



Москва

JAMES TREFIL

**THE NATURE
OF SCIENCE**

Houghton Mifflin Company
2003

ДЖЕЙМС ТРЕФИЛ

200 ЗАКОНОВ МИРОЗДАНИЯ

Гелеос
2007

УДК
УБК

Трефил, Джеймс

200 законов мироздания / Джеймс Трефил — М.: Гелеос, 2007. — 528 с.

ISBN 5-8189-0807-0 (в пер.)

Аннотация

© James Trefil, 2002

© Houghton Mifflin Company, 2003

© ЗАО «ЛГ Информэйшн Груп», 2006

© ЗАО «Издательский дом «Гелеос», 2006

ДЖЕЙМС ТРЕФИЛ

200
ЗАКОНОВ
МИРОЗДАНИЯ

Природа науки 9
Об этой книге 29

Законы 31

Агрегатные состояния
вещества 32

Анализ Фурье 34

Античастицы 35

Антропный принцип 37

Атом Бора 40

Атомная теория строения
вещества 43

Белки 46

Биологические молекулы 48

Большой взрыв 51

Бритва Оккама 53

Броуновское движение 54

Великая теорема Ферма 56

Вечный двигатель 58

Витализм 59

Генетический код 60

Гипотеза газопылевого облака 62

Гипотеза Геи 66

Гипотеза гигантского
столкновения 67

Гликолиз и дыхание 69

Демон Максвелла 72

Детерминизм 74

Детерминистический хаос 76

Диаграмма

Герцшпрунга—Рассела 79

Дисперсия: атомная теория 82

Дифракция 85

Дифференциальное
использование ресурсов 87

ДНК 88

Дрейф генов 91

Зависимость количества видов от
площади экосистемы 92

Зависимость
период—светимость 93

Закон Авогадро 95

Закон Ампера 97

Закон Архимеда 99

Закон Био—Савара 101

Закон Бойля—Мариотта 103

Закон Брэгга 105

Закон Брюстера 107

Закон всемирного тяготения

Ньютона 108

Закон Генри 111

Закон Грэма 113

Закон Гука 114

Закон Дальтона 116

Закон Копа 117

Закон Кулона 118

Закон Кюри 120

Закон Мёрфи 121

Закон Мура 123

Закон Ома 124

Закон отражения света 126

Закон последовательности
напластования горных
пород 127

Закон Снеллиуса 129

Закон сохранения линейного
импульса 132

Закон сохранения момента
импульса 134

Закон сохранения электрического
заряда 136

Закон Стефана—Больцмана 138

Закон Хаббла 140

Закон Харди—Вайнберга 144

Закон Шарля 145

Законы Кеплера 147

Законы Кирхгофа 151

Законы Менделя 153

Законы механики Ньютона 155

Законы электролиза Фарадея 160

Законы электромагнитной

индукции Фарадея 161

Зеленая революция 163

Излучение Черенкова 165

Излучение черного тела 167

Иммунная система 169

Интерференция 171

Инфляционная стадия
расширения Вселенной 174

Катализаторы и ферменты 177

Квантовая механика 178

Квантовая хромодинамика 181

Квантовый туннельный
эффект 183

Кварки и восьмеричный путь 186

Кислотный дождь 189

Кислоты и основания 191

Клеточная теория 194

Клонирование 195

Космический треугольник 197

Космологическая постоянная 200

Козволюция 203

Критерий красоты 204

Критерий Лоусона 205

Критерий Рэлея 208

Круговорот азота в природе 210

Круговорот воды в природе 213

Круговорот углерода
в природе 214

Ламаркизм 216

Магнетизм 217

Магнитные монополи 220

Максимальная устойчивая
добыча 222

Массовые вымирания 223

Механическая теория
теплоты 225

Микробная теория
инфекционных
заболеваний 226

Мимикрия 228

Молекулярно-кинетическая
теория 230

Молекулярные часы 232

Нулевая гипотеза 234

Объяснение Бора 235

Озоновая дыра 237

Онтогенез повторяет
филогенез 238

Опыт Дэвиссона—Джермера 239

Опыт Майкельсона—Морли 241

Опыт Милликена 244

Опыт Резерфорда 246

Опыт Штерна—Герлаха 249

Открытие аргона 251

Открытие гелия 252

Открытие

Кирхгофа—Бунзена 254

Открытие пенициллина 256

Открытие электрона 257

Открытие Эрстеда 259

Отношения хищник—жертва 260

Парадокс Зенона 261

Парадокс Ольберса 263

Парадокс Ферми 264

Парниковый эффект 266

Периодическая система
Менделеева 268

Поверхностное натяжение 270

Подобное растворяется
в подобном 272

Полосная теория твердотельной проводимости 273
Постоянная Больцмана 275
Постоянная Планка 276
Постоянная Ридберга 278
Правило Аллена 280
Правило Ленца 281
Правило октета 282
Правило Тициуса—Бодэ 283
Предел Чандрасекара 286
Предельная скорость падения 288
Принцип Aufbau 290
Принцип Гюйгенса 292
Принцип дополнительной 293
Принцип запрета Паули 295
Принцип конкурентного исключения 297
Принцип Коперника 298
Принцип Ле Шателье 300
Принцип мутуализма 301
Принцип неопределенности Гейзенберга 302
Принцип соответствия 308
Принцип Ферма 310
Принцип эквивалентности 311
Проба на окрашивание пламени 313
Проблема Гольдбаха 314
Проект «Геном человека» 315

Равновесие 317
Равновесие в природе 320
Радиоактивный распад 321
Радиометрическое датирование 325
Ранняя Вселенная 328
Распределенное движение 331
Распространение нервных импульсов 334
Репродуктивные стратегии 336
Родственный отбор 337

Самозарождение жизни 338
Симбиоз 339
Синтез мочевины 341
Система классификации Линнея 342
Скрытый принцип необратимости времени 344
Сложные адаптивные системы 345
Соотношение де Бройля 346
Социальный дарвинизм 348
Спектр электромагнитного излучения 349

Спектроскопия 354
Стандартная модель 356
Стволовые клетки 360
Суточные ритмы 362

Тектоника плит 363
Темная материя 367
Теорема Белла 370
Теорема Гаусса 373
Теорема Гёделя о неполноте 375
Теорема о маргинальных значениях 377
Теория молекулярных орбиталей 380
Теория оптимального фуражирования 381
Теория относительности 382
Теория равновесия Макартура—Уилсона 386
Теория сверхпроводимости 388
Теория стационарной Вселенной 391
Теория струн 392
Теория сцепления-натяжения 394
Теория эволюции 395
Тепловое расширение 403
Теплообмен 405
Термодинамика, второе начало 409
Термодинамика, первое начало 412
Термодинамика, третье начало 415
Территориальность у животных 417
Тест Тьюринга 418
Точка Кюри 419
Три закона робототехники 422
Триединый мозг 423

Ударные волны 425
Универсальные теории 427
Униформизм 430
Уравнение Бернулли 432
Уравнение Клапейрона—Клаузиуса 435
Уравнение состояния идеального газа 437
Уравнение Шрёдингера 439
Уравнения Максвелла 442
Уравнения равноускоренного движения 445
Устойчивость микробов к антибиотикам 450

Фазовые переходы 452
Флогистон 455
Формула Дрейка 456
Фотосинтез 459
Фотоэлектрический эффект 462

Химические связи 464

Центральная догма молекулярной биологии 467
Центробежная сила 469
Цикл и теорема Карно 471
Цикл преобразования горной породы 473
Циклы Миланковича 475

Черные дыры 478
Числа Фибоначчи 481
Число Рейнольдса 482

Эволюция звезд 485
Экологическая сукцессия 488
Эксперимент Ван Гельмонта 490
Эксперимент Миллера—Юри 491
Эксперимент Херши—Чейз 493
Экспоненциальный рост 495
Электрические свойства вещества 497
Электронная теория проводимости 500
Элементарные частицы 502
Эффект Джозефсона 504
Эффект Доплера 506
Эффект Зеемана 509
Эффект Комптона 511
Эффект Кориолиса 512
Эффект Тиндалля 514
Эффект Холла 516

Ядерный распад и синтез 517

Хронология 520
Глоссарий 524

Природа науки

Законы природы — скелет Вселенной. Они служат ей опорой, придают форму, связывают воедино. Все вместе они воплощают в себе умопомрачительную и величественную картину нашего мира. Однако важнее всего, наверное, то, что законы природы делают нашу Вселенную познаваемой, подвластной силе человеческого разума. В эпоху, когда мы перестаем верить в свою способность управлять окружающими нас вещами, они напоминают, что даже самые сложные системы повинуются простым законам, понятным обычному человеку. Но прежде чем приступить к обзору законов природы, подумаем, откуда они берутся и какую роль играют в предприятии, именуемом наукой.

О науке

Большинство из нас почти всю свою жизнь прожило в XX веке. Задумайтесь над простым вопросом: что так сильно отличает этот век, только что оставленный нами позади, от всего, что было до него? Конечно, он был веком разрушения старых политических укладов и прихода новых, но то же можно сказать почти про любое столетие со времен появления первых письменных источников. Он был веком великих писателей и художников, но и в этом нет ничего нового. Он дал миру новые виды искусства (на ум приходят джаз и кино). Может быть, со временем они займут свое место рядом с классической оперой и симфонической музыкой. Я в этом сомневаюсь, но, как бы то ни было, это не первый и не последний случай рождения новых видов искусства.

Мне кажется, именно развитие науки и технологии наложило печать уникальности на XX век. Если составить список важных достижений столетия, в него могли бы войти:

антибиотики, высадка астронавтов на Луне, компьютеры, Интернет, операции на открытом сердце, реактивные самолеты, мороженные продукты, небоскребы.

Невероятный рост населения и мировой экономики за последние сто лет — прямое следствие невероятного роста объема накопленных нами знаний о Вселенной.

В определенном смысле, в этом нет ничего особенно нового. Все по-настоящему глубокие изменения в жизни человечества происходили благодаря новым знаниям. Например, около 10 000 лет назад кому-то — вероятно, женщине, жившей на Ближнем Востоке — пришло в голову, что вместо того, чтобы питаться собранными дикими растениями, их можно выращивать и культивировать. Так появилось сельское хозяйство — новшество (независимо воспроизведенное во многих частях света), без которого невозможна современная цивилизация. Несколько веков назад шотландский инженер по имени Джеймс Уатт создал пригодный к использованию паровой двигатель, ставший неотъемлемым элементом промышленной революции. Возможно, когда-нибудь ученые поставят в один ряд с ним изобретенный в 1947 году транзистор и недавно заверченный проект «Геном человека» как важнейшие вехи истории человечества.

Конечно, при таком взгляде на науку нас интересует прежде всего приносимая ей практическая польза, улучшение здоровья людей и рост жизненного комфорта. Но есть у науки и другое измерение. Улучшая качество нашей жизни, она в то же время открывает для нашего интеллекта великолепное окно во Вселенную. Она показывает нам, что весь окружающий нас мир существует по общим правилам и принципам, и эти правила и принципы можно обнаружить с помощью научных методов. Правила, испытанные и проверенные самым тщательным образом, возведены в ранг «законов природы», хотя, как мы увидим, ученые и философы далеки от согласия относительно использования этого термина. Из законов природы складывается интеллектуальная структура, в которой есть место для любого явления во Вселенной.

Люди всегда испытывали любопытство по отношению к окружающему их миру — не в последнюю очередь потому, что выживание человека часто зависело от его способности прогнозировать развитие той или иной ситуации. Фермеры давным-давно выработали систему знаний о погоде и климате, позволявшую им получать хорошие урожаи, охотники изучили повадки своей добычи, а моряки научились находить в море и на небе признаки надвигающихся штормов. Но особые приемы и методики, совокупность которых мы называем наукой, появились лишь несколько сотен лет назад. Почему это произошло именно тогда и именно в Европе, а не где-то еще — на эти вопросы пусть отвечают историки. Нам же важно понять, что такое наука и каким образом она подводит нас к тому, что мы называем законами природы.

Прежде чем мы начнем, хочу вас предупредить об одной вещи. Вам часто придется сталкиваться, особенно в учебниках, с последовательностью действий, называемой «научным методом». Обычно объясняют, что «сначала ученый выполняет шаг X, затем Y, а потом Z и так далее. Можно подумать, будто заниматься наукой — все равно что выпекать печенье по рецепту. Проблема с этим подходом не в том, что он совершенно неверен — ученые действительно часто выполняют шаги X, Y и Z. Беда в том, что в нем не предусмотрено место для творчества, изобретательности и простого человеческого упрямства — извечных и неотъемлемых составляющих научного труда. Определять научный процесс как «метод» — то же, что, описывая картину Рембрандта или Ван Гога, говорить лишь о том, где какие краски нанесены на холст. Наука — не книжка для раскрашивания, где каждому цвету соответствует номер.

Поэтому, когда речь заходит о том, как устроена наука и как ученые открывают законы природы, я предпочитаю использовать аналогию с юридической практикой. Я имею в виду, что описанные ниже элементы надо рассматривать не как часть жестко заданной последовательности шагов, а как ступени процесса, осуществляемого учеными. Другими словами, думая о науке, надо иметь в виду все эти составляющие, при этом каждый раз решая, насколько важна каждая составляющая в данном контексте (и вообще все ли они присутствуют). Иначе говоря, нет фиксированной, жесткой последовательности действий, позволяющей прийти к выводу, является ли нечто наукой или нет.

В целом, большинство ученых используют более или менее одну и ту же последовательность шагов (мы ее описываем ниже), и в учеб-

никах, как правило, фигурирует именно она. Но иногда случаются интуитивные прозрения и прорывы, которые в вашем представлении, может быть, не ассоциируются с образом рассудительных ученых в белых халатах. Это хорошо, потому что больше всего мне хочется, чтобы вы вынесли из этой книги представление о том, что наука, как и искусство, — один из главных путей реализации тяги человека к творчеству, и что ученые разделяют со всеми нами человеческие наклонности и слабости. Помня про эту оговорку, рассмотрим теперь составляющие научного процесса.

Наблюдение или эксперимент?

Чтобы узнать, что представляет собой мир, посмотрите, и вы увидите, каков он. Это утверждение кажется совершенно очевидным, и вы, возможно, удивились тому, что я потрудился привести его здесь, но дело в том, что оно представляет собой краеугольный камень науки. И все же оно по сей день не снискало всеобщего признания, и уж точно не признавалось всеми на протяжении истории.

На протяжении большей части документированной истории люди, сталкиваясь с противоречием между наблюдением реального мира и толкованием религиозной доктрины, последовательно исходили из положений доктрины, а не результатов наблюдений. Например, из-за неверного толкования Библии иерархи Католической церкви в XVII веке заставили Галилея отречься от представления о том, что Земля вращается вокруг Солнца. Нечто похожее можно наблюдать сегодня в США, где школьные комитеты часто игнорируют огромное количество данных, подтверждающих теории эволюции и «большого взрыва», предпочитая придерживаться толкования Книги Бытия, с которым не согласны большинство христианских и иудейских исследователей.

Но не только религиозные люди отказываются смотреть на данные или соглашаться с тем, что в нашем мире часто есть место сложностям и неоднозначностям. Например, существует масса доказательств того, что природных канцерогенов, вырабатываемых растениями, куда больше, чем канцерогенов в искусственных пестицидах. Многие защитники окружающей среды просто игнорируют эти доказательства, повторяя усвоенное в молодости заклинание, что «естественное хорошо, искусственное плохо». Оба примера показывают, что удобнее замкнуться в собственной системе убеждений, чем попытаться воспринимать мир таким, какой он есть.

И все же наблюдение мира — первый шаг к науке, и сделан этот шаг уже очень давно. С появлением земледелия фермеры стали сохранять семена от самых крупных, самых плодовых растений, поняв, что это позволит им улучшить урожай на следующий год. Ремесленники заметили и сохранили для потомков (возможно, в устной традиции) сведения о том, как ведут себя разные сплавы металлов, когда их обрабатывают и нагревают определенным образом. Предтечи нынешних медиков подметили, что вытяжки из определенных растений помогают при некоторых болезнях, и этим заложили основу современной фармацевтической промышленности. Во всех этих примерах память о наблюдениях и опытах сохранилась, потому

что они помогали людям удовлетворить свои потребности. Короче говоря, они давали результат. К этой идее мы вернемся, когда будем говорить о других путях познания.

По бытующему в народе мнению, ученый должен подходить к миру совершенно непредвзято — без заранее сформированного представления о том, каким будет итог эксперимента или наблюдения. Идею эту высказал давным-давно английский монах, философ и ученый Роджер Бэкон (ок. 1220–92), но, как в средневековом Датском королевстве, «обычай этот похвальнее нарушить, чем блюсти». За всю свою карьеру я встречал лишь одного человека, соблюдавшего этот принцип, — полевого геолога, любившего ходить «послушать, что скажут камни». Все остальные, с кем я имел дело, приступали к экспериментам с достаточно ясным представлением о том, что из них выйдет. Но все дело в том, что, если получались не те результаты, каких они ожидали, они были способны оставить свои прежние идеи и следовать за данными. Таким образом, говоря о непредвзятости научного сообщества, я имею в виду эту способность отказаться от сложившихся представлений и следовать за данными, куда бы они ни вели и независимо от того, куда, как нам кажется, они должны привести.

Существует много примеров того, как отдельные ученые и даже целые научные сообщества пошли по этому пути. Например, в 1964 году Арно Пензиас и Роберт Уилсон (см. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ) — исследователи Лабораторий Bell в Нью-Джерси — занимались измерением космического микроволнового излучения. На заре спутниковой связи такие измерения были обычным делом — ведь, для того чтобы ловить сигнал от спутников на орбите, хорошо бы знать, что попадает в приемник, кроме собственно сигнала со спутника. Обследуя небесную сферу своим приемником, Пензиас и Уилсон регистрировали помехи из многочисленных известных источников. При этом они столкнулись с совершенно неожиданным явлением: куда бы они ни направили свои приборы, приемники неизменно ловили слабый входящий микроволновый сигнал (он проявлялся как тихое шипение в наушниках). Избавиться от него не удавалось, как они ни пытались. Пришлось даже выселить пару голубей, обосновавшихся в аппарате и покрывших части приемника, как тактично говорили ученые, «белым диэлектрическим веществом». В конце концов Пензиасу и Уилсону пришлось просто принять совершенно неожиданный факт, что Вселенная буквально пронизана микроволновым излучением. Теперь мы считаем это так называемое реликтовое электромагнитное излучение важным подтверждением теории БОЛЬШОГО ВЗРЫВА — лучшей на сегодняшний день теории о происхождении Вселенной. За то, что они поверили полученным данным, несмотря на их полную неожиданность, Пензиас и Уилсон получили Нобелевскую премию по физике за 1978 год.

Объяснив, почему я считаю, что наблюдение и эксперимент имеют для науки центральное значение, я должен сказать, что эти два понятия, будучи похожи по смыслу, подразумевают несколько разные способы работы. Астроном не может построить звезду и подождать, пока она состарится, чтобы изучить ее поведение. Эволюционный биолог не может создать новое позвоночное и подождать несколько миллионов

лет, чтобы посмотреть, во что оно разовьется. Геолог не может ускорить движение тектонических плит на поверхности Земли, чтобы посмотреть, как изменится конкретная формация. Во всех этих случаях ученым приходится довольствоваться наблюдениями над природой, поскольку предмет исследования им неподвластен.

Экспериментатор же старается управлять изучаемой системой, зачастую меняя по одному параметру, чтобы посмотреть, к чему приведет его изменение. Вот классический пример использования экспериментального метода. Эколог Дэйвид Тилман из Университета Миннесоты разделил большой участок прерии на Среднем Западе США решеткой, состоящей из квадратов со стороной в несколько метров. В одном из своих экспериментов он поддерживал все условия во всех квадратах одинаковыми, за исключением количества добавляемого азотного удобрения. Это позволило отделить действие одного элемента — азота — от всех остальных факторов, влияющих на рост растений. Другие экспериментаторы поступают аналогичным образом. Ядерный физик, сталкивающий субатомные частицы на огромных скоростях, обеспечивает неизменность условий всех столкновений, за исключением величины энергии налетающей частицы; химик поддерживает одинаковым соотношение всех участвующих в реакции веществ, кроме одного; исследователь рака при лечении опухоли у экспериментальных животных изменяет лишь по одному элементу и так далее. В этих и многих других экспериментах ученые делают сложность системы минимальной, чтобы подробно изучить один из элементов, отделив его от остальных.

Разница между наблюдением и экспериментом, будучи важна, все же не делит науки на два разных лагеря. Например, астрономы могут не только наблюдать звезды, но и использовать эксперименты с ядерными реакциями, чтобы понять, откуда берется их энергия. Эволюционным биологам экспериментальные данные о мутациях фруктовых мушек, живущих совсем недолго, помогают получить представления о продолжительном процессе эволюции, а геологи почти неизменно пользуются данными лабораторных экспериментов по получению минеральных соединений при изучении пород, составляющих ландшафт. Эксперимент не исключает наблюдений, и наоборот. В любой науке используется разумное сочетание того и другого.

Источник многих, если не большинства новых идей в науке — неожиданные результаты экспериментов или наблюдений, и это можно считать отправной точкой научного метода. Но у этого общего правила есть и исключения. Начало теории относительности, созданной в первые десятилетия XX века, было положено размышлениями Альберта Эйнштейна о существовавших в те времена фундаментальных научных теориях. Как я уже говорил, наука не всегда идет столбовой дорогой, известной наперед.

Закономерности

Следующий элемент научного процесса вступает в игру после того, как проведена серия экспериментов или наблюдений и ученые получили первое представление об определенном аспекте уст-

ройства природы. Это новое понимание обычно принимает форму той или иной закономерности, присущей природе. Например, в упомянутых выше экологических экспериментах по изучению влияния азота Тилман обнаружил, что по мере добавления азота количество растительного материала (биомасса) на участке увеличивается, в то время как число видов (биологическое разнообразие) уменьшается. По сути, несколько видов, воспользовавшись большей доступностью азота, вытесняют те виды, которым это не удалось.

Иногда вновь открытые закономерности можно описать простыми словами, как мы это сделали выше, но чаще прибегают к математическим терминам («при увеличении количества азота на $x\%$ биомасса вырастает на $y\%$ ») или формулам. Как преподаватель научных дисциплин, я привык бояться момента, когда мне придется отказаться от удобства английского языка, написав на доске уравнение. Можно без преувеличения сказать, что, прибегая к математике, ученые начинают говорить на другом языке. Может быть, если вы будете помнить, что уравнение — лишь способ кратко выразить то, что на обычном языке можно описать лишь сложно или громоздко, это поможет вам смириться с необходимостью пользоваться математическим аппаратом.

Приведем важный исторический пример, иллюстрирующий роль закономерностей. В XVII веке одним из центральных вопросов, занимавших ученых, было место Земли в мироздании. Является ли она центром, как учили древнегреческие ученые, или движется по орбите вокруг Солнца (см. принцип Коперника), как предположил Николай Коперник в 1543 году? Этот вопрос имеет глубокое религиозное и философское значение, в чем на свое горе убедился Галилей (см. уравнения равноускоренного движения). Но с научной точки зрения, получить ответ на него можно только одним способом. Ученому следует посмотреть на небо и определить, какому из двух случаев лучше соответствует движение небесных тел — когда планета, с которой ведется наблюдение, стационарна или когда она движется по орбите.

Человеком, потратившим всю жизнь на создание инструментов и проведение необходимых измерений, был датский астроном Тихо Браге (1546–1601). К концу жизни он составил огромный список положений планет на небе, определенных в результате точных измерений. Список этот, кстати, имел огромную коммерческую ценность, потому что его можно было использовать для расчета гороскопов. После смерти Браге его помощник, немецкий математик Иоганн Кеплер, блестяще применив математическую дедукцию, использовал результаты этих измерений, чтобы показать, что все данные можно объяснить с помощью трех простых правил. Эти правила движения планет, называемые теперь законами Кеплера, гласят, что:

- все планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам,
- находясь ближе к Солнцу, планеты движутся быстрее, чем когда они находятся дальше от него,
- чем сильнее удалена от Солнца орбита планеты, тем медленнее планета движется и тем длиннее ее «год».

У этих законов есть и математическая формулировка, и, если вы знаете, например, на каком расстоянии данная планета находится от Солнца, третий закон позволит вам вычислить продолжительность ее года. Законы Кеплера, кстати, — хороший пример, иллюстрирующий сделанное выше замечание: полученную из наблюдений информацию можно обобщить с помощью нескольких простых правил, умещающихся на обороте конверта, вместо того чтобы пробиваться сквозь тома данных.

Здесь надо отметить еще вот что: ученые очень небрежно обращаются со словом «закон». В книге, посвященной разъяснению законов природы, эту проблему нельзя упускать из виду. Было бы очень удобно, если бы существовало простое правило, определяющее использование в науке таких слов, как «теория», «принцип», «эффект» и «закон». Например, можно было бы проверенное тысячу раз называть «эффектом», проверенное миллион раз именовать «принципом», а то, что проверили 10 миллионов раз, — «законом». Но так просто не поступают. Использование этих терминов основано на исторических прецедентах и не имеет отношения к тому, насколько ученые убеждены в верности каждого конкретного утверждения.

Например, закон всемирного тяготения Ньютона — одно из наиболее тщательно проверенных научных утверждений. Он, однако, входит в состав теории относительности Эйнштейна. Каждое подтверждение закона Ньютона — это одновременно и подтверждение теории Эйнштейна. Но существуют и подтверждения общей теории относительности, выходящие за рамки закона всемирного тяготения. Таким образом, мы имеем дело с «теорией», имеющей больше подтверждений, чем «закон». И это далеко не единичный пример. Некоторые аспекты поведения идеального газа описываются законом Шарля и законом Бойля—Мариотта, но эти законы можно вывести из (соответственно, более общей) теории — молекулярно-кинетической теории газов. Одна из наиболее проверенных научных идей, на которой зиждутся все биологические науки, описывает развитие жизни на нашей планете. Несмотря на все подтверждения, ученые все же говорят о теории эволюции.

Таким образом, слово «теория» может относиться к новой концепции, которую еще предстоит как следует проверить, а может обозначать идею, бывшую когда-то новой, но с тех пор настолько тщательно проверенную, что ее можно считать одной из самых достоверных истин о Вселенной. Ученые просто не особо интересуются тем, как идеи называются и какими словами их обозначают. Важна лишь суть идей и то, насколько они верны. В результате такого невнимания к терминологическим условностям вы столкнетесь в этой книге с самыми разными заголовками. Речь идет о коктейле из «эффектов», «теорий», «законов» и «принципов», составленном без оглядки на высоту положения. Это, равно как и тот факт, что законы часто называют именами тех, кто их не открывал, можно считать свидетельством отношения ученых к своему делу.

Гипотеза

Когда эксперименты проведены и новые закономерности природы открыты, это значит, что ученым пора остановиться и подвести итог. Говорят ли что-то вновь открытые закономерности о том, как устроена природа? Согласуются ли они с уже известными закономерностями, расширяющими представления о какой-то области науки? Задавшись подобными вопросами, ученые приступают к формулированию гипотез — догадок или предположений об устройстве Вселенной. Вот тут и заводятся величественные идеи о правящих Вселенной силах.

Именно на этом этапе язык математики вступает в свои права. Когда закономерности сформулированы в виде уравнений, их можно преобразовывать по стандартным правилам математики, играющим, если хотите, роль грамматики языка. Часто такие преобразования приводят к потрясающим открытиям. Например, Исаак Ньютон совместил закон всемирного тяготения Ньютона и законы механики Ньютона, получив при этом совершенно новую модель Солнечной системы, в которой планеты вращаются вокруг Солнца, а сила притяжения Солнца не позволяет им улететь в космическое пространство. Как мы увидим дальше, это событие оказало большое влияние на умы. С одной стороны, законы Кеплера, раньше считавшиеся обобщением данных наблюдений, сами стали следствиями — утверждениями, выводимыми логическим путем из более глубокой теории Ньютона. С другой, стало возможно рационально рассуждать о движении комет, до этого считавшемся непредсказуемым, и это обстоятельство позволило Эдмунду Галлею (1656–1742) открыть в 1705 году орбиту кометы, носящей теперь его имя.

На данном этапе научного процесса мы сталкиваемся с еще одной вариацией на нашу лингвистическую тему — еще одним оттенком значения слова «теория». В физических науках это слово часто обозначает математическое описание идей об устройстве Вселенной. Оно может означать как объяснение совершенно незначительного феномена — сноски на странице Вселенной, — так и величественную и масштабную конструкцию, объясняющую целый ряд известных результатов. Опять же, это слово может описывать (и описывает) идеи, признанные настолько, насколько это только возможно. Теория квантовой хромодинамики, например, — одна из наиболее скрупулезно подтвержденных экспериментом физических теорий. Некоторые из предсказанных ею явлений проверены экспериментаторами с точностью до 16 знаков после запятой. Известно, что она применима к широчайшему диапазону структур, от одиночных электронов до скоплений галактик. Замечательно, что ученые используют одно и то же слово, говоря и о столь серьезно проверенной концепции, и о новой неподтвержденной гипотезе какого-нибудь аспиранта.

Предсказание

Сколь бы сложной или элегантной ни была теория, ее качество определяется лежащими в ее основе данными, полученными в результате экспериментов и наблюдений. Но хорошая теория не просто объединяет уже известные факты — она предсказывает

явления, которые до сих пор не наблюдались. Другими словами, хорошая теория «ручается за себя головой», давая ясные, поддающиеся проверке предсказания. Таким образом, замыкая круг, составляющий научный метод, мы можем, вернувшись к эксперименту и наблюдениям, выяснить, имеют ли место предсказанные теорией факты. Если да, мы ищем новые факты, выводимые из теории и подтверждающие ее верность. Если нет, возвращаемся к чертежам, меняем теорию и пробуем снова. В любом случае, качество теории определяется успешностью ее предсказаний.

Иногда теории очень точно предсказывают факты. К примеру, Галлей, рассчитав с помощью теории Ньютона орбиты комет, подверг эту теорию суровой проверке, предсказав, что в 1758-м или 1759 году комета снова появится на небе. Тут не могло быть никаких отговорок или оправданий — если бы комета не появилась, теория рухнула бы. Теперь-то мы знаем, что возвращение кометы Галлея в ночь на Рождество 1758 года представляет собой одно из величайших подтверждений ньютоновского представления о Вселенной, но важно помнить, что все могло быть иначе. В наши дни, конечно, возвращения периодических комет можно предсказать куда точнее.

Теории могут предсказывать и общие закономерности. Например, история эволюции впервые была восстановлена по ископаемым органическим остаткам. Это дало ученым представление о том, как разные организмы связаны между собой, как давно у них были общие предки и так далее. Не так давно был найден новый способ выявления связей между живыми организмами — молекулярные часы. Эта методика основана на анализе ДНК: чем больше разница между ДНК двух организмов, тем раньше должны были разойтись их эволюционные пути. ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ предсказывает наличие единого генеалогического древа для всех живых организмов, потому ДНК и ископаемые остатки должны рассказывать одну и ту же историю. Это одно из недвусмысленных предсказаний теории, которое, однако, не привлекло к себе большого внимания. Совпадение двух историй прошлого — один из полученных в результате наблюдений фактов, подтверждающих теорию эволюции.

Эта опора на проверку опытом, как мне кажется, и есть то, что отличает науку от других видов интеллектуальной деятельности. Сформулируем разницу самым прямым и неоригинальным образом: в науке есть верные ответы. Не имеет значения, насколько элегантна теория и сколь высокое положение занимают ее создатели. Если теория не работает, надо от нее отказаться или изменить ее. И только так. Эта опора на проверку опытом служит демаркационной линией, разделяющей естественные и гуманитарные науки. В таких дисциплинах, как философия или литературная критика, нет внешнего объективного арбитра, играющего роль природы. Например, толкования произведения искусства так сравнивать невозможно. Соответственно, представителям гуманитарных и естественных наук бывает трудно понять образ мыслей друг друга. К этому вопросу мы скоро вернемся.

С опорой на экспериментальную проверку идей в научном сообществе связан интересный социологический феномен. Часто случается, что, когда теория оказывается несостоятельной, небольшая

группа, иногда даже один человек, еще долго пытается ее оживить. По моему опыту, ни один ученый не испытывает такого одиночества, как те, кто пытается оживить теории, не выдержавшие проверку экспериментом. Покинутые коллегами, они не отступают, часто на протяжении всей жизни безуспешно пытаюсь оспорить вынесенный природой приговор. Наука бывает суровым воспитателем, потому что она неумолимо требует подвергать идеи сомнению, заставляет судить их трибуналом наблюдения, прежде чем принять.

У этого факта есть важное следствие. Если идею невозможно проверить экспериментально, столкнуть ее лицом к лицу с природой, то это просто не наука. Используя термин, популяризованный философом Карлом Поппером (Karl Popper, 1902–94), научные идеи должны быть фальсифицируемы (т.е. опровержимы) — из них должны выводиться поддающиеся проверке утверждения. Другими словами, должно быть возможно представить себе результат эксперимента или наблюдения, демонстрирующий неверность теории (например, закона всемирного тяготения), даже если на практике такие результаты и не будут получены. Комета Галлея могла не появиться снова. Тот факт, что она появилась, конечно, подтвердил теорию Галлея, но то, что это могло не произойти, показывает, что теория была фальсифицируема. Таким же образом, могло оказаться, что ДНК рыб ближе к человеческой ДНК, чем ДНК шимпанзе. Это опровергло бы теорию эволюции. Результат, конечно, был иным — ДНК шимпанзе и людей совпадают на 98%, — но в принципе он мог быть и таким. Это показывает, что теория эволюции фальсифицируема.

Для сравнения рассмотрим теорию, популярную последнее время среди креационистов, — доктрину сотворенной древности. Согласно этой теории, Земля сотворена несколько тысяч лет назад, и в ней уже тогда были заложены свидетельства значительно большего возраста. Например, горные породы созданы вместе с находящимися в них ископаемыми остатками, деревья созданы с годовыми кольцами, свет от звезд, находящихся на расстоянии тысяч световых лет, создан по пути к Земле, и так далее. Первая (и весьма элегантная) иллюстрация этого принципа дана в книге «Омфалос», написанной вскоре после выхода работы Дарвина. По-гречески «Омфалос» означает пупок, и главная идея книги состоит в том, что Адам был сотворен с пупком, хотя он не был в утробе и, соответственно, не нуждался в пуповине.

Главное в этой теории то, что невозможно представить себе опровергающий ее эксперимент или наблюдение. От любого свидетельства ее неверности можно отмахнуться, сказав, что такой была сотворена Земля. Эта теория не фальсифицируема (не опровержима), поэтому сколь бы она ни была привлекательна, она просто не научна. Немалая часть того, что принято называть альтернативной наукой, страдает этим недостатком — она не проходит тест на опровержимость. В телесериале «Секретные материалы» (горячим поклонником которого я, кстати, являюсь) речь идет о масштабном заговоре, единственная цель которого — уничтожить свидетельства присутствия на Земле инопланетян. Отсутствие доказательств всегда объясняется одним и тем же: «Они не хотят, чтобы ты это увидел». Это хороший сериал, но плохая наука.

Прежде чем пойти дальше, я хотел бы упомянуть, что обвинения в невозможности фальсификации иногда приходится слышать в спорах об эффективности классической фрейдистской психотерапии. Некоторые критики утверждают, что фрейдистская теория может объяснить результат лечения независимо от его исхода. Если это так (в чем я не уверен), то эта теория также выходит за рамки науки.

Большой цикл

Итак, научное исследование образует цикл: эксперименты, затем обнаружение закономерностей, создание теорий, предсказание на их основе новых фактов и, наконец, возвращение к эксперименту для проверки верности предсказанного. Большинство ученых значительную часть жизни водят свою область знаний по этому кругу. Это то, что философы называют «нормальной наукой». Иногда, как мы видели, происходящее не укладывается в эту удобную схему, но ничего иного и нельзя ожидать от дела, которым занимаются люди. Таким образом, на любом этапе своего развития каждая научная область пытается перейти от одного этапа к другому. Один из способов сравнить разные науки — выяснить, на каком этапе цикла они находятся в данный момент. Другими словами, каким образом представители данной области стараются продвинуть ее вперед?

Я начинал свою карьеру в физике элементарных частиц — разделе науки, посвященном изучению фундаментальных составляющих материи. В данный момент этот раздел находится на этапе между предсказанием фактов и их проверкой. Налицо несколько правдоподобных теорий, и многие из них предсказывают поведение частиц очень высоких энергий при столкновении. К сожалению, мы не можем проверить верность предсказанного, потому что у нас нет машин, способных ускорить частицы до достаточно высоких энергий. В 1993 году конгресс США с присущей ему мудростью принял решение о прекращении строительства машины, названной «Сверхпроводящий суперколлайдер», обеспечив таким образом невозможность последовательного развития теории и эксперимента в этой области. Машина поменьше под названием «большой адронный коллайдер» должна вступить в строй в Европейском центре ядерных исследований (CERN) в Женеве (Швейцария) к 2005 году, и, может быть, физика элементарных частиц снова сможет развиваться.

В то время как некоторые отрасли науки изголодались по данным, другие, напротив, страдают от пресыщения. Например, во многих областях молекулярной биологии новая информация поступает таким потоком, что его невозможно переварить. Живые организмы — самые сложные структуры во Вселенной, и только теперь у нас появилась возможность исследования такого уровня сложности. Многие направления в науках о жизни задержались на этапе перехода от эксперимента к выявлению закономерностей, и исследователи прилагают большие усилия, пытаясь найти молекулярный аналог законов Кеплера.

Хороший пример этого — так называемая проблема укладки белка. Среди прочего, белки — это рабочие лошадки, управляющие хими-

ческими процессами в живых организмах. Это крупные молекулы, имеющие сложную пространственную форму. Именно эта форма позволяет белку выступать на молекулярном уровне в роли своеобразного посредника — способствовать протеканию химических реакций, не участвуя в них (см. КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ). Белок строится из меньших по размеру молекул, называемых аминокислотами. Построение белка напоминает процесс нанизывания бусинок на нить. После того как аминокислоты соединены в цепочку, под действием сложных электростатических взаимодействий между атомами в соседних аминокислотах, а также между этими атомами и окружающей их водой белок укладывается в сложную трехмерную форму, позволяющую ему выполнять свою функцию.

Проблему укладки белка можно сформулировать так: можно ли предсказать форму молекулы и, соответственно, выполняемую ей химическую функцию, зная последовательность аминокислот в составляющей белок «цепочке»? На данный момент ответ на этот вопрос — «нет», потому что эта проблема слишком сложна, чтобы решить ее с помощью даже самого быстрого компьютера. Вероятно, существуют правила — молекулярный аналог законов Кеплера, — которые помогут нам понять, как устроен процесс укладки, но из-за сложности проблемы нам пока не удалось их найти. Это классический пример неспособности увидеть лес за деревьями.

Сложность проблем тормозит продвижение и в других научных областях. К примеру, источником большей части ведущихся сейчас споров о ПАРНИКОВОМ ЭФФЕКТЕ и глобальном потеплении служит неспособность климатологов четко предсказать последствия поступления в атмосферу таких веществ, как углекислый газ. Главная причина этой неопределенности не в том, что неясны основные физико-химические процессы, определяющие поведение атмосферы. Дело в том, что реальная атмосфера настолько сложна, что мы не можем ввести всю необходимую информацию в компьютерную программу. Например, на данный момент два важных климатических фактора — облака и океанские течения — плохо поддаются анализу с помощью таких программ. Можно сказать, что, с точки зрения нашего понимания научного метода, эта область находится между этапами теории и предсказания.

Завершая обсуждение примеров, поговорим об эволюционной теории. Данные в этой области накапливаются на протяжении сотен лет, и многие закономерности известны. Внимание некоторых последователей эволюционной теории теперь направлено на более широкую проблему определения общих принципов, которым подчиняется вся история жизни. Например, одно дело знать, как в течение конкретного периода времени менялся конкретный вид плоских червей или птиц, и совершенно другое — понять, как целые экосистемы реагируют на изменения, уметь предсказать судьбу каждого вида. В контексте нашего разговора можно сказать, что эволюционные биологи пытаются перейти в своей области от закономерностей к теории.

Как мы увидели, ученые постоянно работают над продвижением своей области науки от этапа к этапу цикла — от эксперимента к поиску закономерностей, далее к теории, предсказанию новых фактов и снова к эксперименту. Программа деятельности варьи-

руется от одной дисциплины к другой в зависимости от предмета изучения и степени зрелости дисциплины. На каждом новом витке цикла теории становятся все точнее и подробнее, а наше представление о природе — полнее. И хотя философы могут не согласиться (и не соглашаются) со мной, я считаю, что с каждым витком мы становимся все ближе к истине о нашей Вселенной.

Следует сделать несколько замечаний относительно нарисованной мною упорядоченной картины научного прогресса. Одно уже сделано выше: иногда при появлении новых данных или теорий вся система претерпевает коренные изменения. Мне кажется, что философы придают этому слишком большое значение (такие «революции» можно сосчитать по пальцам одной руки), но такие вещи случаются, и про них надо знать. Второе замечание: мы имеем дело с бесконечным процессом. Нельзя дойти до конца круга, как нельзя получить у природы окончательные подтверждения своих идей. Это значит, что в науке всегда есть место новым идеям и расширению горизонтов познания в новых направлениях. Через пятьдесят или сто лет в новостях наверняка будет так же много известий о новинках науки, как и сейчас. Наконец, у цикла нет фиксированных временных рамок. Развитие науки повинуется собственной логике и зависит от появления новых инструментов и идей, так что не всегда можно предсказать, когда удастся решить те или иные проблемы или получить ответы на те или иные вопросы. Иногда прогресс движется семимильными шагами, а иногда он вдруг застопоривается. Иногда открытия в одной области глубоко влияют на другие, давая им новые инструменты. В качестве примера можно привести лазер. В конечном счете, прогресс трудно предсказуем, и это лишает сна руководителей исследовательских проектов и государственных деятелей.

Из-за такой специфики научного процесса научная работа и государственная деятельность часто плохо согласуются между собой. Предположим, например, что в следующий вторник должно состояться важное голосование по некоему вопросу и что народным представителям, для того чтобы решить, как голосовать, нужна определенная научная информация. Однако нет никакой гарантии, что внутренняя логика соответствующих наук позволит получить эту информацию вовремя. Для ученого это не предмет для беспокойства. Если со временем ответ будет найден, нет особых причин переживать о том, когда это произойдет. Для политиков же информация, полученная после будущего вторника, не просто бесполезна, а даже вредна. Она не только не поможет им решить, как голосовать, но и может поставить их в неудобное положение, показав, что они проголосовали неправильно.

Еще один пример. Функция судов состоит в том, чтобы выяснить, имеют ли место определенные факты, и вынести решение по проблемам, ставшим предметом противоречий. Если, например, компания предстала перед судом, потому что истец утверждает, что ее продукция вызывает рак, то решить, имеет ли место этот факт, нужно немедленно. Ученые не могут просить суд подождать десять лет, пока они разберутся во всех фактах и проведут соответствующие исследования. Решение должно быть принято в ходе судебного процесса,

и информацию необходимо представить в это время. А если позже появится новая информация, она вряд ли принесет сторонам пользу, потому что подобные дела чрезвычайно трудно возобновить.

Таким образом, научный метод — действительно прекрасный инструмент получения ответов на вопросы о физическом устройстве Вселенной. Идеи не принимаются, пока они не пройдут тщательной опытной проверки, и это делает их чрезвычайно надежными. Но в науке на то, чтобы прийти к консенсусу, нужно много времени, и это значит, что не всегда возможно получить информацию, необходимую для принятия политических решений и улаживания судебных споров.

Роль законов природы

Круг объектов и явлений во Вселенной невероятно широк — от звезд, в тридцать раз превосходящих массой Солнце, до микроорганизмов, которые нельзя рассмотреть невооруженным глазом. Эти объекты и их взаимодействия составляют то, что мы называем материальным миром. В принципе, каждый объект мог бы существовать по своему собственному набору законов, совершенно независимому от законов, управляющих всеми остальными объектами. Такая Вселенная была бы хаотичной и трудной для понимания, но с точки зрения логики это возможно. То, что мы живем не в такой хаотичной Вселенной, стало в большой степени следствием существования законов природы.

Роль законов природы состоит в том, чтобы упорядочивать и выстраивать объекты, связывать то, что кажется между собой не связанным, создавать простой каркас, соединяющий Вселенную воедино. В этой связи мне нравится использовать аналогию с паутиной. На периферии паутины находятся все явления во Вселенной — травинки, горы, кометы и так далее. Если попасть в паутину в любой точке на краю, выбрав для исследования единственное явление, можно начать задавать про него вопросы. Двигаясь в этом направлении, вы обнаружите, что все дальше и дальше углубляетесь в паутину, находя все более глубокие объяснения изучаемого явления. Постепенно обнаруживаются общие закономерности, относящиеся не только к изучаемому явлению, но связывающие его с другими, хотя эти связи и не видны с первого взгляда. Эти глубинные объяснения мы и называем законами природы.

Если продолжить исследование, можно обнаружить, что эти процессы идут еще дальше. Оказывается, что многие законы природы сами связаны с другими, еще более глубокими законами, у этих более глубоких законов есть свои, более глубокие связи и так далее. В конце концов, в самом центре паутины можно найти относительно небольшое число законов, связывающих всю конструкцию воедино. По сложившейся в науке привычке не придавать терминологии особого значения, их иногда называют «законами природы». Но, чтобы избежать путаницы, я буду называть их «основополагающими принципами», отличая их этим от остальных законов, принципов и эффектов, о которых мы будем говорить.

ПЕРЕФРАЗИРУЯ известную фразу из «Скотного двора» Оруэлла, «все законы природы равны, но некоторые равнее других». Конечно, как и следовало ожидать, среди ученых нет общего мнения отно-

сительно того, что именно представляют собой основополагающие принципы нашего ремесла, но вам пришлось бы потрудиться, чтобы найти ученого, несогласного с фактом их существования. Подозреваю также, что практически никто не спорит с включением в эту элитную группу некоторых принципов, например ПЕРВОГО НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ. На периферии же возможны здоровые расхождения во мнениях. Вспоминаю, как несколько лет назад в журнале *Science* была опубликована статья на эту тему, и в ней читателям предлагалось присылать свои списки кандидатов в «лучшую двадцатку». Получив больше 800 ответов, редакция обнаружила, что составить список из десяти «величайших идей» нетрудно, а на следующие десять мест претендентов очень много. Ниже я среди прочего просто опишу область действия каждого закона и предоставлю вам решать, принадлежит ли он к основополагающим принципам.

Хочу проиллюстрировать паутину взаимосвязанных законов и принципов с помощью уже упомянутого нами вкратце предмета, а именно комет. Про кометы можно задать много разных вопросов. Один очень старый вопрос: почему они появляются на небе беспорядочно — откуда они берутся и куда исчезают? В действительности, речь идет про орбиты комет или, более общо, про влияние на их орбиты Солнца и планет. Чтобы понять, как движется комета, надо знать, какие силы на нее действуют и какие законы управляют этим воздействием. Так случилось, что пониманием и того, и другого мы обязаны Исааку Ньютону. Его закон всемирного тяготения говорит нам, с какой силой Солнце действует на комету, а законы механики объясняют, как эта сила влияет на движение кометы. Вместе эти законы показывают, как будет перемещаться каждая комета, двигаясь вокруг Солнца.

Они же представляют собой первую из объединяющих идей, о которых мы говорили ранее (Ньютон до этого смог таким же образом объяснить движение планет). Другими словами, получается, что законы, управляющие движением комет, — в точности те же самые, что управляют движением планет. Сила притяжения Солнца действует и на те, и на другие, а разница между орбитами планет и комет связана со способом образования этих двух классов объектов (см. гипотеза газопылевого облака). Кометы попадают внутрь Солнечной системы из областей, находящихся далеко за пределами орбит самых дальних планет, поэтому они приближаются к Солнцу по касательной. Их можно сравнить с детьми, играющими в знаковую игру, в которой надо как можно быстрее подбежать к столбу, схватиться за него и бежать его. Планеты же сформировались более или менее там же, где находятся сейчас, и, соответственно, движутся вокруг Солнца по размеренным, почти круглым траекториям.

Вывод о том, что движением планет и комет управляют одни и те же законы, оказался революционным и совершенно неожиданным. В конце концов, что может быть больше непохоже на размеренное, регулярное и предсказуемое продвижение планеты по небосводу, чем беспорядочное и непредсказуемое появление комет? Однако эти, казалось бы, совершенно разные небесные явления подчиняются одним и тем же законам и связаны с притяжением Солнца одинаковым образом.

Именно это позволило астрономам в середине XX века понять, откуда берутся кометы. Изучив траекторию комет с момента их появления в Солнечной системе, астрономы сумели с помощью законов Ньютона рассчитать, где начался их путь. Было обнаружено, что кометы пришли из двух резервуаров на холодных просторах космоса — плоского диска с внешней стороны орбиты Плутона, называемого Поясом Койпера, и огромной сферы, простирающейся на расстоянии примерно полутора световых лет от Солнца, называемой Облаком Оорта. Получается, что так же, как законы Ньютона позволили Эдмунду Галлею рассчитать орбиту кометы, захваченной Солнцем, они дали возможность продолжателям его дела выяснить, откуда берутся кометы. Это еще одна из неожиданных связей, о которых мы говорили ранее.

Если спросить не откуда появилась комета, а что она собой представляет, окажешься в совершенно иной части паутины. Простой вопрос из этой категории может звучать так: «Из каких химических элементов и соединений состоят кометы?» Поскольку по большей части исследование комет ведется с большого расстояния, астрономы, задающие себе подобный вопрос, изучают, как комета излучает и поглощает свет, пытаясь таким образом определить ее химический состав. Как и все остальные материальные объекты, кометы состоят из атомов, а атомы особым образом взаимодействуют со светом. Атомы каждого химического элемента и соединения излучают в характерном только для него наборе длин волн, который можно рассматривать как своеобразный оптический отпечаток пальца (см. СПЕКТРОСКОПИЯ). В случае видимого света мы воспринимаем эти оптические отпечатки пальцев как разные цвета. Ярко-синий свет, видимый, когда кусочек меди падает в костер, и насыщенный желтый цвет уличного натриевого фонаря — примеры этого явления. Атомы кометы испускают свет, он проходит огромные космические расстояния до телескопа, и астрономы определяют химический состав кометы, несмотря на то, что не могут заполучить ее фрагменты для лабораторного исследования.

Конечно же, для применения этого метода не нужно, чтобы свет проходил огромные расстояния. Он дает такой же хороший результат, когда свет проходит всего несколько метров или даже миллиметров. В химической промышленности часто используют это свойство атомов — то, что каждый вид атомов испускает свет характерного именно для него набора цветов, — для контроля качества производственных процессов. Так испытывают самую разнообразную продукцию — лекарства, краски, напитки и многое другое. То, что инженер, проверяющий качество партии бензина, и астроном, изучающий дальнюю комету, используют в своей работе одни и те же законы поведения атомов — еще один пример этих неожиданных связей.

Я могу и дальше приводить примеры, но думаю, что вам понятно, о чем идет речь. Когда видишь мир как единое целое, управляемое законами природы, а не как большое число разрозненных явлений, представление о Вселенной становится более связным. Начинаешь видеть связи между, казалось бы, несвязанными вещами, упорядоченность во всем огромном разнообразии природных явлений. Мне

кажется, что это — главный дар науки нашему интеллекту, одно из величайших достижений человеческой мысли.

Наука в XX веке

Картина, только что нарисованная мною для вас, именуемая «научным взглядом на мир», несет на себе отчетливую печать ньютоновских представлений. Существует распространенное заблуждение, что XX век сыграл с Исааком Ньютоном злую шутку и что ученые уже не считают Вселенную упорядоченным местом, управляемым законами природы. Философы, придерживающиеся подобных взглядов, зачастую утверждают, что благодаря теории относительности, принципу неопределенности Гейзенберга и детерминистическому хаосу прежний научный взгляд на мир устарел. Ничто не может быть дальше от истины!

Для начала поговорим об относительности. Как мы увидим, Эйнштейн пришел к своей теории в попытке спасти принцип главенства законов природы в науке. В частности, его интересовал один аспект ньютоновских законов механики — тот факт, что независимо от точки наблюдения и даже при перемещении наблюдателей друг относительно друга любой наблюдатель увидит действие во Вселенной одних и тех же законов. На этой простой посылке он построил сложную теоретическую структуру, не столько вытеснившую законы Ньютона, сколько расширившую их применение на новые области. Например, одно из следствий из теории Эйнштейна состоит в том, что перемещающиеся часы идут медленнее, чем те, что находятся в покое. Для движения с обычными скоростями (например, в машине или самолете) это замедление столь мало, что не поддается измерению, так что в повседневной жизни можно смело игнорировать относительность. Но для объектов, движущихся со скоростями, меньшими скорости света, но сопоставимыми с ней, разница может быть значительной, и ее необходимо учитывать.

О так называемом эффекте замедления времени можно сделать два замечания. Во-первых, он в полной мере подтвержден экспериментально, как этого требует научный метод. Во-вторых, при использовании релятивистских уравнений для описания медленно движущихся объектов воспроизводятся ньютоновские законы движения. Более того, исходя из представления о том, что каждый закон природы верен в той степени, в какой верны подтверждающие его экспериментальные данные, нужно помнить, что законы Ньютона изначально проверялись только применительно к обычным объектам, движущимся с нормальными скоростями — для которых их предсказания совпадают с предсказаниями теории относительности. Но при скоростях, близких к скорости света, для которых законы Ньютона никогда не проверялись, две теории расходятся в своих предсказаниях, причем предсказания теории относительности проверены экспериментально. Это очерчивает область применимости законов Ньютона, но также говорит нам о том, что теория относительности не противоречит им, а дает возможность распространить существующую теорию на новые области.

Представление о том, что ньютоновские яблоки высыпались из тележки, опрокинутой теорией относительности, основано на неявной посылке о том, что законы Ньютона можно распространить без изменений на объекты, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света. Для этого нет никакой логической причины. Рассуждать подобным образом — все равно что утверждать, что, раз жители Америки говорят по-английски, то и жители Парижа должны говорить по-английски, и затем найти в этом умопостроении огромное противоречие, когда окажется, что в действительности парижане говорят по-французски.

Отношения между теориями Ньютона и Эйнштейна дают нам прекрасный пример того, как развиваются достигшие зрелости науки. Новая теория не отменяет старую. Вместо этого новые и более глубокие теории расширяют область применения старых, включая их в свой состав. Мы по сей день используем законы Ньютона при расчете движения космических аппаратов просто потому, что эти законы в полной мере испытаны и проверены в подобных ситуациях. В этом смысле наука растет, как дерево, все время добавляя новые ветви, но всегда сохраняя при этом сердцевину.

Аргументы, почерпнутые из теории хаоса и квантовой механики, касаются другой стороны ньютоновского взгляда на мир — представления о детерминизме. Говоря языком физики, система является детерминированной, если, зная начальные условия и законы, определяющие ее поведение, можно предсказать ее состояние в любой момент в будущем. Классический пример детерминированной системы — столкновение двух бильiardных шаров. Зная их положение и скорости до столкновения, с помощью закона сохранения момента импульса и первого начала термодинамики легко предсказать, где будет находиться каждый из шаров в любой момент после столкновения. Теория относительности — совершенно детерминистическая теория. Часы на движущихся бильiardных шарах могут замедляться, но, для того чтобы предсказать их поведение, можно использовать уравнения Эйнштейна точно так же, как и законы Ньютона. Дайте мне начальное положение и скорость каждого из шаров, и я скажу вам, где какой шар окажется в будущем.

С хаотическими системами ситуация несколько иная. Конечное состояние этих систем, открытых во второй половине XX века прежде всего благодаря использованию компьютерного моделирования, чрезвычайно сильно зависит от начальной точки. Речные пороги — хороший пример хаотической системы. Если в воду перед порогом положить рядом две щепки, то за порогом они окажутся далеко одна от другой. Это значит, что, для того чтобы предсказать будущее хаотической системы, необходимо очень точно знать ее начальное положение. В действительно хаотической системе, для того чтобы предсказать ее поведение в любой момент бесконечно продолжающегося будущего, необходимо знать ее начальное состояние с бесконечной точностью. Для проходящей речной порог щепки это означает, что ее начальное положение должно быть известно с бесконечной точностью. Поскольку очевидно, что в реальной системе это требование выполнить невозможно, будущее состояние такой системы практически невозможно предсказать с ньютоновской точностью.

Значит ли это, что хаос разрушил ньютоновский взгляд на мир? Вовсе нет. Ньютоновский детерминизм — это классическое утверждение типа «если..., то...»: если я знаю, каково первоначальное состояние системы, то я могу предсказать ее будущее. Теория хаоса затрагивает не этот главный принцип, а взаимосвязь между величиной погрешности в посылке утверждения («если...») и величиной погрешности в заключении («то...»). Если погрешность в посылке равна нулю (т.е. если первоначальное состояние системы известно нам с бесконечной точностью), то величина погрешности в заключении также равна нулю (т.е. можно с точностью предсказать ее будущее поведение). Таким образом, хаотичные системы являются детерминированными в теории, но не на практике. Ученые отдают должное этому факту, называя поведение систем, подобных речным порогам, **ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИМ ХАОСОМ**.

Мне кажется, что путаница с хаосом и ньютоновскими представлениями возникла из-за бытующего мнения, что будущее классических ньютоновских систем всегда можно предсказать с бесконечной точностью. Это совершенно неверно, даже применительно к совсем простым ситуациям. Описывая выше идеальные ньютоновские бильярдные шары, я не стал заострять внимание на вопросе, насколько точно могут быть известны их положения и скорости. На самом деле, в реальном мире в отношении этих чисел всегда присутствует некоторая неопределенность, а это значит, что и будущее положение шаров также не может быть предсказано совершенно точно. Помню, в аспирантуре мне пришлось проработать именно такой пример, чтобы усвоить, что в реальном мире никакая система не может быть бесконечно предсказуемой. В конце концов, разница между хаотической и классической ньютоновской системой — дело степени. В предсказании поведения любой системы — даже ньютоновских бильярдных шаров — имеется неопределенность, если есть неопределенность в измерениях ее исходного состояния. Хаотические системы — просто крайний случай этого принципа.

Ситуация с квантовой механикой несколько сложнее, прежде всего вследствие принципа неопределенности ГЕЙЗЕНБЕРГА. Суть этого принципа состоит в том, что невозможно одновременно совершенно точно знать и положение, и скорость субатомной частицы. Можно точно знать одно или другое, или и то, и другое с некоторой степенью неопределенности, но нельзя определенно знать и то, и другое одновременно. Это значит, что в мире атомов придется описывать состояние частицы совершенно иначе, чем в ньютоновском мире. Вместо того чтобы считать частицу конкретным предметом (как, например, бейсбольный мяч), находящимся в определенном месте и движущимся с определенной скоростью, придется рассматривать ее как некую разновидность волны.

Из-за этого в квантовой механике можно предсказать только вероятности (физики называют их волновыми функциями). Некоторые считают, что из-за этого квантовая механика не является детерминистической теорией, но в действительности это не так. Квантовая механика говорит нам, как от первоначального состояния, описанного в вероятностных терминах, прийти к конечному состоянию, также описанному

в вероятностных терминах. Практически все трудности, с которыми сталкиваются люди из-за «квантовых странностей» связаны с попытками смешать квантовый мир с ньютоновским. Например, иногда (не осознавая этого) исходят из того, что первоначальное состояние электрона описывается в ньютоновских терминах, и используют тот факт, что конечное состояние описывается в вероятностных терминах, в качестве аргумента, подтверждающего, что мы каким-то образом утратили способность делать детерминистические прогнозы.

Однако точка отсчета в разговоре о квантовой механике состоит вот в чем: *если хочешь играть в квантовую игру, придется играть по квантовым правилам*. Другими словами, если конечное состояние системы будет описано в вероятностных терминах, придется и ее исходное состояние описывать так же. Если понять это, то окажется, что квантовая механика — такая же детерминированная система, определяемая утверждениями типа «если ..., то ...». Если я знаю исходное состояние системы (описанное в вероятностных терминах), то я могу точно предсказать ее конечное состояние (также описанное в вероятностных терминах). Единственная разница между ньютоновской и квантовой механикой — это понятие «состояния». С точки зрения Ньютона, состояние — это совокупность таких переменных, как положение в пространстве и скорость, а пионеры квантовой механики под состоянием понимали волновую функцию. Выбор того или иного определения делает за нас природа, но когда выбор сделан, утверждение о возможности предсказания окажется одним и тем же.

Таким образом, три великих открытия XX века, перечеркнувшие, по мнению многих, ньютоновский взгляд на Вселенную, привели к следующему:

- теория относительности выходит за пределы ньютоновской теории и расширяет ее, распространяясь на объекты, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света,
- теория хаоса дает нам представление о влиянии ошибок в определении первоначальных состояний на точность предсказаний,
- квантовая механика по-новому определяет и расширяет понятие физического состояния, распространяя его на волновые функции.

Другими словами, все новые достижения науки, казалось бы, перечеркнувшие ньютоновскую физику, на деле просто расширили и переопределили ее главные положения.

Центральная идея науки, согласно которой возможно экспериментально найти законы, управляющие явлениями природы, и сформулировать теории, позволяющие предсказывать новые явления, остается в силе. Это хорошо, поскольку благодаря этому говорить о законах природы не только интересно, но и необходимо, для того чтобы понять, как устроена наша Вселенная.

Об этой книге

Одна из открытых нами великих истин — тот факт, что мы живем в упорядоченной вселенной — вселенной, чье устройство доступно человеческому разуму. Предприятие, именуемое наукой, отличается от прочих попыток толкования вселенной тем, что оно не ищет абсолютной истины, а использует метод, дающий все более точные представления физической реальности. Научный метод начинается с вопроса: «Почему нечто происходит так, а не иначе?» Ученый исследует, проводя систематические наблюдения и измерения, ищет взаимосвязи и аномалии. Когда складывается структура, формулируется объяснение. Чем более общее объяснение найдено, тем больше новых явлений оно позволит предсказать. Ученый продолжает проводить наблюдения и измерения, проверяя справедливость этих предсказаний. Если объяснение выдержит все проверки, результатом станет закон природы. Настоящая книга — ваш путеводитель по этим законам.

Законы природы не всегда называют «законами». Ученые не всегда заботятся о терминологической точности, и закон может быть также известен как «теория», «правило», «модель» или «принцип», или, отражая тот факт, что законы часто формулируют на языке математики, как «отношение» или «уравнение». Подозреваю, что то, называют ли то или иное утверждение законом, связано скорее с причудами истории, чем с логикой науки. Совершенно нетрудно представить себе, например, что в какой-нибудь иной вселенной явление фотосинтеза называется «законом преобразования энергии профессора Бурлиума». Соответственно, в этой книге вы найдете толкования природных явлений, обычно не называемые «законами», но обладающие той же глубиной и способностью объяснять происходящее в природе.

Предполагается, что каждая статья автономна и понятна сама по себе, поэтому некоторые объяснения и сведения можно найти в нескольких статьях. Книга не рассчитана на прочтение «от корки до корки», в нее надо заглядывать за конкретной информацией, откладывая, а потом заглядывать снова. Если какая-то статья покажется вам интересной, вы можете почитать связанные с ней статьи, названия которых выделены. Каждая из них поведет вас глубже в сеть знаний, составляющую наше научное представление о вселенной. Все статьи об одной и той же области науки помечены цветными закладками одного и того же цвета над заголовком каждой статьи. Одна из этих категорий называется «Взгляд в прошлое». Это идеи, оказавшиеся вытесненными или дискредитированными, но нашедшие тем не менее свое место в истории науки. В качестве дополнительных ориентиров можно использовать временные диаграммы, показывающие как предмет статьи хронологически связан с предметами родственных статей. В конце книги дана хронологическая справка, помещающая все статьи в единый исторический контекст. Также в конце книги даны объяснения терминов, составляющих основу словаря науки.

Составление списка статей для этой книги было, как всегда в таких случаях, вопросом индивидуальных предпочтений. Составляя этот список, я легко мог представить себе, как критики будут спрашивать

¹ Иногда предмет статьи можно однозначно привязать к конкретному году (как, например, формулу Дрейка). В других случаях выбран год достижения значительного успеха, о котором в статье может и не говориться. Если идея вызревала в течение определенного времени, и в ее развитие внесли свой вклад несколько человек, мы можем написать, например, просто «1880-е годы» или даже «XX век». Таким образом, временные диаграммы не всегда представляют собой хронологическую линейку (хотя по большей части это так).

с обвинительными нотками в голосе: «Почему же вы включили X, а Y не включили?» Даже такая объективная на первый взгляд вещь, как перечисление законов природы, на деле оказывается подвластна субъективным критериям. Чтобы предупредить хотя бы некоторые из вопросов «почему?», хочу объяснить, как отбирались статьи.

Во-первых, некоторые статьи отобрали себя сами, имея несомненное право на описание в книге про законы природы. ЗАКОН ШАРЛЯ, устанавливающий взаимосвязь между температурой и давлением газа, используется физиками и химиками уже четвертое столетие. Это, несомненно, «закон природы», как это понятие ни определяй. Такого рода законы, конечно, все включены, за исключением только тех, что не настолько известны, чтобы оказаться в предметном указателе стандартного университетского учебника. Как я уже говорил, некоторые прочно утвердившиеся «законы» природы называются иначе без особой на то причины. Многие из них автоматически дополнили собой список статей.

Другая группа статей отражает важнейшую историческую взаимосвязь между научным поиском с одной стороны и экспериментом и наблюдением с другой. Чтобы подчеркнуть важность этой связи и дать читателю чувство исторической перспективы, в книге описаны важнейшие эксперименты и наблюдения, и им обычно посвящены отдельные статьи. Таким образом, в книгу попали, например, статьи про ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА, давший экспериментальное подтверждение существования атомных ядер, и ЭКСПЕРИМЕНТ ВАН ХЕЛЬМОНТА, показавший, что растения наращивают биомассу, извлекая вещества из воздуха, а не из почвы.

Наконец, несколько статей оказались в списке просто потому, что, по мнению автора и редакторов, они могли заинтересовать людей, читающих книги о законах природы. В эту категорию попали серьезные статьи о математике, например, ТЕОРЕМА ГЕДЕЛЯ О НЕПОЛНОТЕ, такие необычные статьи, как КРИТЕРИЙ КРАСОТЫ, и просто интересные материалы, в число которых входят статьи про ЗАКОН МЁРФИ и ТРИ ЗАКОНА РОБОТОТЕХНИКИ.

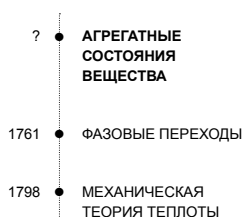
Все вместе статьи книги составляют карту наших сегодняшних представлений о физической вселенной, от БОЛЬШОГО ВЗРЫВА до ПРОЕКТА «ГЕНОМ ЧЕЛОВЕКА».

Джеймс Трефил
Фейрфакс, Вирджиния

ЗАКОНЫ

Агрегатные состояния вещества

Вещество может пребывать в твердом, жидком или газообразном состояниях, а при особых условиях также в плазменном состоянии



Любое вещество состоит из молекул, а его физические свойства зависят от того, каким образом упорядочены молекулы и как они взаимодействуют между собой. В обычной жизни мы наблюдаем три агрегатных состояния вещества — твердое, жидкое и газообразное.

Газ расширяется, пока не заполнит весь отведенный ему объем. Если рассмотреть газ на молекулярном уровне, мы увидим беспорядочно мечущиеся и сталкивающиеся между собой и со стенками сосуда молекулы, которые, однако, практически не вступают во взаимодействие друг с другом. Если увеличить или уменьшить объем сосуда, молекулы равномерно перераспределятся в новом объеме. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ связывает молекулярные свойства газа с его макроскопическими свойствами, такими, как температура и давление.

В отличие от газа *жидкость* при заданной температуре занимает фиксированный объем, однако и она принимает форму заполняемого сосуда, но только ниже уровня ее поверхности. На молекулярном уровне жидкость проще всего представить в виде молекул-шариков, которые, хотя и находятся в тесном контакте друг с другом, однако имеют свободу перекатываться друг относительно друга, подобно круглым бусинам в банке. Налейте жидкость в сосуд — и молекулы быстро растекутся и заполнят нижнюю часть объема сосуда, в результате жидкость примет его форму, но не распространится в полном объеме сосуда.

Твердое тело имеет собственную форму, не растекается по объему контейнера и не принимает его форму. На микроскопическом уровне атомы прикрепляются друг к другу химическими связями, и их положение друг относительно друга фиксировано. При этом они могут образовывать как жесткие упорядоченные структуры — кристаллические решетки — так и беспорядочное нагромождение — аморфные тела (именно такова структура полимеров, которые похожи на перепутанные и слипшиеся макароны в миске).

Выше были описаны три классических агрегатных состояния вещества. Имеется, однако, и четвертое состояние, которые физики склонны относить к числу агрегатных. Это *плазменное состояние*. Плазма характеризуется частичным или полным срывом электронов с их атомных орбит, при этом сами свободные электроны остаются внутри вещества. Таким образом, плазма, будучи ионизированной, в целом остается электрически нейтральной, поскольку число положительных и отрицательных зарядов в ней остается равным. Мы можем наблюдать как холодную и в незначительной степени ионизированную плазму (например, в люминесцентных лампах), так и полностью ионизированную горячую плазму (внутри Солнца, например).

При сверхнизких температурах скорости молекул снижаются настолько, что мы не можем точно определить их местоположение. Это происходит в силу принципа неопределенности ГЕЙЗЕНБЕРГА. Когда температура снижается настолько, что степень неопределенности положения атомов оказывается сопоставимой с размерами группы атомов, к которой они принадлежат, вся группа начинает вести себя, как единое целое. Такое состояние вещества называется *конденсатом Бозе—Эйнштейна*, и его можно считать пятым агрегатным состоянием вещества.

Анализ Фурье

Любая волна сложной формы может быть представлена как сумма простых волн

1822 • АНАЛИЗ ФУРЬЕ

Жозеф Фурье очень хотел описать в математических терминах, как тепло проходит сквозь твердые предметы (см. ТЕПЛООБМЕН). Возможно, его интерес к теплу вспыхнул, когда он находился в Северной Африке: Фурье сопровождал Наполеона во французской экспедиции в Египет и прожил там некоторое время. Чтобы достичь своей цели, Фурье должен был разработать новые математические методы. Результаты его исследований были опубликованы в 1822 году в работе «Аналитическая теория тепла» (*Theorie analytique de la chaleur*), где он рассказал, как анализировать сложные физические проблемы путем разложения их на ряд более простых.

Метод анализа был основан на так называемых *рядах Фурье*. В соответствии с принципом ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ряд начинается с разложения сложной формы на простые — например, изменение земной поверхности объясняется землетрясением, изменения орбиты кометы — влиянием притяжения нескольких планет, изменение потока тепла — его прохождением сквозь препятствие неправильной формы из теплоизолирующего материала. Фурье показал, что сложная форма волны может быть представлена как сумма простых волн. Как правило, уравнения, описывающие классические системы, легко решаются для каждой из этих простых волн. Далее Фурье показал, как эти простые решения можно суммировать, чтобы получить решение всей сложной задачи в целом. (Говоря языком математики, ряд Фурье — это метод представления функции суммой гармоник — синусоид и косинусоид, поэтому анализ Фурье был известен также под названием «гармонический анализ».)

До появления компьютеров в середине XX столетия методы Фурье и им подобные были лучшим оружием в научном арсенале при наступлениях на сложности природы. Со времени появления комплексных методов Фурье ученые смогли использовать их для решения уже не только простых задач, которые можно решить прямым применением законов МЕХАНИКИ НЬЮТОНА и других фундаментальных уравнений. Многие великие достижения ньютоновской науки в XIX веке фактически были бы невозможны без использования методов, впервые предложенных Фурье. В дальнейшем эти методы применялись в решении задач в различных областях — от астрономии до машиностроения.

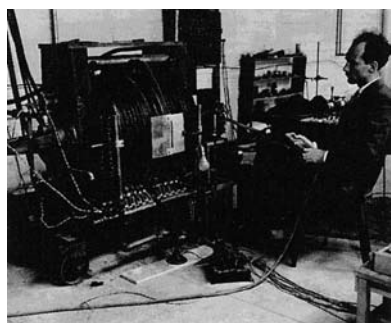
ЖАН-БАТИСТ ЖОЗЕФ ФУРЬЕ

(Jean-Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) — Французский математик. Родился в Осере; в возрасте девяти лет остался сиротой. Уже в юном возрасте проявил способности к математике. Фурье получил образование в церковной школе и военном училище, затем работал преподавателем математики. На протяжении всей жизни активно занимался политикой; был арестован в 1794 году за защиту жертв террора. После смерти Робеспьера был выпущен

из тюрьмы; принимал участие в создании знаменитой Политехнической школы (Ecole Polytechnique) в Париже; его положение послужило ему плацдармом для продвижения при режиме Наполеона. Сопровождал Наполеона в Египет, был назначен губернатором Нижнего Египта. По возвращении во Францию в 1801 году был назначен губернатором одной из провинций. В 1822 году стал постоянным секретарем Французской академии наук — влиятельная должность в научном мире Франции.

Античастицы

Для всякой известной элементарной частицы имеется вероятность найти античастицу — то есть частицу с той же массой, но противоположными другими физическими характеристиками



Карл Андерсон в 1931 году в лаборатории Гуггенхайма с конденсационной камерой, в которой ему удалось впервые обнаружить предсказанное Полем Дираком антивещество

В 1920-е годы — после введения принципов квантовой механики — субатомный мир представлялся крайне простым. Всего два вида элементарных частиц — протоны и нейтроны — составляли ядро атома (хотя экспериментально существование нейтронов и было подтверждено лишь в 1930-е годы), и один вид частиц — электроны — существовали за пределами ядра, вращаясь вокруг него на орбитах. Казалось, все многообразие Вселенной выстроено из этих трех частиц.

Увы, столь простой картине мира суждено было просуществовать недолго. Ученые, оборудовав высокогорные лаборатории по всему миру, принялись за изучение состава космических лучей, бомбардирующих нашу планету (см. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ), и вскоре начали открывать всевозможные частицы, не имеющие ни малейшего отношения к вышеописанной идиллической триаде. В частности, были обнаружены совершенно немыслимые по своей природе античастицы.

Мир античастиц — своего рода зеркальное отражение знакомого нам мира. Масса античастицы в точности равняется массе частицы, которой она вроде бы соответствует, но все ее остальные характеристики противоположны прообразу. Например, электрон несет отрицательный электрический заряд, а парная ему античастица — *позитрон* (производное от «позитивный электрон») — положительный. У протона заряд положительный, а у антипротона — отрицательный. И так далее. При взаимодействии частицы и парной ей античастицы происходит их взаимная аннигиляция — обе частицы прекращают свое существование, а их масса преобразуется в энергию, которая рассеивается в пространстве в виде вспышки фотонов и прочих сверхлегких частиц.

Существование античастиц впервые предсказал Поль Дирак в статье, опубликованной им в 1930 году. Чтобы понять, как ведут себя частицы и античастицы при взаимодействии, по Дираку, представьте себе ровное поле. Если взять лопату и вырыть в нем ямку, в поле появится два объекта — собственно ямка и кучка грунта рядом с ней. Теперь представим, что кучка грунта — это обычная частица, а ямка, или «отсутствие кучки грунта», — античастица. Засыпьте ямку ранее извлеченным из нее грунтом — и не останется ни ямки, ни кучки (аналог процесса аннигиляции). И снова перед вами ровное поле.

Пока шло теоретизирование вокруг античастиц, молодой физик-экспериментатор из Калифорнийского технологического института Карл Дейвид Андерсон (Carl David Anderson) (1905–1991) монтировал оборудование астрофизической лаборатории на вершине Пайк в штате Колорадо, намереваясь заняться изучением космических лучей. Работая под руководством Роберта Милликена (см. ОПЫТ МИЛЛИКЕНА), он придумал установку для регистрации космических лучей, состоящую из мишени, помещенной в мощное магнитное поле. Бомбардируя мишень, частицы оставляли в камере вокруг мишени треки из капелек конденсата, которые можно было сфотографировать и по полученным фотографиям изучать траектории движения частиц.

При помощи этого аппарата, получившего название *конденсационная камера*, Андерсон смог зарегистрировать частицы, возникающие в результате столкновения космических лучей с мишенью. По интенсивности трека, оставленного частицей, он мог судить о ее массе, а по характеру отклонения ее траектории в магнитном поле — определить электрический заряд частицы. К 1932 году ему удалось зарегистрировать ряд столкновений, в результате которых образовывались частицы с массой, равной массе электрона, однако отклонялись они под воздействием магнитного поля в противоположную сторону по сравнению с электроном и, следовательно, имели положительный электрический заряд. Так была впервые экспериментально выявлена античастица — позитрон. В 1932 году Андерсон опубликовал полученные результаты, а в 1936 году был отмечен за них половиной Нобелевской премии по физике. (Вторую половину премии получил австрийский физик-экспериментатор Виктор Франц Гесс (Victor Franz Hess, 1883–1964), впервые экспериментально подтвердивший существование космических лучей. — *Прим. переводчика.*) Это был первый (и, пока что, последний) случай присуждения Нобелевской премии ученому, официально даже не числившемуся на тот момент в штате научных сотрудников своего университета!

Хотя вышеописанный пример, казалось бы, служит идеальной иллюстрацией сценария «предсказание — проверка» в рамках научного метода, описанного во введении, историческая реальность представляется не столь простой, как кажется. Дело в том, что Андерсон, судя по всему, не знал о публикации Дирака абсолютно ничего до своего экспериментального открытия. Так что в данном случае речь идет, скорее, об одновременном теоретическом и экспериментальном открытии позитрона.

Все следующие за позитроном античастицы были экспериментально обнаружены уже в лабораторных условиях — на ускорителях. Сегодня физики-экспериментаторы имеют возможность буквально штамповать их в нужных количествах для текущих экспериментов, и чем-то из ряда вон выходящим античастицы давно не считаются.

ПОЛЬ АДРИАН МОРИС ДИРАК (Paul Adrian Maurice Dirac, 1902–84) — британский физик-теоретик. Родился в Бристоле в семье иммигрантов из Швейцарии. Отец Дирака преподавал французский на своей новой родине и, по рассказам, не желал разговаривать с сыном иначе, чем на их родном французском языке: отсюда, вероятно, и та молчаливость, которой всю жизнь отличался Поль Дирак. В 1921 году Дирак окончил Бристольский электротехнический институт (теперь Бристольский университет), после чего отправился преподавать математику и физику в Кембридж, где в 1926 году получил

докторскую степень, а еще шесть лет спустя стал почетным профессором математики — и занимал этот престижный пост в течение почти сорока лет. Еще до защиты докторской диссертации Дирак успел опубликовать ряд важных статей по квантовой механике. В 1928 году Дирак опубликовал работу, впервые объясняющую поведение электрона с точки зрения сочетания принципов теории относительности и квантовой механики. Именно в этой работе было предсказано существование античастиц, и за нее Дирак несколько позже в 1933 году получил Нобелевскую премию по физике, разделив ее с Эрвином Шрёдингером.

Антропный принцип

Существование жизни во Вселенной каким-то образом взаимосвязано с фундаментальными физическими законами, описывающими устройство и поведение Вселенной

XVI	●	ПРИНЦИП КОПЕРНИКА
1950	●	ПАРАДОКС ФЕРМИ
1961	●	АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП
1961	●	ФОРМУЛА ДРЕЙКА

По мере накопления нами знаний о космосе возрастал объем имеющейся у нас информации об устройстве и макромира, и микромира. И становилось все очевиднее, что, сложись хоть что-то в процессе возникновения и эволюции Вселенной хотя бы незначительно иначе, чем оно было, нас бы с вами попросту не было, и некому было бы размышлять о порядке мироустройства. То есть все выглядит так, будто Вселенная действительно была изначально задумана как своего рода Эдем — райский сад, где все благоприятствовало зарождению человечества, — и замысел этот поражает грандиозностью своего масштаба.

Окажись чуть интенсивнее силы взаимного гравитационного притяжения материальных тел — и расширение Вселенной (см. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ) прекратилось бы, практически не успев начаться, — мир буквально сжался бы обратно в бесструктурную массу, не успев по-настоящему родиться; по крайней мере, до формирования звезд с планетными системами, не говоря уже о зарождении на них жизни, дело бы дойти не успело. Если бы, напротив, сила тяжести оказалась несколько ниже наблюдаемой, вещество Вселенной попросту расплылось бы, не успев и не сумев локализоваться в звездно-планетарные системы. Из всех возможных значений константы гравитационного протяжения лишь мизерный интервал ее значений приводит к формированию устойчивой и жизнеспособной Вселенной.

И то же самое можно сказать практически о любой фундаментальной константе, определяющей физические свойства наблюдаемого нами материального мира. Случись, например, единичному электрическому заряду элементарных частиц оказаться чуть выше наблюдаемой величины, и сила взаимного электростатического отталкивания положительно заряженных протонов не дала бы сложиться ядрам наблюдаемых нами сегодня химических элементов, из которых сложена Вселенная. Окажись же единичный электрический заряд чуть ниже, электроны не смогли бы закрепиться на орбитах вокруг ядра. И в том, и в другом случае до зарождения жизни во Вселенной (и до появления нас с вами) дело бы никак не дошло. Или, если бы сильные взаимодействия внутри ядра, удерживающие вместе *нуклоны* (протоны и нейтроны) оказались слабее, чем они есть, нестабильными оказались бы подавляющее большинство стабильных ядер базовых химических элементов, образовавшихся вскоре после БОЛЬШОГО ВЗРЫВА, из которых и сформировалась та Вселенная, которую мы сегодня наблюдаем. А окажись они сильнее чем есть, стали бы невозможными термоядерные реакции, дающие энергию звездам и обеспечивающие «энергоснабжение» планет.

На самом деле все фундаментальные константы, взятые по совокупности, имеют очень узкий интервал допустимых значений, при которых Вселенная в том виде, в котором она перед нами предстает и обеспечивает условия для зарождения жизни, могла возникнуть и стабильно развиваться. Первым эту мысль озвучил аме-

Сколько вселенных существует?

Если Вселенная, по определению, вмещает всю совокупность сущего, можно ли вообще говорить о самой возможности существования многих вселенных? Одним из возможных ответов может стать так называемая «множественность вероятностных миров», предсказываемая квантовой механикой; в частности, можно обратиться к опыту, свидетельствующему о полной непредсказуемости того, через какое из двух равновеликих отверстий квантовая частица проникнет в камеру-обскуру при эксперименте по исследованию интерференции — именно благодаря этому на задней стенке камеры образуются известные интерференционные полосы Фраунгофера. Чтобы хоть как-то логически обосновать результаты наблюдения, некоторые физики-теоретики предложили единственное, по их мнению, разумное объяснение происходящего: при каждом разовом «взаимодействии» вселенная распадается надвое и образуется две буквально неразличимые копии мира. Если так, то одновременно существует неизмеримо большое количество подобных «слепок» вселенной, образовавшихся в результате неисчислимого множества подобных взаимодействий с дуальным исходом, причем на макроскопическом уровне все эти вселенные существуют независимо друг от друга, однако они по-прежнему могут «сообщаться» посредством взаимодействий на квантовом уровне.

риканский астрофизик Роберт Дик (Robert H. Dicke, 1916–1997), а окончательно сформулировал в 1973 году также американец Брэндон Картер (Brandon Carter, р. 1942) — этот космолог усмотрел в антропном принципе расширение задолго до него сформулированного принципа Коперника. Согласно Картеру, мы имеем два формально раздельных космологических вселенских антропных принципа — слабый и сильный.

Слабый антропный принцип просто утверждает, что устройство Вселенной допускает зарождение в ней биологической жизни. То есть вопрос «почему Вселенная устроена именно так, как она устроена?» заменяется вопросом «Почему Вселенная устроена так, что в ней возникли разумные существа, задающиеся вопросом о причинах наблюдаемого устройства Вселенной?». То есть сам факт возникновения вопроса относительно природы фундаментальных сил и законов уже подразумевает, что во Вселенной развились разумные формы жизни. Если бы, условно говоря, константы (такие, как постоянная всемирного тяготения) отличались от наблюдаемых, Вселенная эволюционировала бы по-иному, жизнь в ней попросту могла бы и не развиваться, в результате чего вопросов о первопричинах возникновения Вселенной не возникло бы, как таковых.

В этой формулировке антропный принцип не подразумевает каких бы то ни было первопричин, по которым Вселенная сформировалась именно так, как она это сделала, и по которым фундаментальные природные константы таковы, как они есть. Допускается (теоретически) существование буквально бесчисленного множества других вселенных с другими наборами фундаментальных констант (см. *вставку*), но само возникновение форм разумной жизни возможно лишь во вселенных, подобных нашей, — то есть достаточно устойчивых, чтобы в них успели развиваться разумные формы жизни.

Вот, к примеру, аналогия: если десять раз подряд подбросить монету, вероятность того, что десять раз подряд выпадет орел, составит $(1/2)^{10}=1/1024$. То есть из 1024 серий по бросанию монеты 10 раз подряд вы в среднем лишь единожды добьетесь результата, при котором монета все десять раз подряд упадет одной стороной вверх. Это строгое следствие теории вероятностей, но, после того как монета десять раз подряд выпала орлом, смысла задаваться вопросом, *почему* так случилось, нет и быть не может. Можно сколько угодно отслеживать и описывать траекторию хаотичного движения монеты в полете — никакой закономерности в выпадении орла или решки нет. В точности так же из бесчисленного множества вероятных вселенных лишь у немногих есть шанс на то, что набор фундаментальных констант сложится в них благоприятным (с точки зрения их дальнейшего устойчивого развития) образом, остальные же обречены на практически мгновенное сжатие до состояния протоматерии или распыление без образования устойчивых структур. И только в этих

Английский астроном Мартин Рис (Martin Rees, р. 1942) ввел по этому случаю термин «мульти-вселенная» — то есть это вселенная, объединяющая в себе все неисчислимое множество вероятных миров.

Концепция множественной вселенной дает нам естественное объяснение слабого антропного принципа. Можно, конечно, задаваться вопросом, почему в нашей Вселенной создались условия, благоприятствовавшие зарождению разумной жизни. Но гораздо проще принять, что среди бесконечного числа вселенных должно быть немало таких, где возможна органическая жизнь. Так стоит ли удивляться, что одна из таких вселенных, как Машеньке в сказке о трех медведях, пришлась нам в самый раз?

устойчивых вселенных может зародиться разумная жизнь, задающаяся вопросом о причинах своего происхождения.

Однако и этого некоторым ученым показалось мало для объяснения наблюдаемой пригодности нашей Вселенной для жизни, в результате чего был сформулирован *сильный антропный принцип*: Вселенная *обязана* быть устроена так, чтобы в ней могла зародиться разумная жизнь. В этой его версии принцип выходит за рамки слабого антропного принципа и утверждает, что зарождение жизни во Вселенной не только возможно (слабый принцип), но и фактически неизбежно. Сторонники этого взгляда на вещи обосновывают свою точку зрения тем, что имеется некий универсальный (и до сих пор не открытый) закон, согласно которому все фундаментальные вселенские константы попросту не могут отличаться от тех, которые мы имеем в объективной реальности. Крайняя точка зрения в этой космогонической традиции доходит до того, что не только универсальные константы предопределены, но и развитие сознающего разума во Вселенной неизбежно.

Что касается ученых-естествоиспытателей, то большинство из них безоговорочно признают антропный принцип в его «слабой» формулировке, поскольку здесь он является не более, чем обычным упражнением в логике (кто-то, возможно, даже сочтет его *тавтологией*: «мы живы, потому что живы, и сознаем этот факт»). Сильный же антропный принцип широкого признания так и не получил по причине практической невозможности его проверки. Что касается лично меня, то по обоим вышеупомянутым вопросам я, вынужденно или невольно, разделяю мнение большинства.

Атом Бора

*Электроны
в атоме могут
находиться только
на разрешенных
орбитах*

ок. 420 до н.э.	•	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1859	•	ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА
1859	•	СПЕКТРОСКОПИЯ
1911	•	ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА
1913	•	АТОМ БОРА
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Когда Джон Дальтон впервые в истории современной науки предложил атомную теорию строения вещества, атомы представлялись ему неделимыми, наподобие микроскопических бильярдных шаров. Однако на протяжении всего XIX столетия становилось все очевиднее, что такая модель неприемлема. Поворотной точкой стало открытие электрона Дж. Дж. Томсоном в 1897 году, из которого следовало, что атом состоит из отдельных частиц — прямое свидетельство против его неделимости. Последним гвоздем в крышку гроба неделимого атома стало открытие в 1911 году атомного ядра (см. опыт Резерфорда). После этих открытий стало ясно, что атом не просто делим, но еще и обладает дискретной структурой: состоит из массивного, положительно заряженного центрального ядра и движущихся по орбитам вокруг него легких, отрицательно заряженных электронов.

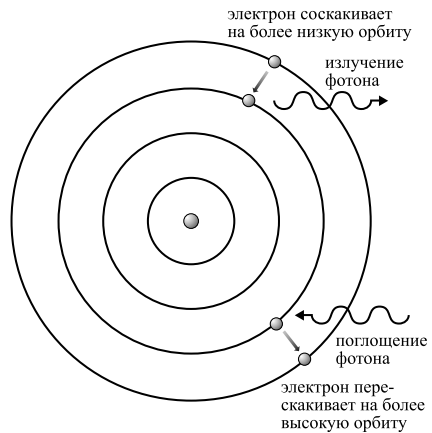
Но с этой простой планетарной моделью атома тут же возникли проблемы. Прежде всего, согласно физическим законам того времени, такой атом не мог бы просуществовать дольше доли мгновения — на наше счастье, мы имеем все основания утверждать, что этот факт опытом не подтверждается. Аргументация была такова: в соответствии с законами механики Ньютона электрон, находящийся на орбите, движется с ускорением. Следовательно, согласно уравнениям Максвелла, он должен излучать электромагнитные волны и, как следствие, терять энергию (в силу закона сохранения энергии; см. уравнение состояния идеального газа) и вскоре сойти с орбиты и упасть на ядро. Это стандартная задача по физике для студентов-первокурсников, и любой из них легко докажет путем таких рассуждений, что планетарный атом не просуществует и секунды. Очевидно, что-то было не так в этой простой модели строения атома, раз реальные атомы, окружающие нас, просуществовали миллиарды лет.

Разрешить эту проблему и направить физиков по верному пути понимания атомной структуры удалось молодому датскому теоретику Нильсу Бору, недавно прибывшему на стажировку в Англию после защиты докторской диссертации у себя на родине. За отправную точку Бор принял новые постулаты квантовой механики, согласно которым на субатомном уровне энергия испускается исключительно порциями, которые получили название «кванты». Немецкий физик Макс Планк воспользовался положением о том, что атомы излучают свет отдельными частицами (позже Альберт Эйнштейн назвал их «фотоны»), для разрешения застарелой проблемы излучения черного тела. Используя концепцию фотонов, Альберт Эйнштейн теоретически объяснил фотоэлектрический эффект. За свои работы и Планк, и Эйнштейн получили по Нобелевской премии.

Бор развил квантовую теорию еще на шаг и применил ее к состоянию электронов на атомных орбитах. Говоря научным языком, он предположил, что угловой момент электрона (см. опыт Штерна—Герлаха) квантуется. Далее он показал, что в этом

случае электрон не может находиться на произвольном удалении от атомного ядра, а может быть лишь на ряде фиксированных орбит, получивших название «разрешенные орбиты». Электроны, находящиеся на таких орбитах, не могут излучать электромагнитные волны произвольной интенсивности и частоты, иначе им, скорее всего, пришлось бы перейти на более низкую, неразрешенную орбиту. Поэтому они и удерживаются на своей более высокой орбите, подобно самолету в аэропорту отправления, когда аэропорт назначения закрыт по причине нелетной погоды.

Однако электроны могут переходить на другую разрешенную орбиту. Как и большинство явлений в мире квантовой механики, этот процесс не так просто представить наглядно. Электрон просто исчезает с одной орбиты и материализуется на другой, не пересекая пространства между ними. Этот эффект назвали «квантовым прыжком», или «квантовым скачком». Позже этот термин обрел широкую популярность и вошел в наш лексикон со значением «внезапное, стремительное улучшение» («Настоящий квантовый скачок в технологии производства наручных часов!»). Если электрон перескакивает на более низкую орбиту, он теряет энергию и, соответственно, испускает квант света — фотон фиксированной энергии с фиксированной длиной волны. На глаз мы различаем фотоны разных энергий по цвету — раскаленная на огне медная проволока светится синим, а натриевая лампа уличного освещения — желтым. Для перехода на более высокую орбиту электрон должен, соответственно, поглотить фотон.

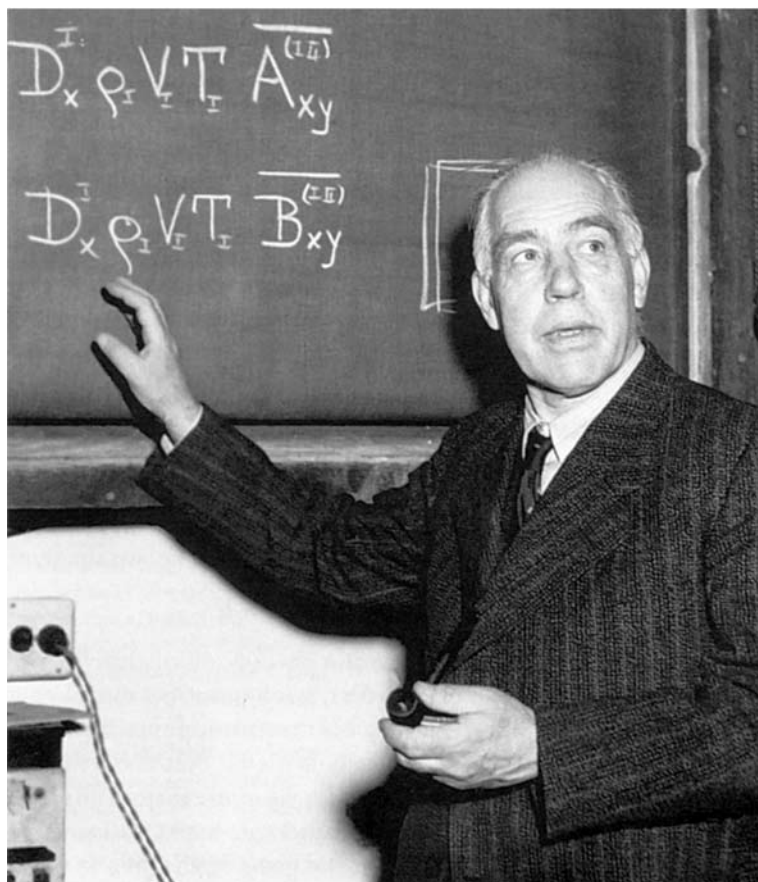


Согласно модели атома Бора, электрон перескакивает на более высокую орбиту при поглощении фотона и соскакивает на более низкую при излучении фотона

В картине атома по Бору, таким образом, электроны переходят вниз и вверх по орбитам дискретными скачками — с одной разрешенной орбиты на другую, подобно тому, как мы поднимаемся и спускаемся по ступеням лестницы. Каждый скачок обязательно сопровождается испусканием или поглощением кванта энергии электромагнитного излучения, который мы называем фотоном.

Со временем интуитивная гипотеза Бора уступила место строгой систематической формулировке в рамках законов квантовой механики и, в частности, концепции двойственной природы элементарных частиц — корпускулярно-волновой (с.м. принцип дополнительности). Сегодня электроны представляются нам не микроскопическими планетами, обращающимися вокруг атомного ядра, а волнами вероятности, плещущимися внутри своих орбит —

подобно приливам и отливам в тороидальном бассейне — и подчиняющимися уравнению Шрёдингера. Современные физики, как само собой разумеющееся, рассчитывают характеристики этих волн для самых сложных по структуре атомов и используют их для объяснения свойств и поведения этих атомов. Однако основополагающую картину всей современной квантовой механики нарисовал в своем великом прозрении Нильс Бор — в далеком теперь 1913 году.



Нильс Бор, один из основоположников современных представлений о субатомном мире, разработчик первой квантово-механической модели строения атома. Фотография сделана в 1948 году в Принстонском университете (США)

Атомная теория строения вещества

*Материя состоит
из атомов*

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1811	• ЗАКОН АВОГАДРО
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ



*Незадолго до того, как ее
валюта была вытеснена
евро, Греция увековечила
образ основоположника
атомистической теории
Демокрита на монете
достоинством 10 драхм*

Слово «атом» греческого происхождения, и переводится оно «неделимый». Принято считать, что первым идею о том, что кажущаяся гладкой и непрерывной материя на самом деле состоит из великого множества мельчайших и потому невидимых частиц, выдвинул древнегреческий философ Демокрит (чей «расцвет», согласно восхитительному по образности выражению классиков, пришелся на V век до н.э.). О жизни Демокрита нам, однако, практически ничего неизвестно, и оригинальные труды этого мыслителя до наших дней не дошли. Поэтому об идеях Демокрита остается судить в основном по цитатам из его работ, которые мы находим у других авторов, прежде всего у Аристотеля.

Логика рассуждений Демокрита, если перевести ее на современный язык, была крайне проста. Представим, говорил он, что у нас есть самый острый в мире нож. Берем первый попавшийся под руку материальный объект и разрезаем его пополам, затем одну из получившихся половинок также разрезаем пополам, затем разрезаем пополам одну из получившихся четвертинок и так далее. Рано или поздно, утверждал он (основываясь, как и все древнегреческие мыслители, прежде всего на философских соображениях), мы получим частицу столь мелкую, что дальнейшему делению на две она не поддается. Это и будет неделимый *атом* материи.

По представлениям Демокрита атомы были вечными, неизменными и неделимыми. Изменения во Вселенной происходили исключительно из-за изменений в связях между атомами, но не в них самих. Тем самым он тонко обошел давнишний спор древнегреческих философов о том, подвержена ли переменам сама суть видимого мира или все перемены в нем носят чисто внешний характер.

От древнегреческих представлений об атоме на сегодняшний день сохранилось разве что само слово «атом». Теперь мы знаем, что атом состоит из более фундаментальных частиц (*см. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ*). Ясно, что между древнегреческой теорией и современными научными исследованиями мало общего: идеи Демокрита не основывались ни на каких наблюдениях или практических опытах. Демокрит, подобно всем натурфилософам античности, просто рассуждал и делал умозрительные заключения относительно природы мира.

Тем не менее труды Демокрита не остались без признания и в современном мире. На последней греческой монете достоинством 10 драхм (теперь она выведена из обращения и заменена евро) на лицевой стороне изображен портрет Демокрита, а на оборотной — схематическая модель атома. Я весьма признателен своему другу Гансу фон Байеру, обратившему мое внимание на то, что на монете изображен атом с тремя электронами — стало быть, это атом лития. Демокрита называли «смеющимся философом» (похоже, он обладал несвойственным другим античным философам чувством юмора). Не потому ли на монете, увековечивающей его память, изображен именно атом лития — химического элемента, который теперь широко используется для лечения депрессии?

Идея об атомном строении материи так и оставалась чисто философским умопостроением вплоть до начала XIX века, когда сформировались основы химии как науки. Химики первыми и обнаружили, что многие вещества в процессе реакций распадаются на более простые компоненты. Например, вода распадается на водород и кислород. Однако некоторые вещества — те же водород и кислород — разложению на составляющие при помощи химических реакций не поддаются. Такие вещества называли *химическими элементами*. К началу XIX века было известно около 30 химических элементов (на момент написания этой статьи их открыто более 110, включая искусственно полученные в лабораторных условиях; см. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕНДЕЛЕЕВА). Кроме того, было установлено, что в процессе химических реакций количественное соотношение веществ, участвующих в данной реакции, не изменяется. Так, для получения воды неизменно берутся восемь массовых долей кислорода и одна доля водорода (см. ЗАКОН АВОГАДРО).

Первым осмысленную интерпретацию этих фактов предложил Джон Дальтон, чье имя увековечено в открытом им ЗАКОНЕ ДАЛЬТОНА. В своих химических опытах он исследовал поведение газов (см. ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА, ЗАКОН ШАРЛЯ и ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ), но этим круг его интересов не ограничивался. В 1808 году он приступил к публикации своего фундаментального двухтомного труда *«Новая система химической философии»*, радикально повлиявшего на дальнейшее развитие химии. В этой работе Дальтон предположил, что осмыслить и интерпретировать последние достижения экспериментальной химии можно только приняв, что каждому химическому элементу в этих опытах соответствует уникальный для него атом, и что именно смешение и объединение в различных пропорциях этих атомов приводит к образованию наблюдаемых в природе химических веществ. Например, вода, по Дальтону, состоит из сочетания двух атомов водорода и одного атома кислорода (общеизвестная формула H_2O). Тот факт, что все атомы одного вида неразличимы между собой, удачно объяснял, почему при химических реакциях они всегда обнаруживаются в неизменных пропорциях. Так, в случае с водой, два атома водорода всегда одни и те же, где бы мы ни взяли эту воду, и всегда находятся в одной и той же связи с единственным атомом кислорода.

Для Дальтона, как и для Демокрита, атомы оставались неделимыми. В черновиках и книгах Дальтона мы находим рисунки, где атомы представлены в виде шариков. Однако основное положение его работы — что каждому химическому элементу соответствует особый тип атома — легло в основу всей современной химии. Этот факт остается непреложным и теперь, когда мы знаем, что каждый атом сам по себе является сложной структурой (см. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА) и состоит из тяжелого, положительно заряженного ядра и легких, отрицательно заряженных *электронов*, вращающихся по

орбитам вокруг ядра. Достаточно обратиться к сложностям КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ (см. также атом Бора и уравнение Шрёдингера), чтобы понять, что концепция атома не исчерпала себя и в XXI веке.

Неплохо, однако, для идеи, зародившейся в философских спорах 2500 лет назад!

Белки

Белки — это цепочки аминокислот, выполняющие множество функций, важнейшая из которых — ферментативная, то есть регуляция химических реакций в живых организмах



В основе жизнедеятельности любого организма лежат химические процессы. В каждой клетке вашего тела происходят тысячи химических реакций, и совокупность этих реакций определяет вашу индивидуальность. В этой грандиозной химической системе важнейшую роль играют молекулы белков.

Давайте в начале нашей беседы о белках поговорим об их строении. При конструировании сложных молекул вы можете пойти двумя путями: либо использовать систему модулей и собирать всевозможные крупные молекулы из небольшого числа структурных единиц, либо изготавливать каждую молекулу по индивидуальному плану. Вспомните старые и новые методы строительства. Раньше все элементы конструкции изготавливали только для одного здания, и в других зданиях они не встречались. В наше время такие здания (если их только можно отреставрировать) считаются очень красивыми и ценятся выше современных построек. Современный же метод строительства состоит в том, чтобы взять уже готовые однотипные детали, или модули (кирпичи, окна, двери), и собрать из них здание. Но и в такой системе, komponуя серийные детали по-разному, можно построить самые разнообразные сооружения. Аналогичный подход реализуется в живых системах — структурная сложность достигается за счет модульного принципа построения. Именно такой подход логичен с точки зрения теории эволюции, поскольку он позволяет последовательно усложнять структуры по мере появления новых модулей.

Основной структурной единицей белков являются аминокислоты. Молекулы этого класса имеют сходную структуру, немного различаясь в деталях. Они представляют собой цепочку атомов, на одном конце которой находится положительно заряженный ион водорода (H^+), а на другом — отрицательно заряженная гидроксильная группа (OH^-), состоящая из кислорода и водорода. От основной цепи отходят боковые группы, различные для разных аминокислот. В живых организмах насчитывается 21 аминокислота.

Из аминокислот строится белок. Этот процесс напоминает нанизывание бусинок на нить. При сближении двух аминокислот ион водорода (H^+) одной из них соединяется с OH^- -группой второй, и две аминокислоты связываются друг с другом с высвобождением молекулы воды. При этом возможны самые разные сочетания аминокислот. Последовательность аминокислот в «бусах» называется *первичной структурой* белка. Поскольку бусиной может быть любая из 21 аминокислоты, то даже для коротких белков существует огромное количество возможных вариантов первичной структуры. Например, существует более 10 *триллионов* способов собрать белок длиной всего в 10 аминокислот!

После того как определена первичная структура белка, под действием электростатических взаимодействий между различными боковыми группами аминокислот, а также между аминокислотами и окружающей их водой белок принимает сложную трех-

мерную форму. Для нас важнее всего белки, которые сворачиваются в сложные сферические структуры, поскольку именно они регулируют химические реакции в живых организмах. (Другие типы белков, например те, из которых состоят волосы и прочие структуры тела, имеют не такую форму.)

При взаимодействии сложных молекул между определенными атомами каждой из молекул образуется химическая связь. Одной лишь способности молекул к взаимодействию недостаточно для образования связи. Две молекулы должны сблизиться и принять такую ориентацию, при которой атомы, способные образовывать химические связи, могли бы состыковаться, как космические корабли на орбите. Поэтому трехмерная структура имеет первостепенное значение для химических процессов, идущих в живых организмах.

Трудно поверить, чтобы две сложные молекулы, предоставленные сами себе, случайным образом расположились бы в пространстве так, чтобы стало возможным их взаимодействие. Для протекания химической реакции с заметной скоростью необходимо участие молекул, называемых *ферментами* (см. КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ). Фермент притягивает обе молекулы к себе и придает им ориентацию, обеспечивающую взаимодействие. Как только взаимодействие произошло, фермент, выполнивший свою работу, высвобождается и может повторить эту операцию со следующей парой молекул.

Благодаря своей сложной структуре белки идеально справляются с ролью ферментов. Каждой первичной структуре соответствует определенная форма молекулы белка и, следовательно, определенная химическая реакция, которую этот белок катализирует. Во всех живых организмах первичная структура белка записана на молекуле ДНК (см. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДОГМА МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ). Таким образом, ДНК держит под контролем весь организм, определяя спектр образующихся белков и, таким образом, возможные химические реакции.

В принципе, по первичной структуре белка можно было бы предсказать, какую форму будет иметь его молекула, а значит, предсказать и природу химической реакции, в которой этот белок будет участвовать. В действительности же эта *проблема укладки белка* настолько сложна, что пока ее невозможно вычислить даже при помощи лучших компьютеров и программного обеспечения. На сегодняшний день это одна из основных нерешенных проблем молекулярной биологии.

Биологические молекулы

Биологические молекулы имеют модульное строение. К числу важных классов биологических молекул относятся белки, углеводы, липиды и нуклеиновые кислоты. Множество других молекул в клетке играют роль «энергетической валюты»



Жизнь — таинственная, сложная, загадочная — не что иное, как совокупность достаточно крупных молекул и довольно простых химических реакций. Если бы вам понадобилось конструировать крупные молекулы, вы пошли бы по одному из двух путей. Либо, как в кустарном ювелирном деле, вы стали строить каждую молекулу «с нуля», проделывая каждый раз уникальную работу. Либо — этот путь используется в современных строительных технологиях — вы бы изготовили набор простых молекул, из которых можно собирать самые разнообразные молекулы большего размера, сочетая модули тем или иным образом. Оказывается, именно такое модульное строение имеют биологические молекулы. Согласно теории эволюции, таким и должен был быть самый простой путь к крупным молекулам, поскольку в начале эволюционного процесса необходимость в конструировании очень сложных молекул отсутствовала. Со временем же могли добавляться новые модули, расширяя коллекцию крупных разнородных элементов, что вполне соответствует духу эволюции.

Белки

Основной структурной единицей белков являются молекулы *аминокислот*. Чтобы понять, что такое аминокислота, представьте себе совокупность атомов, у которых с одной стороны наружу выступает водород, с другой — соединенные между собой кислород и водород, а посередине расположены разнообразные другие компоненты. Подобно тому как бусины нанизываются на нить, из этих аминокислот собираются белки — ион водорода (H^+) одной аминокислоты объединяется с ионом гидроксила (OH^-) другой аминокислоты с образованием молекулы воды. (Представьте, как каждый раз при соединении двух аминокислотных молекул между ними пробегает капелька воды.) Среди белков самую важную роль играют белки-ферменты (см. КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ), регулирующие химические реакции в клетках; но белки также являются важными структурными компонентами живых организмов. Например, ваши волосы и ногти состоят из белков.

Углеводы

Углеводы содержат кислород, водород и углерод в соотношении $1 : 2 : 1$. Во многих живых системах молекулы углеводов выполняют роль источников энергии. Одним из важнейших углеводов можно считать сахар глюкозу, содержащую шесть атомов углерода ($C_6H_{12}O_6$). Глюкоза — конечный продукт фотосинтеза и, следовательно, основа всей пищевой цепи в биосфере. Соединяя молекулы глюкозы, как основные строительные модули, можно получить сложные углеводы. Как и белки, углеводы играют вспомогательную роль в клетках, поскольку входят в клеточные структуры. Например, растительные волокна состоят из целлюлозы, которая представляет собой вереницу сцепленных особым образом молекул глюкозы.

Липиды

Липиды — это нерастворимые в воде органические молекулы. Вы получите правильное представление о липидах, если вообразите капельки жира, плавающие на поверхности бульона. В живых организмах липиды выполняют две важные функции. Один класс молекул — фосфолипиды — состоят из маленькой головки, содержащей фосфатную группу (атом фосфора, соединенный с четырьмя атомами кислорода), и длинного углеводородного хвоста. Углеводородный хвост этой молекулы *гидрофобен*, то есть энергетическое состояние молекулы минимально, когда этот хвост находится не в воде. Напротив, фосфатная головка *гидрофильна*, то есть энергетическое состояние молекулы минимально при контакте головки с водой. Если поместить молекулы фосфолипидов в воду, они будут стремиться достичь минимального энергетического состояния и выстроятся таким образом, что их хвосты окажутся вместе, а головки — врозь. Такая *двухслойная* структура очень стабильна, поскольку головки будут в контакте с водой, но вода будет вытеснена из области, окружающей хвосты молекул. Для перемещения липидным молекулам необходима энергия — либо чтобы удалить гидрофильные участки из воды, либо чтобы поместить в воду гидрофобные участки. Из таких липидных двухслойных структур состоят клеточные мембраны и мембраны, разделяющие компоненты клетки. Эти пластичные и прочные молекулы отделяют живое от неживого.

Кроме того, в липидах запасается энергия. Липиды могут накапливать примерно вдвое больше энергии на единицу массы, чем углеводы. Вот почему, когда вы переедаете и ваш организм хочет запастись энергией на случай непредвиденных обстоятельств в будущем, когда пищи не будет, он станет запасать ее в форме жира. На этом простом факте строится многомиллиардная индустрия диетических продуктов.

Нуклеиновые кислоты

Молекулы ДНК и РНК (см. центральная догма молекулярной биологии) переносят информацию о химических процессах, идущих в клетке, и участвуют в передаче содержащейся в ДНК информации в цитоплазму клетки. В ДНК живого организма закодированы белки-ферменты, которые катализируют все химические реакции, происходящие в этом организме.

Молекулы-переносчики энергии

Жизнедеятельность требует затрат энергии. В частности, нужно, чтобы энергия, произведенная в одном месте, могла быть использована в другом. Эту функцию в клетке осуществляет целая армия специализированных молекул. Пожалуй, самые важные из них — аденозин трифосфат (АТФ) и аденозин дифосфат (АДФ).

Обе молекулы устроены так: группа из атомов углерода, водорода и азота (она называется аденин) присоединена к молекуле рибозы (это сахар), и все это вместе крепится к хвосту из фосфатов. Из названий молекул понятно, что в хвосте АДФ содержится два фосфата, а в хвосте АТФ — три. Когда в клетке происходит химический процесс, например фотосинтез, образующаяся энергия идет на присоединение третьего фосфата к хвосту АДФ. Полученная молекула АТФ затем переносится в другие части клетки. Там запасенная энергия может быть использована в других химических процессах: она выделяется при отщеплении последнего фосфата от АТФ, в результате чего АТФ вновь превращается в АДФ.

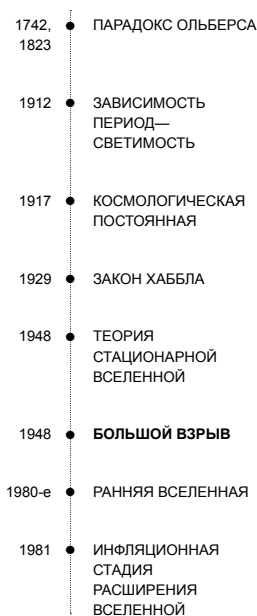
Как мы уже упоминали, существуют и другие молекулы, которые переносят энергию в клетке. Набор таких молекул чем-то напоминает разные варианты оплаты счетов. Вы можете выбрать наличные, банковский перевод, кредитную карту и т.д. — в зависимости от того, какой способ вам удобнее. Так же и клетка для поддержания своей жизнедеятельности может использовать АТФ (эквивалент наличных денег) или любую другую из большого набора более сложных молекул.

Большой взрыв

Вселенная возникла около 15 миллиардов лет назад в виде раскаленного сгустка сверхплотной материи, и с тех пор она расширяется и остывает

Астрономы употребляют термин «Большой взрыв» в двух взаимосвязанных значениях. С одной стороны, этим термином называют само событие, ознаменовавшее зарождение Вселенной около 15 миллиардов лет назад; с другой — весь сценарий ее развития с последующим расширением и остыванием.

Концепция Большого взрыва появилась с открытием в 1920-е годы закона Хаббла. Этот закон описывает простой формулой результаты наблюдений, согласно которым видимая Вселенная расширяется и галактики удаляются друг от друга. Нетрудно, следовательно, мысленно «прокрутить пленку назад» и представить, что в исходный момент, миллиарды лет назад, Вселенная пребывала в сверхплотном состоянии. Такая картина динамики развития Вселенной подтверждается двумя важными фактами.



Космический микроволновой фон

В 1964 году американские физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон обнаружили, что Вселенная наполнена электромагнитным излучением в микроволновом диапазоне частот. Последовавшие измерения показали, что это характерное классическое излучение черного тела, свойственное объектам с температурой около -270°C (3 K), т.е. всего на три градуса выше абсолютного нуля.

Простая аналогия поможет вам интерпретировать этот результат. Представьте, что вы сидите у камина и смотрите на угли. Пока огонь горит ярко, угли кажутся желтыми. По мере затухания пламени угли тускнеют до оранжевого цвета, затем до темно-красного. Когда огонь почти затух, угли перестают испускать видимое излучение, однако, поднеся к ним руку, вы почувствуете жар, что означает, что угли продолжают излучать энергию, но уже в инфракрасном диапазоне частот. Чем холоднее объект, тем ниже излучаемые им частоты и больше длина волн (см. закон Стефана—Больцмана). По сути, Пензиас и Уилсон определили температуру «космических углей» Вселенной после того, как она остывала на протяжении 15 миллиардов лет: ее фоновое излучение оказалось в диапазоне микроволновых радиочастот.

Исторически это открытие и предопределило выбор в пользу космологической теории Большого взрыва. Другие модели Вселенной (например, теория стационарной Вселенной) позволяют объяснить факт расширения Вселенной, но не наличие космического микроволнового фона.

Изобилие легких элементов

Ранняя Вселенная была очень горячей. Даже если протоны и нейтроны при столкновении объединялись и формировали более тяжелые ядра, время их существования было ничтожным, потому что уже при следующем столкновении с еще одной тяжелой и быстрой частицей ядро снова распадалось на элементарные компоненты. Выходит, что с момента Большого взрыва должно было пройти около трех минут,

прежде чем Вселенная остыла настолько, чтобы энергия соударений несколько смягчилась и элементарные частицы начали образовывать устойчивые ядра. В истории ранней Вселенной это ознаменовало открытие окна возможностей для образования ядер легких элементов. Все ядра, образовывавшиеся в первые три минуты, неизбежно распались; в дальнейшем начали появляться устойчивые ядра.

Однако это первичное образование ядер (так называемый *нуклеосинтез*) на ранней стадии расширения Вселенной продолжался очень недолго. Вскоре после первых трех минут частицы разлетелись так далеко друг от друга, что столкновения между ними стали крайне редкими, и это ознаменовало закрытие окна синтеза ядер. В этот краткий период первичного нуклеосинтеза в результате соударений протонов и нейтронов образовались дейтерий (тяжелый изотоп водорода с одним протоном и одним нейтроном в ядре), гелий-3 (два протона и нейтрон), гелий-4 (два протона и два нейтрона) и в незначительном количестве литий-7 (три протона и четыре нейтрона). Все более тяжелые элементы образуются позже — при формировании звезд (см. *эволюция звезд*).

Теория Большого взрыва позволяет определить температуру ранней Вселенной и частоту соударений частиц в ней. Как следствие, мы можем рассчитать соотношение числа различных ядер легких элементов на первичной стадии развития Вселенной. Сравнив эти прогнозы с реально наблюдаемым соотношением легких элементов (с поправкой на их образование в звездах), мы обнаруживаем впечатляющее соответствие между теорией и наблюдениями. По моему мнению, это лучшее подтверждение гипотезы Большого взрыва.

Помимо двух приведенных выше доказательств (микроволновой фон и соотношение легких элементов) недавние работы (см. *инфляционная стадия расширения Вселенной*) показали, что сплав космологии Большого взрыва и современной теории элементарных частиц разрешает многие кардинальные вопросы устройства Вселенной. Конечно, проблемы остаются: мы не можем объяснить саму первопричину возникновения Вселенной; не ясно нам и то, действовали ли в момент ее зарождения нынешние физические законы. Но убедительных аргументов в пользу теории Большого взрыва на сегодняшний день накоплено более чем достаточно.

АРНО АЛЛАН ПЕНЗИАС (Arno Allan Penzias, р. 1933) и **РОБЕРТ ВУДРО ВИЛЬСОН** (Robert Woodroe Wilson, р. 1936) — американские физики. Пензиас родился в Мюнхене, эмигрировал в США вместе с родителями в 1940 году. Уилсон родился в Хьюстоне (США). Оба приступили к работе в лабораториях Bell в Холмдейле, штат Нью-Джерси в начале 1960-х годов. В 1963 году перед ними была поставлена задача выяснить природу шумов в радиодиапазоне, создающих помехи для радиосвязи. Отметя

целый ряд вероятных причин (вплоть до загрязнения антенн голубиным пометом), они пришли к выводу, что источник стабильного фонового шума находится за пределами нашей Галактики. Иными словами, это был космический радиационный фон, предсказанный астрофизиками-теоретиками, включая Роберта Дика (Robert Dick), Джима Пиблза (Jim Peebles) и Георгия Гамова (George Gamov). За свое открытие Пензиас и Уилсон были удостоены в 1978 году Нобелевской премии по физике.

Бритва Оккама

Самое простое объяснение, скорее всего, и есть правильное

В XIV веке Уильям Оккам был одним из самых известных философов своего времени, но сегодня мы знаем его лишь как автора принципа простоты, который он сформулировал в одной из своих книг, предложив «сбривать» лишнюю сложность в аргументации. Этот принцип получил название «бритва Оккама»* и звучал приблизительно так: *«Non sunt entia multiplicanda praeter necessitatem»*, что означает: «Не нужно множить сущности без необходимости». Это предупреждение о том, что не надо прибегать к сложным объяснениям там, где вполне годятся простые.

Допустим, кто-то увидел яркий и необычный свет в ночном небе — неопознанный летающий объект. Конечно, можно предположить, что это огни космического корабля, управляемого инопланетянами. Однако такое объяснение требует множества излишних, по Оккаму, «допущений» — что существуют инопланетяне, что они умеют управлять межпланетными кораблями, что они проявляют интерес к планете Земля, что они не могут пролететь незамеченными (несмотря на свои передовые технологии) и т. п. Но для огней на небе существует множество других, более простых объяснений: что это был самолет, или планета Венера (причина номер один «появления» всяческих НЛО), или пресловутые погодные зонды и т. п. Каждое из этих объяснений требует относительно небольшого количества допущений. И хотя никто не может доказать, что свет исходил не от инопланетного космического корабля, большинство из нас (сознательно или бессознательно) воспользуется бритвой Оккама и отвергнет это предположение.

Должен сказать, что, хотя ученые часто говорят о бритве Оккама и даже используют ее, когда речь идет о таких псевдонаучных вещах, как НЛО, я не припомню, чтобы к ней прибегали во время серьезных научных дискуссий. Причина, я думаю, в том, что ученые чувствуют себя неуютно, когда им приходится использовать философские аргументы, а имея под рукой надежные экспериментальные данные, незачем прибегать к общим соображениям. Иными словами, выбирая между теориями А и В, ученый будет полагаться на наблюдения и экспериментальные данные, а не на философские принципы вроде бритвы Оккама. В этом отношении бритва Оккама подобна критерию красоты — ученым удобно, что они существуют, они даже не сомневаются в их правильности, но редко используют их в работе.

УИЛЬЯМ ОККАМ (William of Ockham, 1285–1349) — английский философ и богослов. Родился в Оккаме, деревушке в графстве Суррей. Стал монахом-францисканцем, изучал богословие в Оксфордском университете. В 1324 году был обвинен в ереси и оказался вовлечен в споры между орденом францисканцев и

Ватиканом. Уильям закончил свою жизнь в Баварии, написав трактаты о церкви и государстве, в которых выступал против абсолютной власти папы. Первоначально он ввел свою «бритву» для упрощения богословской аргументации.

* Любопытно, что в авторитетнейшем Словаре научных биографий в статье об Оккаме, занимающей несколько страниц, ни разу не упоминается его «бритва». — Прим. автора.

Броуновское движение

Малые частицы взвеси хаотично движутся под воздействием ударов молекул жидкости

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1827	• БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Во второй половине XX века в научных кругах разгорелась нешуточная дискуссия о природе атомов. На одной стороне выступали неопровержимые авторитеты, такие как Эрнст Мах (см. **УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**), который утверждал, что атомы — суть просто математические функции, удачно описывающие наблюдаемые физические явления и не имеющие под собой реальной физической основы. С другой стороны, ученые новой волны, в частности Людвиг Больцман (см. **ПОСТОЯННАЯ БОЛЬЦМАНА**), настаивали на том, что атомы представляют собой физические реалии. И ни одна из двух сторон не сознавала, что уже за десятки лет до начала их спора получены экспериментальные результаты, раз и навсегда решающие вопрос в пользу существования атомов как физической реальности, — правда, получены они в смежной с физикой дисциплине естествознания ботаником Робертом Броуном.

Еще летом 1827 года Броун, занимаясь изучением поведения цветочной пыльцы под микроскопом (он изучал водную взвесь пыльцы растения *Clarkia pulchella*), вдруг обнаружил, что отдельные споры совершают абсолютно хаотичные импульсные движения. Он доподлинно определил, что эти движения никак не связаны ни с завихрениями и токами воды, ни с ее испарением, после чего, описав характер движения частиц, честно расписался в собственном бессилии объяснить происхождение этого хаотичного движения. Однако, будучи дотошным экспериментатором, Броун установил, что подобное хаотичное движение свойственно любым микроскопическим частицам, — будь то пыльца растений, взвеси минералов или вообще любая измельченная субстанция.

Лишь в 1905 году не кто иной, как Альберт Эйнштейн, впервые осознал, что это таинственное, на первый взгляд, явление служит наилучшим экспериментальным подтверждением правоты атомной теории строения вещества. Он объяснил его примерно так: взвешенная в воде спора подвергается постоянной «бомбардировке» со стороны хаотично движущихся молекул воды. В среднем молекулы воздействуют на нее со всех сторон с равной интенсивностью и через равные промежутки времени. Однако, как бы ни мала была спора, в силу чисто случайных отклонений сначала она получает импульс со стороны молекулы, ударившей ее с одной стороны, затем — со стороны молекулы, ударившей ее с другой и т.д. В результате усреднения таких соударений получается, что в какой-то момент частица «дергается» в одну сторону, затем, если с другой стороны ее «толкнуло» больше молекул — в другую и т.д. Используя законы математической статистики и молекулярно-кинетической теории газов, Эйнштейн вывел уравнение, описывающее зависимость среднеквадратичного смещения броуновской частицы от макроскопических показателей. (Интересный факт: в одном из томов немецкого журнала «Анналы физики» (*Annalen der Physik*) за 1905 год были опубликованы три статьи Эйнштейна: статья с теоретическим разъяснением броуновского движения, статья об основах специальной теории относитель-

ности и, наконец, статья с описанием теории фотоэлектрического эффекта. Именно за последнюю Альберт Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике в 1921 году.)

В 1908 году французский физик Жан Батист Перрен (Jean-Baptiste Perrin, 1870–1942) провел блестящую серию опытов, подтвердивших правильность эйнштейновского объяснения феномена броуновского движения. Стало окончательно ясно, что наблюдаемое «хаотичное» движение броуновских частиц — следствие межмолекулярных соударений. Поскольку «полезные математические условности» (по Маху) не могут привести к наблюдаемым и совершенно реальным перемещениям физических частиц, стало окончательно ясно, что спор о реальности атомов окончен: они существуют в природе. В качестве «призовой игры» Перрену досталась выведенная Эйнштейном формула, которая позволила французу проанализировать и оценить среднее число атомов и/или молекул, соударяющихся с взвешенной в жидкости частицей за заданный промежуток времени и через этот показатель рассчитать молярные числа различных жидкостей. В основе этой идеи лежал тот факт, что в каждый данный момент времени ускорение взвешенной частицы зависит от числа соударений с молекулами среды (см. законы механики Ньютона), а значит, и от числа молекул в единице объема жидкости. А это не что иное, как *число Авогадро* (см. закон Авогадро) — одна из фундаментальных постоянных, определяющих строение нашего мира.

РОБЕРТ БРОУН (Robert Brown, 1773–1858) — шотландский ботаник. Родился в Монтроузе (Montrose) в семье священника. Получил медицинское образование в Эдинбургском университете, работал военнопольным хирургом. В 1798 году, познакомившись с Джозефом Бэнксом (Joseph Banks, 1743–1820), выдающимся ботаником своего времени, настолько заинтересовался этой наукой, что решил в корне изменить

свою карьеру и достиг в ботанике высот, которым его учитель позавидовал бы. В качестве натуралиста Броун плавал к берегам Австралии. Со временем занял пост главы ботанического отдела Британского музея. Открыл, идентифицировал, классифицировал и изучил морфологию множества растений. Однако прославился прежде всего благодаря открытию им броуновского движения.

Великая теорема Ферма

Для целых чисел n больше 2 уравнение $x^n + y^n = z^n$ не имеет ненулевых решений в натуральных числах

1630 • ВЕЛИКАЯ ТЕОРЕМА ФЕРМА



Вы, наверное, помните со школьных времен *теорему Пифагора*: квадрат гипотенузы прямоугольного треугольника равен сумме квадратов катетов. Возможно, вы помните и классический прямоугольный треугольник со сторонами, длины которых соотносятся как 3 : 4 : 5. Для него теорема Пифагора выглядит так:

$$3^2 + 4^2 = 5^2.$$

Это пример решения обобщенного уравнения Пифагора в ненулевых целых числах при $n = 2$. Великая (ее также называют «Большой теоремой Ферма» или «Последней теоремой Ферма») состоит в утверждении, что при значениях $n > 2$ уравнения вида $x^n + y^n = z^n$ не имеют ненулевых решений в натуральных числах.

История Великой теоремы Ферма весьма занимательна и поучительна, и не только для математиков. Пьер де Ферма внес вклад в развитие самых различных областей математики, однако основная часть его научного наследия была опубликована лишь посмертно. Дело в том, что математика для Ферма была чем-то вроде хобби, а не профессиональным занятием. Он переписывался с ведущими математиками своего времени, однако публиковать свои работы не стремился. Научные труды Ферма в основном обнаружены в форме частной переписки и обрывочных записей, часто сделанных на полях различных книг. Именно на полях (второго тома древнегреческой «Арифметики» Диофанта. — *Прим. переводчика*) вскоре после смерти математика потомки и обнаружили формулировку знаменитой теоремы и приписку:

«Я нашел этому поистине чудесное доказательство, но поля эти для него слишком узки».

Увы, судя по всему, Ферма так и не удосужился записать найденное им «чудесное доказательство», и потомки безуспешно искали его три с лишним века. Из всего разрозненного научного наследия Ферма, содержащего немало удивительных утверждений, именно Великая теорема упорно не поддавалась решению.

Кто только не брался за доказательство Великой теоремы Ферма — все тщетно! Другой великий французский математик Рене Декарт (René Descartes, 1596–1650) называл Ферма «хвастуном», а английский математик Джон Уоллис (John Wallis, 1616–1703) — и вовсе «чертовым французом». Сам Ферма, правда, все-таки оставил после себя доказательство своей теоремы для случая $n = 4$. С доказательством для $n = 3$ справился великий швейцарско-русский математик XVIII века Леонард Эйлер (1707–83), после чего, не сумев найти доказательств для $n > 4$, в шутку предложил устроить обыск в доме Ферма, чтобы найти ключ к утерянному доказательству. В XIX веке новые методы теории чисел позволили доказать утверждение для многих целых чисел в пределах 200, однако опять же не для всех.

В 1908 году была учреждена премия в размере 100 000 немецких марок за решение этой задачи. Призовой фонд был завещан гер-

манским промышленником Паулем Вольфскем (Paul Wolfskehl), который, согласно преданию, собирался покончить жизнь самоубийством, но так увлекся Великой теоремой Ферма, что передумал умирать. С появлением арифмометров, а затем и компьютеров планка значений n стала подниматься все выше — до 617 к началу Второй мировой войны, до 4001 в 1954 году, до 125 000 в 1976 году. В конце XX столетия мощнейшие компьютеры военных лабораторий в Лос-Аламосе (Нью-Мексико, США) были запрограммированы на решение задачи Ферма в фоновом режиме (по аналогии с режимом экранной заставки персонального компьютера). Таким образом удалось показать, что теорема верна для невероятно больших значений x , y , z и n , но строгим доказательством это послужить не могло, поскольку любые следующие значения n или тройки натуральных чисел могли опровергнуть теорему в целом.

Наконец в 1994 году английский математик Эндрю Джон Уайлс (Andrew John Wiles, р. 1953), работая в Принстоне, опубликовал доказательство Великой теоремы Ферма, которое после некоторых доработок было признано исчерпывающим. Доказательство заняло более ста журнальных страниц и основывалось на использовании современного аппарата высшей математики, который в эпоху Ферма разработан не был. Так что же тогда имел в виду Ферма, оставляя на полях книги сообщение о том, что доказательство им найдено? Большинство математиков, с которыми я беседовал на эту тему, указывали, что за века накопилось более чем достаточно некорректных доказательств Великой теоремы Ферма, и что, скорее всего, сам Ферма нашел подобное доказательство, однако не сумел усмотреть в нем ошибку. Впрочем, не исключено, что все-таки имеется какое-то короткое и изящное доказательство Великой теоремы Ферма, которое никто до сих пор не нашел. С уверенностью можно утверждать лишь одно: сегодня мы точно знаем, что теорема верна. Большинство математиков, я думаю, безоговорочно согласятся с Эндрю Уайлсом, который заметил по поводу своего доказательства: «Теперь наконец мой ум спокоен».

ПЬЕР ДЕ ФЕРМА (Pierre de Fermat, 1601–65) — французский математик и юрист. Родился в Бомон-де-Ломань (Beaumont-de-Lomagne). Изучал право, работал судьей. В свободное время увлекался математикой и внес значительный вклад в развитие различных отраслей этой науки, за что получил прозвище «король любителей». Помимо теории чисел (так называется область математики, к которой относится Великая теорема

Ферма) еще до Ньютона разработал многие основы дифференциального исчисления, а совместно с Блезом Паскалем (Blaise Pascal, 1623–62) основал теорию вероятностей. В оптике сформулировал принцип Ферма, согласно которому преломление света на границе двух сред обусловлено различной скоростью распространения света в различных средах.

Вечный двигатель

*Можно
построить
двигатель,
который будет
работать вечно
или еще лучше,
который будет
неиссякаемым
источником
энергии*

Свойственное человеческой натуре упрямство не дает людям смириться с непреложностью законов природы. Самым ярким свидетельством этому служит настойчивая вера в то, что можно построить вечный двигатель — двигатель, который будет работать бесконечно долгое время без какой-либо внешней помощи. Как ученый, занимающийся еще и общественной деятельностью, я каждый год получаю хотя бы одно письмо, уведомляющее о проекте создания такого двигателя. Иногда авторы писем предлагают мне проценты от доходов, которые можно будет получить от такого двигателя, если я обращу на него внимание соответствующих организаций.

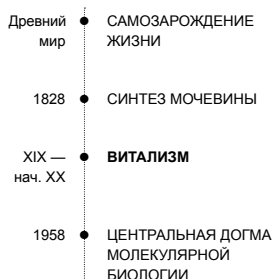
Существует два типа вечных двигателей — те, что нарушают и первое, и второе начала термодинамики, и те, что нарушают только второе из них. Вот пример двигателя первого типа: металлический шар, расположенный между северным и южным полюсами магнита. Тяжелый металлический экран заслоняет шар от северного полюса, поэтому, если шар отпустить, он начнет двигаться к южному полюсу. При приближении его к южному полюсу металлический экран у северного полюса поднимается, в то время как другой экран между шаром и южным полюсом опускается. Шар меняет направление движения, начиная катиться обратно к северному полюсу. Точно в нужный момент экран у северного полюса падает, и шар начинает катиться обратно к южному полюсу. Как предположительно должен работать двигатель? Энергия извлекается из катящегося шара, и, если экраны расположены на концах такого балансира, на их поднимание и опускание энергия не тратится.

Недостаток этого двигателя в том, что если металлический экран движется в магнитном поле, то, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, в металле обязательно возникнет электрический ток. Это означает, что будет происходить утечка энергии из системы вследствие работы закона Ома. Легко видеть, что, если магниты достаточно сильны, чтобы заставить шар двигаться, они будут также достаточно сильны, чтобы вызывать большие потери сопротивления в металлических экранах при их опускании, поэтому двигатель, который на бумаге выглядит столь привлекательно, просто не будет работать.

Некоторые изобретатели предлагали более сложные вечные двигатели, и требовалось более тонкое понимание вопроса, чтобы увидеть изъяны в их конструкции. Но изъяны находятся всегда, вот почему ни одного такого двигателя мы не видели в работе. В середине XX века этот факт был признан Патентным бюро США. Измученное потоком патентных заявок на вечные двигатели, бюро объявило, что в будущем любая такая заявка должна сопровождаться работающей моделью. С тех пор заявители его больше не беспокоили.

Витализм

Существует особая сила, благодаря которой в биологических системах образуются молекулы



В начале XIX века в развитии химии был достигнут большой прогресс. Переосмысленная атомная теория строения вещества помогла понять сложный состав большинства найденных в природе веществ. Оставалась одна проблема — казалось, что многие молекулы существуют только в биологических системах. Поэтому химики заговорили о так называемой «жизненной силе», присущей только живым организмам. Считалось, что благодаря этой силе возникают молекулы, которые не могут быть воспроизведены в неживой природе.

Типичным примером таких *органических молекул* может служить вещество под названием мочевины. Молекулы мочевины имеют химическую формулу $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. С их помощью у большинства животных происходит выделение неусвоенного азота, поступившего с пищей. К примеру, человеческая моча содержит 2–5% мочевины.

В 1828 году Фридрих Вёлер совершил важный прорыв, синтезировав мочевины в лаборатории из стандартных химикатов. Его открытие было убедительным доказательством того, что для создания органических молекул не требуется никакой жизненной силы и что они образуются по тем же законам, что и любые другие молекулы. После работ Вёлера понятие жизненной силы полностью исчезло со сцены.

С юмором (наличие которого обычно не предполагают в немецких ученых-академистах) Вёлер в письме другу рассказал о своем открытии следующими словами: «Я больше не могу, образно говоря, сдерживать свою химическую мочу, и должен сообщить, что я произвожу мочевины без помощи почки, человеческой или собачьей».

В действительности же идеи витализма (представления о жизненной силе) не так-то легко похоронить. Чтобы покончить с ними раз и навсегда, недостаточно только привести очевидные факты. Так, многие идеи «нового времени» являются почти не замаскированным витализмом. В 1930-е годы нечто похожее на витализм, но в более respectable виде, обозначилось в дискуссиях по поводу открытия очень сложных биологических молекул (их примером служит ДНК). Утверждалось, что законы, управляющие поведением атомов в сложных и простых молекулах, могут различаться. Поскольку в то время ученые еще мало работали со сложными молекулами, эту гипотезу нельзя было опровергнуть. Позже выяснилось, что это утверждение неверно: атомы водорода в молекуле ДНК подчиняются тем же законам, что и атомы водорода в любых других молекулах. По крайней мере, в этом случае оказалось, что природа устроена просто.

Генетический код

Три пары оснований молекулы ДНК кодируют одну аминокислоту в белке



Сегодня ни для кого не секрет, что программа жизнедеятельности всех живых организмов записана на молекуле ДНК. Проще всего представить молекулу ДНК в виде длинной лестницы. Вертикальные стойки этой лестницы состоят из молекул сахара, кислорода и фосфора. Вся важная рабочая информация в молекуле записана на перекладинах лестницы — они состоят из двух молекул, каждая из которых крепится к одной из вертикальных стоек. Эти молекулы — азотистые основания — называются аденин, гуанин, тимин и цитозин, но обычно их обозначают просто буквами А, Г, Т и Ц. Форма этих молекул позволяет им образовывать связи — законченные ступеньки — лишь определенного типа. Это связи между основаниями А и Т и между основаниями Г и Ц (образованную таким образом пару называют «парой оснований»). Других типов связи в молекуле ДНК быть не может.

Спускаясь по ступенькам вдоль одной цепи молекулы ДНК, вы получите последовательность оснований. Именно это сообщение в виде последовательности оснований и определяет поток химических реакций в клетке и, следовательно, особенности организма, обладающего данной ДНК. Согласно центральной догме молекулярной биологии, на молекуле ДНК закодирована информация о белках, которые, в свою очередь, выступая в роли ферментов (см. КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ), регулируют все химические реакции в живых организмах.

Строгое соответствие между последовательностью пар оснований в молекуле ДНК и последовательностью аминокислот, составляющих белковые ферменты, называется генетическим кодом. Генетический код был расшифрован вскоре после открытия двуспиральной структуры ДНК. Было известно, что недавно открытая молекула *информационной*, или *матричной* РНК (иРНК, или мРНК), несет информацию, записанную на ДНК. Биохимики Маршалл Уоррен Ниренберг (Marshall W. Nirenberg) и Дж. Генрих Маттеи (J. Heinrich Matthaei) из Национального института здравоохранения в городке Бетезда под Вашингтоном, округ Колумбия, поставили первые эксперименты, которые привели к разгадке генетического кода.

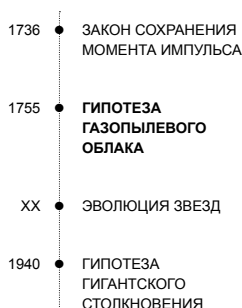
Они начали с того, что синтезировали искусственные молекулы иРНК, состоявшие только из повторяющегося азотистого основания урацила (который является аналогом тимина, Т, и образует связи только с аденином, А, из молекулы ДНК). Они добавляли эти иРНК в тестовые пробирки со смесью аминокислот, причем в каждой пробирке лишь одна из аминокислот была помечена радиоактивной меткой. Исследователи обнаружили, что искусственно синтезированная ими иРНК инициировала образование белка лишь в одной пробирке, где находилась меченая аминокислота фенилаланин. Так они установили, что последовательность —У—У—У— на молекуле иРНК (и, следовательно, эквивалентную ей последовательность —А—А—А— на молекуле ДНК) кодирует белок, состоящий только из аминокис-

лоты фенилаланина. Это было первым шагом к расшифровке генетического кода.

Сегодня известно, что три пары оснований молекулы ДНК (такой триплет получил название *кодон*) кодируют одну аминокислоту в белке. Выполняя эксперименты, аналогичные описанному выше, генетики в конце концов расшифровали весь генетический код, в котором каждому из 64 возможных кодонов соответствует определенная аминокислота.

Гипотеза газопылевого облака

Солнечная система образовалась в результате сжатия газопылевого облака



Гипотезы о том, как сформировалась Солнечная система, относятся к области *космогонии* — одного из старейших разделов теоретической астрономии. Первым такую гипотезу, исходя из общих умозрительных соображений, выдвинул немецкий философ Иммануил Кант (Immanuel Kant, 1724–1804), однако по-настоящему научное развитие она получила в трудах Пьера Симона Лапласа, первым предпринявшего попытку объяснить механику образования Солнечной системы в рамках закона всемирного тяготения Ньютона.

В начале сценария предполагается наличие газопылевой туманности. По чистой случайности отдельные области этой туманности оказываются плотнее окружающего их вещества и, следовательно, обладают большей массой. Тут в действие вступает сила тяготения, и окружающая материя начинает устремляться к этим центрам повышенной плотности, масса которых все возрастает. В конечном итоге материя в области каждого такого центра уплотняется настолько, что в результате гравитационного коллапса в каждой такой точке образуется звезда. Сегодня астрономы наблюдают в нашей Галактике достаточно много подобных центров формирования звезд.

В целом, остаточное газопылевое облако вокруг формирующейся звезды ведет себя хаотично, и частицы материи движутся внутри него во всех направлениях. И тут, опять же по чистой случайности, может оказаться, что большая часть газа и пыли оказываются «закрученными» в одну сторону. Соответственно, газопылевое облако вокруг формирующейся звезды приобретает чистый угловой момент количества движения. В соответствии с законом сохранения момента импульса дальнейшее сжатие (*конденсация*) облака в направлении центра приводит к увеличению угловой скорости вращения материи вокруг центральной части. В итоге после завершения стадии коллапса газопылевого облака, подавляющая часть его массы оказывается сосредоточенной в центре (где впоследствии сформируется звезда), а незначительная периферийная масса облака оказывается распределенной в экваториальной плоскости вращения протозвезды вокруг собственной оси. Происходит это в результате «сплющивания» остатков распыленного раскрученного вещества под действием центробежной силы. Из вещества этого остаточного диска в дальнейшем формируются планеты.

В окружающем протозвезду остаточном газопылевом диске в результате хаотичных соударений частиц также начинают формироваться сгустки материи, которые в свою очередь начинают служить центрами притяжения для распыленного вокруг вещества. Вокруг них сначала формируются *протопланеты*, которые также выступают в роли источников гравитационного притяжения, в результате чего околосолнечное вещество расслаивается в кольца, а затем собирается в сгустки на определенных орбитах, из которых в конечном итоге и формируются планеты. Типоразмеры планет зависят от расстояния до новорожденной звезды. На небольшом

удалении от нее температуры из-за начавшейся внутри звезды термоядерной реакции (см. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД) оказываются слишком высокими, и все легкоплавкие летучие вещества в основном просто испаряются в пространство, не имея возможности сконденсироваться в жидкое или твердое состояние. В результате ближние планеты *земного типа* оказываются небольшими и относительно плотными из-за преобладания в их составе тяжелых химических элементов — в Солнечной системе к этой категории относятся Меркурий, Венера, Земля и Марс.

Вообще, этот период в эволюции Солнечной системы выглядит несколько странно, если исходить из основных современных гипотез и результатов компьютерного моделирования, полученных согласно этим гипотезам. С одной стороны, накопление вещества вокруг ядер-зародышей современных планет действительно должно было происходить в соответствии с вышеописанной моделью; с другой — такое моделирование предсказывает образование еще 10–12 планет размером с Марс. Сегодня выдвигается гипотеза, что эти протопланеты попросту рассыпались в результате затяжной партии в небесный бильярд, в которую они оказались втянутыми, после чего часть их вещества осела на «успешно» сформировавшихся планетах, избежавших разрушения в результате череды соударений, а часть вещества была буквально вышвырнута на периферию Солнечной системы под воздействием мощного гравитационного поля Юпитера. Таким образом, в нашей Солнечной системе, скорее всего, до сих пор кружится, по большей части на большом удалении от Солнца, значительная масса протопланетных тел.

Луна — естественный спутник Земли — часто также классифицируется астрономами как самостоятельная планета земного типа, однако последние данные свидетельствуют, скорее, в пользу гипотезы ГИГАНТСКОГО СТОЛКНОВЕНИЯ, согласно которой Луна сформировалась позже других планет земного пояса в результате падения на раннюю Землю еще одной планеты размером с Марс и последующего выброса вещества на околоземную орбиту. Вообще, подобные столкновения на ранней стадии формирования Солнечной системы были явлением распространенным. Это, кстати, объясняет и еще одну загадку Солнечной системы. Угловые скорости вращения планет вокруг собственной оси (иными словами, продолжительность солнечных «суток» на планетах) варьируют в весьма широких пределах. В случае Венеры наблюдается уникальное явление *ретроградного суточного вращения*: эта планета вращается в противоположную по сравнению со всеми прочими планетами сторону. Такое отличие трудно увязать с размеренным, упорядоченным формированием планетной системы. Однако, если предположить, что итоговое собственное вращение планеты вокруг оси сложилось в результате суммы импульсов, полученных ею в результате мощных соударений с другими протопланетами, все становится на свои места.

На большем удалении от молодого Солнца на ранней стадии формирования планетной системы было не так жарко, и там сформировались планеты иного типа. Достаточно низкие температуры не препятствовали конденсации и кристаллизации относительно легких химических элементов, в результате чего сформировались сверхмассивные твердокристаллические ядра из скальных пород и льда. Обладая мощным гравитационным полем, они захватили из окрестных газопылевых скоплений значительные объемы легких и летучих веществ — гелия и водорода, образовавших их океаны и/или атмосферу, — и стали еще массивнее (планеты земного типа с их слабым гравитационным полем на это оказались не способны). К категории так называемых *газовых гигантов* нашей Солнечной системы относятся Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. При огромных по сравнению с планетами земного типа размерах эти планеты характеризуются очень низкой средней плотностью вещества. Плотность Сатурна, например, вообще ниже плотности воды, так что, если бы нашелся океан сопоставимых с этой планетой размеров, Сатурн плавал бы в нем, как поплавочек. Тем не менее, согласно современным гипотезам, внутри этих газожидкостных гигантов все-таки есть достаточно массивное плотное ядро из твердого вещества, напоминающее собой планету земного типа и образовавшееся аналогичным образом.

Особый случай представляет собой Плутон, — последняя из открытых «настоящих» планет Солнечной системы. По размеру он сопоставим с планетами земной группы и представляет собой, по сути, огромную глыбу льда летучих элементов. Долгое время ученые считали Плутон не то курьезным недоразумением, не то захваченным Солнечной системой инородным телом. Однако открытие в 1990-х годах так называемого «пояса Койпера», подобного поясу астероидов, — еще одного пояса малых планет, многие из которых движутся по очень вытянутому, «неправильным» орбитам, — заставило астрофизиков пересмотреть свои взгляды. Расположенный за орбитой Нептуна пояс Койпера — основной «поставщик» комет, залетающих в окрестности Солнца. Согласно современным взглядам, Плутон скорее всего представляет собой все-таки самое крупное небесное тело пояса Койпера — зародыш так и не сформировавшейся крупной планеты, вращающийся среди миллионов более мелких «отбросов» Солнечной системы.

Такая картина формирования планетной системы хорошо объясняет многие наблюдаемые характеристики Солнечной системы: небольшие размеры, тяжелый элементный состав и конденсированное состояние внутренних планет; большие размеры, легкий элементный состав и жидкостно-газообразное состояние внешних планет; единое направление движения планет по орбитам вокруг Солнца. В 1995 году астрономами были получены первые доказательства существования планетных систем у других звезд и выяснены некоторые их характеристики (это удалось сделать по замерам циклических отклонений звезд от их среднестатистичес-

кого положения в пространстве, вызванных силой гравитационного притяжения обращающихся вокруг них планет). Благодаря этому сегодня мы точно знаем о том, что за пределами Солнечной системы планет существует гораздо больше, чем внутри нее: на момент написания этой статьи открыто 83 планеты в 71 звездной системе (теперь, когда вы читаете эти строки, число открытых планет еще возросло). Однако лишь одна из открытых планетных систем похожа на нашу Солнечную систему. Во всех остальных, судя по всему, планеты движутся вокруг своей звезды по сильно вытянутым эллиптическим траекториям, в то время как в нашей Солнечной системе орбиты всех планет, за исключением Плутона, приближаются к круговым. Кроме того, в большинстве этих систем все планеты обращаются вокруг звезд на расстояниях, не превышающих радиус орбиты Меркурия. У некоторых планет период обращения вокруг их солнца и вовсе составляет всего несколько земных суток.

Кроме планетных систем астрономам на сегодняшний день удалось открыть целый ряд *околозвездных дисков* — сплюснутых газопылевых облаков вокруг молодых звезд. А это служит хорошим подтверждением гипотезы образования планетных систем из газопылевых облаков, пусть даже планетных систем, подобных нашей, открыты лишь считанные единицы.



Пьер Симон ЛАПЛАС (Pierre Simon Marquis de Laplace, 1749–1827) — французский математик, физик и астроном. Родился в семье фермера в местечке Бомон-ан-Ож (Beaumont-en-Auge). Благодаря рано проявленным способностям и благоволению крупного помещика дворянина, у которого отец будущего ученого арендовал землю, окончил местную школу Ордена монахов-бенедиктинцев, после чего получил возможность продолжить образование в университете г. Кан (Caen). В дальнейшем ученый внес огромный вклад в развитие математической физики в рамках классической механики Ньютона, применил закон всемирного тяготения Ньютона к теории строения Солнечной системы. Вскоре после Великой французской революции был

исключен из Академии «за недостаток республиканской добродетели и ненависти к королям» и в 1793 году бежал с семьей из Парижа и, находясь, фактически, на нелегальном положении, написал научно-популярную книгу «Изложение системы мира», где и сформулировал свою гипотезу происхождения Солнечной системы. По завершении периода якобинского террора, вернувшись в Париж, опубликовал монументальный многотомный труд «Трактат о небесной механике» (*Traité de mécanique céleste*, 1796), заложивший основы нового раздела физической науки, который с тех пор так и именуется «небесной механикой». При Наполеоне занимал видные государственные посты, вплоть до поста министра внутренних дел.

Гипотеза Гея

Земля представляет собой единый живой организм



Гея — греческая богиня, которая вывела мир из хаоса. Гипотезу Геи выдвинул английский ученый Джеймс Лавлок, работавший в НАСА в начале 1960-х годов, в период, когда только начинались поиски жизни в Солнечной системе. Исходя из того факта, что земная атмосфера значительно отличается от атмосфер безжизненных планет, Лавлок утверждал, что наша планета и ее биосфера представляют собой некий живой организм. Он говорил: «Земля — больше, чем просто дом, это живой организм, и мы являемся его частью».

Как относиться к этой гипотезе, непонятно. Ведь в ней нет четко определенных выводов, которые можно было бы проверить экспериментально, а такая проверка требуется любой научной теории. Некоторые (в том числе и автор этих строк) считают, что эту гипотезу лучше рассматривать как литературную метафору — возможно, полезную при рассуждении о планетах, но недостаточно точную. Но у нее есть и свои приверженцы среди серьезных ученых (например, американский биолог Линн Маргулис).

Сторонники гипотезы отмечают, что она предполагает наличие механизма обратной связи со стороны живых организмов, благодаря чему планета остается пригодной для жизни. Приводится такой пример: повышение содержания углекислого газа в атмосфере приводит к усилению роста растений, что в свою очередь снижает уровень углекислого газа. Однако эти механизмы обратной связи хорошо известны и для их объяснения не требуется гипотеза Гея.

Значение же гипотезы состоит в том, что она способствовала развитию системного подхода к изучению Земли, при котором планета рассматривается как единое целое, а не как набор отдельных частей. Действительно, развитие наук о Земле в последние десятилетия XX века стимулировалось пониманием того, что различные части планеты — например, горные породы или океаны — нельзя исследовать в отрыве друг от друга. Именно поэтому соответствующие факультеты в американских университетах стали чаще называться факультетами науки о земных системах, а не геологическими, как раньше. Во многом эта перемена была вызвана прогрессом в развитии вычислительной техники, но и гипотеза Гея также внесла свой вклад.

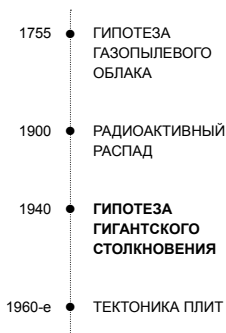


ДЖЕЙМС ЭФРАИМ ЛАВЛОК (James Ephraim Lovelock, р. 1919) — английский ученый, родился в Лондоне. После окончания учебы работал в Национальном институте медицинских исследований. Затем, недолгое время проработав в НАСА, в 1964 году Лавлок объявил себя независимым ученым, свободным от

любых ограничений, связанных с влиянием международных компаний на направление научных исследований. Два года спустя обнаружил присутствие в атмосфере хлорфторуглеродов (ХФУ) (см. ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ). Лавлок стал широко известен благодаря гипотезе, впервые выдвинутой им в книге «Гея» (1979).

Гипотеза гигантского столкно- вения

Возможно, Луна образовалась в результате столкновения Земли с небесным телом, масса которого превышала массу Марса



Среди всех внутренних планет Солнечной системы Земля единственная имеет крупный спутник. Происхождение Луны — одна из древнейших загадок астрономии, однако многие планетологи сегодня считают ее наконец-то решенной. Сначала вопрос стоял следующим образом: почему средняя плотность лунного вещества в 1,5 с лишним раза ниже средней плотности земного при практически одинаковом химическом составе того и другого (3,6 против 5,5 ед. плотности воды)? После того как был получен ответ, согласно которому причина такого несоответствия заключается в отсутствии у Луны в отличие от Земли плотного раскаленного железного ядра, вопрос встал по-другому: почему столь схожие по составу небесные тела — Земля и Луна — имеют столь различную внутреннюю структуру?

Согласно гипотезе газопылевого облака, планетные тела образуются из околозвездного вещества, распределенного в плоскости *околосолнечной дисковой туманности*, и, как следствие, должны обладать приблизительно одним и тем же химическим составом. Первоначальные теории происхождения Луны можно условно подразделить на две категории: *теории захвата* и *приливные теории*.

Первая и самая древняя из них подразумевала, что Луна представляет собой независимо сформировавшуюся в Солнечной системе планету, оказавшуюся в непосредственной близости от Земли и захваченную ею в качестве спутника. Однако эта теория не выдерживает сегодня никакой критики, поскольку динамика процесса захвата, в результате которого тело, двигавшееся по независимой гелиоцентрической орбите вокруг Солнца, могло бы перейти на геоцентрическую и практически круговую орбиту вокруг Земли, противоречит всем известным физическим законам.

Конкурирующая приливная теория предполагала, что Земля в далеком прошлом вращалась вокруг своей оси значительно быстрее, чем сегодня, в результате чего на поверхности планеты возбуждались мощные центробежные силы, под воздействием которых (согласно большинству приливных теорий, их действие было усугублено гравитационным воздействием пролетавшего в непосредственной близости от Земли крупного небесного тела) от нашей планеты оторвался крупный кусок, который и оказался, в конечном итоге, на стационарной орбите вокруг Земли. Выдвигались даже гипотезы, будто Тихоокеанская впадина на поверхности Земли представляет собой «послеродовую травму», понесенную нашей планетой в результате рождения Луны.

Исследования химического состава лунного вещества, однако, опровергают обе вышеописанные гипотезы. С одной стороны, Луна слишком близка к Земле по своему химическому составу, чтобы сформироваться вдали от нашей планеты; с другой — недостаточно близка, чтобы быть ее осколком.

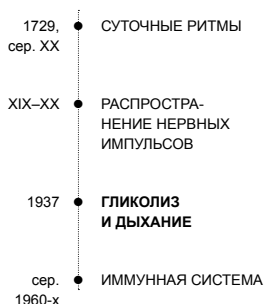
В последние десятилетия XX века, однако, появилась и еще одна гипотеза, завоевавшая достаточное признание в научных

кругах. На раннем этапе формирования Солнечной системы Земля и другие недавно сформировавшиеся планетные тела, будучи, по сути, еще практически целиком жидкими и состоящими из магмы современных геологических пород, подвергались интенсивной бомбардировке множеством более мелких новообразовавшихся тел размером с современные крупные астероиды. Кинетическая энергия падающих на Землю тел была столь высока, что, преобразуясь в тепловую, она поддерживала земное вещество в расплавленном состоянии, в результате чего и происходила его дальнейшая *дифференциация*: тяжелые железо и никель тонули в направлении центра Земли и формировали ее ядро, а более легкие вещества, шлаки и соли всплывали, образуя мантию и прообраз горных пород будущей земной коры (см. тектоника плит). Именно на этой стадии или несколько позже, пока земная кора еще до конца не оформилась, в Землю врезалось небесное тело размером не меньше Марса. В результате этого катаклизма на околоземную орбиту оказалось буквально выплеснуто значительное количество вещества земной мантии и коры, из которых вскоре и сформировалась Луна.

Эта теория, получившая название гипотезы *гигантского столкновения* (а неформально — *гипотезы большого выплеска*), объясняет и низкую плотность лунного вещества, и близость его химического состава к химическому составу вещества земной коры и мантии, поскольку земное ядро гигантским столкновением затронуто не было и на орбиту не попало. Решающие доводы в пользу этой гипотезы поступили на Землю вместе с образцами лунного грунта, доставленными американскими астронавтами из лунных экспедиций на борту «Аполлонов». В результате анализа соотношения различных изотопов кислорода (см. радиоактивный распад) в них удалось установить точное совпадение возраста лунных и земных минералов.

Гликолиз и дыхание

В основе метаболизма животных и других организмов лежат химические процессы извлечения энергии, накопленной углеводами



В процессе фотосинтеза солнечная энергия запасается в химических связях углеводных молекул, из которых наиболее важную роль играет шестиуглеродный сахар — глюкоза. После того как другие живые организмы используют эти молекулы в пищу, запасенная энергия выделяется и используется для метаболизма. Это происходит во время процессов гликолиза и дыхания. Весь химический процесс можно коротко описать так:



Чтобы лучше понять эти процессы, представьте себе, что организм «сжигает» углеводы, чтобы получить энергию.

Термин «гликолиз» образован при соединении слова *лизис*, означающего «расщепление», со словом *глюкоза*. Как следует из названия, процесс начинается с химического извлечения энергии посредством расщепления молекулы глюкозы на две части, каждая из которых содержит три атома углерода. В процессе гликолиза из каждой молекулы глюкозы получается две трехуглеродные молекулы пировиноградной кислоты. Кроме того, энергия глюкозы запасается в молекулах (см. биологические молекулы), которые мы называем «энергетической валютой» клетки, — двух молекулах АТФ и двух молекулах НАДФ. Таким образом, уже на первой стадии гликолиза энергия высвобождается в такой форме, которая может быть использована клетками организма.

Дальнейший ход событий зависит от наличия или отсутствия кислорода в среде. При отсутствии кислорода пировиноградная кислота превращается в другие органические молекулы в ходе так называемых *анаэробных* процессов. Например, в клетках дрожжей пировиноградная кислота превращается в этанол. У животных, к которым относится и человек, при истощении запасов кислорода в мышцах пировиноградная кислота превращается в молочную кислоту — именно она вызывает так хорошо знакомое всем нам ощущение мышечной скованности после тяжелой физической нагрузки.

При наличии же кислорода энергия выделяется в процессе *аэробного дыхания*, когда пировиноградная кислота расщепляется на молекулы углекислого газа и воды с одновременным высвобождением оставшейся энергии, запасенной в углеводной молекуле. Дыхание происходит в специализированной клеточной органелле — *митохондрии*. Вначале отщепляется один углеродный атом пировиноградной кислоты. При этом образуется углекислый газ, энергия (она запасается в одной молекуле НАДФ) и двухуглеродная молекула — ацетильная группа. Затем реакционная цепь поступает в метаболический координационный центр клетки — *цикл Кребса*.

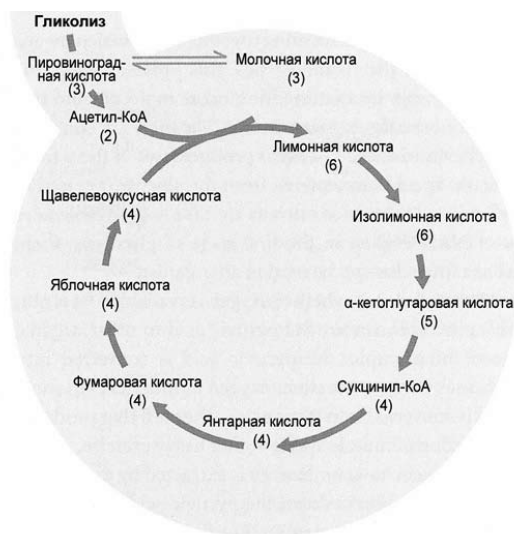
Цикл Кребса (его также называют *циклом лимонной кислоты* или *циклом трикарбоновых кислот*) является примером хорошо знакомого в биологии явления — химической реакции, которая начинается, когда определенная входящая молекула соединяется с другой молекулой, выполняющей функцию «помощника». Такая комбинация инициирует серию других химических реакций, в которых образуются моле-

кулы-продукты и в конце воссоздается молекула-помощник, которая может начать весь процесс вновь. В цикле Кребса роль входящей молекулы играет ацетильная группа, образующаяся при расщеплении пировиноградной кислоты, а роль молекулы-помощника — четырехуглеродная молекула щавелевоуксусной кислоты. Во время первой химической реакции цикла эти две молекулы соединяются с образованием шестиуглеродных молекул лимонной кислоты (этой кислоте цикл обязан одним из своих названий). Далее происходят восемь химических реакций, в которых сначала образуются молекулы-переносчики энергии и углекислый газ, а затем новая молекула щавелевоуксусной кислоты. Для переработки энергии, запасенной в одной молекуле глюкозы, цикл Кребса нужно пройти дважды. Чистая прибыль оказывается равной двум молекулам АТФ, четырем молекулам углекислого газа и десяти другим молекулам-переносчикам энергии (о них немного позже). Углекислый газ, в конечном счете, диффундирует из митохондрии и выделяется при выдохе.

Цикл Кребса принципиально важен для жизни не только потому, что в нем образуется энергия. Помимо глюкозы в него могут вступать многие другие молекулы, также образующие пировиноградную кислоту. Например, когда вы соблюдаете диету, организму не хватает потребляемой вами глюкозы для поддержания метаболизма, поэтому в цикл Кребса, после предварительного расщепления, вступают липиды (жиры). Вот почему вы теряете вес. Кроме того, молекулы могут покидать цикл Кребса, чтобы принять участие в построении новых белков, углеводов и липидов. Таким образом, цикл Кребса может принимать энергию, сохраненную в разной форме во многих молекулах, и создавать на выходе разнообразные молекулы.

С энергетической точки зрения чистый результат цикла Кребса состоит в том, чтобы завершить извлечение энергии, запасенной в химических связях глюкозы, передать небольшую часть этой энергии молекулам АТФ и запасти остальную энергию в других молекулах-переносчиках энергии. (Говоря об энергии химических связей, не надо забывать, что для разделения соединенных атомов необходимо совершить работу.) На заключительном этапе дыхания эта оставшаяся энергия высвобождается из молекул-переносчиков и также запасается в АТФ. Молекулы, запаасающие энергию, перемещаются внутри митохондрии, пока не столкнутся со специализированными белками, погруженными во внутренние мембраны митохондрии. Эти белки отнимают электроны у переносчиков энергии и начинают передавать их по цепи молекул — наподобие

Цикл Кребса — это повторяющаяся последовательность биохимических реакций, происходящих в процессе дыхания животных, растений и многих микроорганизмов. Здесь изображен его упрощенный вариант. Числа в скобках означают количество углеродных атомов в каждой органической молекуле



цепочки людей, передающих ведра с водой на пожаре, — извлекая энергию, запасенную в химических связях. Извлеченная на каждом этапе энергия запасается в форме АТФ. На последнем этапе электроны соединяются с атомами кислорода, которые далее объединяются с ионами водорода (протонами), образуя воду. В цепи переноса электронов образуется не менее 32 молекул АТФ — 90% энергии, хранившейся в исходной молекуле глюкозы.

Превращение энергии в цикле Кребса включает в себя довольно сложный процесс *хемиосмотического сопряжения*. Этот термин указывает на то, что в высвобождении энергии наряду с химическими реакциями участвует осмос — медленное просачивание растворов через органические перегородки. По сути дела, электроны с переносчиков энергии, являющихся продуктом цикла Кребса, переносятся по транспортной цепочке и поступают на белки, погруженные в мембрану, которая разделяет внутренний и внешний компартменты (отсеки) митохондрии. Энергия электронов используется для перемещения ионов водорода (протонов) во внешний компартмент, служащий «энергохранилищем» — наподобие водохранилища, образовавшегося перед плотиной. При оттоке протонов через мембрану энергия используется для образования АТФ, подобно тому как вода перед плотиной используется для производства электричества при падении на генератор. Наконец, во внутреннем компартменте митохондрии ионы водорода соединяются с молекулами кислорода с образованием воды — одного из конечных продуктов метаболизма.

Этот рассказ о гликолизе и дыхании иллюстрирует, насколько далеко зашли современные представления о живых системах. Простое высказывание о конкретном процессе — например, что для метаболизма необходимо «сжигать» углеводы — влечет за собой невероятно подробное описание сложных процессов, происходящих на молекулярном уровне и с участием огромного количества различных молекул. Осмысление современной молекулярной биологии в чем-то сродни чтению классического русского романа: вам легко понять каждое взаимодействие между персонажами, но, дойдя до страницы 1423, вы вполне можете забыть, кем приходится Петр Петрович Алексею Алексеевичу. Точно так же каждая химическая реакция в только что описанной цепи кажется понятной, но, дочитав до конца, вы будете поражены непостижимой сложностью процесса. В качестве утешения замечу, что я чувствую себя так же.

Ханс Адольф КРЕБС (Hans Adolf Krebs, 1900–81) — британский биохимик, выходец из Германии. Родился в Хилдесхайме (Германия) в еврейской семье отоларинголога. В 1925 году получил степень доктора медицины в Гамбургском университете и начал исследования в Фрейбургском университете. В 1933 году, после того как к власти в Германии пришли нацисты,

Кребс эмигрировал в Англию, где работал вначале в Шеффилдском (1935–54), а затем в Оксфордском университете. В Шеффилде Кребс определял относительное содержание различных молекул в тканях свиньи после вдоха, и в 1937 году воспроизвел химический цикл, который теперь носит его имя и за который в 1953 году он был удостоен Нобелевской премии в области физиологии и медицины.

Демон Максвелла

Возможно ли нарушение второго начала термодинамики?

- 1850 • ТЕРМОДИНАМИКА, ВТОРОЕ НАЧАЛО
- 1867 • ДЕМОН МАКСВЕЛЛА
- 1927 • ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Джеймс Кларк Максвелл, прославленный физик-теоретик второй половины XIX века, внесший огромный вклад в развитие электромагнитной и молекулярно-кинетической теории

В науке, как и в художественной литературе, встречаются фантастические персонажи. Пожалуй, больше всего их было вымышлено в процессе обсуждения второго начала термодинамики. Самым популярным из них стал *демон Максвелла*, которого придумал Джеймс Кларк Максвелл, автор знаменитой системы уравнений Максвелла, полностью описывающей электромагнитные поля. Второе начало (или закон) термодинамики имеет множество формулировок, физический смысл которых, однако же, идентичен: изолированная система не может самопроизвольно переходить из менее упорядоченного состояния в более упорядоченное. Так, газ, состоящий из молекул, движущихся с различными скоростями, не может самопроизвольно разделиться на две части, в одной из которых соберутся молекулы, движущиеся в среднем быстрее среднестатистической скорости, а в другой — медленнее.

Многие физические процессы относятся к категории *обратимых*. Воду, например, можно заморозить, а полученный лед снова растопить, и мы получим воду в прежнем объеме и состоянии; железо можно намагнитить, а затем размагнитить и т. п. При этом энтропия (степень упорядоченности) системы в начальной и конечной точке процесса остается неизменной. Есть и необратимые в термодинамическом понимании процессы — горение, химические реакции и т. п. То есть, согласно второму началу термодинамики, любой процесс в итоге приводит либо к сохранению, либо к снижению степени упорядоченности системы. Такая дисгармоничная ситуация сильно озадачила физиков второй половины XIX столетия, и тогда Максвелл предложил парадоксальное решение, позволяющее, казалось бы, обойти второе начало термодинамики и обратить неуклонный рост хаоса в замкнутой системе. Он предложил следующий «мысленный эксперимент»: представим себе герметичный контейнер, разделенный надвое газонепроницаемой перегородкой, в которой имеется единственная дверца размером с атом газа. В начале опыта в верхней части контейнера содержится газ, а в нижней — полный вакуум.



Теперь представим, что к дверце приставлен некий микроскопический вахтер, зорко следящий за молекулами. Быстрым молекулам он дверцу открывает и пропускает их за перегородку, в нижнюю половину контейнера, а медленные оставляет в верхней половине. Понятно, что если такой мини-вахтер будет дежурить у дверцы достаточно долго, газ разделится на две половины: в верхней части останется холодный газ, состоящий из медленных молекул, а в нижней скопится горячий газ из

быстрых молекул. Тем самым система упорядочится по сравнению с исходным состоянием, и второе начало термодинамики будет нарушено. Мало того, разницу температур можно будет использовать для получения работы (см. цикл и теорема Карно). Если такого вахтера оставить на дежурстве навечно (или организовать сменное дежурство), мы получим вечный двигатель.

Этот забавный вахтер, которому остроумные коллеги ученого дали прозвище демон Максвелла, до сих пор живет в научном фольклоре и волнует умы ученых. Действительно, вечный двигатель человечеству бы не повредил, но вот беда: судя по всему, чтобы демон Максвелла заработал, ему самому потребуется энергоснабжение в виде притока фотонов, необходимых для освещения приближающихся молекул и их просеивания. Кроме того, просеивая молекулы, демон и дверца не могут не вступать с ними во взаимодействие, в результате чего они сами будут неуклонно получать от них тепловую энергию и наращивать свою энтропию, в результате чего суммарная энтропия системы все равно уменьшаться не будет. То есть таким объяснением теоретическая угроза второму началу термодинамики была отведена, но не безоговорочно.

Первый по-настоящему убедительный контраргумент был сформулирован вскоре после зарождения квантовой механики. Для сортировки подлетающих молекул демону нужно измерять их скорость, а сделать это с достаточной точностью он не может в силу принципа неопределенности Гейзенберга. Кроме того, в силу этого же принципа он не может точно определить и местонахождение молекулы в пространстве, и часть молекул, перед которыми он распахивает микроскопическую дверцу, с этой дверцей разминутся. Иными словами, демон Максвелла на поверку оказывается макроскопическим слоном в посудной лавке микромира, который живет по собственным законам. Приведите демона в соответствие с законами квантовой механики, и он окажется не в состоянии сортировать молекулы газа и просто перестанет представлять какую-либо угрозу второму началу термодинамики.

Другой веский аргумент против возможности существования демона-вахтера появился уже в компьютерную эру. Предположим, что демон Максвелла — это компьютерная автоматизированная система управления открыванием дверцы. Система производит побитовую обработку входящей информации о скорости и координатах приближающихся молекул. Пропустив или отклонив молекулу, система должна произвести сброс прежней упорядоченной информации, а это равносильно повышению энтропии на величину, равную снижению энтропии в результате упорядочивания газа при пропуске или отклонении молекулы, информация о которой стерта из оперативной памяти компьютерного демона. Сам компьютер, к тому же, также греется, так что и в такой модели в замкнутой системе, состоящей из газовой камеры и автоматизированной пропускной системы, энтропия не убывает и второй закон термодинамики выполняется.

Жаль демона — симпатичный был персонаж.

Детерминизм

Если известны начальные условия системы, можно, используя законы природы, предсказать ее конечное состояние

Одно из основных положений научного метода состоит в том, что мир предсказуем — то есть для данного набора обстоятельств есть только один возможный (и предсказуемый) исход. Эта философская доктрина известна под названием «детерминизм». Возможно, лучший пример детерминистической системы получится из сочетания законов механики ньютона и закона всемирного тяготения ньютона. Если вы примените эти законы к единственной планете, вращающейся вокруг звезды, и запустите планету с заданного места с заданной скоростью, вы можете предсказать, где она будет в любой момент времени в будущем. Так возникла идея «часового механизма Вселенной», имевшая огромное влияние не только на развитие науки, но и на появление такого философско-культурного движения, как Просвещение, которое достигло своего расцвета в XVIII веке.

Как философская доктрина детерминизм играл (и продолжает играть) важную роль в науке. Однако на практике не всегда легко предсказать, какой будет система в конце своего существования (ученые называют это конечным состоянием системы), даже если известны начальные условия. Например, довольно просто рассчитать орбиту единственной планеты в вышеприведенном примере. Но введите еще две-три планеты в систему, и все значительно усложнится. Каждая планета действует своей силой притяжения на все остальные планеты и в свою очередь испытывает их влияние. Найти точное решение такой задачи многих тел, как ее называют астрономы, практически невозможно.

В XIX веке было обещано вознаграждение тому, кто первым сможет ответить, стабильна ли Солнечная система. Вопрос о стабильности можно переформулировать так: если бы вы могли оказаться в далеком будущем, увидели бы вы все планеты точно там, где они находятся сегодня, так же расположенными друг относительно друга и движущимися с той же скоростью? Это чрезвычайно трудный вопрос. На него нельзя ответить однозначно, поскольку в Солнечной системе девять планет, не считая их спутников, астероидов и комет, у которых есть свои собственные маленькие спутники с неизвестными нам орбитами. Хотя Солнечная система и приводится как показательный пример часового механизма Вселенной и принципа детерминизма, но ее будущее не всегда можно точно предсказать.

Это наличие большого количества разнообразных факторов, влияющих на движение планет, в первой половине XX века сыграло важную роль в экспериментальном подтверждении общей теории относительности. У Меркурия, как и у всех остальных планет, орбита эллиптическая (см. законы Кеплера). Если бы Солнечная система состояла только из Меркурия и Солнца, то Меркурий двигался бы все время по одному и тому же эллипсу. Однако из-за влияния других планет этот эллипс с каждым оборотом планеты вокруг Солнца немного искривляется. По мере движения планеты ближайшая к Солнцу точка орбиты — перигелий — постепенно

смещается, причем смещается ненамного: каждые сто лет она сдвигается вокруг Солнца примерно на 1000 угловых секунд, то есть на четверть градуса. Почти все это смещение можно объяснить результатом гравитационного притяжения других планет — за исключением 43 угловых секунд за столетие.

До того как Эйнштейн сформулировал свою общую теорию относительности, феномен с перигелием Меркурия был всего-навсего очередной необъяснимой загадкой Вселенной — никто не знал, чем вызвано это смещение, хотя, честно говоря, немногие астрономы вообще обращали на это внимание. Но когда орбиту Меркурия рассчитали исходя из уравнений общей теории относительности, к ньютоновскому закону всемирного тяготения применили маленькую поправку, которой оказалось достаточно для объяснения этого смещения перигелия планеты. Орбиты всех планет, включая Землю, тоже испытывают смещение перигелия, как и Меркурий, просто у Меркурия оно наиболее выражено и его проще измерить, поскольку Меркурий расположен ближе всех к Солнцу и поэтому имеет самую высокую орбитальную скорость (в соответствии с законами Кеплера). В настоящее время измерены смещения перигелиев всех внутренних планет с использованием современных радиолокационных методов определения дальности, и они подтвердили предсказания общей теории относительности.

Итак, если ставки достаточно высоки, ученые будут прокладывать свой путь сквозь запутанные силы притяжения в Солнечной системе, чтобы проникнуть в суть таких явлений, как смещение перигелия. Однако вопрос о стабильности остается нерешенным. Возможно, эта проблема и в самом деле неразрешима, да и награда за ее решение, надо сказать, довольно скромная. Пример Солнечной системы показывает, что даже для систем, полностью детерминистических в классическом ньютоновском смысле, возможность делать предсказания неочевидна.

Детерминистический хаос

В природе существуют системы, в которых исход конкретной ситуации существенно зависит от измерения воздействия на входе и будущее поведение которых непредсказуемо для всех практических применений

1980-е • ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЙ ХАОС

Принцип ДЕТЕРМИНИЗМА — один из наиболее важных в современной науке. Он гласит: если мы знаем текущее состояние какой-либо системы в природе, мы можем применить наше знание законов природы для предсказания будущего поведения этой системы. Классическая ньютоновская «механическая» вселенная, в которой положение планет походило на движение стрелок многострелочных часов, а наше знание законов природы сводилось к пониманию устройства часового механизма — это наглядное представление данной концепции.

В XX веке ученые пришли к пониманию того, что в природе имеются системы, полностью детерминистические в ньютоновском смысле, тем не менее их будущее с точки зрения практического применения не поддается расчетам. Появление быстродействующих электронных вычислительных машин в 1980-е годы привело к тому, что это явление, известное как детерминистический хаос, или *теория хаоса*, стало областью активных научных исследований. Лучшая аналогия детерминистического хаоса — так называемая «белая вода» горных потоков. Если вы бросите в эту воду горной реки два листика один за другим, то ниже по течению они, вероятнее всего, окажутся далеко друг от друга. В системе, подобной этой, небольшое различие в начальных условиях (положение листиков) может привести к большому расхождению на выходе.

Большинство систем в природе не такие. Например, если вы уроните шар с высоты 5 метров и измерите его скорость при ударе о землю, а затем уроните этот же шар с высоты 5,0001 метра, то значения его скорости при ударе будут не очень отличаться. В системах, подобных этой, небольшие изменения начальных условий приводят к небольшим изменениям на выходе. Большинство известных нам систем в природе именно такого типа.

Однако даже для таких простых систем, как классические ньютоновские бильярдные шары, иногда сложно делать предсказания об их состоянии в будущем. К примеру, стандартная задача для студентов-дипломников по физике — показать, что даже случай с бильярдным шаром, отскакивающим от бортов на совершенно ровном столе, в итоге растворяется в неопределенности вследствие неточностей в измерении угла, под которым шар приближается к борту в самом начале.

Однако система горного потока иная, и открытие детерминистического хаоса — хорошая иллюстрация того, каким образом работают подобные системы. По современным стандартам, первые электронные вычислительные машины были очень медленными и имели очень маленькую память. В 1960-е годы Эдвард Лоренц (Edward Lorenz, р. 1917) и его коллеги в Массачусетском технологическом институте испытывали компьютерные модели климата Земли. Их компьютеры часто приходили к некоторому промежуточному состоянию в вычислениях, выводили эти промежуточные результаты на бумажную ленту в течение всей ночи и заканчивали

вычисления на следующий день. Они стали замечать, что вычисления, выполнявшиеся непрерывно от начала до конца, приводили к результатам, которые значительно отличались от результатов прерывавшихся вычислений. Они обнаружили, что это расхождение происходит из-за того, что компьютер округлял числа в промежуточных результатах. Например, для записи на ленту он выдал бы число 0,506, а если бы продолжал работать, то 0,506127. Это различие было достаточным для того, чтобы привести в итоге к совершенно различным прогнозам будущих состояний климата. Теперь мы знаем о существовании систем, которые гораздо чувствительнее к начальным условиям и в которых различие в восьмом знаке после запятой оказывает значительное влияние на конечный результат. (В технических терминах хаотическая система определяется как система, в которой выход экспоненциально зависит от изменений на входе.)

Дело в том, что, когда мы говорим об «определении» начального состояния, мы фактически говорим об измерении. Каждое измерение в реальном мире содержит ошибку — некоторую неточность в фактической величине. Например, если вы измеряете длину стола линейкой, на которой наименьшее деление — миллиметр, то в вашем определении неизбежно будет присутствовать ошибка в долю миллиметра. Аналогично, если в приведенном выше примере вы хотите определить положение листика в горном потоке, вы можете измерить расстояние между листиком и точкой на берегу. Всегда будет присутствовать небольшая погрешность в этом измерении, зависящая от точности используемого измерительного устройства. Если система хаотическая, вы можете много раз класть тот же самый листик, как вам кажется, на то же самое место и получать при этом различные результаты, поскольку вы никогда не сможете *точно* положить его на одно и то же место дважды.

Таким образом, для хаотических систем теоретически возможно предсказать будущий исход, но только в тех случаях, когда начальное состояние можно определить с абсолютной точностью. Поскольку такой точности достичь невозможно, эти системы для всех практических применений непредсказуемы. При этом важно понимать, что существование детерминистического хаоса не нарушает принципа детерминизма. Оно просто говорит, что при определенных обстоятельствах вы не сможете осуществить те виды измерений, которые вам нужны для определения текущего состояния системы с достаточной точностью в целях предсказания ее будущих состояний.

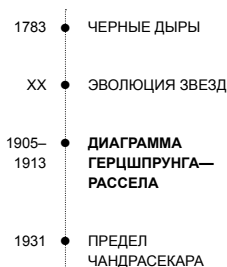
Иными словами, в хаотических системах имеется некоторое расхождение между детерминизмом (нашим пониманием законов, управляющих системой) и предсказанием (нашей способностью утверждать, что система будет делать). Это не значит, что такого расхождения не существовало в ньютоновской физике — мы видели, что оно есть. Это значит только, что до недавнего времени люди

не уделяли ему должного внимания: вероятно, они понимали, что решение проблемы предсказания — это вопрос времени. Теория хаоса научила нас, что расхождение не только реально — оно существует постоянно. Теперь мы понимаем, что система может быть детерминистической и предсказуемой теоретически, в то же время оставаясь непредсказуемой на практике.

Не так давно некоторые ученые попытались применить теорию хаоса в других областях, включая такие, как расчеты орбит планет Солнечной системы на очень долгие промежутки времени и фондовая биржа. Некоторое время назад группа физиков покинула свои лаборатории, чтобы воспользоваться теорией хаоса для продажи советов относительно ценных бумаг, однако я еще не видел ни одного из них на «Мерседесе». По всей видимости, много работы еще предстоит сделать, чтобы воплотить теорию в практику.

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела

Звезды, если их нанести на диаграмму в соответствии с физическими характеристиками, разделяются на четко выраженные группы, соответствующие разным стадиям их эволюции

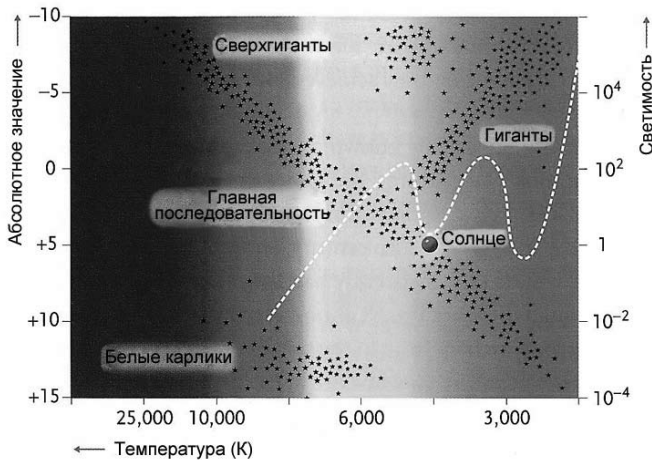


Звезды бывают множества типов. Есть звезды, диаметр которых в 30 раз превышает диаметр Солнца, и есть звезды размером всего лишь с большой земной город. Есть звезды настолько горячие, что основной цвет в спектре их излучения — фиолетовый, и есть звезды настолько «холодные», что даже темно-красный свет в их спектре выражен крайне тускло. В XIX веке в астрономии произошел перелом — ученые стали сходить с накатанного пути классической астрономии («Где это, и как и куда оно движется?») и переходить на рельсы астрофизики («Что это, и как оно устроено?»). Одной из первоочередных задач на этом пути стала задача хотя бы внешнего упорядочивания классификации наблюдаемых во Вселенной звезд. Это и привело к независимому созданию двумя астрофизиками диаграммы, которую сегодня принято в их честь называть диаграммой Герцшпрунга—Рассела (или, сокращенно, «диаграммы ГР»).

Диаграмма ГР — как это нередко бывает в науке — была практически одновременно разработана двумя учеными, совершенно самостоятельно работавшими на двух разных континентах. Генри Норрис Рассел — один из крупнейших американских астрономов начала XX века — долгие годы интересовался проблемой описания жизненного цикла звезд и, судя по всему, пришел к основной идее диаграммы еще в 1909 году, однако работа с ее представлением была опубликована лишь в 1913 году. Датчанин Эйнар Герцшпрунг пришел к тем же выводам, что и Рассел, несколькими годами раньше своего американского коллеги, однако опубликованы они были (в 1905-м и 1907 годах) в узкоспециализированном «Журнале научной фотографии» (*Zeitschrift fuer Wissenschaftliche Photographie*), издающемся к тому же на немецком языке, и публикация эта поначалу попросту осталась незамеченной астрономами. Поэтому вплоть до середины 1930-х годов эту диаграмму принято было называть просто «диаграммой Рассела», пока не был обнаружен случившийся казус, после чего датчанину было воздано должное, и теперь диаграмма носит имена обоих ученых.

Диаграмма ГР представляет собой график, на котором по вертикальной оси отсчитывается светимость (интенсивность светового излучения) звезд, а по горизонтальной — наблюдаемая температура их поверхностей. Оба этих количественных показателя поддаются экспериментальному измерению при условии, что известно расстояние от Земли до соответствующей звезды. Чисто исторически сложилось так, что по горизонтальной оси x температуру поверхности звезд откладывают в обратном порядке: то есть, чем жарче звезда, тем левее она находится; это чистая условность, и я не вижу смысла в том, чтобы ее обсуждать и оспаривать. Смысл же всей диаграммы ГР заключается в том, чтобы нанести на нее как можно больше экспериментально наблюдаемых звезд (каждая из которых представлена соответствующей точкой) и по их расположению определить некие закономерности их распределения по соотношению спектра и светимости.

Выясняется, что это распределение носит отнюдь не случайный характер: по соотношению спектра со светимостью звезды делятся на три достаточно строгие категории или, как принято их называть в астрофизике, «последовательности». Из верхнего левого угла в правый нижний тянется так называемая *главная последовательность*. К ней относится, в частности, и наше Солнце. В верхней части главной последовательности расположены самые яркие и горячие звезды, а справа внизу — самые тусклые и, как следствие, долгоживущие.



Отдельно — правее и выше — расположена группа звезд с очень высокой светимостью, непропорциональной их температуре, которая относительно низка — это так называемые красные звезды-гиганты и сверхгиганты. Эти

огромные звезды, условно говоря, светят, но не греют. Ниже и левее главной последовательности расположены карлики — группа относительно мелких и холодных звезд. Еще раз отметим, что подавляющее большинство звезд относится к главной последовательности, и энергия в них образуется путем термоядерного синтеза гелия из водорода (см. эволюция звезд).

На самом деле, три этих последовательности на диаграмме ГР строго соответствуют трем этапам жизненного цикла звезд. Красные *гиганты* и *сверхгиганты* в правом верхнем углу — это доживающие свой век звезды с до предела раздувшейся внешней оболочкой (через 6,5 млрд лет такая участь постигнет и наше Солнце — его внешняя оболочка выйдет за пределы орбиты Венеры). Они излучают в пространство примерно то же количество энергии, что и звезды основного ряда, но поскольку площадь поверхности, через которую излучается эта энергия, превосходит площадь поверхности молодой звезды на несколько порядков, сама поверхность гиганта остается относительно холодной.

Наконец, обратимся к левому нижнему углу диаграммы ГР: здесь мы видим так называемых *белых карликов* (см. ПРЕДЕЛ ЧАНДРАСЕКАРА). Это очень горячие звезды — но очень мелкие, размером обычно не больше нашей Земли. Поэтому, излучая в космос относительно немного энергии, они по причине весьма незначительной (на фоне других звезд) площади их поверхностной оболочки светятся в достаточно ярком спектре, поскольку она оказывается достаточно высокотемпературной.

Вообще, по диаграмме Герцшпрунга—Рассела можно проследить весь жизненный путь звезды. Сначала звезда главной

Любой звезде на диаграмме Герцшпрунга—Рассела обязательно найдется свое место. «Нормальные» звезды, включая Солнце, расположены в пределах диагональной ветви главной последовательности (место Солнца в главной последовательности вы можете определить по его спектральному бело-желтому цвету). Над главной последовательностью находятся ветви гигантов и сверхгигантов; под ней — ветвь белых карликов. По диаграмме можно проследить и эволюцию звезд. В частности, Солнце представлено в своем нынешнем положении, а пунктиром отмечены его предыстория и дальнейшая судьба

последовательности (подобная Солнцу) конденсируется из газопылевого облака (см. гипотеза газопылевого облака) и уплотняется до создания давлений и температур, необходимых для разжигания первичной реакции термоядерного синтеза, и, соответственно появляется где-то в основной последовательности диаграммы ГР. Пока звезда горит (запасы водорода не исчерпаны), она так и остается (как сейчас Солнце) на своем месте в основной последовательности, практически не смещаясь. После того как запасы водорода исчерпаны, звезда сначала перегревается и раздувается до размеров красного гиганта или сверхгиганта, отправляясь в правый верхний угол диаграммы, а затем остывает и сжимается до размеров белого карлика, оказываясь слева внизу.

Эйнар ГЕРЦШПРУНГ (Einar Hertzsprung, 1873–1967) — датский астроном. Родился в местечке Фредериксборг близ Копенгагена. Учился в Копенгагенском политехническом институте, получил специальность инженера-химика. По окончании института (1898) в течение трех лет работал в Петербурге. Вернувшись на родину, начал изучать астрономию, одновременно проводил фотографические наблюдения в обсерватории Копенгагенского университета и небольшой обсерватории «Урания». Его исследования произвели впечатление на директора Потсдамской обсерватории К. Шварцшильда, который пригласил Герцшпрунга сначала в Гёттингенский университет, а затем в Потсдамскую обсерваторию (1909). С 1919 года Герцшпрунг работал в Лейденской обсерватории, в 1935 году стал ее директором. Выйдя в отставку, возвратился в Данию и продолжил исследования в обсерватории в Брорфельде. Образование фотохимика позволило ученому разработать уникальную для тех лет технологию расчета светимости звезд по их фотоизображениям. Сопоставив полученные результаты с данными о спектрах исследуемых звезд, Герцшпрунг и пришел к своей классификации звезд, согласно которой они подразделяются на гигантов, карликов и основной ряд.

Генри Норрис РАССЕЛ (Henry Norris Russell, 1877–1957) — американский астрофизик. Родился в Ойстер-Бэй (штат Нью-Йорк) в семье пресвитерианского священника. Учился в Принстонском университете, где сменил своего учителя К. Юнга на должностях профессора астрономии и директора местной обсерватории, которые занимал вплоть до 1947 года. Долгое время Рассел занимался исследованием связи между спектрами звезд и их светимостью с целью разобраться в том, как эволюционируют светила. В 1913 году — независимо от Герцшпрунга — построил диаграмму, связывающую спектральные характеристики и светимость звезд (которая теперь и называется диаграммой Герцшпрунга—Рассела) по результатам изучения снимков, полученных им на фотопластинках в обсерватории Принстонского университета. Увы, ученый вывел из полученной диаграммы ложное заключение о том, что звезды появляются на свет в виде красных гигантов и со временем вырождаются в белых карликов.

Дисперсия: атомная теория

*Скорость
распространения
световых лучей
разной частоты
в среде определяется
свойствами
вещества на
атомном уровне*

- 1621 • ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
- 1864 • СПЕКТР ЭЛЕКТРО-
МАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ
- 1864 • УРАВНЕНИЯ
МАКСВЕЛЛА
- 1924 • ДИСПЕРСИЯ:
АТОМНАЯ ТЕОРИЯ

Мы знаем, что скорость света в среде меньше скорости света в вакууме. Это свойство обычно находит отражение в так называемом коэффициенте или показателе преломления среды, который определяется соотношением:

$$n = c/v,$$

где c — скорость распространения света в вакууме, а v — в среде.

Свет затормаживается в среде в результате постоянных взаимодействий с электронными оболочками атомов. Ситуацию здесь можно сравнить с дорожным движением: если скорость света в вакууме уподобить движению по идеально прямому и совершенно свободному загородному шоссе, на котором машина может всю дорогу ехать на максимальной скорости, то скорость света в среде можно представить себе как движение по большому городу: световой луч-машина раз за разом притормаживает на очередном перекрестке-атоме. В результате скорость света в веществе оказывается непременно ниже скорости света в вакууме. Коэффициент преломления, в частности стекла, составляет около 1,5; следовательно, в стекле свет распространяется примерно на треть медленнее, чем в вакууме.

О том, что не только разные материалы имеют разные коэффициенты преломления, но и в одном материале световые лучи разных цветов преломляются по-разному, известно достаточно давно. Это явление получило название дисперсии света. По закону Снеллиуса угол преломления луча после его попадания в прозрачную среду зависит от коэффициента преломления этой среды, соответственно дисперсия проявляет себя тем, что лучи разных цветов, обладая разными коэффициентами преломления в среде, преломляются под разными углами. В большинстве материалов, в частности в стекле, наблюдается *нормальная дисперсия*, при которой показатель преломления обратно пропорционален длине волны: чем короче волна, тем выше коэффициент преломления. (У некоторых веществ, однако, имеются диапазоны длин световых волн, в которых наблюдается *аномальная дисперсия*: короткие волны преломляются слабее длинных.)

Именно этот принцип лежит в основе действия *призмы*. При попадании обычного «белого» (а в действительности содержащего все цвета спектра) света, например, солнечных лучей на призму луч начинает расщепляться сразу после пересечения границы воздуха со стеклом, поскольку фиолетовые лучи преломляются сильнее всего, а красные — слабее всего. В результате после пересечения светом второй границы стекла с воздухом белый луч оказывается расщепленным на составляющие его цветные лучи. В результате мы наблюдаем на экране или стене знакомую картину радужного спектра.

Кстати, о радуге: она тоже возникает в результате дисперсии света на дождевых каплях. Попадая внутрь капли, солнечный луч

преломляется, внутри капли происходит его дисперсия, затем разложенный на спектр луч отражается от задней полусферы капли, на обратном пути происходит его дальнейшая дисперсия, и, наконец, луч выходит обратно через переднюю поверхность капли, будучи разложенным на радужный спектр солнечного света. Именно поэтому мы и наблюдаем радугу лишь тогда, когда Солнце находится с одной стороны от нас, а дождь идет с другой стороны. Из-за дисперсии каждый цвет в отраженных лучах собирается под своим строго определенным углом, и это объясняет, почему радуга образует в небе дугу. Цвета в дождевой радуге разделены не очень четко, поскольку капли имеют разный диаметр, и на одних каплях дисперсия проявляется сильнее, на других — слабее. Воспринимаемая же нашим зрением радуга образуется совокупностью отраженных лучей от всех дождевых капель, пролетающих в момент наблюдения через зону отражения.

Более редкое явление двойной радуги наблюдается, когда внутри части дождевых капель световой луч отражается от внутренней поверхности дважды, а совсем редкая тройная радуга свидетельствует об эффекте тройного внутреннего отражения луча в части дождевых капель.

Принципиальные физические причины дисперсии удалось объяснить только в рамках современной атомной теории строения материи и взаимодействия света с веществом. Подобно лучам всех диапазонов спектра электромагнитного излучения, световые лучи представляют собой поперечные электромагнитные волны. Электрическое поле, возбуждаемое в такой волне, согласно уравнениям Максвелла воздействует на электроны атомов, возбуждая их. Возбуждаясь, электрон поглощает фотон определенной частоты, чтобы почти сразу же испустить в точности такой же фотон и вернуться в нормальное состояние на нижней незанятой орбитали своего атома. Таким образом, свет в среде распространяется посредством цепочки непрерывных поглощений и испусканий фотонов. Именно этим обусловлено замедление распространения света в среде.

Электроны в атомах — пленники своих ядер. Для понимания некоторых явлений субатомного мира полезно представить себе электроны прикрепленными к ядрам на жестких пружинах. Реакция электрона на воздействии электрического поля световой волны зависит от того, как частота волны соотносится с частотами собственных колебаний этой воображаемой пружины. Расчеты показывают, что чем короче длина световой волны, тем выше вероятность ее попадания в резонанс с собственными частотами возбуждения электронов и, соответственно, тем чаще электроны будут поглощать и вновь испускать фотоны соответствующей частоты, задерживая тем самым распространение света этой частоты. Доказано, что интенсивность испускания таких вторичных световых волн атомами пропорциональна длине волны в четвертой степени!

Следствием этого же эффекта взаимодействия света с атомами является и рассеяние света в среде. Свет, не вступавший во взаимодействие с атомами, доходит до нас напрямую. Поэтому, когда мы глядим не на источник света, а на рассеянный свет от этого источника, мы наблюдаем в нем преобладание коротких волн синей части спектра.

Вот почему небо выглядит синим, а Солнце желтоватым! Когда вы смотрите на небо в стороне от Солнца, вы видите там рассеянный солнечный свет, где преобладают короткие волны синей части спектра. Когда же вы смотрите непосредственно на Солнце, вы наблюдает спектр его излучения, из которого путем рассеяния на атомах воздуха удалена часть синих лучей, и изначально белый спектр Солнца смещается в желто-красную область при прохождении через атмосферу. (Только никогда не пытайтесь удостовериться в этом собственными глазами, глядя прямо на Солнце. Интенсивность прямых солнечных лучей настолько высока, что даже секундного взгляда на Солнце в зените достаточно, в лучшем случае, для временного ослепления, а в худшем — для хронических функциональных нарушений зрения.) На закате, когда солнечные лучи совершают значительно более длительное путешествие сквозь атмосферу, Солнце кажется нам и вовсе красным, поскольку в этом случае рассеиваются и исчезают из его спектра не только синие, но и зеленые, и желтые лучи.

Дифракция

Дифракционная картина возникает в результате интерференции вторичных световых волн при огибании лучами света препятствий или их прохождении через множественные отверстия

1690	•	ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА
1807	•	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1818	•	ДИФРАКЦИЯ

Идея о волновой природе света (см. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ) получила серьезное подтверждение в результате открытия и изучения в начале XIX века явлений *интерференции* и *дифракции* света. Традиционное со времен Ньютона и из-за его непререкаемого авторитета долго остающееся неизменным представление о свете как о потоке частиц — так называемая *корпускулярная теория света* — оказалось поставленным под серьезное сомнение после открытия интерференции. А вскоре о корпускулярной теории и вовсе забыли — почти на целое столетие — в результате открытия и исследования явлений дифракции, в результате чего волновая теория света стала новым ортодоксальным и незыблемым представлением о нем. Лишь после объяснения с корпускулярной точки зрения фотоэлектрического эффекта и зарождения квантовой механики корпускулярные представления о свете получили второе рождение в рамках принципа дополнительности.

Основы явления дифракции можно понять, если обратиться к принципу Гюйгенса, согласно которому каждая точка на пути распространения светового луча может рассматриваться как новый независимый источник *вторичных волн*, и дальнейшая дифракционная картина оказывается обусловленной *интерференцией* этих вторичных волн. При взаимодействии световой волны с препятствием часть вторичных волн Гюйгенса блокируется. Например, при падении световой волны сверху под острым углом на бритву на верхней плоскости бритвы вторичные волны Гюйгенса образовываться будут, а на нижней нет. Однако в результате конструктивной интерференции вторичные волны все равно обогнут бритву, и мы увидим там сплошной световой луч, как если бы на пути его распространения ничего не стояло. Подобное же «огибание» волной препятствия можно наблюдать и в морском порту в шторм: суда, стоящие на якоре за волнорезом, который, казалось бы, должен полностью гасить волны, тем не менее «гуляют» вверх-вниз благодаря вторичным волнам.

Если источник света и точка наблюдения удалены от препятствия на незначительное расстояние, исходные и результирующие лучи света не параллельны друг другу — и мы наблюдаем *дифракцию Френеля (дифракцию в ближней зоне)*. Если же источник и точка наблюдения находятся на значительном расстоянии от препятствия (точки дифракции), лучи практически параллельны, и мы наблюдаем *дифракцию Фраунгофера (дифракцию в дальней зоне)*. Фраунгофер, кстати, изобрел целый ряд важных прецизионных оптических приборов, включая *дифракционную решетку*. Она представляет собой систему расположенных на небольшом расстоянии друг от друга микроскопических линий, отражающих свет. Изначально это была затемненная стеклянная пластина с тщательно нанесенными на нее параллельными штрихами. Каждый такой штрих отражает свет, и его можно считать вторичным источником волн Гюйгенса, которые вступают в интерференцию и вза-

имно усиливаются под определенными углами после рассеяния на решетке.

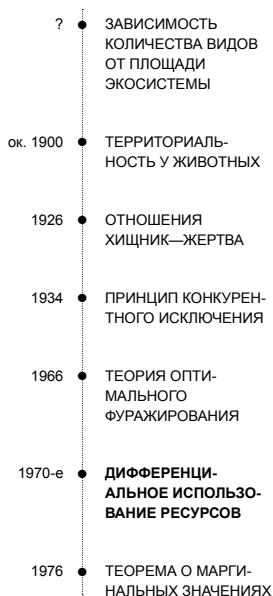
Начиная с середины XIX века дифракционная решетка стала важнейшим инструментом спектроскопии — с ее помощью ученые исследуют спектры излучения светящихся объектов и спектры поглощения различных веществ и по ним определяют их химический состав. Одним из важнейших открытий Фраунгофера стало обнаружение темных линий в спектре Солнца. Сегодня мы знаем, что они возникают в результате поглощения световых волн определенной длины относительно холодным веществом солнечной короны, и благодаря этому можем судить о химическом составе нашего светила.

ЙОЗЕФ ФРАУНГОФЕР (Joseph von Fraunhofer, 1787–1826) — немецкий физик и оптик, уроженец Штраубинга (Straubing), сын ремесленника-стеклодува. Рано осиротев, пошел в подмастерья к стекольщику. В возрасте 14 лет серьезно пострадал при обрушении новостройки, провел несколько дней под завалом и благодаря этому несчастному случаю приобрел некоторую популярность. В частности, получил от властей Баварии денежную компенсацию, на которую

открыл собственное стекольное дело, с которым в 1806 году присоединился к знаменитой баварской фирме Utzschneider, которая в те дни пользовалась славой производителя лучших в мире оптических инструментов. Явление дифракции Фраунгофер исследовал с чисто прикладной точки зрения: делом своей жизни он считал изобретение идеальных ахроматических линз, которые не давали бы радужного ореола вокруг изображения.

Дифференциальное использование ресурсов

Для видов, использующих разные количества одних и тех же ресурсов, возможно поддержание популяционного равновесия



В природе одна и та же территория довольно часто бывает заселена различными видами. Иногда в таких случаях срабатывает принцип конкурентного исключения, и один вид вытесняет другой. Иногда — и травяной газон тому хороший пример — видам удается найти способ сосуществования и распределения ресурсов. Возможно, соседствующие виды просто используют различные ресурсы. Но может быть и так, что их потребности очень схожи. Модель, известная как дифференциальное использование ресурсов, объясняет, каким образом виды могут делить одну и ту же ресурсную базу.

Чтобы увидеть, как работает эта модель, начнем с простого примера. Предположим, имеется один вид растений, который требует для своего выживания два ресурса — назовем их А и В. Эти ресурсы могут быть конкретными химическими веществами — например, калий и фосфор или вода и углекислый газ. Если нет других растений, экосистема будет поставлять эти ресурсы с постоянной скоростью и будет существовать некая граница, ниже которой поступление каждого из ресурсов недостаточно для поддержания жизни растения.

Чтобы имело место устойчивое равновесие, оба компонента экосистемы — растения и ресурсы — должны быть устойчивыми. Для этого растениям надо потреблять каждого из двух ресурсов ровно столько, сколько возобновляется. Если потреблять слишком мало — база ресурса возрастет, слишком много — она уменьшится. В каждом случае потребление будет изменяться так, чтобы вернуть систему обратно в положение равновесия (например, увеличивая или уменьшая количество растений).

Теперь предположим, что есть два вида растений, каждый из которых использует ресурсы А и В. Тогда существует несколько возможностей:

- ресурсов А и В недостаточно для выживания каждого из видов;
- ресурсов А или В столько, чтобы позволить существовать только одному из двух видов;
- ресурсов А или В столько, что будет работать принцип конкурентного исключения, и один из видов вытеснит другой;
- ресурсов А и В столько, что смогут выжить оба вида.

Это зона дифференциального использования ресурсов.

Чтобы выжили оба вида, должны быть выполнены специальные условия. Например, первый вид может занимать область, где есть весь необходимый ему ресурс В, но где он ограничен в ресурсе А. Тогда второй вид должен занимать область, где есть весь необходимый ему ресурс А, но недостаточно ресурса В. В этом случае каждый из видов имеет возможность потреблять количество ресурса, достаточное для выживания, в то же время оставляя достаточное количество для другого вида. Таким образом они могут сосуществовать в равновесии внутри одной экологической ниши.

Очевидно, что эта модель может работать для любого числа видов и любого количества ресурсов.

ДНК

Молекула ДНК имеет форму двойной спирали, и ее воспроизведение основано на том, что каждая цепь двойной спирали служит матрицей для сборки новых молекул



Эксперимент Мезельсона—Сталя

После того как Уотсон и Крик высказали предположение о двуспиральной структуре ДНК, это предположение прошло экспериментальную проверку, как происходит с любой научной гипотезой. Два молекулярных биолога — Мэтью Мезельсон (Matthew Meselson, р. 1930) и Франклин Сталь (Franklin

Сегодня мы знаем, что молекула ДНК является носителем кода, который управляет химизмом всего живого (см. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДОГМА МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ), а двойная спираль молекулы ДНК стала одним из самых известных научных символов. Открытие ДНК, как и практически все великие открытия, не было результатом работы одинокого гения, а увенчало собой длинную цепь экспериментальных работ. Так, ЭКСПЕРИМЕНТ ХЕРШИ—ЧЕЙЗ продемонстрировал, что носителем генетической информации в клетках является именно ДНК, а не белки. Еще в 1920-е годы американский биохимик родом из России Фибус Левин (Phoebus Levene, 1869–1940) установил, что основные кирпичики, из которых построена ДНК, — это пятиатомный сахар дезоксирибоза (она обозначена буквой Д в слове ДНК), фосфатная группа и четыре азотистых основания — тимин, гуанин, цитозин и аденин (их обычно обозначают буквами Т, Г, Ц и А). В конце 1940-х годов американский биохимик австрийского происхождения Эрвин Чаргафф (Erwin Chargaff, р. 1905) выяснил, что во всех ДНК содержится равное количество оснований Т и А и аналогично равное количество оснований Г и Ц. Однако относительное содержание Т/А и Г/Ц в молекуле ДНК специфично для каждого вида.

В начале 1950-х годов стали известны два новых факта, пролившие свет на природу ДНК: американский химик Лайнус Полинг (Linus Pauling, 1901–94) показал, что в длинных молекулах, например белках, могут образовываться связи, закручивающие молекулу в спираль, а в лондонской лаборатории Морис Уилкинс и Розалинда Франклин получили данные рентгеноструктурного анализа (основанные на усовершенствованном применении ЗАКОНА БРЭГГА), позволившие предположить, что ДНК имеет спиральную структуру.

Как раз в это время молодой американский биохимик Джеймс Уотсон отправился на год в Кембриджский университет для работы с молодым английским физиком-теоретиком Фрэнсисом Криком. («Обо мне тогда практически никто не знал, — вспоминал впоследствии Крик, — а идеи Уотсона считали... слишком заумными».) Экспериментируя с металлическими моделями, Крик и Уотсон пытались объединить различные компоненты молекулы в трехмерную модель ДНК.

Чтобы лучше представить себе полученные ими результаты, вообразите длинную лестницу. Вертикальные стойки этой лестницы состоят из молекул сахара, кислорода и фосфора. Важную функциональную информацию в молекуле несут ступеньки лестницы. Они состоят из двух молекул, каждая из которых крепится к одной из вертикальных стоек. Эти молекулы — четыре азотистых основания — представляют собой одиночные или двойные кольца, содержащие атомы углерода, азота и кислорода и способные образовывать две или три водородные связи (см. ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ) с другими основаниями. Форма этих молекул позволяет им образовывать связи — законченные ступеньки — лишь определенного

Stahl, p. 1910) — провели в 1957 году в Калифорнийском технологическом институте серию экспериментов. Используемая ими методика позволяла различать массы очень похожих молекул. Сначала они выращивали бактерии в среде, где единственным источником азота был изотоп ^{15}N (обычный атом азота, ^{14}N , несколько легче). Через несколько поколений весь азот в бактериальной ДНК был представлен только «тяжелым» азотом. Затем бактерии переносили в среду, где весь азот был в форме ^{14}N (азот входит в состав оснований ДНК и поэтому поглощается любым организмом, синтезирующим новые цепи молекулы). После одного цикла клеточного деления вес бактериальной ДНК был промежуточным между весом ДНК с ^{15}N и весом ДНК с ^{14}N . После двух циклов клеточного деления лишь одна из четырех цепей ДНК была «тяжелой» ДНК и т.д. Этим остроумным экспериментом Мезельсон и Сталь подтвердили, что в результате каждого деления клетки комплементарные цепи ДНК содержат половину старой («тяжелой») ДНК и половину новой («легкой») ДНК — в точном соответствии с гипотезой Уотсона и Крика.

Участок ДНК реплицируется посредством «растегивания» двойной цепи и достраивания новых цепей

типа: между А и Т и между Г и Ц. Другие связи возникнуть не могут. Следовательно, каждая ступенька представлена либо А—Т либо Г—Ц. Теперь вообразите, что вы берете собранную таким образом лестницу за два конца и скручиваете — вы получите знакомую двойную спираль ДНК.

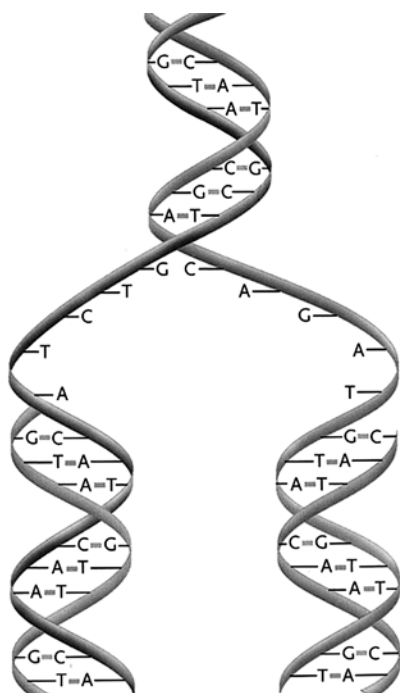
Считывая ступеньки по одной цепи молекулы ДНК, вы получите последовательность оснований. Представьте, что это сообщение, написанное с помощью алфавита всего из четырех букв. Именно это сообщение определяет химические превращения, происходящие в клетке, и, следовательно, характеристики живого организма, частью которого является эта клетка. На другой цепи спирали никакой новой информации не содержится, ведь, если вам известно основание, которое находится на одной цепи, вы знаете и то, какой должна быть вторая половина ступеньки. В некотором смысле две цепи двойной спирали относятся друг другу так же, как фотография и негатив.

Открыв двуспиральную структуру ДНК, Уотсон и Крик поняли и тот простой способ, которым осуществляется воспроизведение молекулы ДНК — как и должно происходить при делении клетки. По их собственным словам, «от нашего внимания не ускользнул тот факт, что постулированная нами специфичная парность азотистых оснований непосредственно указывает на возможный механизм копирования генетического материала».

Такой «возможный механизм копирования» определен структурой ДНК. Когда клетка приступает к делению и необходима дополнительная ДНК для дочерних клеток, ферменты (см.

КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ) начинают «растегивать» лестницу ДНК, как застежку-«молнию», обнажая индивидуальные основания. Другие ферменты присоединяют соответствующие основания, находящиеся в окружающей жидкой среде, к парным «обнажившимся» основаниям — А к Т, Г к Ц и т.д. В результате на каждой из двух разошедшихся цепей ДНК достраивается соответствующая ей цепь из компонентов окружающей среды, и исходная молекула дает начало двум двойным спиральям.

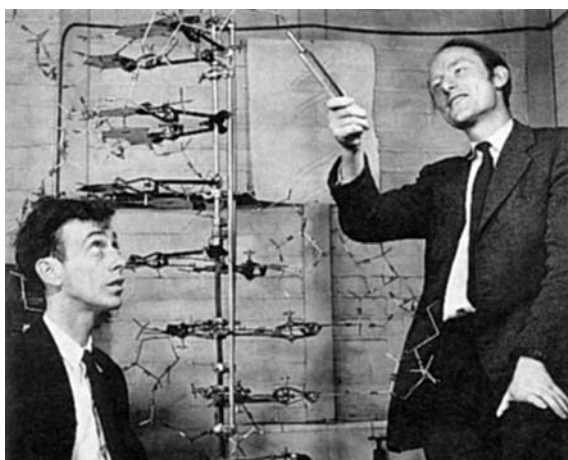
Точно так же, как каждое великое открытие основано



на работе предшественников, оно дает начало новым плодотворным исследованиям, поскольку ученые используют полученную информацию для движения вперед. Можно сказать, что открытие двойной спирали дало толчок последующему полувековому развитию молекулярной биологии, завершившемуся успешным осуществлением ПРОЕКТА «ГЕНОМ ЧЕЛОВЕКА».

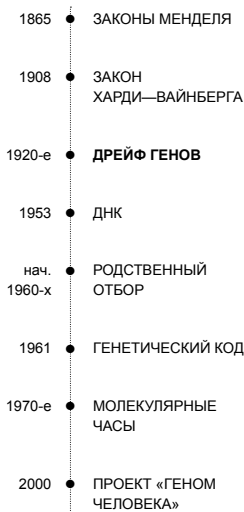
ФРЭНСИС ХАРРИ КОМПТОН КРИК (Francis Harry Compton Crick, 1916–2004) — английский молекулярный биолог (*на фото справа*). Родился в Нортгемптоне в семье обувного фабриканта. В 1938 году получил диплом физика в Университетском колледже в Лондоне. В годы войны занимался разработкой акустических и магнитных мин. Впоследствии решил исследовать «тайну жизни». В 1951 году, когда Крик изучал структуру белков в новом подразделении, созданном Медицинским исследовательским советом в Кавендишской лаборатории Кембриджа, студент Джеймс Уотсон предположил, что для понимания функции молекулы ДНК необходимо выяснить ее структуру. Успешные поиски в этом направлении принесли Уотсону и Крику в 1962 году Нобелевскую премию в области физиологии и медицины. Более поздние работы Крика связаны с разработкой центральной догмы молекулярной биологии. В 1977 году Крик перешел в институт Солка в Сан-Диего, где продолжил поиски «тайны жизни», переключившись на изучение сознания.

ДЖЕЙМС ДЬЮИ УОТСОН (James Dewey Watson, р. 1928) — американский биохимик. Родился в Чикаго, штат Иллинойс. В возрасте 15 лет поступил в университет Чикаго, который окончил четырьмя годами позже. В 1950 году получил докторскую степень в университете штата Индиана за изучение вирусов. Его посещение Кавендишской лаборатории в 1951 году привело к сотрудничеству с Фрэнсисом Криком, которое увенчалось открытием структуры ДНК. Крик и Уотсон поделили Нобелевскую премию в области физиологии и медицины с Морисом Уилкинсом (Maurice Wilkins, р. 1916), чьи эксперименты с дифракцией рентгеновских лучей помогли установить двуспиральную структуру ДНК. Розалинда Франклин (Rosalind Franklin, 1920–58), чей вклад в открытие структуры ДНК, по мнению многих, был очень весомым, не была удостоена Нобелевской премии, так как не дожила до этого времени.



Дрейф генов

Частота генов в популяции может варьировать под действием случайных факторов



ЗАКОН ХАРДИ—ВАЙНБЕРГА утверждает, что в теоретической идеальной популяции распределение генов будет оставаться постоянным из поколения в поколение. Так, в популяции растений количество «внуков» с генами высокорослости будет ровно таким же, сколько было родителей с этим геном. Но в реальных популяциях дело обстоит иначе. Из-за случайных событий частота распределения генов из поколения в поколение несколько варьирует — это явление называется дрейфом генов.

Приведем простой пример. Представьте себе группу растений, населяющих изолированную горную долину. Популяция состоит из 100 взрослых растений, и лишь 2% растений в популяции содержат особенный вариант гена (например, затрагивающий окраску цветка), т.е. в рассматриваемой нами популяции этот ген имеется лишь у двух растений. Вполне возможно, что небольшое происшествие (например, наводнение или падение дерева) приведет к гибели обоих растений, и тогда этот особенный вариант гена (или, пользуясь научной терминологией, этот *аллель*) попросту исчезнет из популяции. А значит, будущие поколения будут уже не такими, как рассматриваемое нами.

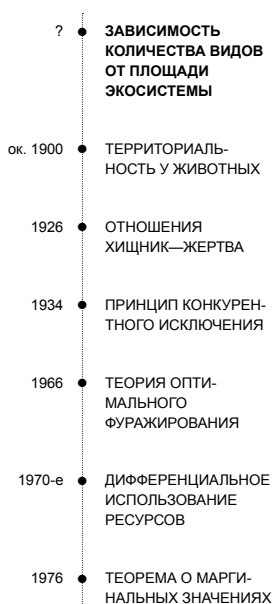
Существуют и другие примеры дрейфа генов. Рассмотрим крупную размножающуюся популяцию со строго определенным распределением аллелей. Представим, что по той или иной причине часть этой популяции отделяется и начинает формировать собственное сообщество. Распределение генов в субпопуляции может быть нехарактерным для более широкой группы, но с этого момента и впредь в субпопуляции будет наблюдаться именно такое нехарактерное для нее распределение. Это явление называется *эффектом основателя*.

Дрейф генов сходного типа можно наблюдать и на примере явления с запоминающимся названием *эффект бутылочного горлышка*. Если по какой-либо причине численность популяции резко уменьшится — под воздействием сил, не связанных с естественным отбором (например, в случае необычной засухи или непродолжительного увеличения численности хищников), быстро появившихся и затем исчезнувших, — то результатом будет случайное устранение большого числа индивидуумов. Как и в случае эффекта основателя, к тому времени, когда популяция вновь будет переживать расцвет, в ней будут гены, характерные для случайно выживших индивидуумов, а вовсе не для исходной популяции.

В конце XIX века в результате охотничьего промысла были почти полностью истреблены северные морские слоны. Сегодня в популяции этих животных (восстановившей свою численность) наблюдается неожиданно маленькое количество генетических вариантов. Антропологи полагают, что первые современные люди пережили эффект бутылочного горлышка около 100 000 лет назад, и объясняют этим генетическое сходство людей между собой. Даже у представителей кланов гориллы, обитающих в одном африканском лесу, больше генетических вариантов, чем у всех человеческих существ на планете.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА ВИДОВ ОТ ПЛОЩАДИ ЭКОСИСТЕМЫ

Количество видов, которое может поддерживать данная экосистема, тем выше, чем больше площадь этой экосистемы



Возникает закономерный вопрос: действительно ли небольшие экосистемы могут поддерживать существование меньшего числа видов, чем более крупные? С одной стороны, можно ожидать, что чем больше площадь, тем больше на ней различных экологических ниш, пригодных для использования. С другой стороны, непонятно, почему, например, сократив площадь луга вдвое, можно сократить биологическое разнообразие на нем. Ясно, что общее количество организмов уменьшится, но почему при этом должно измениться количество обнаруживаемых видов?

Ответ на этот вопрос был получен экспериментально. Экологи провели множество исследований. В одном из них на небольшом острове у побережья Флориды площадь, пригодную для использования, даже изменяли с помощью бензопилы! Данные изучения материковых и островных экосистем приводят к одинаковому заключению. Если A — площадь экосистемы, а S — количество видов, то зависимость между ними описывается формулой:

$$S = KA^n,$$

где n — число от 0,1 до 0,3, а K — константа, представляющая собой количество видов на единицу площади экосистемы. Это выражение называется уравнением зависимости количества видов от площади экосистемы.

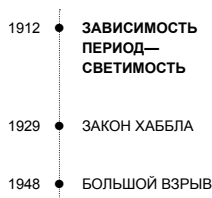
Однако надо иметь в виду, что, хотя количество видов, безусловно, зависит от площади экосистемы, эта зависимость не прямая. Так, даже при $n = 0,3$ увеличение площади экосистемы вдвое сопровождается увеличением количества видов всего на 23%.

Тем не менее эта закономерность имеет важные следствия для природоохранных действий, направленных на сохранение биологического разнообразия. В частности, мы должны понимать, что, сокращая площадь экосистемы, мы получаем не уменьшенную копию оригинала, а новую экосистему с ощутимо меньшим количеством видов. Другими словами, десять небольших клочков дикой природы могут поддерживать существование лишь половины видов, которые можно было бы обнаружить на едином участке земли с площадью, равной суммарной площади этих клочков.

И наоборот, увеличение размеров данной экосистемы не повлечет за собой пропорционального увеличения биоразнообразия, поэтому часто целесообразнее направить средства не на расширение существующих экосистем, а на создание заповедников в совершенно новых экосистемах.

Зависимость период— светимость

*Чем дольше период
изменения блеска
переменной звезды
класса цефеид, тем
больше энергии она
излучает*



Когда Китс писал «Звезда моя, ты постоянство света», он явно имел в виду не переменную Цефеиду. Большинство звезд, включая, к счастью для нас, Солнце, излучают свет и другие формы лучистой энергии (см. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ) с более или менее постоянной интенсивностью. Есть, однако, несколько классов звезд, с достаточным на то основанием названных *переменными*, яркость которых периодически возрастает и убывает из-за колебаний интенсивности поверхностного излучения. В результате наблюдаются циклические изменения свойства звезды, называемого *светимостью* и отражающего суммарный поток лучистой энергии, покидающий поверхность звезды. Особую историческую роль в развитии астрофизики сыграли переменные звезды класса цефеид, получившие свое название в честь созвездия Цефей, в котором находится первая открытая цефеида — δ Цефея.

Если проследить за динамикой изменения светимости цефеиды, выясняется, что ее усиление от минимума до пика происходит значительно быстрее, чем затухание, вне зависимости от разницы между максимальной и минимальной светимостями, которая может составлять от нескольких процентов до многократной. И такие колебания светимости у различных цефеид регулярно повторяются с периодичностью от нескольких суток до нескольких месяцев. При этом *период* цикла изменения светимости (время между максимумами или минимумами яркости) и *перепад* светимости (разность между максимумом и минимумом) остаются постоянными.

Благодаря этому свойству цефеиды послужили для астрономов первой *эталонной свечой* — объектом с заведомо известной светимостью. Электрическая лампочка мощностью 100 Вт, например, является прекрасной эталонной свечой в земных условиях. Обнаружив эталонную свечу в пространстве, можно измерить наблюдаемую интенсивность ее излучения и, сопоставив ее с заведомо известной исходной светимостью, определить геометрическое расстояние до источника света. Именно стандартные свечи позволяют астрономам добавлять в карты звездного неба третье измерение — удаленность — к двум наблюдаемым угловым координатам небесных объектов.

В начале XX века американский астроном Генриетта Ливитт заинтересовалась переменными цефеидами и начала их серьезно изучать. К 1912 году она накопила достаточно данных наблюдений, чтобы установить закономерность: чем ярче переменная цефеида, тем дольше длится ее цикл. Вскоре Эдвин Хаббл развил этот результат, связав период цефеиды не с наблюдаемой яркостью, а с присущей звезде *светимостью* — суммарной энергией, излучаемой звездой в космическое пространство. Так была открыта зависимость «период—светимость». Хаббл же первым использовал открытые им на новом телескопе цефеиды в туманности Андромеды в качестве стандартных свеч и обна-

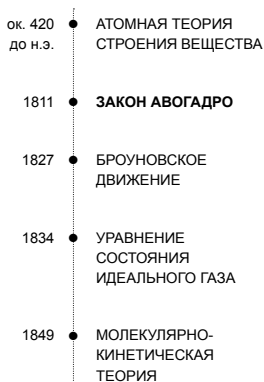
ружил, что это вовсе не туманность, а соседняя галактика. За этим последовали открытия целого ряда новых галактик и, наконец, открытие закона Хаббла, установившего, что галактики разбегаются.

ГЕНРИЕТТА ЛИВИТТ (Henrietta Leavitt, 1868–1921) — американский астроном. Родилась в Ланкастере (Lancaster), штат Массачусетс. В 1895 году. По окончании Рэдклифского колледжа (Radcliffe College) получила должность ассистента профессора астрономии Эдварда Пикеринга (Edward C. Pickering) и

под его руководством занималась классификацией звездных спектров, накапливаемых в обсерватории Гарвардского колледжа. Именно там изучение переменных цефеид в Малом Магеллановом облаке (небольшой галактике — спутнике Млечного Пути) и привело ее к открытию зависимости между периодом и яркостью цефеид.

Закон Авогадро

В равных объемах различных газов при постоянных температуре и давлении содержится одинаковое число молекул



При горении дерева происходит химическая реакция: углерод древесины соединяется с кислородом воздуха и образуется диоксид углерода (CO_2). Один атом углерода имеет такую же массу, как и 12 атомов водорода, а два атома кислорода — как 32 атома водорода. Таким образом, соотношение масс углерода и кислорода, участвующих в реакции, всегда равно 12:32 (или после упрощения 3 : 8). Какие бы мы ни выбрали единицы измерения, соотношение останется неизменным: 12 грамм углерода всегда реагируют с 32 граммами кислорода, 12 тонн углерода — с 32 тоннами кислорода и т.д. В химических реакциях имеет значение относительное количество атомов каждого элемента, участвующего в реакции. И, наблюдая за горящим в ночи костром, мы можем быть твердо уверены, что для каждого атома углерода из древесины найдутся два атома кислорода из воздуха, и соотношение их масс будет 12 : 32.

Раз это так, значит, в 12 граммах углерода атомов столько же, сколько в 16 граммах кислорода. Химики называют это количество атомов *молем*. Если относительная атомная масса вещества равна n (т.е. его атом в n раз тяжелее атома водорода), то масса одного моля этого вещества — n грамм. Моль — мера количества вещества, подобная *паре, дюжине* или *сотне*. Носков в паре всегда два, яиц в дюжине — всегда двенадцать; точно так же и в моле вещества количество атомов или молекул всегда одно и то же.

Но как же ученые это поняли? Ведь атомы сосчитать все-таки значительно сложнее, чем носки. Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к исследованиям итальянского химика Амедео Авогадро. Ему было известно, что при протекании химической реакции между газами соотношение объемов этих газов такое же, как и их молекулярное соотношение. Например, если три молекулы водорода (H_2) реагируют с молекулой азота (N_2) с образованием двух молекул аммиака (NH_3), то объем участвующего в реакции водорода в три раза больше объема азота. Из этого Авогадро сделал вывод, что количество молекул в двух объемах должно находиться в соотношении 3 : 1, или, другими словами, что равные объемы газа должны содержать равное количество атомов или молекул — это утверждение известно нам как закон Авогадро. Авогадро не знал, какое именно количество атомов или молекул должно быть в одном моле вещества. Сегодня мы знаем: это число 6×10^{23} ; мы называем его *числом Авогадро* (или *постоянной Авогадро*) и обозначаем символом N .

Несколько десятилетий исследования Авогадро оставались за рамками европейской науки того времени. Большинство историков склонны объяснять этот любопытный факт тем, что Авогадро работал в Турине, вдали от научных центров Германии, Франции и Англии. И действительно, только когда Авогадро приехал в Германию и представил там результаты своих исследований, они получили заслуженное признание.

Вычисление значения N оказалось непростой задачей. Это удалось сделать только в начале XX века французскому физическому

Перрену (Jean Perrin, 1870–1942). Он предложил несколько методов нахождения этого числа, и все они дали один и тот же результат. Самый известный из них основан на количественной теории броуновского движения, разработанной Эйнштейном. Речь идет о непрерывном беспорядочном движении малых частиц (например, пыльцевых зерен) под действием хаотических толчков атомов или молекул окружающей их среды. Движение такого пыльцевого зерна зависит от частоты столкновений, а следовательно, от количества атомов в материальной среде.

ЛОРЕНЦО РОМАНО АМЕДЕО КАРЛО АВОГАДРО (Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, 1776–1856) — итальянский физик и химик. Родился в Турине в дворянской семье, получил ученую степень доктора церковного права. В 1800 году начал самостоятельно заниматься математикой и физикой, а спустя шесть лет получил должность профессора в колледже города Верчелли. Затем стал профессором кафедры математической физики Туринского университета (в 1821 году кафедру закрыли по политическим причинам, и он смог вновь занять эту должность лишь в 1834 году). Авогадро был чрезвычайно скромным человеком, работал в одиночестве, и большую часть жизни его достижения были неизвестны в научном мире.



Закон Ампера

Движение электрических зарядов приводит к возникновению магнитных полей

1785	•	ЗАКОН КУЛОНА
1820	•	ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	•	ЗАКОН АМПЕРА
1820	•	ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	•	ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	•	ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Одним из главных направлений развития естественной науки в начале XIX века стало растущее осознание взаимосвязей между, казалось бы, совершенно не связанными между собой феноменами электричества и магнетизма. Ханс Кристиан Эрстед (см. ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА) экспериментально установил, что провод, по которому течет электрический ток, отклоняет магнитную стрелку компаса. Андре-Мари Ампер так заинтересовался этим явлением, что принялся за углубленное экспериментальное и математическое исследование взаимосвязи между электричеством и магнетизмом. В результате и был сформулирован закон, носящий теперь его имя.

Ключевой эксперимент, проведенный Ампером, достаточно прост. Он положил два прямых провода бок о бок и пропускал по ним электрический ток. Выяснилось, что между проводами действует сила притяжения или отталкивания (в зависимости от направления тока. — *Прим. переводчика*). Конечно, не надо быть семи пядей во лбу, чтобы прийти к такому выводу. Ведь при достаточно сильном токе провода действительно притягиваются или отталкиваются так, что это видно невооруженным глазом. Но Ампер путем тщательных измерений сумел определить, что сила механического взаимодействия пропорциональна силам токов и падает по мере увеличения расстояния между ними. Исходя из этого Ампер решил, что наблюдаемая сила объясняется возникновением магнитного поля.

Рассуждал Ампер примерно так. Электрический ток в одном проводе производит магнитное поле, конфигурация силовых линий которого представляет собой концентрические круги вокруг сечения провода. Второй провод попадает в область воздействия этого магнитного поля, и в нем возникает сила, действующая на движущиеся электрические заряды. Эта сила передается атомам металла, из которого сделан провод, в результате чего провод и изгибается. Таким образом, эксперимент Ампера демонстрирует нам два взаимодополняющих факта о природе электричества и магнетизма: во-первых, любой электрический ток порождает магнитное поле; во-вторых, магнитные поля оказывают силовое воздействие на движущиеся электрические заряды. Первое из этих утверждений сегодня и называют законом Ампера, и закон этот тесно связан с законом БИО—САВАРА. Именно эти два закона затем легли в основу теории электромагнитного поля (см. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА).

Если же трактовать закон Ампера чуть шире, то мы поймем, что находящийся в пространстве замкнутый электрический контур формирует вокруг себя магнитное поле, интенсивность которого пропорциональна силе протекающего через контур электрического тока и площади внутри контура. То есть, например, если вокруг отдельного прямолинейного проводника с током формируется магнитное поле, индукция которого равна B на расстоянии r от проводника, то при замыкании такого проводника в круговой

контур, путем сложения этих полей внутри контура, образованного замкнутым проводником с током, то есть, выражаясь научным языком, путем *интегрирования*, мы получим значение интенсивности магнитного поля внутри контура $2\pi rB$, где $2\pi r$ — площадь кругового контура. По закону Ампера эта величина и будет пропорциональна силе тока в контуре.

На самом деле вы не раз сталкивались с упоминанием имени Андре-Мари Ампера, возможно, сами того не сознавая. Взгляните на любой электроприбор у вас дома — и вы на нем обнаружите его электротехнические характеристики, например: «~220V 50Hz 3,2A». Это значит, что прибор рассчитан на питание от стандартной электросети переменного тока напряжением 220 вольт с частотой 50 герц, а сила потребляемого прибором тока составляет 3,2 *ампера*. Единица силы тока ампер (сокращенно — А) как раз и названа в честь ученого.

Официальное определение единицы выводится из исходного эксперимента, проделанного Ампером. Это сила тока, протекающего в каждом из двух параллельных прямолинейных проводников, помещенных в вакууме на расстояние одного метра друг от друга, вызывающая между двумя проводниками силу взаимодействия, равную 2×10^{-7} ньютона на метр длины. (Все научные определения единиц измерения даются в такой строгой формулировке. Причем речь здесь идет о так называемых «идеальных проводниках» бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения.) Кстати, при силе тока в 1 ампер в любой точке проводника каждую секунду протекает около 6×10^{23} электронов.

АНДРЕ-МАРИ АМПЕР (André Marie Ampère, 1775–1836) — французский физик. Родился в Лионе в семье торговца. Получил домашнее образование, имея доступ к прекрасной семейной библиотеке. (В частности, самостоятельно выучил латынь, чтобы в подлиннике читать труды видных математиков.) Сделал заметную карьеру во французской системе образования, получив при Наполеоне Бонапарте назначение на пост генерального инспектора всей системы университетского образования Франции. В 1827 году опубликована его самая известная работа «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», в которой Ампер подытожил свои электродинамические исследования и дал точные математические формулировки.



Закон Архимеда

Выталкивающая сила, действующая на погруженное в жидкость тело, равна весу вытесненной им жидкости

III до н.э. • ЗАКОН АРХИМЕДА

«Эврика!» («Нашел!») — именно этот возглас, согласно легенде, издал древнегреческий ученый и философ Архимед, открыв принцип вытеснения. Легенда гласит, что сиракузский царь Герон II попросил мыслителя определить, из чистого ли золота сделана его корона, не причиняя вреда самому царскому венцу. Взвесить корону Архимеду труда не составило, но этого было мало — нужно было определить объем короны, чтобы рассчитать плотность металла, из которого она отлита, и определить, чистое ли это золото.

Дальше, согласно легенде, Архимед, озабоченный мыслями о том, как определить объем короны, погрузился в ванну — и вдруг заметил, что уровень воды в ванне поднялся. И тут ученый осознал, что объем его тела вытеснил равный ему объем воды, следовательно, и корона, если ее опустить в заполненный до краев таз, вытеснит из него объем воды, равный ее объему. Решение задачи было найдено и, согласно самой расхожей версии легенды, ученый побежал докладывать о своей победе в царский дворец, даже не потрудившись одеться.

Однако, что правда — то правда: именно Архимед открыл *принцип плавучести*. Если твердое тело погрузить в жидкость, оно вытеснит объем жидкости, равный объему погруженной в жидкость части тела. Давление, которое ранее действовало на вытесненную жидкость, теперь будет действовать на твердое тело, вытеснившее ее. И, если действующая вертикально вверх выталкивающая сила окажется больше силы тяжести, тянущей тело вертикально вниз, тело останется наплаву; в противном случае оно пойдет ко дну (утонет). Говоря современным языком, тело плавает, если его средняя плотность меньше плотности жидкости, в которую оно погружено.

Закон Архимеда можно истолковать с точки зрения молекулярно-кинетической теории. В покоящейся жидкости давление производится посредством ударов движущихся молекул. Когда некий объем жидкости вымещается твердым телом, направленный вверх импульс ударов молекул будет приходиться не на вытесненные телом молекулы жидкости, а на само тело, чем и объясняется давление, оказываемое на него снизу и выталкивающее его в направлении поверхности жидкости. Если же тело погружено в жидкость полностью, выталкивающая сила будет по-прежнему действовать на него, поскольку давление нарастает с увеличением глубины, и нижняя часть тела подвергается большему давлению, чем нижняя, откуда и возникает выталкивающая сила. Таково объяснение выталкивающей силы на молекулярном уровне.

Такая картина выталкивания объясняет, почему судно, сделанное из стали, которая значительно плотнее воды, остается на плаву. Дело в том, что объем вытесненной судном воды равен объему погруженной в воду стали плюс объему воздуха, содержащегося внутри корпуса судна ниже ватерлинии. Если усреднить плотность оболочки корпуса и воздуха внутри нее, получится, что плотность судна (как физического тела) меньше плотности воды,



поэтому выталкивающая сила, действующая на него в результате направленных вверх импульсов удара молекул воды, оказывается выше гравитационной силы притяжения Земли, тянущей судно ко дну, — и корабль плавает.

АРХИМЕД ИЗ СИРАКУЗ (Archimedes of Siracuse, ок. 287–212 г. до н.э.) — древнегреческий математик, изобретатель и натурфилософ. О его жизни известно мало. Доказал ряд основополагающих математических теорем, прославился благодаря изобретению различных механизмов, до сих пор находящихся широкое приме-

нение как в быту, так и в оборонной промышленности. Легенда гласит, что Архимед умер насильственной смертью, пав от руки римского воина во время осады Сиракуз, не пожелав укрыться в доме, поскольку был всецело поглощен геометрической задачей, начертанной им на прибрежном песке.

Закон Био—Савара

Магнитное поле в точке пространства, создаваемое малым отрезком проводника, по которому течет электрический ток, пропорционально силе тока, обратно пропорционально квадрату расстояния от этой точки до проводника и направлено перпендикулярно по отношению и к току, и к направлению на проводник

1785	•	ЗАКОН КУЛОНА
1820	•	ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	•	ЗАКОН АМПЕРА
1820	•	ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	•	ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	•	ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Одним из величайших прорывов в естествознании XIX века стала серия открытий, позволивших установить неразрывную связь между двумя, казалось бы, не связанными между собой природными феноменами — электричеством и магнетизмом, — которые на поверку оказались просто двумя сторонами одной медали. Одним из первых фрагментов пазла, который предстояло собрать ученым, стало осознание того, что движущиеся электрические заряды (то есть электрический ток) могут порождать магнитное поле. Это открытие сделал датский ученый Ханс Кристиан Эрстед (см. ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА), а представил его в количественной форме французский ученый Андре-Мари Ампер (см. ЗАКОН АМПЕРА). Обобщением этой работы стал закон Био—Савара (его еще называют «закон Био—Савара—Лапласа». — *Прим. переводчика*), содержащий окончательную формулировку соотношения между электрическими токами и магнитными полями, которые они производят.

Жан Батист Био, яркий и смелый ученый, был профессором физики в Сорбонне и действительным членом французской Академии наук. Сразу после открытия Эрстеда вместе со своим коллегой Феликсом Саваром он принялся за изучение взаимосвязи между электрическим током и магнитными полями.

В отличие от Ампера, изучавшего магнитные поля опосредованно, путем измерения силы взаимодействия между парами проводников с током, Био и Савар предприняли прямые измерения магнитных полей, используя для этого множество легких магнитных стрелок компасов. Смысл их закона проще всего понять, если представить себе, что проводник с током разбит на крошечные отрезки — так называемые *элементы тока* (такой подход предложил ученым их старший коллега Пьер Симон Лаплас (Pierre-Simon Laplace, 1749–1827), стоявший у истоков дифференциального и интегрального исчисления, который затем и обобщил полученные результаты. — *Прим. переводчика*). На каждом из этих крошечных отрезков кривизной проводника можно пренебречь — их можно рассматривать как отрезки прямой. Так вот, согласно закону Био—Савара, магнитное поле B на расстоянии r от такого элемента тока пропорционально

$$IL/r^2,$$

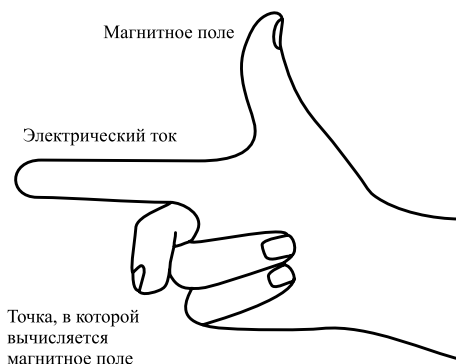
где I — сила тока, а L — длина элемента тока.

Я уже упоминал, что закон Био—Савара является наиболее полным формальным обобщением взаимосвязи между электрическим током и магнитным полем. Это значит, что можно взять проводник с током сколь угодно сложной и асимметричной конфигурации и разбить его на элементы тока. Каждый элемент вносит свой вклад в магнитное поле в рассчитываемой точке. Сделав эти расчеты, мы можем затем просуммировать вклад от каждого элемента проводника и найти общее магнитное поле (этот процесс суммирования относится к области высшей математики и выглядит он достаточно сложно). Таким образом, закон Ампера является частным случаем закона Био—Савара для случая линейного проводника.

Я еще не сказал, что закон Био—Савара предсказывает также направление получающегося магнитного поля. Это направление можно определить с помощью так называемого *правила правой руки*, ставшего настоящим бичом целых поколений студентов физических и технических вузов. Правило гласит: если вытянутый указательный палец правой руки показывает направление электрического тока в элементе тока, а средний палец направлен на точку, в которой вы вычисляете магнитное поле, то выставленный под прямым углом к двум другим пальцам большой палец укажет направление магнитного поля.

Как я уже говорил, полное математическое выражение закона Био—Савара требует довольно сложных вычислений, поскольку оно представляет собой интегральное уравнение. Оно является, по сути, общим решением четвертого уравнения МАКСВЕЛЛА.

Правило правой руки — проверенный временем способ определить направление магнитного поля, возникающего при электрическом токе



ЖАН БАТИСТ БИО (Jean-Baptiste Biot, 1774–1862) — французский физик. Родился в Париже, вырос в годы Великой французской революции и до начала занятий физикой успел отслужить в армии. Затем стал одним из первых студентов только что открытой Парижской политехнической школы, по окончании которой продолжал заниматься академической наукой, со временем заняв должность профессора физики в Коллеж де Франс в Париже. В 1803 году был командирован Министерством внутренних дел для расследования обстоятельств метеоритного дождя в городок Эгль. Ему впервые удалось доказать, что метеориты имеют внеземное происхождение и в буквальном смысле падают к нам с неба (в то время в это практически не верили). На следующий год Био вместе с Жозефом Луи Гей-Люссаком (Joseph-Louis Gay-Lussac, 1778–1850) впервые в истории поднялся в воздух на воздушном шаре в научно-иссле-

довательских целях — для изучения характеристик магнитного поля Земли на больших высотах. Однако главную известность принес ему закон Био—Савара, а также большие успехи в исследовании природы поляризации света.

ФЕЛИКС САВАР (Félix Savart, 1791–1841) — французский врач и физик. Родился в Мезьере. Получив медицинское образование, Савар тем не менее поступил на работу в Коллеж де Франс в качестве профессора акустики. Там он изучал принцип работы музыкальных инструментов, прежде всего скрипки, на примере колебаний песчаных волн в слое песка на плоской поверхности, отражающих акустические колебания. Кроме того, он изобрел *колесо Савара* для точного измерения высоты музыкальных тонов и *кварцевую пластину Савара* для изучения поляризации света. Однако самая известная работа ученого — его сотрудничество с Био, вылившееся в закон Био—Савара.

Закон Бойля—Мариотта

При постоянной температуре объем, занимаемый газом, обратно пропорционален его давлению

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1827	• БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Роберт Бойль — яркий пример ученого-джентльмена, сына давно ушедшей эпохи, когда наука была уделом исключительно состоятельных людей, посвящавших занятиям ею свой досуг. Большинство исследований Бойля относятся по современной классификации к разряду химических опытов, хотя сам себя он наверняка считал *натурфилософом* (физиком-теоретиком) и *естествоиспытателем* (физиком-экспериментатором). Судя по всему, поведением газов он заинтересовался, увидев проект одного из первых в мире воздушных насосов. Сконструировав и построив очередную усовершенствованную версию своего двустороннего воздушно-вакуумного насоса, он решил исследовать, как повышенное и пониженное давление газа в герметичном сосуде, к которому был подключен его новый аппарат, влияет на свойства газов. Будучи одаренным экспериментатором, Бойль одновременно придерживался весьма новых и необычных для той эпохи взглядов, считая, что наука должна идти от эмпирических наблюдений, а не основываться исключительно на умозрительно-философских построениях.

В формулировке Бойля закон звучал буквально так: «Под воздействием внешней силы газ упруго сжимается, а в ее отсутствие расширяется, при этом линейное сжатие или расширение пропорционально силе упругости газа». Представьте, что вы сдавливаете надутый воздушный шарик. Поскольку свободного пространства между молекулами воздуха достаточно, вы без особого труда, приложив некоторую силу и проделав определенную работу, сожмете шарик, уменьшив объем газа внутри него. Это одно из основных отличий газа от жидкости. В шарике с жидкой водой, например, молекулы упакованы плотно, как если бы шарик был заполнен микроскопическими дробинками. Поэтому вода не поддается в отличие от воздуха упругому сжатию. (Если не верите, попробуйте протолкнуть плотно пригнанную пробку внутрь горлышка бутылки, заполненной водой по самую пробку.) Закон Бойля—Мариотта*, наряду с законом Шарля, лег в основу уравнения состояния идеального газа.

* Трефил называет его «закон Бойля», однако мы сохранили принятое в российской традиции название закона. — Прим. переводчика.

РОБЕРТ БОЙЛЬ (Robert Boyle, 1627–91) — англо-ирландский физик и химик. Родился в замке Лисмор (Lismore Castle), Ирландия, став четырнадцатым ребенком графа Коркского (Earl of Cork) — знаменитого авантюриста эпохи королевы Елизаветы. Окончив привилегированную Итонскую школу, где был одним из первых учеников среди «юных джентльменов», отправился в многолетнее путешествие по континентальной Европе, в ходе которого продолжил образование в Женевском университете. Вернувшись на родину в 1648 году, оборудовал частную лабораторию и занялся на ее базе физико-химическими исследованиями. В 1658 году перебрался в Оксфорд, где его учеником и ассистентом по лаборатории стал Роберт Гук (см. закон Гука), будущий научный секретарь Королевского общества. Кстати, Бойль был одним из основателей и соучредителей Королевского общества, выросшего из кружка молодых оксфордских ученых. Провел целый ряд новаторских химических экспериментов, включая эксперименты по детальному изучению свойств кислот и оснований.



По некоторым данным, первым выдвинул гипотезу о существовании химических элементов. Доказал, что воздух необходим для горения и дыхания. Помимо занятий наукой был соучредителем и членом-пайщиком «Восточно-индийской компании» и активно занимался миссионерской деятельностью в надежде обратить в христианство жителей восточных колоний Британской империи.

Закон Брэгга

При соблюдении определенных математических условий рентгеновские лучи, отраженные от кристалла, дают четкую дифракционную картину, по которой можно воссоздать структуру кристаллической решетки

1807	• ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1818	• ДИФРАКЦИЯ
1864	• СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
1912	• ЗАКОН БРЭГГА

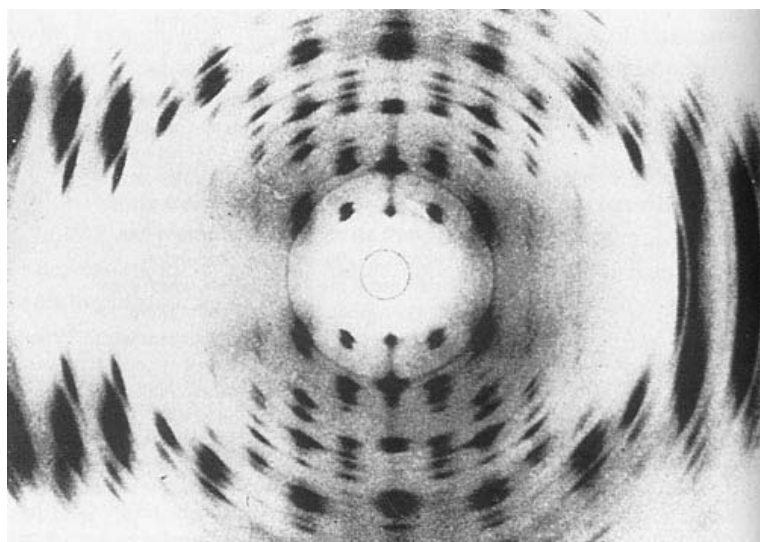
Дифракционная рентгенография применяется не только для исследования структуры кристаллических веществ. Перед вами дифракционная рентгенограмма молекулы ДНК. Поскольку ДНК имеет двуспиральную структуру, на снимке мы наблюдаем повторяющиеся дифракционные пики

В кристаллах атомы упорядоченно организованы в регулярно повторяющуюся геометрическую структуру, которую принято называть *кристаллической решеткой*. Она чем-то напоминает горку апельсинов на фруктовом лотке. Одна из задач физики твердого тела — разгадать структуру кристаллов. Для этого обычно используется метод, основанный на законе, который был открыт родившимся в Австралии английским ученым сэром Уильямом Лоуренсом Брэггом совместно с его отцом.

Когда рентгеновский луч падает на кристалл, каждый атом становится центром испускания вторичной волны Гюйгенса (см. принцип ГЮЙГЕНСА). Сам кристалл можно разбить на набор параллельных плоскостей, определяемых атомной структурой решетки (условно говоря, первая плоскость определяется направлением от атома к двум его ближайшим соседям, вторая — направлением от атома к двум следующим соседям по кристаллической решетке и так далее). Вторичные дифракционные волны в общем случае взаимно усиливаться не будут, за исключением тех случаев, когда они попадают в точку наблюдения (на экран или приемник) со сдвигом по фазе, равным целому числу длин волн. Это условие, определяющее пики интенсивности дифракционной картины, можно записать следующим образом:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

где d — расстояние между параллельными плоскостями кристаллической решетки, θ — угол рассеяния рентгеновских лучей, λ — длина волны рентгеновских лучей, а n — целое число (*порядок дифракции*). При $n = 1$ мы наблюдаем пик взаимного усиления волн дифракции на атомах, удаленных друг от друга на одну длину волны, при $n = 2$ — второй пик дифракции (разность хода составляет две длины волны) и т.д.



Это условие, известное теперь как закон Брэгга, говорит нам, что при данных длинах волн рентгеновское излучение усиливается под определенными углами рассеяния, и по этим углам отклонения мы можем рассчитать расстояние между плоскостями кристаллической решетки. Каждой из таких плоскостей будет соответствовать пик яркости рентгеновских лучей на дифракционной картине при соблюдении условия Брэгга.

Поэтому при облучении кристалла сфокусированным рентгеновским лучом на выходе мы получаем рассеянный в результате дифракции луч с выраженными пиками яркости. По углам отклонения пиков яркости от направления исходного луча ученые сегодня с большой точностью рассчитывают расстояния между атомами кристаллической решетки. Этот метод называется *дифракционной рентгенографией*. Он имеет сегодня первостепенное значение в биотехнологии, поскольку *дифракционная рентгенография* — один из основных методов, используемых для расшифровки структуры биологических молекул.

УИЛЬЯМ ГЕНРИ БРЭГГ (William Henry Bragg, 1862–1942) и **УИЛЬЯМ ЛОУРЕНС БРЭГГ** (William Lawrence Bragg, 1890–1971) — английские физики. Единственный в истории случай, когда отец и сын разделили Нобелевскую премию. Уильям Брэгг старший родился в Вествуде (Англия). По окончании Кембриджа преподавал физику в ряде университетов Великобритании и Австралии. После открытия радиоактивного излучения заинтересовался исследованиями его взаимодействия с веществом. Самое

важное и успешное исследование, посвященное рассеянию рентгеновских лучей на кристаллах, он провел вместе с сыном. За это исследование отец и сын были в 1915 году удостоены Нобелевской премии по физике. В дальнейшем Уильям Генри занимал посты директора Королевского института и председателя Королевского общества. Уильям Лоуренс всю свою научную карьеру посвятил дальнейшему развитию кристаллографии — науки, основы которой заложил вместе со своим отцом.

Закон Брюстера

Луч, падающий под определенным углом к отражающей поверхности, при отражении полностью поляризуется в плоскости, параллельной этой поверхности

ок. 100 н.э.	• ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА
1621	• ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
1690	• ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА
1807	• ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1815	• ЗАКОН БРЮСТЕРА
1818	• ДИФРАКЦИЯ

Свет, как и любое электромагнитное излучение, состоит из распространяющихся колебаний электрического и магнитного полей, которые ориентированы под прямым углом друг к другу. Направление электрического поля определяет направление, в котором будет двигаться электрический заряд при прохождении электромагнитной волны. *Поляризацией* волны как раз и называется направление электрического поля в волне.

Световые волны могут иметь *линейную* поляризацию (в этом случае колебания электрического поля происходят в фиксированной плоскости), *круговую* поляризацию (электрическое поле вращается подобно стрелке часов) или *эллиптическую* поляризацию (электрического поля вращается, при этом его абсолютная величина зависит от направления). Закон Брюстера описывает линейную поляризацию света при отражении луча от поверхности. Согласно этому закону, при определенном угле падения свет полностью поляризуется параллельно отражающей поверхности, и величина этого угла зависит от свойств отражающего вещества. Угол падения, при котором происходит полная поляризация отраженного и преломленного света, называется *углом Брюстера*, и его тангенс равен коэффициенту преломления отражающего вещества. Даже при углах падения, заметно отличающихся от угла Брюстера, свет в значительной мере поляризуется, но в этом случае и для преломленного, и для отраженного луча характерна эллиптическая поляризация.

Коэффициент преломления света в веществе равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в веществе. У обычного стекла, например, коэффициент преломления 1,5. Это означает, что свет, распространяющийся в вакууме со скоростью около 300 000 км/с, в стекле распространяется со скоростью всего лишь около 200 000 км/с. Следовательно, для стекла угол Брюстера, при котором происходит полная поляризация, составляет около 57°.

Вы наверняка встречались с явлением поляризации в быту. В частности, в наше время солнцезащитные очки часто делают *антибликовыми*, а достигается это благодаря тому, что в них вставлены поляризованные линзы. В солнечную погоду свет, отраженный от блестящих поверхностей (стекла, стали, воды), оказывается поляризованным преимущественно в горизонтальной плоскости (по закону Брюстера). А линзы антибликовых солнцезащитных очков пропускают только свет, поляризованный вертикально. Благодаря этому большинство бликов, отраженных от окружающих нас предметов, гасятся и не ослепляют нас.

ДЕЙВИД БРЮСТЕР (David Brewster, 1781–1868) — шотландский физик. Родился в Джеббурге. Изучал теологию в Эдинбургском университете, принял сан священника и стал одним из основателей Свободной шотландской церкви, однако вскоре оставил это поприще ради карьеры ученого и популяризатора науки. Специализировался на изучении оптических явлений, прежде всего спектральных и поляризационных, открыл закон, носящий его имя. Однако своеобразную бессмертную славу снискал себе, изобретя в 1816 году калейдоскоп. С 1859 года и до самой смерти Брюстер был ректором Эдинбургского университета.

зировавшись на изучении оптических явлений, прежде всего спектральных и поляризационных, открыл закон, носящий его имя. Однако своеобразную бессмертную славу снискал себе, изобретя в 1816 году калейдоскоп. С 1859 года и до самой смерти Брюстер был ректором Эдинбургского университета.

Закон всемирного тяготения Ньютона

Между всеми телами во Вселенной действует сила взаимного притяжения

1609, 1619	ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА
1687	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1687	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1905, 1916	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Исаак Ньютон (портрет работы неизвестного художника). Без преувеличения один из величайших научных умов за всю историю человечества. Именно Ньютону мы обязаны той картинке физического мира, которая сложилась к сегодняшнему дню.

На склоне своих дней Исаак Ньютон рассказал, как это произошло: он гулял по яблоневому саду в поместье своих родителей и вдруг увидел луну в дневном небе. И тут же на его глазах с ветки оторвалось и упало на землю яблоко. Поскольку Ньютон в это самое время работал над законами движения (см. ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА), он уже знал, что яблоко упало под воздействием гравитационного поля Земли. Знал он и о том, что Луна не просто висит в небе, а вращается по орбите вокруг Земли, и, следовательно, на нее воздействует какая-то сила, которая удерживает ее от того, чтобы сорваться с орбиты и улететь по прямой прочь, в открытый космос. Тут ему и пришло в голову, что, возможно, это одна и та же сила заставляет и яблоко падать на землю, и Луну оставаться на околоземной орбите.

Чтобы в полной мере оценить весь блеск этого прозрения, давайте ненадолго вернемся к его предыстории. Когда великие предшественники Ньютона, в частности Галилей, изучали равноускоренное движение тел, падающих на поверхность Земли, они были уверены, что наблюдают явление чисто земной природы, существующее только недалеко от поверхности нашей планеты. Когда другие ученые, например Иоганн Кеплер (см. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА), изучали движение небесных тел, они полагали что в небесных сферах действуют совсем иные законы движения, нежели законы, управляющие движением здесь, на Земле. История науки свидетельствует, что практически все аргументы, касающиеся движения небесных тел, до Ньютона сводились в основном к тому, что небесные тела, будучи совершенными, движутся по круговым орбитам в силу своего совершенства, поскольку окружность — суть идеальная геометрическая фигура. Таким образом, выражаясь современным языком, считалось, что имеются два типа гравитации, и это представление устойчиво закрепилось в сознании людей того времени. Все считали, что есть земная гравитация, действующая на несовершенной Земле, и есть гравитация небесная, действующая на совершенных небесах.

Прозрение же Ньютона как раз и заключалось в том, что он объединил эти два типа гравитации в своем сознании. С этого исторического момента искусственное и ложное разделение Земли и остальной Вселенной прекратило свое существование.

Результаты ньютоновских расчетов теперь называют *законом всемирного тяготения* Ньютона. Согласно этому закону, между любой парой тел во Вселенной действует сила взаимного притяжения. Как и все физические законы, он облечен в форму математического уравнения. Если M и m — массы двух тел, а D — рассто-



яние между ними, тогда сила F взаимного гравитационного притяжения между ними равна:

$$F = GMm/D^2,$$

где G — гравитационная константа, определяемая экспериментально. В единицах СИ ее значение составляет приблизительно $6,67 \times 10^{-11}$.

Относительно этого закона нужно сделать несколько важных замечаний. Во-первых, его действие в явной форме распространяется на все без исключения физические материальные тела во Вселенной. В частности, сейчас вы и эта книга испытываете равные по величине и противоположные по направлению силы взаимного гравитационного притяжения. Конечно же, эти силы настолько малы, что их не зафиксируют даже самые точные из современных приборов, но они реально существуют, и их можно рассчитать. Точно так же вы испытываете взаимное притяжение и с далеким квазаром, удаленным от вас на десятки миллиардов световых лет. Опять же, силы этого притяжения слишком малы, чтобы их инструментально зарегистрировать и измерить.

Второй момент заключается в том, что сила притяжения Земли у ее поверхности в равной мере воздействует на все материальные тела, находящиеся в любой точке земного шара. Прямо сейчас на вас действует сила земного притяжения, рассчитываемая по вышеприведенной формуле, и вы ее реально ощущаете как свой *вес*. Если вы что-нибудь уроните, оно под действием все той же силы равноускоренно устремится к земле. Галилею первому удалось экспериментально измерить приблизительную величину *ускорения свободного падения* (см. *УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ*) вблизи поверхности Земли. Это ускорение обозначают буквой g .

Для Галилея g было просто экспериментально измеряемой константой. По Ньютону же, ускорение свободного падения можно *вычислить*, подставив в формулу закона всемирного тяготения массу Земли M и радиус Земли D , помня при этом, что, согласно второму закону механики Ньютона, сила, действующая на тело, равняется его массе, умноженной на ускорение. Тем самым то, что для Галилея было просто предметом измерения, для Ньютона становится предметом математических расчетов или прогнозов.

Наконец, закон всемирного тяготения объясняет механическое устройство Солнечной системы, и законы Кеплера, описывающие траектории движения планет, могут быть выведены из него. Для Кеплера его законы носили чисто описательный характер — ученый просто обобщил свои наблюдения в математической форме, не подведя под формулы никаких теоретических оснований. В великой же системе мироустройства по Ньютону законы Кеплера становятся прямым следствием универсальных законов механики и закона всемирного тяготения. То есть мы опять наблюдаем, как эмпирические заключения, полученные на одном уровне, превращаются в строго обоснованные логические выводы при переходе на следующую ступень углубления наших знаний о мире.

Картину устройства Солнечной системы, вытекающую из этих уравнений и объединяющую земную и небесную гравитации, можно понять на простом примере. Предположим, вы стоите у края отвесной скалы, рядом с вами пушка и горка пушечных ядер. Если просто сбросить ядро с края обрыва по вертикали, оно начнет падать вниз отвесно и равноускоренно. Его движение будет описываться законами Ньютона для равноускоренного движения тела с ускорением g . Если теперь выпустить ядро из пушки в направлении горизонта, оно полетит и будет падать по дуге. И в этом случае его движение будет описываться законами Ньютона, только теперь они применяются к телу, движущемуся под воздействием силы тяжести и обладающему некой *начальной скоростью* в горизонтальной плоскости. Теперь, раз за разом заряжая в пушку все более тяжелое ядро и стреляя, вы обнаружите, что, поскольку каждое следующее ядро вылетает из ствола с большей начальной скоростью, ядра падают все дальше и дальше от подножия скалы.

Теперь представьте, что вы забили в пушку столько пороха, что скорости ядра хватает, чтобы облететь вокруг земного шара. Если пренебречь сопротивлением воздуха, ядро, облетев вокруг Земли, вернется в исходную точку точно с той же скоростью, с какой оно изначально вылетело из пушки. Что будет дальше, понятно: ядро на этом не остановится и будет и продолжать наматывать круг за кругом вокруг планеты. Иными словами, мы получим *искусственный спутник*, обращающийся вокруг Земли по орбите, подобно естественному спутнику — Луне. Так мы поэтапно перешли от описания движения тела, падающего исключительно под воздействием «земной» гравитации (ньютоновского яблока), к описанию движения спутника (Луны) по орбите, не изменяя при этом природы гравитационного воздействия с «земной» на «небесную». Вот это-то прозрение и позволило Ньютону связать воедино считавшиеся до него различными по своей природе две силы гравитационного притяжения.

Остается последний вопрос: правду ли рассказывал на склоне своих дней Ньютон? Действительно ли все произошло именно так? Никаких документальных свидетельств того, что Ньютон действительно занимался проблемой гравитации в тот период, к которому он сам относит свое открытие, сегодня нет, но документам свойственно теряться. С другой стороны, общеизвестно, что Ньютон был человеком малопривлекательным и крайне дотошным во всем, что касалось закрепления за ним приоритетов в науке, и это было бы очень в его характере — затемнить истину, если он вдруг почувствовал, что его научному приоритету хоть что-то угрожает. Датируя это открытие 1666-м годом, в то время как реально ученый сформулировал, записал и опубликовал этот закон лишь в 1687 году, Ньютон с точки зрения приоритета выгадал для себя преимущество больше чем в два десятка лет.

Я допускаю, что кого-то из историков от моей версии хватит удар, но на самом деле меня этот вопрос мало волнует. Как бы то ни было, яблоко Ньютона остается красивой притчей и блестящей метафорой, описывающей непредсказуемость и таинство творческого познания природы человеком. А является ли этот рассказ исторически достоверным — это уже вопрос вторичный.

Закон Генри

Масса газа, растворенного в жидкости, пропорциональна давлению газа над поверхностью жидкости

1801 • ЗАКОН ГЕНРИ

Закон Генри описывает процесс растворения газа в жидкости. Что представляет собой жидкость, в которой растворен газ, мы знаем на примере газированных напитков — безалкогольных, слабоалкогольных, а по большим праздникам — шампанского. Во всех этих напитках растворена двуокись углерода (химическая формула CO_2) — безвредный газ, используемый в пищевой промышленности по причине его хорошей растворимости в воде, а пенятся после открытия бутылки или банки все эти напитки по той причине, что растворенный газ начинает выделяться из жидкости в атмосферу, поскольку после открытия герметичного сосуда давление внутри падает.

Собственно, закон Генри констатирует достаточно простой факт: чем выше давление газа над поверхностью жидкости, тем труднее растворенному в ней газу высвободиться. И это совершенно логично с точки зрения молекулярно-кинетической теории, поскольку молекуле газа, чтобы вырваться на свободу с поверхности жидкости, нужно преодолеть энергию соударений с молекулами газа над поверхностью, а чем выше давление и как следствие число молекул в приграничной области, тем сложнее растворенной молекуле преодолеть этот барьер.

Закон Генри объясняет и другое свойство шипучих напитков — характерную пену, которая так и стремится выплеснуться наружу после того, как вы открыли бутылку газировки или (если выпал случай) шампанского. Чтобы закачать в напиток побольше газа, производители нарочно закупоривают бутылки и банки под большим приповерхностным давлением, а в шампанском оно и вовсе нагнетается само в процессе *ферментации* и естественного выделения двуокиси углерода внутри бутылки.

Когда вы дергаете за кольцо банки или открываете бутылку, углекислый газ, находящийся внутри под высоким давлением, производит характерный хлопок или шипение. Давление над поверхностью жидкости стремительно падает, уравниваясь с атмосферным давлением, и молекулы CO_2 начинают беспрепятственно выделяться из напитка, в котором были растворены, в результате чего напиток пузырится и пенится. Рано или поздно раство-

УИЛЬЯМ ГЕНРИ (William Henry, 1774–1836) — английский химик и физик. Родился в семье владельца химической мануфактуры в г. Манчестер. Учился на медицинском факультете Эдинбургского университета, окончив его, работал в морге в Манчестере. Унаследовав семейную химическую мануфактуру, посвятил свободное время физико-химическим исследованиям. Помимо закона, названного его именем, Генри открыл химическую формулу аммиака и обнаружил различие между метаном и этиленом. Помимо исследований (на

которые он потратил значительную часть семейного наследства) Генри оставил после себя учебник «Элементы экспериментальной химии» (Elements of Experimental Chemistry), признанный самым удачным учебником по химии первой половины XIX века. Близким другом и сотрудником Генри был другой видный ученый того времени Джон Дальтон (см. Закон Дальтона), а сын Уильяма Генри старшего Уильям Чарлз Генри (William Charles Henry) впоследствии написал первую и наиболее полную биографию друга своего отца.

ренный углекислый газ выделится из жидкости практически весь, направленное к поверхности давление растворенного в жидкости CO_2 сравняется с атмосферным, и напиток перестанет пениться и пузыриться. Вот почему шипучие напитки в откупоренном виде выдыхаются и достаточно быстро.

Оказывается, физический смысл можно найти даже в банке газировки.

Закон Грэма

Чем меньше плотность идеального газа, тем больше скорость его истечения через микроскопические отверстия в стенках сосуда

ок. 420 до н.э.	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1829	ЗАКОН ГРЭМА
1834	УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

ТОМАС ГРЭМ

(Thomas Graham, 1805–69) — шотландский химик. Родился в Глазго в семье преуспевающего фабриканта. Вопреки воле отца, желавшего видеть сына священником, он решил изучать химию. По окончании учебы в университете Глазго работал в разных научных учреждениях (даже был, как и когда-то Исаак Ньютон, директором Монетного двора). Томас Грэм известен в научном мире как основатель коллоидной химии (коллоиды — что-то вроде растворов, в которых частицы намного больше молекул).

Эффузия — это процесс медленного истечения газов через маленькие (часто микроскопические) отверстия. Вы встречались с явлением эффузии, когда наутро после празднования дня рождения обнаруживали вдруг, что наполненные накануне гелием воздушные шарик сдулись. Пока вы спали, через микроскопические поры гелий вытек из шариков.

В 1829 году Томас Грэм провел серию экспериментов по эффузии и обнаружил, что при постоянных температуре и давлении скорость истечения газа r обратно пропорциональна квадратному корню из плотности газа d . На языке уравнений это выглядит следующим образом:

$$r \times \sqrt{d} = k,$$

где k — константа. Другими словами, чем выше плотность газа при постоянных температуре и давлении, тем ниже скорость эффузии. Пожалуй, самое удивительное в законе Грэма — это то, что постоянная k (в правой части приведенного выше уравнения) при равных условиях примерно одинакова для всех газов.

Как мы знаем из законов идеального газа, при постоянных температуре и давлении плотность газа пропорциональна его относительной молекулярной массе M . Исходя из этого, можно переписать уравнение закона Грэма следующим образом:

$$r \times \sqrt{M} = k.$$

Теперь закон об относительной скорости истечения разных газов из одинаковых сосудов мы можем сформулировать так: чем меньше относительная молекулярная масса газа, тем выше скорость эффузии. Вот почему резиновый воздушный шарик, наполненный гелием (с относительной молекулярной массой 4), сдуется за одну ночь, но если тот же шарик наполнить воздухом, то есть смесью главным образом азота (относительная молекулярная масса 28) и кислорода (относительная молекулярная масса 32), он останется надутым в течение нескольких дней. (Воздушные шарик из металлизированной пленки, у которой поры значительно меньше, чем у резины, могут удерживать гелий в течение нескольких недель.)

Это может показаться неожиданным, но закон Грэма нашел применение и при конструировании космических кораблей (предназначенных для длительного нахождения человека в космосе). Корабль, конечно, отличается от воздушного шарика, но с течением времени воздух будет просачиваться через материал, из которого сделан корпус, так же, как он просачивается через оболочку шарика. Может быть, это и не главная забота тех, кто думает о будущем человечества в космосе, но в конце концов с этим придется считаться, например придумав способ получения газов прямо на борту корабля, чтобы компенсировать потери в безвоздушное пространство.

Закон Гука

*Сила
противодействия
упругого вещества
линейному
растяжению или
сжатию прямо
пропорциональна
относительному
увеличению или
сокращению длины*

1678 • ЗАКОН ГУКА

РОБЕРТ ГУК (Robert Hooke, 1635–1702) — английский физик. Родился во Фрешуотере (Freshwater) на острове Уайт в семье священника, окончил Оксфордский университет. Еще учась в университете, работал ассистентом в лаборатории Роберта Бойля, помогая последнему строить вакуумный насос для установки, на которой был открыт закон Бойля—Мариотта. Будучи современником Исаака Ньютона, вместе с ним активно участвовал в работе Королевского общества, а в 1677 году занял там пост ученого секретаря. Как и многие другие ученые того времени, Роберт Гук интересу-

Представьте, что вы взяли за один конец упругой пружины, другой конец которой закреплен неподвижно, и принялись ее растягивать или сжимать. Чем больше вы сдвигаете пружину или растягиваете ее, тем сильнее она этому сопротивляется. Именно по такому принципу устроены любые пружинные весы — будь то безмен (в нем пружина растягивается) или платформенные пружинные весы (пружина сжимается). В любом случае пружина противодействует деформации под воздействием веса груза, и сила гравитационного притяжения взвешиваемой массы к Земле уравнивается силой упругости пружины. Благодаря этому мы можем измерять массу взвешиваемого объекта по отклонению конца пружины от ее нормального положения.

Первое по-настоящему научное исследование процесса упругого растяжения и сжатия вещества предпринял Роберт Гук. Первоначально в своем опыте он использовал даже не пружину, а струну, измеряя, насколько она удлиняется под воздействием различных сил, приложенных к одному ее концу, в то время как другой конец жестко закреплен. Ему удалось выяснить, что до определенного предела струна растягивается строго пропорционально величине приложенной силы, пока не достигает предела упругого растяжения (эластичности) и не начинает подвергаться необратимой нелинейной деформации (см. ниже). В виде уравнения закон Гука записывается в следующей форме:

$$F = -kx,$$

где F — сила упругого сопротивления струны, x — линейное растяжение или сжатие, а k — так называемый *коэффициент упругости*. Чем выше k , тем жестче струна и тем тяжелее она поддается растяжению или сжатию. Знак минус в формуле указывает на то, что струна противодействует деформации: при растяжении стремится укоротиться, а при сжатии — распрямиться.

Закон Гука лег в основу раздела механики, который называется теорией *упругости*. Выяснилось, что он имеет гораздо более широкие применения, поскольку атомы в твердом теле ведут себя так, будто соединены между собой струнами, то есть упруго закреплены в объемной кристаллической решетке. Таким образом, при незначительной упругой деформации эластичного материала действующие силы также описываются законом Гука, но в несколько более сложной форме. В теории упругости закон Гука принимает следующий вид:

$$\sigma/\eta = E,$$

где σ — *механическое напряжение* (удельная сила, приложенная к поперечной площади сечения тела), η — относительное удлинение или сжатие струны, а E — так называемый *модуль Юнга*, или *модуль упругости*, играющий ту же роль, что коэффициент упругости k . Он зависит от свойств материала и определяет, насколько растянется или сожмется тело при упругой деформации под воздействием единичного механического напряжения.

вался самыми разными областями естественных наук и внес вклад в развитие многих из них. В своей монографии «Микрография» (*Micrography*) он опубликовал множество зарисовок микроскопического строения живых тканей и других биологических образцов и впервые ввел современное понятие «живая клетка». В геологии он первым осознал важность геологических пластов и первым в истории занялся научным изучением природных катаклизмов (см. униформизм). Он же одним из первых высказал гипотезу, что сила гравитационного притяжения между телами убывает пропорционально квадрату расстояния между ними, а это ключевой компонент закона всемирного тяготения Ньютона, и двое соотечественников и современников так до конца жизни и оспаривали друг у друга право называться его первооткрывателем. Наконец, Гук разработал и собственноручно построил целый ряд важных научно-измерительных приборов — и многие склонны видеть в этом его главный вклад в развитие науки. Он, в частности, первым додумался помещать перекрестье из двух тонких нитей в окуляр микроскопа, первым предложил принять температуру замерзания воды за ноль температурной шкалы, а также изобрел универсальный шарнир (кардановое сочленение).

Вообще-то Томас Юнг гораздо более известен в науке как один из сторонников теории волновой природы света, разработавший убедительный опыт с расщеплением светового луча на два пучка для ее подтверждения (см. принцип дополнительности и интерференция), после чего сомнений в верности волновой теории света ни у кого не осталось (хотя до конца облечь свои идеи в строгую математическую форму Юнг так и не сумел). Вообще говоря, модуль Юнга представляет собой одну из трех величин, позволяющих описать реакцию твердого материала на приложенную к нему внешнюю силу. Вторая — это *модуль смещения* (описывает, насколько вещество смещается под воздействием силы, приложенной по касательной к поверхности), а третья — *соотношение Пуассона* (описывает, насколько твердое тело истончается при растяжении). Последнее названо в честь французского математика Симеона Дени Пуассона (Siméon-Denis Poisson, 1781–1840).

Конечно, закон Гука даже в усовершенствованной Юнгом форме не описывает всего, что происходит с твердым веществом под воздействием внешних сил. Представьте себе резиновую ленту. Если растянуть ее не слишком сильно, со стороны резиновой ленты возникнет возвратная сила упругого натяжения, и как только вы ее отпустите, она тут же соберется и примет прежнюю форму. Если растягивать резиновую ленту и дальше, то рано или поздно она утратит свою эластичность, и вы почувствуете, что сила сопротивления растяжению ослабла. Значит, вы перешли так называемый *предел эластичности* материала. Если тянуть резину и дальше, через какое-то время она вообще порвется, и сопротивление исчезнет полностью — это вы перешли через так называемую *точку разрыва*.

Иными словами, закон Гука действует только при относительно небольших сжатиях или растяжениях. Пока вещество сохраняет свои упругие свойства, силы деформации прямо пропорциональны ее величине, и вы имеете дело с линейной системой — каждому равному приращению приложенной силы соответствует равное приращение деформации. Стоит перетянуть резину за *предел эластичности*, и межатомные связи-пружины внутри вещества сначала ослабевают, а затем рвутся — и простое линейное уравнение Гука перестает описывать происходящее. В таком случае принято говорить, что система стала *нелинейной*. Сегодня исследование нелинейных систем и процессов является одним из основных направлений развития физики.

Закон Дальтона

Давление смеси газов, не взаимодействующих друг с другом химически, равно сумме парциальных давлений этих газов

ок. 420 до н.э.	•	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	•	ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1801	•	ЗАКОН ДАЛЬТОНА
1834	•	УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	•	МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Джон Дальтон, ученый, создавший современную теорию атомов

Воздух в комнате, где мы находимся, представляет собой смесь нескольких газов, в основном — азота (около 80%) и кислорода (около 20%). Парциальное давление каждого из этих газов — это давление, которое имел бы газ, если бы он один занимал весь объем. К примеру, если бы все газы, кроме азота, удалили из комнаты, то давление того, что осталось, и было бы парциальным давлением азота. Закон Дальтона утверждает, что общее давление всех газов вместе взятых равно сумме парциальных давлений каждого газа в отдельности. (Строго говоря, закон применим только к идеальным газам, но с достаточно хорошим приближением он описывает также и реальные газы.)

Джон Дальтон сформулировал этот закон в 1801 году, хотя молекулярно-кинетическая теория газов (модель, описывающая поведение газов), из которой он непосредственно вытекает, была разработана позже — уже в середине XIX века. Давление газа на стенки сосуда представляет собой результат столкновения молекул газа с этими стенками. Рассматривая газ с этих позиций, нетрудно понять, что количество столкновений со стенкой молекул каждого вида будет зависеть от того, как много молекул этого вида присутствует в газе. А из этого следует, что общее давление, представляющее собой сумму столкновений всех молекул, получается при сложении числа столкновений молекул каждого вида.



ДЖОН ДАЛЬТОН (John Dalton, 1766–1844) — английский химик и физик. Родился в городе Иглсфилде (графство Камбрия), в семье квакеров. Дальтон бросил школу в 11 лет, но позже начал изучать метеорологию. Два года он работал сельскохозяйственным рабочим, затем стал ассистентом в квакерской

школе. Знания в области естественных наук и математики Дальтон получил от своих коллег. Чтобы прокормиться, открыл собственную школу. Его главным вкладом в науку стала современная атомная теория. Интерес к погоде, а затем и к поведению газов привел его к идее атомов.

Закон Копа

*Все виды
эволюционируют
в направлении
увеличения размеров
тела*



ЭДУАРД ДРИНКЕР КОП (Edward Drinker Cope, 1840–97) — американский палеонтолог. Родился в Филадельфии (штат Пенсильвания). С ранних лет начал проявлять интерес к естествознанию. В 1864 году стал профессором сравнительной зоологии и ботаники колледжа Хаверфорд (штат Пенсильвания), а спустя восемь лет начал работать в Геологической службе США. Впоследствии заведовал кафедрой геологии и минералогии (1889–95) и кафедрой зоологии и сравнительной анатомии в Пенсильванском университете. Научная деятельность Копа в области палеонтологии характеризовалась напряженным соперничеством с профессором палеонтологии позвоночных Йельского университета Отниелем Чарлзом Маршем (Othniel Charles Marsh, 1831–99). Оба ученых получили широкое признание благодаря открытию почти тысячи вымерших видов.

Эдуард Коп был одним из последних представителей ученых своего поколения — независимых, богатых, идущих в науке собственным путем. Он внес значительный вклад в открытие кладбищ ископаемых животных на западе США. Наибольшую известность ему принесло участие в «войне динозавров» — яростном соперничестве с представителем Йельского университета Отниелем Маршем. Оба ученых обнаружили большое количество костей динозавров и постоянно боролись за самое яркое открытие. Пожалуй, главным результатом этой «войны» стала ошибочная идентификация первых обнаруженных останков бронтозавра. Из-за этой ошибки бронтозавр был впоследствии переименован в апатозавра — это название впервые предложил Коп. (Об этой ошибке было официально объявлено в 1903 году, однако к тому времени название «бронтозавр» уже прочно укрепилось в общественном сознании. Так что, если только вы не пишете научный труд по палеонтологии, можете смело употреблять старое название.)

Этому исследованию динозавров мы обязаны еще и появлением закона Копа. Закон говорит нам, что в процессе эволюционного развития каждый вид стремится к увеличению размеров тела. Данное утверждение считалось верным почти целый век. Однако недавно палеонтолог Майкл Фут (Michael Foote, р. 1963) из Чикагского университета поставил под сомнение верность этого закона. Фут — представитель нового поколения палеонтологов, хорошо знакомых с современными компьютерными методами исследования. Работая с внушительной базой данных, в которой собрана информация об ископаемых иглокожих (тип морских животных), он показал, что на протяжении десятков миллионов лет в изменении их размеров не было никакой определенной тенденции. Размеры некоторых видов из его базы данных действительно увеличились в соответствии с законом Копа. Однако размеры других видов, наоборот, уменьшились, а третьих — остались без изменения. Иными словами, если анализировать большой объем данных, не ограничиваясь только динозаврами, закон Копа выглядит не столь безупречным.

Закон Копа применим лишь к таким изменениям размеров тела, которые связаны со значительными изменениями в ДНК данного вида на протяжении длительного времени. Этот закон не годится для объяснения такого явления, как увеличение среднего роста людей в Европе со времен Средневековья. По мнению ученых, это следствие улучшения питания и медицинского обслуживания. Так что когда вы смотрите на рыцарские доспехи и задаетесь вопросом, почему рыцари были такими маленькими, закон Копа не может служить вам ответом.

Закон Кулона

Сила взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами пропорциональна величинам этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

1785	● ЗАКОН КУЛОНА
1820	● ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	● ЗАКОН АМПЕРА
1820	● ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	● ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	● ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Явление электростатического притяжения еще до нашей эры было известно древнегреческим ученым. Они знали, например, что если потереть янтарь кошачьей шерстью, а стекло шелком, то между ними возникают силы притяжения. Кроме того, им было известно, что при помощи таких предметов можно заставить воздействовать друг на друга и другие предметы: например, если прикоснуться наэлектризованным янтарем к пробковой крошке, она будет отталкиваться от других пробковых крошек, к которым прикасались янтарем, и притягиваться к крошкам, к которым прикасались стеклом. Сегодня мы знаем, что подобное притяжение и отталкивание является проявлением *статического электричества*. Мы наблюдаем электростатические явления и в повседневной жизни, когда, например, нам приходится буквально отлеплять одну от другой свежевывстиранные и доставаемые из сушилки вещи или когда мы никак не можем привести в порядок наэлектризованные и буквально встающие дыбом волосы.

Электростатика в современном понимании начинается с осознания того, что подобное поведение (притяжение или отталкивание), наблюдавшееся еще древними греками, является следствием существования в природе двух видов электрических зарядов — положительных и отрицательных. В атоме они разделены. Положительные заряды сосредоточены в атомном ядре — их носителями являются протоны, а электроны, являющиеся носителями отрицательных зарядов, расположены вокруг ядра (см. атом бора). Первым идею о том, что в природе существует только два типа электрических зарядов и только они ответственны за все наблюдаемые нами электростатические явления, подобные вышеописанным, высказал американский государственный деятель и ученый Бенджамин Франклин (Benjamin Franklin, 1706–1790). Выражаясь современным языком, его рассуждения сводились к тому, что, если удалить часть отрицательно заряженных электронов из вещества, оно останется положительно заряженным, поскольку в нормальном состоянии именно отрицательный заряд электронов компенсирует положительный заряд ядер. Если же к веществу в нормальном состоянии добавить дополнительные электроны, оно приобретет отрицательный заряд.

Зная о существовании электричества на протяжении тысяч лет, человек приступил к его научному изучению лишь в XVIII веке. (Интересно, что сами ученые той эпохи, занявшиеся этой проблемой, выделяли электричество в отдельную от физики науку, а себя именовали «электриками».) Одним из ведущих первоисследователей электричества явился Шарль Огюстен де Кулон. Тщательно исследовав силы взаимодействия между телами, несущими на себе различные электростатические заряды, он и сформулировал закон, носящий теперь его имя. В основном свои эксперименты он проводил следующим образом: различные электростатические заряды передавались двум маленьким шарикам, подвешенным на тончайших нитях, после чего подвесы с шариками сближались. При достаточном сближении шарики начинали притягиваться друг к другу (при противо-

положительной *полярности* электрических зарядов) или отталкиваться (в случае однополярных зарядов). В результате нити отклонялись от вертикали на достаточно большой угол, при котором силы электростатического притяжения или отталкивания уравнивались силами земного притяжения. Замерив угол отклонения и зная массу шариков и длину подвесов, Кулон рассчитал силы электростатического взаимодействия на различном удалении шариков друг от друга и на основе этих данных вывел эмпирическую формулу:

$$F = kQq/D^2,$$

где Q и q — величины электростатических зарядов, D — расстояние между ними, а k — экспериментально определяемая *постоянная Кулона*.

Сразу отметим два интересных момента в законе Кулона. Во-первых, по своей математической форме он повторяет закон всемирного тяготения Ньютона, если заменить в последнем массы на заряды, а постоянную Ньютона на постоянную Кулона. И для этого сходства есть все причины. Согласно современной квантовой теории поля и электрические, и гравитационные поля возникают, когда физические тела обмениваются между собой лишенными массы покоя элементарными частицами-энергосносителями — *фотонами* или *гравитонами* соответственно. Таким образом, несмотря на кажущееся различие в природе гравитации и электричества, у двух этих сил много общего.

Второе важное замечание касается постоянной Кулона. Когда шотландский физик-теоретик Джеймс Кларк Максвелл вывел систему уравнений Максвелла для общего описания электромагнитных полей, выяснилось, что постоянная Кулона напрямую связана со скоростью света c . Наконец, Альберт Эйнштейн показал, что c играет роль фундаментальной мировой константы в рамках теории относительности. Таким образом можно проследить, как самые абстрактные и универсальные теории современной науки поэтапно развивались, впитывая в себя ранее полученные результаты, начиная с простых выводов, сделанных на основе настоящих физических опытов.

ШАРЛЬ ОГУСТЕН ДЕ КУЛОН

(Charles Augustin de Coulomb, 1736–1806) — французский инженер и физик. Родился в провинциальном местечке Ангулем в семье влиятельных поместных дворян. Большую часть своей жизни Кулон посвятил военной инженерии. Выйдя в отставку по окончании военно-инженерной службы, где он занимался строительством каналов и фортификационных укреплений во Франции и ее колониях в Карибском регионе, получил назначение в Париж на должность консультанта, оставлявшую ему достаточно

времени и сил для начала научной карьеры. Помимо электростатических явлений и магнетизма ученый экспериментально исследовал законы трения, а также разработал концепцию линейных осевых нагрузок, которая до сих пор неизменно используется в строительном-инженерном проектировании для расчета сил, действующих по отличному от вертикали направлениям на различные элементы постройки (например, со стороны кровли на стены). В его честь единица СИ количества электричества носит название кулон.

Закон Кюри

Магнитная восприимчивость парамагнетиков прямо пропорциональна магнитному полю и обратно пропорциональна температуре



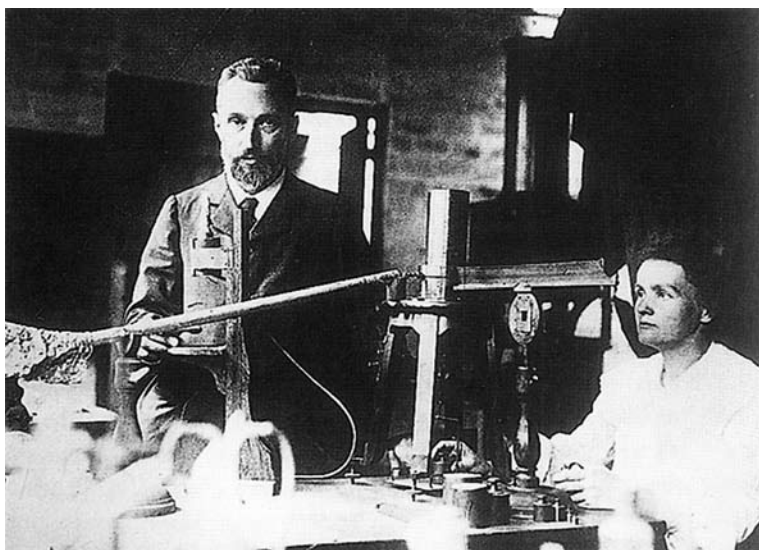
Большинство атомов обладает собственным магнитным полем (см. точка Кюри). В большинстве веществ магнитные поля атомов направлены хаотично, и они взаимно гасятся. Имеются, однако, такие вещества, в которых под воздействием внешнего магнитного поля магнитные поля атомов упорядочиваются и начинают усиливать внешнее магнитное поле. Такие материалы — их называют *парамагнетиками* — в обычных условиях магнитных свойств не проявляют, но во внешнем магнитном поле начинают их проявлять. Этим они, прежде всего, отличаются от *ферромагнетиков*, например железа, которые остаются намагниченными после прекращения действия внешнего магнитного поля, и *диамагнетиков*, которые намагничиваются в противоположном внешнему полю направлении и ослабляют его.

В начале своей карьеры французский физик Пьер Кюри детально изучил магнитные свойства различных веществ, и именно ему мы обязаны нашими современными представлениями в этой области. В частности, Кюри обнаружил, что дополнительное магнитное поле, возникающее, когда атомы парамагнетика упорядочиваются, пропорционально приложенному магнитному полю — то есть чем сильнее внешнее магнитное поле, тем больше атомы упорядочиваются. Кюри также открыл, что при нагревании парамагнитные свойства веществ ослабевают. Происходит это из-за усиления теплового движения атомов, которое препятствует упорядочению их магнитных полей. Эти результаты обобщены в законе Кюри:

$$M = CB/T,$$

где M — дополнительное магнитное поле, или намагниченность, вещества, B — приложенное магнитное поле, T — температура вещества (в кельвинах), а C — постоянная Кюри. Для данного вещества постоянная Кюри всегда одна и та же (не зависит от температуры), но меняется от вещества к веществу.

Пьер и Мария Кюри в своей лаборатории (около 1900 г.). Нетрудно видеть, что лаборатория оборудована весьма примитивно и небезопасно для здоровья. Постепенно в лаборатории накопился такой радиационный фон, что все предметы светились в темноте



Закон Мёрфи

*Если что-то
может сломаться,
это обязательно
сломается*

сер.
1940-х

● ЗАКОН МЁРФИ

Существует множество вариантов закона Мёрфи: бутерброд падает маслом вниз, сдача в кассе заканчивается всегда как раз перед тобой и т. п. Я всегда предполагал, что закон Мёрфи — это всего лишь образец народной мудрости, в ироничной форме выражающий представления о мире, а Мёрфи — персонаж вымышленный. Поэтому я очень удивился, когда узнал, что Мёрфи — не просто реальный человек, но еще и инженер военно-воздушных сил США, и его устам действительно принадлежит так называемая «классическая» версия закона, носящего его имя.

Как ни странно, Мёрфи — это капитан Эдвард Алоизиус Мёрфи (р. 1917), выпускник Военной академии сухопутных войск в Уэст-Пойнте и бывший летчик-истребитель, участвовавший в середине 1940-х в первых экспериментах по изучению реакции человеческого организма на сверхускорение. В ходе экспериментов, которые проводились на авиабазе Эдвардс в калифорнийской пустыне Мохаве, волонтера пристегивали к своего рода санкам, которые, двигаясь по рельсам, получали ускорение от ракетного двигателя. Наибольшее ускорение (в данном случае отрицательное) санки получали в конце поездки, когда скорость их движения резко замедлял бассейн с водой, установленный на рельсах.

Нет необходимости говорить, что это была система, в которой может произойти любая неожиданность. Мёрфи, как конструктора одного из механизмов санок, постоянно занимали мысли о том, почему его системы не работают должным образом. Вот его реальные слова (первая формулировка закона Мёрфи): «Если что-то можно сделать несколькими способами и один из них не работает, то обязательно найдется кто-то, кто прибегнет именно к этому способу». Мне кажется, тот факт, что изначальная мысль, много раз искажаясь, превратилась в хорошо знакомое нам всем утверждение, которое я дал в начале статьи, только подтверждает закон Мёрфи. Кстати говоря, как потом выяснилось, проблемы с механизмом Мёрфи возникли из-за того, что техник установил его задом наперед — вот очередной прекрасный пример закона в действии.

Конечно, «закон» Мёрфи — это не закон в том смысле, в каком это слово употребляется на других страницах нашей книги. Я имею в виду, что он никогда не подвергался тем тщательным испытаниям, которых требует научный метод. Тем не менее эта частица народной мудрости помогает нам более спокойно пережить те моменты, когда судьба отворачивается от нас.

Но кроме того, закон выражает взгляды инженера на жизнь. Все инженеры знают, что первым (а также вторым и третьим) делом сложную систему тестируют, и она не работает. И не предполагается, что она сразу будет работать. Конечная цель испытаний — найти неполадки в системе, чтобы их можно было устранить. Есть принципиальное различие между тем, как подходит к этому вопросу инженер и обычный человек. Так, насмешки, которым подверглась в 1960-е годы американская космическая программа,

когда ракеты одна за другой взрывались на старте, показывают, что публика просто не понимает цели испытаний. Конечно, в конце концов неполадки были устранены, и после успеха программы «Аполлон» все насмешки прекратились. Подобное явление наблюдалось и в начале XXI века во время публичного обсуждения американской системы противоракетной обороны.

Я думаю, конструкторы руководствуются именно законом Мёрфи, когда «на всякий случай» повышают коэффициент безопасности в своих сооружениях и механизмах. Большинство зданий, например, способно выдержать по крайней мере на 50% более мощные нагрузки, чем те, что возникают в реальной жизни, просто потому, что их создатели знают, что что-то может выйти не так.

Дело в том, что инженерам нравится думать о недостатках системы. Я помню семинар в Вирджинском университете в начале 1970-х, перед запуском первого космического шаттла. Докладчиком был инженер НАСА, который руководил созданием космического двигателя шаттла. И все полтора часа он объяснял в леденящих душу подробностях, почему его двигатель не должен был работать. Я никогда не видел столь восторженной публики: эти ребята наслаждались созерцанием системы, где столько всего может сломаться. Я думаю, такая кальвинистская черта характера должна быть присуща каждому инженеру, если он хочет добиться успеха. Тот факт, что в один прекрасный день он создаст систему, работающую безупречно, к делу не относится.

Закон Мура

*Основные
характеристики
компьютеров
улучшаются в два
раза каждые два
года*

1965 • ЗАКОН МУРА

В 1960-е годы, в самом начале информационной революции, Гордон Мур, впоследствии один из основателей корпорации Intel, обратил внимание на интересную закономерность в развитии компьютеров. Он заметил, что объем компьютерной памяти удваивается примерно каждые два года. Эта закономерность стала своего рода эмпирическим правилом в компьютерной промышленности, и вскоре оказалось, что не только память, но и каждый показатель производительности компьютера — размер микросхем, скорость процессора и т.д. — подчиняется этому правилу.

Последующее развитие компьютеров шло в соответствии с законом Мура. Поразительно, но в последние десятилетия мы стали свидетелями нескольких настоящих революций в области технологий. Мы прошли путь от компьютеров на ламповых транзисторах к компьютерам на интегральных схемах и далее — к компьютерам на микропроцессорах, и каждый раз закон Мура находил подтверждение. В 1960-е годы ни один человек в Силиконовой долине не мог даже предположить, что современные технологии производства позволят размещать миллионы элементов в кремниевом кристалле (чипе) размером с почтовую марку. Но когда в соответствии с законом Мура должна была возникнуть такая степень интеграции, она возникла. Правда, закон Мура, похоже, стал действовать быстрее — за последние несколько лет период удвоения производительности сократился с двух лет до полутора.

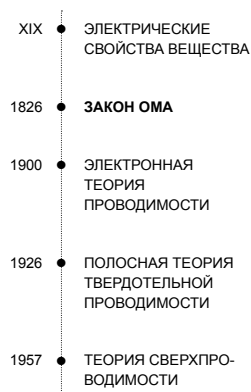
Однако рано или поздно законы природы положат конец господству закона Мура. Взять, к примеру, размеры элементов микросхемы. Закон предсказывает, что к 2060 году они должны будут стать размером с одиночный атом — что невозможно с точки зрения квантовой механики!

ГОРДОН ЭРЛ МУР (Gordon Earle Moore, р. 1929) — американский компьютерный инженер и бизнесмен. Родился в Сан-Франциско, получил докторскую степень в области химической физики в Калифорнийском технологическом институте. Некоторое время работал под руководством Вильяма Шокли (William Shockley, 1910–89), одного из изобретателей транзистора, и занимался изучением полупроводников. Но в характере Шокли начала проявляться эксцентричность, поведение его стало непредсказуемым, и Мур и несколько его коллег уво-

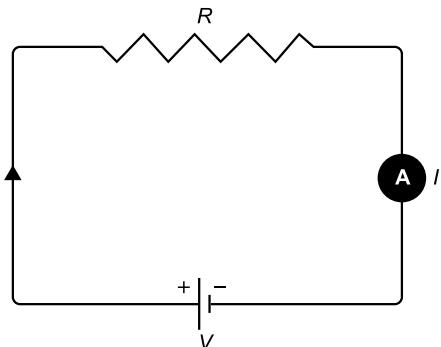
лились. С одним из них, Робертом Нойсом (Robert Noyce, 1927–90), в 1968 году Мур основал корпорацию Intel (где до сих пор занимает должность почетного председателя совета директоров) и приступил к разработке и производству сложных интегральных схем — «чипов», — лежащих в основе современных персональных компьютеров. «Закон» Мура впервые был изложен в 1965 году в журнале «Электроника» в комментарии ученого к статье о том, как технология интегральных схем должна привести к снижению стоимости компьютеров.

Закон Ома

Электрическое сопротивление проводника не зависит от поданного на него напряжения



Для этой цепи, согласно закону Ома, напряжение V равно силе тока I , измеренной амперметром A , умноженной на сопротивление R



Что такое электрическое сопротивление? Проще всего объяснить это по аналогии с водопроводной трубой. Представьте себе, что вода — некое подобие электрического тока, образуемого направленным движением электронов в проводнике, а напряжение — аналог давления (напора) воды. Сопротивление — это та сила противодействия среды их движению, которую электронам или воде приходится преодолевать, в результате чего производится работа и выделяется теплота. Именно такая модель представлялась в 1820-е годы Георгу Ому, когда он занялся исследованием природы происходящего в электрических цепях.

В водопроводной трубе все обстоит так, что чем выше давление воды, тем относительно большая доля энергии расходуется на преодоление сопротивления в трубах, поскольку в них усиливается *турбулентность* потока. Из этого исходил Ом, приступая к опытам по измерению зависимости силы тока от напряжения. И очень скоро выяснилось, что ничего подобного в электрических проводниках не происходит: сопротивление вещества электрическому току *вовсе не зависит* от приложенного напряжения. В этом, по сути, и заключается закон Ома, который (для отдельного участка цепи) записывается очень просто:

$$U = IR,$$

где U — напряжение, приложенное к участку цепи, I — сила тока, а R — электрическое сопротивление участка цепи.

Сегодня мы понимаем, что электрическая проводимость обусловлена движением свободных электронов, а сопротивление — столкновением этих электронов с атомами кристаллической решетки (см. ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ). При каждом таком столкновении часть энергии свободного электрона передается атому, который в результате начинает колебаться более интенсивно, и в итоге мы наблюдаем нагревание проводника под действием электрического тока. Повышение напряжения в цепи никак не сказывается на доле тепловых потерь такого рода, и соотношение напряжения и электрического тока остается постоянным.

Однако, когда Георг Ом экспериментально открыл свой закон, атомная теория строения вещества находилась в зачаточном состоянии, а до открытия электрона оставалось несколько десятилетий. Таким образом, для него формула $U = IR$ была чисто экспериментальным результатом. Сегодня мы имеем достаточно стройную и, одновременно, сложную теорию электропроводности и понимаем, что закон Ома в его первоначальном виде — всего лишь

грубое приближение. Однако это не мешает нам с успехом использовать его для расчета самых сложных электрических цепей, использующихся в промышленности и быту. Единица электрического сопротивления системы СИ называется *Ом* в честь этого выдающегося ученого.

ГЕОРГ СИМОН ОМ (Georg Simon Ohm, 1789–1854) — немецкий физик. Родился в Эрлангене в 1789 году (по другим источникам — в 1787-м). Окончил местный университет. Преподавал математику и естественные науки. Признание в академических кругах получил доста-

точно поздно, лишь в 1849 году став профессором Мюнхенского университета, хотя уже в 1827 году сформулировал и опубликовал закон, который теперь носит его имя. Помимо электричества, занимался акустикой и изучением человеческого слуха.

Закон отражения света

Отраженный и падающий лучи лежат в плоскости, содержащей перпендикуляр к отражающей поверхности в точке падения, и угол падения равен углу отражения

ок. 100 н.э.	●	ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА
1621	●	ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
1650	●	ПРИНЦИП ФЕРМА
1690	●	ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА
1807	●	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1815	●	ЗАКОН БРЮСТЕРА
1818	●	ДИФРАКЦИЯ

Представьте, что вы направили тонкий луч света на отражающую поверхность, — например, посветили лазерной указкой на зеркало или полированную металлическую поверхность. Луч отразится от такой поверхности и будет распространяться дальше в определенном направлении. Угол между перпендикуляром к поверхности (нормалью) и исходным лучом называется *углом падения*, а угол между нормалью и отраженным лучом — *углом отражения*. Закон отражения гласит, что угол падения равен углу отражения. Это полностью соответствует тому, что нам подсказывает интуиция. Луч, падающий почти параллельно поверхности, лишь слегка коснется ее и, отразившись под тупым углом, продолжит свой путь по низкой траектории, расположенной близко к поверхности. Луч, падающий почти отвесно, с другой стороны, отразится под острым углом, и направление отраженного луча будет близким к направлению падающего луча, как того и требует закон.

Закон отражения, как любой закон природы, был получен на основании наблюдений и опытов. Можно его вывести и теоретически — формально он является следствием принципа ФЕРМА (но это не отменяет значимости его экспериментального обоснования).

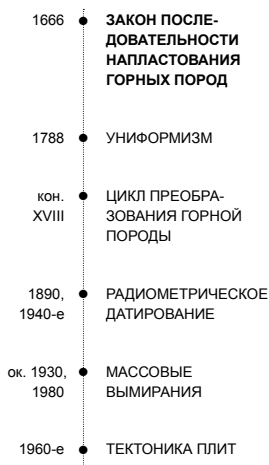
Ключевым моментом в этом законе является то, что углы отсчитываются от перпендикуляра к поверхности *в точке падения* луча. Для плоской поверхности, например, плоского зеркала, это не столь важно, поскольку перпендикуляр к ней направлен одинаково во всех точках. Параллельно сфокусированный световой сигнал — например, свет автомобильной фары или прожектора, — можно рассматривать как плотный пучок параллельных лучей света. Если такой пучок отразится от плоской поверхности, все отраженные лучи в пучке отразятся под одним углом и останутся параллельными. Вот почему прямое зеркало не искажает ваш визуальный образ.

Однако имеются и кривые зеркала. Различные геометрические конфигурации поверхностей зеркал по-разному изменяют отраженный образ и позволяют добиваться различных полезных эффектов. Главное вогнутое зеркало телескопа-рефлектора позволяет сфокусировать в окуляре свет от далеких космических объектов. Выгнутое зеркало заднего вида автомобиля позволяет расширить угол обзора. А кривые зеркала в комнате смеха позволяют от души повеселиться, разглядывая причудливо искаженные отражения самих себя.

Закону отражения подчиняется не только свет. Любые электромагнитные волны — радио, СВЧ, рентгеновские лучи и т. п. — ведут себя в точности так же. Вот почему, например, и огромные принимающие антенны радиотелескопов, и тарелки спутникового телевидения имеют форму вогнутого зеркала — в них используется все тот же принцип фокусировки поступающих параллельных лучей в точку.

Закон последовательности напластования горных пород

В ненарушенных осадочных породах чем слой ниже, тем он древнее



Один из наиболее впечатляющих примеров осадочных пород (см. цикл преобразования горной породы) можно увидеть в Большом Каньоне в Аризоне, где яркие разноцветные горные породы располагаются одна над другой слой за слоем, а между ними — миллионы лет геологической истории. Осадочные породы образуются в виде горизонтальных слоев из ила и других отложений на дне океанов и озер. Естественно, новые слои откладываются поверх более старых. Рассматривая все более и более глубокие слои в Большом Каньоне (или другом подобном месте), мы увидим все более и более древние породы — по сути дела, мы будем двигаться назад во времени.

Этот закон напластования горных пород стал первым инструментом палеонтологов в процессе изучения истории жизни на нашей планете. Сегодня он кажется нам очевидным. Однако в XVII веке, когда он впервые был высказан, сама мысль о том, что у Земли есть долгое геологическое прошлое, в течение которого она значительно изменялась, была просто революционной. Позднее, в начале XIX века, пришла другая важная мысль: если нижние отложения древнее верхних, то те формы жизни, остатки которых найдены в нижних слоях, должны были появиться раньше тех, которые найдены в верхних слоях. Это — закон последовательной смены комплексов животных и растений во времени. (Напомним, что это было время, когда многие считали идею эволюции противоречащей религии, даже еретической.) История отдельного вида растений или животных начинается, когда находят самый ранний слой отложений, содержащий остатки этих растений (животных), а период исчезновения данного вида определяется по самому позднему слою, в котором еще есть эти остатки. Вооружившись данным законом и законом напластования горных пород, палеонтологи стали определять относительный возраст пластов горной породы по ископаемым остаткам, которые содержались в этих пластах.

Если последовательность отложений не нарушена и содержит достаточное количество окаменелостей, можно проследить превращение одного вида организма в другой — иными словами, проследить за ходом естественного отбора в процессе эволюции. Правда, ископаемые остатки обычно не слишком хорошо сохраняются (хотя во всем мире есть несколько мест с подходящими для этого условиями). Обычно же можно увидеть только отпечатки ископаемых организмов, да и то разрозненные, и палеонтологам приходится прибегать к теоретическим рассуждениям, чтобы связать свою находку с тем, что действительно происходило в прошлом. Например, довольно часто какой-нибудь вид находят в нескольких нижних пластах, затем в нескольких последующих пластах его не обнаруживают, а затем вновь находят в вышележащих пластах. Очевидно, что данный вид существовал в течение всего этого периода времени, но не сохранился в виде окаменелостей в промежуточных слоях. (Этот феномен был назван «эффектом Лазаря»

Верхний пласт глины в этой геологической формации в Норфолке (Англия) лежит поверх более ранних пластов песчаника. Это наглядно иллюстрирует принцип последовательности напластования горных пород, который гласит: чем ниже расположен слой, тем раньше он сформировался.



по аналогии с библейским преданием о воскрешении человека из мертвых.)

Несколько слов предостережения. Во-первых, закон напластования горных пород не позволяет точно указать момент времени, когда сформировались отложения — с его помощью можно определить только относительный возраст различных слоев. Чтобы определить абсолютный возраст, необходимо радиометрическое датирование. Во-вторых, слово «ненарушенный» в формулировке принципа чрезвычайно важно. Поскольку поверхность Земли постоянно меняется (см. тектоника плит), осадочные породы, сформировавшись, впоследствии могут образовать складку, а в месте складки более древние породы окажутся выше более молодых.

Закон Снеллиуса

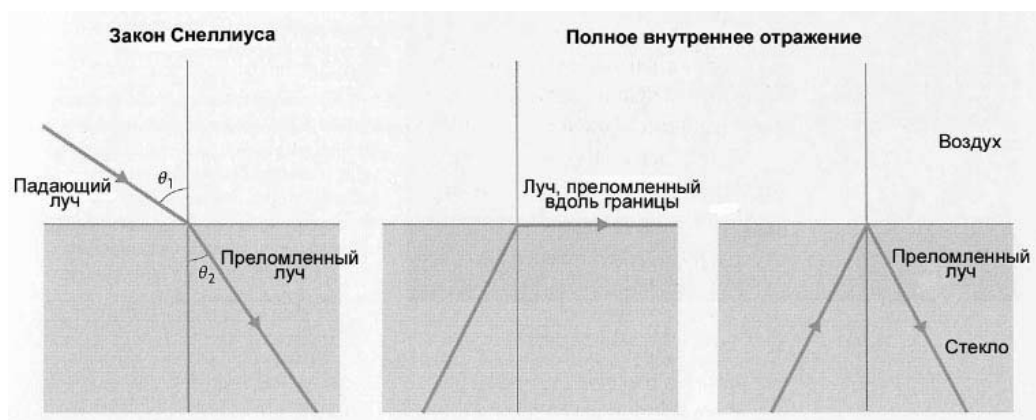
Угол преломления луча при прохождении границы между двумя средами зависит от соотношения коэффициентов преломления этих сред

- 1621 • ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
- 1650 • ПРИНЦИП ФЕРМА
- 1864 • СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- 1864 • УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА
- 1924 • ДИСПЕРСИЯ: АТОМНАЯ ТЕОРИЯ

Виллеброрд Снеллиус открыл простой закон преломления лучей. Полное внутреннее отражение происходит, когда луч падает под критическим или более тупым углом к нормали

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ заставила нас усвоить, что ничто не движется быстрее света, но при этом в данной формулировке имеется одна маленькая хитрость, о которой часто забывают. Теоретики, говоря «скорость света», имеют в виду скорость света в вакууме, которую принято обозначать латинской буквой c , и для них это настолько самоочевидно, что дополнение «в вакууме» они обычно не озвучивают. А ведь при распространении света в прозрачной среде, например, воде или стекле, он движется значительно медленнее скорости c из-за непрерывного взаимодействия с атомами материальной среды.

Так что же происходит с фронтом световой волны при ее прохождении через границу двух прозрачных сред? Ответ на это дает закон Снеллиуса (или «закон Снелля», если следовать не латинскому, а голландскому написанию. — *Прим. переводчика*), названный по имени голландского естествоиспытателя Виллеброрда Снеллиуса, впервые сформулировавшего эту закономерность. Важнейший пример такого преломления мы наблюдаем при попадании светового луча из воздуха в стекло и затем снова в воздух — а именно это происходит (причем зачастую неоднократно) в любом оптическом приборе, будь то сложнейшее лабораторное оборудование или банальная пара очков. Представьте себе туристов, идущих гуськом по диагонали через квадратное поле, посередине которого, параллельно двум его сторонам, проходит граница, после которой начинается болото. Понятно, что по чистому полю туристы могут идти быстрее, а по болотной жиже — медленнее. И вот, когда первые туристы доходят до края болота и начинают вязнуть в грязи, скорость их продвижения падает, и они, как нормальные люди, отклоняются от курса, чтобы поскорее добраться до противоположного края болота, в то время как идущие следом движутся с прежней скоростью и в прежнем направлении. По мере залезания в болото все новых туристов они также сбрасывают скорость и начинают срезать угол. В итоге с высоты птичьего полета процессия туристов выглядит преломленной — по полю она идет в одном направлении, а по болоту — в другом. То



Полное внутреннее отражение

Представьте стеклянный параллелепипед, изнутри которого на одну из его граней падает луч света. При прохождении границы с воздухом луч преломляется и, поскольку коэффициент преломления света в воздухе (около 1) ниже, чем в стекле (около 1,5), луч отклоняется от перпендикуляра (нормали). По закону Снеллиуса, если луч падает на поверхность под углом, например, 30° , по ту сторону границы он выйдет под более тупым углом к нормали (около 49°). По мере увеличения отклонения угла падения от нормали угол преломления будет увеличиваться «опережающими темпами», пока, наконец, при угле падения примерно в 42° расчетный угол преломления не станет равен 90° к перпендикуляру — то есть, попав на поверхность, луч в этом случае не пройдет сквозь нее, а преломится строго вдоль границы между стеклом и воздухом.

Что же случится при дальнейшем увеличении угла падения луча? Угол преломления более 90° по сути означает, что луч не выйдет за пределы стекла и останется внутри стеклянного бруса, — то есть, он не преломится, а *отразится* от границы стекла с воздухом. Это явление называется полным внутренним отражением. Критический угол определяется из уравнения:

$$\sin \theta > n_2/n_1.$$

При значениях θ больше критического угла луч света изнутри стекла больше не проникает в воздух, а отражается обратно внутрь стекла, как от зеркала. Явление полного внутреннего отражения вы легко можете пронаблюдать и сами. В следующий раз, ужиная при свечах, возьмите бокал вина и поднимите его высоко над головой, и, рассматривая огонек свечи сквозь поверхность вина, начните его постепенно опускать. Сначала, пока бокал поднят достаточно высоко, пламя свечи будет проблескивать сквозь поверхность вина. Однако в какой-то момент, по мере того как вы опускаете бокал, вы достигнете точки, когда поверхность

вина вдруг делается абсолютно темной. А все дело в том, что вы достигли критического угла падения луча и свет свечи теперь претерпевает полное внутреннее отражение, в результате чего никакой свет наружу не просачивается.

Однако полное внутреннее отражение — это не просто любопытный фокус, а основа для целого ряда важных современных технологий; прежде всего — этот эффект лежит в основе *оптоволоконной связи*. Свет, поступающий с одного конца в тончайшее стекловолокно под очень большим углом, в дальнейшем вынужден распространяться вдоль этого волокна, не покидая его пределов, раз за разом отражаясь от его стенок, поскольку угол его падения не достаточен, чтобы вырваться за его пределы, благодаря чему на противоположном конце выход оптического сигнала практически не теряет в интенсивности. Если связать множество таких оптических волокон в пучок, чередование импульсов света и затемненных промежутков на выходе из такого оптоволоконного кабеля будет строго соответствовать сигналу, поступившему в него на входе. Этот принцип сегодня широко используется в современных медицинских технологиях, в частности в артроскопии, когда тонкий пучок оптических волокон вводится в организм пациента сквозь крохотный надрез или естественное устье и доставляется буквально к самому органу, на котором производится микрохирургическая операция, позволяя хирургу в буквальном смысле видеть на экране монитора, что и как именно он оперирует.

Не менее широкое применение нашло полное внутреннее отражение и в области высокоскоростной передачи информации по оптоволоконным телефонным линиям связи. Посылая модулированные оптические сигналы вместо электромагнитных, мы получаем возможность на несколько порядков ускорить передачу информации по телекоммуникационным сетям. На самом деле во всех по-настоящему индустриально развитых странах мира вся телефония уже переведена на оптоволоконную связь.

же и со световым лучом: если при пересечении границы двух сред скорость света во второй среде ниже, чем скорость света в первой среде, луч отклоняется в сторону *нормали* (линии, перпендикулярной границе). Если же во второй среде скорость распространения света выше (как, например, при переходе света из стекла в воздух), луч, напротив, отклонится от нормали на больший угол (туристы ускорят шаг и спрямят направление).

Отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде называется *коэффициентом преломления* среды. Так, коэффициент преломления стекла равен примерно 1,5 (зависит от сорта стекла), то есть свет в стекле замедляется примерно на треть по сравнению со скоростью его распространения в вакууме. У каждого прозрачного материала — собственный коэффициент преломления (совпадения, конечно же, возможны, но они ни о чем не говорят).

Закон Снеллиуса устанавливает числовое соотношение между углами падения и преломления луча при переходе из одной среды в другую. Если θ_1 и θ_2 — углы, соответственно, падения и преломления относительно нормали (см. рисунок) при переходе луча из одной среды в другую, а n_1 и n_2 — коэффициенты преломления этих сред, то имеет место соотношение:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

Смысл этого закона в том, что, если известны коэффициенты преломления света в двух граничащих средах и угол падения луча, можно рассчитать, насколько отклонится луч после пересечения границы между средами.

Доводилось ли вам когда-либо стоять у бортика бассейна и удивляться, отчего это у вашей подруги, стоящей по пояс в воде, ноги кажутся непропорционально короткими? А все дело в том, что световые лучи, которые вы воспринимаете и которые доносят до вас зрительный образ, выйдя из воды и попав в воздух, преломились и достигают ваших глаз под более тупым углом, чем если бы бассейн стоял без воды. Мозг же верит глазам, и вам кажется, что ступни вашей подруги ближе, чем они есть на самом деле.

ВИЛЛЕБОРД СНЕЛЛИУС

(СНЕЛЛЬ) (Willebrord Van Roijen Snell, 1580–1626) — голландский математик и физик. Родился в Лейдене в семье профессора математики местного университета. Изучал математику и юриспруденцию в различных университетах Европы, много путешествовал, познакомился со многими видными учеными своего времени, включая Иоганна Кеплера. В 1613 году стал преемником отца на должности профессора Лейденского университета. Стоял

у истоков новой науки геодезии, первым усмотрев важность использования метода подобия треугольников при проведении геодезических измерений. В 1621 году, после многочисленных экспериментов по оптике, открыл закон преломления лучей, позже названный его именем. Своих результатов Снеллиус не публиковал, — они пылились в архивах, пока не были обнаружены Рене Декартом (René Descartes), который включил их в свой фундаментальный труд «Начала философии».

Закон сохранения линейного импульса

Линейный импульс замкнутой системы сохраняется

- 1668 • ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСА
- 1687 • ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
- 1736 • ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Начав двигаться, тело имеет тенденцию продолжать движение. Первый закон механики Ньютона гласит: если тело движется, то при отсутствии внешних воздействий оно так и будет двигаться дальше прямолинейно и равномерно до тех пор, пока не подвергнется воздействию внешней силы. Эту тенденцию называют *линейным импульсом*. С ней часто сталкиваемся в повседневной жизни. Бильярдный шар катится по столу с той скоростью, которая придана ему кием, копье летит с той скоростью, с которой его метнули.

Физики определяют линейный импульс тела p как его массу m , умноженную на его скорость v :

$$p = mv.$$

Буквы p и v выделены полужирным шрифтом, чтобы показать, что эти величины характеризуются не только абсолютным значением, но и направлением. Так, применительно к скорости, мы не просто говорим, что машина движется со скоростью 40 км/ч, а что она движется со скоростью 40 км/ч, например, на север. Величина, которая кроме абсолютного значения имеет направление, называется *вектором*.

Понятно, что, согласно первому закону Ньютона, количество движения отдельно взятого тела в отсутствии внешних сил сохраняется. Закон же сохранения импульса гласит, что при соблюдении этого условия сохраняется векторная сумма импульсов всех тел, входящих в замкнутую механическую систему. В таком представлении система из двух бильярдных шаров массой m , пущенных друг навстречу другу с одинаковыми скоростями v , будет иметь нулевой момент импульса, хотя каждый из шаров по отдельности и обладает импульсом mv . Однако импульсы шаров взаимно погасятся вследствие их векторной природы (поскольку их скорости противоположно направлены).

Вообще, любая величина, характеризующая систему и не изменяющаяся в результате взаимодействия внутри нее, называется *консервативной*, и для нее имеется свой закон сохранения. В частности, в механических системах, помимо закона сохранения импульса действует еще и закон сохранения момента импульса или *количества вращения* — величины, которая описывает количество движения тел вокруг собственной оси и по изогнутым траекториям.

Что же происходит при прямолинейном соударении двух бильярдных шаров на встречных курсах? Происходит сразу несколько явлений. Во-первых, в момент столкновения шары слегка деформируются и часть их кинетической энергии переходит в тепловую. Во-вторых, мы знаем, что совокупный импульс системы из двух шаров не изменяется и остается равным нулю. Значит, видя, что один шар откатывается после лобового столкновения в обратном направлении с определенной скоростью, мы можем с уверенностью сказать, что второй шар в данный момент времени катится в обратном направлении ровно с той же скоростью.

Второй закон механики Ньютона, кстати, можно легко интерпретировать и как формулу, согласно которой скорость изменения импульса равна силе, приложенной к замкнутой системе. Таким образом, чтобы изменить импульс системы, требуется внешняя сила. В молекулярно-кинетической теории, например, это наглядно просматривается: давление объясняется импульсами ударов молекул о стенки сосуда, содержащего газ. Поскольку молекулы газа упруго отскакивают в обратном направлении, их импульсы меняются на противоположные, а значит, стенка оказывает силовое воздействие на ударяющиеся об нее молекулы. Но это означает, что и молекулы, в силу третьего закона Ньютона, оказывают силовое воздействие на стенку, которое и воспринимается нами как давление.

Закон сохранения момента импульса

В замкнутой системе выполняется закон сохранения момента импульса

1668	•	ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСА
1687	•	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1736	•	ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Вращающееся вокруг своей оси тело при отсутствии тормозящих вращение сил так и будет продолжать вращаться. Физики привычно объясняют этот феномен тем, что такое вращающееся тело обладает неким *количеством движения*, выражающимся в форме *углового момента количества движения*, или кратко *момента импульса*, или *момента вращения*. Момент импульса вращающегося тела прямо пропорционален скорости вращения тела, его массе и линейной протяженности. Чем выше любая из этих величин, тем выше момент импульса. Если теперь допустить, что тело вращается не вокруг собственного *центра массы*, а вокруг некоего *центра вращения*, удаленного от него, оно все равно будет обладать вращательным моментом импульса. В математическом представлении момент импульса L тела, вращающегося с угловой скоростью ω , равен $L = I\omega$, где величина I , называемая *моментом инерции*, является аналогом инерционной массы в законе сохранения линейного импульса, и зависит она как от массы тела, так и от его конфигурации — то есть от распределения массы внутри тела. В целом, чем дальше от оси вращения удалена основная масса тела, тем выше момент инерции.

Сохраняющейся или *консервативной* принято называть величину, которая не изменяется в результате рассматриваемого взаимодействия. В рамках закона сохранения момента импульса консервативной величиной как раз и является угловой момент вращения массы — он не изменяется в отсутствие приложенного *момента силы* или *крутящего момента* — проекции вектора силы на плоскость вращения, перпендикулярно радиусу вращения, помноженной на *рычаг* (расстояние до оси вращения). Самый расхожий пример закона сохранения момента импульса — фигуристка, выполняющая фигуру вращения с ускорением. Спортсменка входит во вращение достаточно медленно, широко раскинув руки и ноги, а затем, по мере того как она собирает массу своего тела все ближе к оси вращения, прижимая конечности все ближе к туловищу, скорость вращения многократно возрастает вследствие уменьшения момента инерции при сохранении момента вращения. Тут мы и убеждаемся наглядно, что, чем меньше момент инерции I , тем выше угловая скорость ω и, как следствие, короче период вращения, обратно пропорциональный ей.

Следует отметить, однако, что не любая приложенная извне сила сказывается на моменте вращения. Предположим, вы поставили свой велосипед «на попа» (колесами вверх) и сильно раскрутили одно из его колес. Понятно, что, приложив тормозящую силу трения к любой окружности колеса (нажав на ручной тормоз, приложив руку к резине или вращающимся спицам), вы тем самым снизите угловую скорость его вращения. Однако сколько бы вы ни старались, вы не остановите вращения колеса, пытаясь воздействовать на ось вращения. Иными словами, для изменения момента вращения необходима не просто сила, а *момент силы* — то есть сила, приложенная по направлению, отличному от направления

оси вращения, и на некотором удалении от нее. Поэтому закон сохранения момента вращения можно сформулировать и несколько иначе: момент вращения тела изменяется только в присутствии момента силы, направленной на его изменение.

И тут возникает важное дополнительное замечание. До сих пор мы говорили об изменении момента вращения в плане ускорения или замедления вращения как такового, но при этом тело продолжало вращаться все в той же плоскости, и ось вращения не изменяла своей ориентации в пространстве. Теперь предположим, что момент силы приложен в плоскости, которая отличается от плоскости, в которой вращается тело. Такое воздействие неизбежно приведет к изменению направления оси вращения. В отсутствие же внешних воздействий закон сохранения момента импульса подразумевает, что направление оси вращения остается неизменным. Этот принцип широко используется в так называемых *гироскопических* навигационных приборах. В их основе лежит массивное быстро вращающееся колесо — *гироскоп* — которое не изменяет своей ориентации в пространстве, благодаря чему прибор стабильно указывает заданное направление вне зависимости от угла поворота субмарины, самолета или спутника, на котором он установлен. С технической точки зрения гироскоп представляет собой массивный диск на осевых подшипниках низкого трения, раскрученный с очень большой скоростью. Идеальный гироскоп — это диск бесконечной массы, вращающийся с бесконечной скоростью в идеальном вакууме. В таком случае закон сохранения момента импульса подскажет нам, что направление оси такого идеального гироскопа не отклонится от исходной ни на одну угловую секунду, и он вечно будет указывать нам на изначально заданную точку. Искусственные спутники Земли, как правило, оснащаются несколькими независимыми гироскопами, вращающимися в разных плоскостях, и бортовая электроника, сопоставляя данные нескольких гироскопических компасов и усредняя поправки на возможные отклонения их показаний, безошибочно определяет координаты и ориентацию спутника в околоземном пространстве.

Закон сохранения электрического заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остается постоянной

1747	●	ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
1845	●	ЗАКОНЫ КИРХГОФФА
1897	●	ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА
1911	●	ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА
1913	●	АТОМ БОРА

О том, что электрические заряды в природе существуют, человечество знало со времен древнегреческих натурфилософов, которые открыли, что кусочки янтаря, если их потереть кошачьей шерстью, начинают отталкиваться друг от друга. Сегодня мы знаем, что электрический заряд, подобно массе, является одним из фундаментальных свойств материи. Все без исключения элементарные частицы, из которых состоит материальная Вселенная, имеют тот или иной электрический заряд — положительный (подобно протонам в составе атомного ядра), нейтральный (подобно нейтронам того же ядра) или отрицательный (подобно электронам, образующим внешнюю оболочку атомного ядра и обеспечивающим его электрическую нейтральность в целом).

Одним из полезнейших приемов в физике является выявление совокупных (суммарных) свойств системы, которые не изменяются ни при каких изменениях ее состояния. Такие свойства, выражаясь научным языком, являются *консервативными*, поскольку для них выполняются *законы сохранения*. Любой закон сохранения сводится к констатации того факта, что в замкнутой (в смысле полного отсутствия «утечки» или «поступления» соответствующей физической величины) *консервативной системе* соответствующая величина, характеризующая систему в целом, со временем не изменяется.

Электрический заряд как раз и относится к категории консервативных характеристик замкнутых систем. Алгебраическая сумма положительных и отрицательных электрических зарядов — *чистый суммарный заряд системы* — не изменяется ни при каких обстоятельствах, какие бы процессы в системе ни происходили. В частности, при химических реакциях, отрицательно заряженные валентные электроны могут каким угодно образом перераспределяться между внешними оболочками образующих химические связи атомов различных веществ — ни совокупный отрицательный заряд электронов, ни совокупный положительный заряд протонов в ядре в замкнутой химической системе не изменится. И это лишь самый простой пример, поскольку при химических реакциях не происходит трансмутаций самих протонов и электронов, в результате чего число положительных и отрицательных зарядов в системе можно просто подсчитать.

При более высоких энергиях, однако, электрически заряженные элементарные частицы начинают вступать во взаимодействия друг с другом и проследить за соблюдением закона сохранения электрического заряда становится значительно сложнее, но он выполняется и в этом случае. Например, при реакции спонтанного распада изолированного нейтрона происходит процесс, который можно описать следующей формулой:

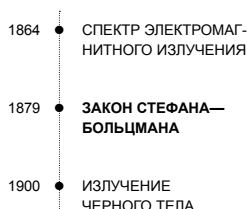
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu},$$

где p — положительно заряженный протон, n — нейтрально заряженный нейтрон, e — отрицательно заряженный электрон, а $\bar{\nu}$ —

нейтральная частица, называемая нейтрино. Нетрудно увидеть, что и в исходном материале, и в продукте реакции суммарный электрический заряд равен нулю ($0 = +1 - 1 + 0$), однако в этом случае налицо изменение общего числа положительно и отрицательно заряженных частиц в системе. Это одна из реакций радиоактивного распада, в которых закон сохранения алгебраической суммы электрических зарядов выполняется, несмотря на образование новых заряженных частиц. Такие процессы характерны для взаимодействий между элементарными частицами, при которых из частиц с одними электрическими зарядами рождаются частицы с другими электрическими зарядами. Суммарный электрический заряд замкнутой системы, в любом случае, остается неизменным.

Закон Стефана— Больцмана

*Светимость
абсолютно
черного тела
пропорциональна
четвертой степени
его температуры*



Нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн различной длины. Когда мы говорим, что тело «раскалено докрасна», это значит, что его температура достаточно высока, чтобы тепловое излучение происходило в видимой, световой части спектра. На атомарном уровне излучение становится следствием испускания фотонов возбужденными атомами (см. ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА). Закон, описывающий зависимость энергии теплового излучения от температуры, был получен на основе анализа экспериментальных данных австрийским физиком Йозефом Стефаном и теоретически обоснован также австрийцем Людвигом Больцманом (см. ПОСТОЯННАЯ БОЛЬЦМАНА).

Чтобы понять, как действует этот закон, представьте себе атом, излучающий свет в недрах Солнца. Свет тут же поглощается другим атомом, излучается им повторно и таким образом передается по цепочке от атома к атому, благодаря чему вся система находится в состоянии энергетического равновесия. В равновесном состоянии свет строго определенной частоты поглощается одним атомом в одном месте одновременно с испусканием света той же частоты другим атомом в другом месте. В результате интенсивность света каждой длины волны спектра остается неизменной.

Температура внутри Солнца падает по мере удаления от его центра. Поэтому по мере движения по направлению к поверхности, спектр светового излучения оказывается соответствующим более высоким температурам, чем температура окружающей среды. В результате при повторном излучении, согласно закону Стефана—Больцмана, оно будет происходить на более низких энергиях и частотах, но при этом в силу закона сохранения энергии будет излучаться большее число фотонов. Таким образом, к моменту достижения им поверхности спектральное распределение будет соответствовать температуре поверхности Солнца (около 5800 K), а не температуре в центре Солнца (около 15 000 000 K).

Энергия, поступившая к поверхности Солнца (или к поверхности любого горячего объекта), покидает его в виде излучения. Закон Стефана—Больцмана как раз и говорит нам, какова излученная энергия. Этот закон записывается так:

$$E = \sigma T^4,$$

где T — температура (в кельвинах), а σ — *постоянная Больцмана*. Из формулы видно, что при повышении температуры светимость тела не просто возрастает — она возрастает в значительно большей степени. Увеличьте температуру вдвое, и светимость возрастет в 16 раз!

Итак, согласно этому закону любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, излучает энергию. Так почему, спрашивается, все тела давно не остыли до абсолютного нуля? Почему, скажем, лично ваше тело, постоянно излучая тепловую энергию в инфракрасном диапазоне, характерном для температуры человеческого тела (чуть больше 300 K), не остывает?

Ответ на этот вопрос на самом деле состоит из двух частей. Во-первых, с пищей вы получаете энергию извне, которая в процессе метаболического усвоения пищевых калорий организмом преобразуется в тепловую энергию, восполняющую потери вашим телом энергии в силу закона Стефана—Больцмана. Умершее теплокровное весьма быстро остывает до температуры окружающей среды, поскольку энергетическая подпитка его тела прекращается.

Еще важнее, однако, тот факт, что закон распространяется на все без исключения тела с температурой выше абсолютного нуля. Поэтому, отдавая свою тепловую энергию окружающей среде, не забывайте, что и тела, которым вы отдаете энергию, — например, мебель, стены, воздух — в свою очередь излучают тепловую энергию, и она передается вам. Если окружающая среда холоднее вашего тела (как чаще всего бывает), ее тепловое излучение компенсирует лишь часть тепловых потерь вашего организма, и он восполняет дефицит за счет внутренних ресурсов. Если же температура окружающей среды близка к температуре вашего тела или выше нее, вам не удастся избавиться от избытка энергии, выделяющейся в вашем организме в процессе метаболизма посредством излучения. И тут включается второй механизм. Вы начинаете потеть, и вместе с капельками пота через кожу покидают ваше тело излишки теплоты.

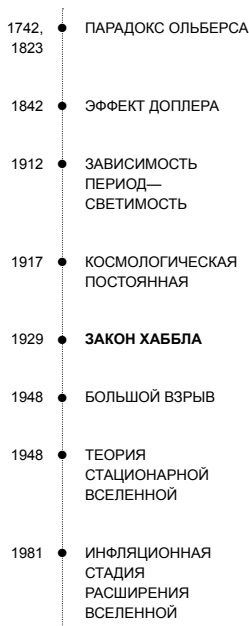
В вышеприведенной формулировке закон Стефана—Больцмана распространяется только на абсолютно черное тело, поглощающее все попадающее на его поверхность излучение. Реальные физические тела поглощают лишь часть лучевой энергии, а оставшаяся часть ими отражается, однако закономерность, согласно которой удельная мощность излучения с их поверхности пропорциональна T^4 , как правило, сохраняется и в этом случае, однако постоянную Больцмана в этом случае приходится заменять на другой коэффициент, который будет отражать свойства реального физического тела. Такие константы обычно определяются экспериментальным путем.

ЙОЗЕФ СТЕФАН (Josef Stefan, 1835–93) — австрийский физик-экспериментатор. Родился в г. Клагенфурт (Klagenfurt). По окончании Венского университета продолжил свою карьеру там же — с 1863 года в качестве профессора кафедры высшей математики и физики, а с 1866 года — по совместительству в качестве директора Института экспериментальной физики при Венском университете. Исследования Стефана затронули целый ряд разделов физики, включая явления электромагнитной индукции, диффузии, молекулярно-кинетическую

теорию газов. Однако своей научной репутацией он обязан, прежде всего, работе по исследованию теплопередачи посредством излучения. Именно он экспериментально нашел формулу закона Стефана—Больцмана путем измерения теплоотдачи платиновой проволоки при различных температурах; теоретическое же обоснование закона дал его ученик Людвиг Больцман. Используя свой закон, Стефан впервые дал достоверную оценку температуры поверхности Солнца — около 6000 градусов по абсолютной шкале.

Закон Хаббла

Кажущаяся скорость удаления галактики от нас прямо пропорциональна расстоянию до нее



Вернувшись с Первой мировой войны, Эдвин Хаббл устроился на работу в высокогорную астрономическую обсерваторию Маунт-Вилсон в Южной Калифорнии, которая в те годы была лучшей в мире по оснащенности. Используя ее новейший телескоп-рефлектор с диаметром главного зеркала 2,5 м, он провел серию любопытных измерений, навсегда перевернувших наши представления о Вселенной.

Вообще-то, Хаббл намеревался исследовать одну застарелую астрономическую проблему — природу туманностей. Эти загадочные объекты, начиная с XVIII века, волновали ученых таинственностью своего происхождения. К XX веку некоторые из этих туманностей разродились звездами и рассосались, однако большинство облаков так и остались туманными — и по своей природе, в частности. Тут ученые и задались вопросом: а где, собственно, эти туманные образования находятся: в нашей Галактике или часть из них представляют собой иные «островки Вселенной», если выражаться изощренным языком той эпохи? До ввода в действие телескопа на горе Уилсон в 1917 году этот вопрос стоял чисто теоретически, поскольку для измерения расстояний до этих туманностей технических средств не имелось.

Начал свои исследования Хаббл с самой, пожалуй, популярной с незапамятных времен туманности Андромеды. К 1923 году ему удалось рассмотреть, что окраины этой туманности представляют собой скопления отдельных звезд, некоторые из которых принадлежат к классу *переменных цефеид* (согласно астрономической классификации). Наблюдая за переменной цефеидой на протяжении достаточно длительного времени, астрономы измеряют период изменения ее светимости, а затем по зависимости период—светимость определяют и количество испускаемого ею света.

Чтобы лучше понять, в чем заключается следующий шаг, приведем такую аналогию. Представьте, что вы стоите в беспросветно темной ночи, и тут вдалеке кто-то включает электрическую лампу. Поскольку ничего, кроме этой далекой лампочки, вы вокруг себя не видите, определить расстояние до нее вам практически невозможно. Может, она очень яркая и светится далеко, а может, тусклая и светится неподалеку. Как это определить? А теперь представьте, что вам каким-то образом удалось узнать мощность лампы — скажем, 60, 100 или 150 ватт. Задача сразу упрощается, поскольку по видимой светимости вы уже сможете примерно оценить геометрическое расстояние до нее. Так вот: измеряя период изменения светимости цефеиды, астроном находится примерно в той же ситуации, как и вы, рассчитывая расстояние до удаленной лампы, зная ее светосилу (мощность излучения).

Первое, что сделал Хаббл, — рассчитал расстояние до цефеид на окраинах туманности Андромеды, а значит, и до самой туманности: 900 000 световых лет (более точно рассчитанное на сегодняшний день расстояние до галактики Андромеды (так ее теперь называют) составляет 2,3 миллиона световых лет. — *Прим. автора*) — то есть туманность находится далеко за пределами Млечного Пути — нашей Галактики. Пронаблюдав эту и другие

туманности, Хаббл пришел к базовому выводу о структуре Вселенной: она состоит из набора огромных звездных скоплений — *галактик*. Именно они и представляются нам в небе далекими туманными «облаками», поскольку отдельных звезд на столь огромном удалении мы рассмотреть попросту не можем. Одного этого открытия, вообще-то, хватило бы Хабблу для всемирного признания его заслуг перед наукой.

Ученый, однако, этим не ограничился и подметил еще один важный аспект в полученных данных, который астрономы наблюдали и прежде, но интерпретировать затруднялись. А именно: наблюдаемая длина спектральных световых волн, излучаемых атомами удаленных галактик, несколько ниже длины спектральных волн, излучаемых теми же атомами в условиях земных лабораторий. То есть в спектре излучения соседних галактик квант света, излучаемый атомом при скачке электрона с орбиты на орбиту, смещен по частоте в направлении красной части спектра по сравнению с аналогичным квантом, испущенным таким же атомом на Земле. Хаббл взял на себя смелость интерпретировать это наблюдение как проявление ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА, а это означает, что все наблюдаемые соседние галактики *удаляются* от Земли, поскольку практически у всех галактических объектов за пределами Млечного Пути наблюдается именно *красное* спектральное смещение, пропорциональное скорости их удаления.

Самое главное, Хабблу удалось сопоставить результаты своих измерений расстояний до соседних галактик (по наблюдениям переменных цефеид) с измерениями скоростей их удаления (по красному смещению). И Хаббл выяснил, что чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется. Это самое явление центробежного «разбегания» видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения и получило название закона Хаббла. Математически он формулируется очень просто:

$$v = Hr,$$

где v — скорость удаления галактики от нас, r — расстояние до нее, а H — так называемая *постоянная Хаббла*. Последняя определяется экспериментально, и на сегодняшний день оценивается как равная примерно 70 км/(с·Мпк) (километров в секунду на мегапарсек; 1 Мпк приблизительно равен 3,3 миллиону световых лет). А это означает, что галактика, удаленная от нас на расстояние 10 мегапарсек, убегает от нас со скоростью 700 км/с, галактика, удаленная на 100 Мпк, — со скоростью 7000 км/с и т.д. И, хотя изначально Хаббл пришел к этому закону по результатам наблюдения всего нескольких ближайших к нам галактик, ни одна из множества открытых с тех пор новых, все более удаленных от Млечного Пути галактик видимой Вселенной из-под действия этого закона не выпадает.

Итак, главное и, казалось бы, невероятное следствие закона Хаббла: Вселенная расширяется! Мне этот образ нагляднее всего

представляется так: галактики — изюмины в быстро всходящем дрожжевом тесте. Представьте себя микроскопическим существом на одной из изюмин, тесто для которого представляется прозрачным: и что вы увидите? Поскольку тесто поднимается, все прочие изюмины от вас удаляются, причем, чем дальше изюмина, тем быстрее она удаляется от вас (поскольку между вами и далекими изюминами больше расширяющегося теста, чем между вами и ближайшими изюминами). В то же время, вам будет представляться, что это именно вы находитесь в самом центре расширяющегося вселенского теста, и в этом нет ничего странного — если бы вы оказались на другой изюмине, вам все представлялось бы в точности так же. Так и галактики разбегаются по одной простой причине: расширяется сама ткань мирового пространства. Все наблюдатели (и мы с вами не исключение) считают себя находящимися в центре Вселенной. Лучше всего это сформулировал мыслитель XV века Николай Кузанский: «Любая точка есть центр безграничной Вселенной».

Однако закон Хаббла подсказывает нам и еще кое-что о природе Вселенной — и это «кое-что» является вещью просто-таки экстраординарной. У Вселенной было начало во времени. И это весьма несложное умозаключение: достаточно взять и мысленно «прокрутить назад» условную кинокартину наблюдаемого нами расширения Вселенной — и мы дойдем до точки, когда все вещество мироздания было сжато в плотный комок протоматерии, заключенный в совсем небольшом в сопоставлении с нынешними масштабами Вселенной объеме. Представление о Вселенной, родившейся из сверхплотного сгустка сверхгорячего вещества и с тех пор расширяющейся и остывающей, получило название теории большого взрыва, и более удачной космологической модели происхождения и эволюции Вселенной на сегодня не имеется. Закон Хаббла, кстати, помогает также оценить возраст Вселенной (конечно, весьма упрощенно и приблизительно). Предположим, что все галактики с самого начала удалялись от нас с той же скоростью v , которую мы наблюдаем сегодня. Пусть t — время, прошедшее с начала их разлета. Это и будет возраст Вселенной, и определяется он соотношениями:

$$v \times t = r, \text{ или } t = r/v.$$

Но ведь из закона Хаббла следует, что

$$r/v = 1/H,$$

где H — постоянная Хаббла. Значит, измерив скорости удаления внешних галактик и экспериментально определив H , мы тем самым получаем и оценку времени, в течение которого галактики разбегаются. Это и есть предполагаемое время существования Вселенной. Постарайтесь запомнить: по самым последним оценкам, возраст нашей Вселенной составляет около 15 миллиардов лет, плюс-минус несколько миллиардов лет. (Для сравнения: возраст Земли оценивается в 4,5 миллиардов лет, а жизнь на ней зародилась около 4 миллионов лет назад.)

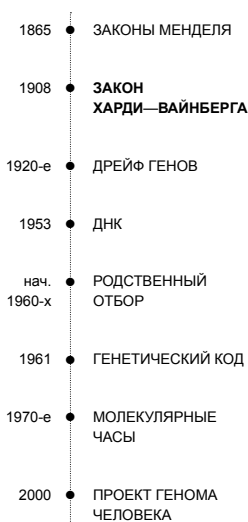


ЭДВИН ПАУЭЛЛ ХАББЛ (Edwin Powell Hubble, 1889–1953) — американский астроном. Родился в г. Марш-филд (штат Миссури, США), вырос в Уитоне (штат Иллинойс) — тогда это был не университетский, а промышленный пригород Чикаго. Окончил с отличием Чикагский университет (где отличился еще и спортивными достижениями). Еще учась в колледже, подрабатывал ассистентом в лаборатории нобелевского лауреата Роберта Милликена (см. ОПЫТ МИЛЛИКЕНА), а в летние каникулы — геодезистом на железнодорожном строительстве. Впоследствии Хаббл любил вспоминать, как вместе еще с одним рабочим они отстали от последнего поезда, увозившего их геодезическую бригаду назад, к благам цивилизации. Три дня они проблуждали в лесах, прежде чем добрались до населенной местности. Никакой провизии у них с собой не было, но, по словам самого Хаббла, «Можно было, конечно, убить ежика или птичку, но зачем? Главное, что воды вокруг хватало». Получив в 1910 году диплом бакалавра, Хаббл отправился в Оксфорд благодаря полученной стипендии Роудса. Там он начал было изучать римское и британское право, но, по его собственным словам, «променял юриспруденцию на астрономию» и вернулся в Чикаго, где и занялся подготовкой к защите своей дипломной работы. Большинство наблюдений ученый проводил на базе обсерватории Йеркс, расположенной к северу от Чикаго. Там его заметил Джордж Эллери Хейл (George Ellery Hale, 1868–1938) и в 1917 году пригласил молодого человека в новую обсерваторию Маунт-Вилсон. Тут, однако, вмешались исторические события. США вступили в Первую мировую войну, и Хаббл за одну ночь довел до ума свою диссертацию на степень Ph. D., на следующее утро защитил ее и тут же ушел добровольцем в армию. Его научный руководитель Хейл получил от Хаббла телеграмму следующего содержания: «Сожалею о вынужденном отказе от приглашения отметить защиту. Ушел на войну». Во Францию добровольческая часть прибыла в самом конце войны и даже не приняла участия в боевых действиях, однако осколочное ранение от шального снаряда Хаббл получить успел. Демобилизовавшись летом 1919 года, ученый немедленно вернулся в калифорнийскую обсерваторию Маунт-Вилсон, где вскоре и

обнаружил, что Вселенная состоит из разлетающихся галактик, что и получило название закона Хаббла. В 1930-е годы Хаббл продолжил активное изучение мира за пределами Млечного Пути, за что вскоре и снискал признание не только в научных кругах, но и среди широких масс. Слава ему пришла по вкусу, и на фотографиях тех лет ученого можно часто увидеть позирующим в компании знаменитых кинозвезд той эпохи. Научно-популярная книга Хаббла «Царство туманностей» (*The Realm of Nebulae*), увидевшая свет в 1936 году, еще прибавила ученому популярности. Справедливости ради нельзя не отметить, что в годы Второй мировой войны ученый оставил свои астрофизические изыскания и честно занимался прикладной баллистикой в должности главного исполнительного директора испытательного полигона со сверхзвуковой аэродинамической трубой в Абердине (штат Мэриленд), после чего вернулся к астрофизике и до конца своих дней занимал пост председателя объединенного ученого совета обсерватории Маунт-Вилсон и Паломарской обсерватории. В частности, ему принадлежит движущая идея и техническая разработка базовой конструкции знаменитого двухсотдюймового (пятиметрового) хейловского телескопа, введенного в строй в 1949 году на базе Паломарской обсерватории. Этот телескоп по сей день остается вершиной воплощенной в материале астрометрии. И, наверное, справедливо, что именно Хаббл успел первым из современных астрофизиков заглянуть в глубины Вселенной через окуляр этого чудесного инструмента. Если же отвлечься от астрономии, то Эдвин Хаббл вообще был человеком уникально широких интересов. Так, в 1938 году его избрали в состав совета попечителей Южно-Калифорнийской библиотеки Хантингтона и Художественной галереи при ней (Лос-Анджелес, США). Ученый подарил этой библиотеке свою уникальную коллекцию старинных книг по истории науки. Любимым же видом отдыха Хаббла была рыбная ловля на спиннинг — он и в этом добился вершин, и его рекордные уловы в горных потоках Скалистых гор (США) и на реке Тест (Англия) до сих пор считаются непревзойденными... Эдвин Хаббл скоропостижно скончался 28 сентября 1953 года в результате кровоизлияния в мозг.

Закон Харди—Вайнберга

Чтобы изменить состав генофонда, требуется нечто большее, чем генетическая рекомбинация



В научном мире нечасто случается, чтобы разные ученые независимо друг от друга наткнулись на одну и ту же закономерность, но все же таких примеров достаточно, чтобы заставить нас поверить в существование «духа времени». К их числу относится и закон Харди—Вайнберга (известный также, как закон генетического равновесия) — одна из основ популяционной генетики. Закон описывает распределение генов в популяции. Представьте себе ген, имеющий два варианта, или, пользуясь научной терминологией, два *аллеля*. Например, это могут быть гены «низкорослости» и «высокорослости», как в случае менделевского гороха (см. ЗАКОНЫ МЕНДЕЛЯ), или наличие/отсутствие предрасположенности к рождению двойни. Харди и Вайнберг показали, что при свободном скрещивании, отсутствии миграции особей и отсутствии мутаций относительная частота индивидуумов с каждым из этих аллелей будет оставаться в популяции постоянной из поколения в поколение. Другими словами, в популяции не будет ДРЕЙФА ГЕНОВ.

Рассмотрим этот закон на простом примере. Назовем два аллеля X и x . Тогда у особей могут встречаться четыре следующие комбинации этих аллелей: XX , xx , xX и Xx . Если обозначить через p и q частоту встречаемости индивидуумов с аллелями X и x соответственно, то согласно закону Харди—Вайнберга

$$p^2 + 2pq + q^2 = 100\%,$$

где p^2 — частота встречаемости индивидуумов с аллелями XX , $2pq$ — с аллелями Xx или xX , а q^2 — частота встречаемости индивидуумов с аллелями xx . Эти частоты при соблюдении сформулированных выше условий будут оставаться постоянными из поколения в поколение, независимо от изменения количества индивидуумов и от того, насколько велики (или малы) p и q . Этот закон представляет собой модель, используя которую генетики могут количественно определять изменения в распределении генов в популяции, вызванные, например, мутациями или миграцией. Другими словами, этот закон является теоретическим критерием для измерения изменений в распределении генов.

ГОДФРИ ХАРОЛД ХАРДИ (Godfrey Harold Hardy, 1877–1947) — английский математик, родился в Кранли, графство Суррей. Сын учителя рисования. Изучал математику в Кембриджском и Оксфордском университете. Пожалуй, самую большую известность Харди принесли совместные работы с Джоном Идензором Литтлвудом (John Edensor Littlewood, 1885–1977) и позднее с индийским математиком-самоучкой Сриниваса Рамануджаном (Srinivasa Aiyangar Ramanujan, 1887–1920), который работал клерком в Мадрасе. В 1913 году Рамануджан послал Харди список доказанных им теорем. Признав гениальность юного клерка, Харди пригласил его в Оксфорд, и в

течение нескольких лет, предшествовавших безвременной смерти Рамануджана, они опубликовали серию блестящих совместных работ.

ВИЛЬГЕЛЬМ ВАЙНБЕРГ (Wilhelm Weinberg, 1862–1937) — немецкий врач, имевший большую частную практику в Штутгарте. По воспоминаниям современников, помог появиться на свет 3500 младенцам, в том числе по крайней мере 120 парам близнецов. На основании собственных наблюдений над рождением близнецов и переоткрытых генетических ЗАКОНОВ МЕНДЕЛЯ пришел к выводу, что предрасположенность к рождению двуйцевых (неидентичных) близнецов передается по наследству.

Закон Шарля

При постоянном давлении объем газа пропорционален его температуре

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1827	• БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Один из пионеров воздухоплавания Жак Александр Сезар Шарль пришел в науку в результате своего увлечения строительством монгольфьеров — больших воздушных шаров, заполненных разогретым воздухом, — которые тогда только-только появились. Я беседовал с современными пилотами воздушных шаров, и они утверждают, что их конструкция с использованием открытой газовой горелки, разработанная Шарлем более двух столетий назад, не претерпела принципиальных изменений и используется до наших дней. Ничего удивительного в том, что научные интересы Шарля лежали в области исследования свойств газов, стало быть, нет. Закон, носящий его имя, Шарль сформулировал в 1787 году после ряда опытов с кислородом, азотом, водородом и углекислым газом.

Чтобы понять смысл закона Шарля, представьте себе газ как скопление быстро движущихся и соударяющихся молекул. Давление газа определяется ударами молекул о стенки сосуда: чем больше ударов, тем выше давление. Например, молекулы воздуха в комнате, где вы находитесь, оказывают на поверхность вашего тела давление 101 325 паскалей (или 1 бар, если речь идет о метеорологии).

Чтобы понять закон Шарля, представьте себе воздух внутри воздушного шарика. При постоянной температуре воздух в шарике будет расширяться или сжиматься, пока давление, производимое его молекулами, не достигнет 101 325 паскалей и не сравняется с атмосферным давлением. Иными словами, пока на каждый удар молекулы воздуха извне, направленный внутрь шарика, не будет приходиться аналогичный удар молекулы воздуха, направленный изнутри шарика вовне. Если понизить температуру воздуха в шарике (например, положив его в большой холодильник), молекулы внутри шарика станут двигаться медленнее, менее энергично ударяя изнутри о стенки шарика. Молекулы наружного воздуха тогда будут сильнее давить на шарик, сжимая его, в результате объем газа внутри шарика будет уменьшаться. Это будет происходить до тех пор, пока увеличение плотности газа не компенсирует понизившуюся температуру, и тогда опять установится равновесие.

Закон Шарля, наряду с другими газовыми законами, лег в основу уравнения состояния идеального газа, описывающего соотношение давления, объема и температуры газа с количеством вещества.

ЖАК АЛЕКСАНДР СЕЗАР ШАРЛЬ

(Jacques Alexandre César Charles, 1746–1823) — французский физик, химик, инженер и воздухоплаватель. Родился в Божанси (Beaugency). В молодости служил чиновником в министерстве финансов в Париже. Заинтересовавшись воздухоплаванием, разработал монгольфьеры современной конструкции, подъемная сила которых обусловлена расширением нагретого

горелкой воздуха внутри шара. Он же одним из первых стал наполнять воздушные шары водородом (который во много раз легче воздуха и обеспечивает значительно большую подъемную силу, нежели горячий воздух), установив благодаря этому рекорды высоты подъема (более 3 000 м) и дальности полета (43 км). Именно занятия воздухоплаванием заставили Шарля заинтересоваться исследованием свойств газов.



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ (Michael Faraday, 1791–1867) — английский физик и химик. Родился в Лондоне в семье простого кузнеца, принадлежащего к маленькой протестантской секте. Возможностей для получения хорошего образования, учитывая происхождение и социальное устройство Англии начала XIX века, был лишен. Окончив всего лишь бесплатную начальную школу, с 12 лет работал посыльным в книжном магазине, с 14 лет стал подмастерьем переплетчика там же и неожиданно для себя заинтересовался содержанием умных книг, которые ему приходилось переплетать. Интерес к науке в юноше пробудили естественнаучные разделы «Британской энциклопедии», попавшей в переплет к нему. В 1810 году Фарадею повезло — один из постоянных посетителей книжного магазина подарил любознательному молодому человеку абонемент на цикл из четырех публичных лекций с демонстрациями опытов одного из ведущих английских химиков того времени, профессора Королевского института, сэра Гемфри (Хамфри) Дэви (Humphry Davy, 1778–1829). Фарадей, успев посетить лишь последние четыре лекции, так увлекся естественными науками, что свои подробные конспекты посещенных им четырех лекций переплел в кожу и... отправил сэру Дэви в

качестве подтверждения серьезности своих намерений вместе с письмом с просьбой помочь ему в реализации стремления заняться наукой. В 1813 году сэр Дэви сделал Фарадея своим ассистентом в Королевском институте, и тут молодой ученый проявил себя настолько блестяще, что теперь его считают самым выдающимся британским ученым Викторианской эпохи; сама королева Виктория регулярно удостоивала ученого личной аудиенции. Величайшие открытия Фарадея относятся к области выявления связей между электричеством и магнетизмом. Кроме того, он сформулировал законы электролиза, носящие его имя, разработал принципиальное техническое решение по генерации электроэнергии. Первоначально же, еще занимаясь преимущественно химией, Фарадей первым получил сжиженный хлор и ряд других газов, открыл формулу бензола. Столь выдающийся вклад в науку Фарадею удалось внести, прежде всего, благодаря тому, что он был изобретательным экспериментатором, не боявшимся проводить опыты, ставившие под сомнение устоявшиеся научные представления своей эпохи. Он был также выдающимся популяризатором науки: в 1826 году организовал при Королевском институте ежегодные циклы лекций для детей, которые читаются и сегодня.

Законы Кеплера

Планеты движутся вокруг Солнца по вытянутым эллиптическим орбитам, причем Солнце находится в одной из двух фокальных точек эллипса

Отрезок прямой, соединяющий Солнце и планету, отсекает равные площади за равные промежутки времени

Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит

XVI	•	ПРИНЦИП КОПЕРНИКА
1609, 1619	•	ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА
1687	•	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1687	•	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1736	•	ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

* Между сферами Марса и Земли — додекаэдр (двенадцатигранный); между сферами Земли и Венеры — икосаэдр (двадцатигранный); между сферами Венеры и Меркурия — октаэдр (восьмигранный). Получившаяся конструкция была представлена Кеплером в разрезе на подробном объемном чертеже (см. рисунок) в его первой монографии «Космографическая тайна» (*Mysteria Cosmographica*, 1596—Прим. переводчика.)

Иоганн Кеплер обладал чувством прекрасного. Всю свою сознательную жизнь он пытался доказать, что Солнечная система представляет собой некое мистическое произведение искусства. Сначала он пытался связать ее устройство с пятью *правильными многогранниками* классической древнегреческой геометрии. (Правильный многогранник — объемная фигура, все грани которой представляют собой равные между собой правильные многоугольники.) Во времена Кеплера было известно шесть планет, которые, как полагалось, помещались на вращающихся «хрустальных сферах». Кеплер утверждал, что эти сферы расположены таким образом, что между соседними сферами точно вписываются правильные многогранники. Между двумя внешними сферами — Сатурна и Юпитера — он поместил куб, вписанный во внешнюю сферу, в который, в свою очередь, вписана внутренняя сфера; между сферами Юпитера и Марса — тетраэдр (правильный четырехгранник) и т.д.* Шесть сфер планет, пять вписанных между ними правильных многогранников — казалось бы, само совершенство?

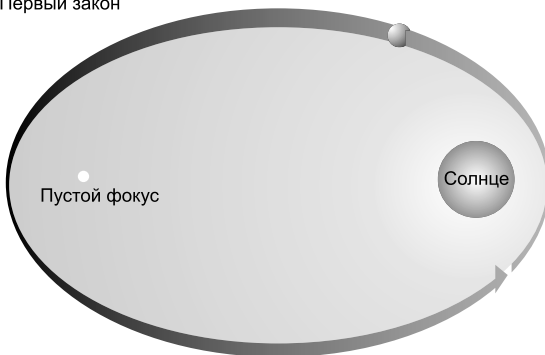
Увы, сравнив свою модель с наблюдаемыми орбитами планет, Кеплер вынужден был признать, что реальное поведение небесных тел не вписывается в очерченные им стройные рамки. По меткому замечанию современного британского биолога Дж. Холдейна (J. B. S. Haldane), «идея Вселенной как геометрически совершенного произведения искусства оказалась еще одной прекрасной гипотезой, разрушенной уродливыми фактами». Единственным пережившим века результатом того юношеского порыва Кеплера стала модель Солнечной системы, собственноручно изготовленная ученым и преподнесенная в дар его патрону герцогу Фредерику фон Вюртембургу. В этом прекрасно исполненном металлическом артефакте все орбитальные сферы планет и вписанные в них правильные многогранники представляют собой не сообщающиеся между собой полые емкости, которые по праздникам предполагалось заполнять различными напитками для угощения гостей герцога.

Лишь переехав в Прагу и став ассистентом знаменитого датского астронома Тихо Браге (Tycho Brahe, 1546–1601), Кеплер натолкнулся на идеи, по-настоящему обессмертившие его имя в анналах науки. Тихо Браге всю жизнь собирал данные астрономических наблюдений и накопил огромные объемы сведений о движении планет. После его смерти они перешли в распоряжение Кеплера. Эти записи, между прочим, имели большую коммерческую ценность по тем временам, поскольку их можно было использовать для составления уточненных астрологических гороскопов (сегодня об этом разделе ранней астрономии ученые предпочитают умалчивать).

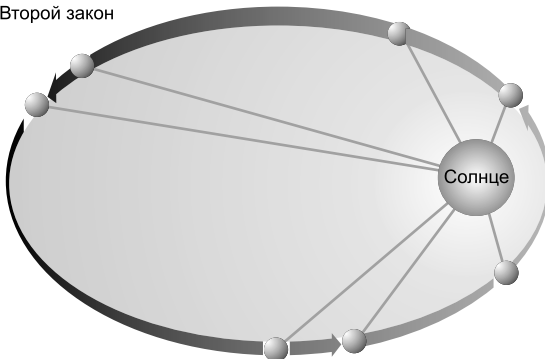
Обрабатывая результаты наблюдений Тихо Браге, Кеплер столкнулся с проблемой, которая и при наличии современных компьютеров могла бы показаться кому-то трудноразрешимой, а у Кеплера не было иного выбора, кроме как проводить все расчеты вручную. Конечно же, как и большинство астрономов его времени, Кеплер уже был знаком с гелиоцентрической системой Коперника (см. принцип

Первый и второй законы движения планет Кеплера: планеты движутся вокруг Солнца по вытянутым эллиптическим орбитам, причем Солнце находится в одной из двух фокальных точек эллипса (первый закон); отрезок прямой, соединяющий Солнце и планету, отсекает равные площади за равные промежутки времени (второй закон). Третий закон выражает математическое отношение между радиусом планеты и периодом ее обращения вокруг Солнца

Первый закон



Второй закон



КОПЕРНИКА) и знал, что Земля вращается вокруг Солнца, о чем свидетельствует и вышеописанная модель Солнечной системы. Но как именно вращается Земля и другие планеты? Представим проблему следующим образом: вы находитесь на планете, которая, во-первых, вращается вокруг своей оси, а во-вторых, вращается вокруг Солнца по неизвестной вам орбите. Глядя в небо, мы видим другие планеты, которые также движутся по неизвестным нам орбитам. Наша задача — определить по данным наблюдений, сделанных на нашем вращающемся вокруг своей оси и вокруг Солнца земном шаре, геометрию орбит и скорости движения других планет. Именно это в конечном итоге удалось сделать Кеплеру, после чего на основе полученных результатов он и вывел три своих закона!

*Первый закон*** описывает геометрию траекторий планетарных орбит. Возможно, вы помните из школьного курса геометрии, что эллипс представляет собой множество точек плоскости, сумма расстояний от которых до двух фиксированных точек — *фокусов* — равна константе. Если это слишком сложно для вас, имеется другое определение: представьте себе сечение боковой поверхности конуса плоскостью под углом к его основанию, не проходящей через основание, — это тоже эллипс. Первый закон Кеплера как раз и утверждает, что орбиты планет представляют собой эллипсы, в одном из фокусов которых расположено Солнце. *Эксцентриситеты* (степень вытянутости) орбит и их удаления от Солнца в *перигелии* (бли-

** Исторически сложилось так, что законы Кеплера (подобно началам термодинамики) пронумерованы не по хронологии их открытия, а в порядке их осмысления в научных кругах. Реально же первый закон был открыт в 1605 году (опубликован в 1609 году), второй — в 1602 году (опубликован в 1609 году), третий — в 1618 году (опубликован в 1619 году). — Прим. переводчика.



Ранняя геометрическая модель Вселенной Кеплера: шесть орбитальных планетных сфер и пять вписанных правильных многогранников между ними

жайшей к Солнцу точке) и *апогелии* (самой удаленной точке) у всех планет разные, но все эллиптические орбиты роднит одно — Солнце расположено в одном из двух фокусов эллипса. Проанализировав данные наблюдений Тихо Браге, Кеплер сделал вывод, что планетарные орбиты представляют собой набор вложенных эллипсов. До него это просто не приходило в голову никому из астрономов.

Историческое значение первого закона Кеплера трудно переоценить. До него астрономы считали, что планеты движутся исключительно по круговым орбитам, а если это не укладывалось в рамки наблюдений — главное круговое движение дополнялось малыми кругами, которые планеты описывали вокруг точек основной круговой орбиты. Это было, я бы сказал, прежде всего философской позицией, своего рода непреложным фактом, не подлежащим сомнению и проверке. Философы утверждали, что небесное устройство в отличие от земного совершенно по своей гармонии, а поскольку совершеннейшими из геометрических фигур являются окружность и сфера, значит, планеты движутся по окружности (причем это заблуждение мне и сегодня приходится раз за разом развеивать среди своих студентов). Главное, что, получив доступ к обширным данным наблюдений Тихо Браге, Иоганн Кеплер сумел перешагнуть через этот философский предрассудок, увидев, что он не соответствует фактам — подобно тому как Коперник осмелился убрать Землю из центра мироздания, столкнувшись с противоречащими стойким геоцентрическим представлениям аргументами, которые также состояли в «неправильном поведении» планет на орбитах.

Второй закон описывает изменение скорости движения планет вокруг Солнца. В формальном виде я его формулировку уже приводил, а чтобы лучше понять его физический смысл, вспомните свое детство. Наверное, вам доводилось на детской площадке раскручиваться вокруг столба, ухватившись за него руками. Фактически, планеты кружатся вокруг Солнца аналогичным образом. Чем дальше от Солнца уводит планету эллиптическая орбита, тем медленнее движение, чем ближе к Солнцу — тем быстрее движется планета. Теперь представьте пару отрезков, соединяющих два положения планеты на орбите с фокусом эллипса, в котором расположено Солнце. Вместе с сегментом эллипса, лежащим между ними, они образуют сектор, площадь которого как раз и является той самой «площадью, которую отсекает отрезок прямой». Именно о ней говорится во втором законе. Чем ближе планета к Солнцу, тем короче отрезки. Но в этом случае, чтобы за равное время сектор покрыл равную площадь, планета должна пройти большее расстояние по орбите, а значит, скорость ее движения возрастает.

В первых двух законах речь идет о специфике орбитальных траекторий отдельно взятой планеты. *Третий закон* Кеплера позволяет сравнить орбиты планет между собой. В нем говорится, что, чем дальше от Солнца находится планета, тем больше времени занимает ее полный оборот при движении по орбите и тем дольше, соответственно, длится «год» на этой планете. Сегодня мы знаем, что это обусловлено двумя факторами. Во-первых, чем дальше планета находится

ИОГАНН КЕПЛЕР

(Johannes Kepler, 1572–1630) — немецкий астроном. Родился в Вюртембурге. Начав с изучения богословия в Тюбингенской академии (позднее университет), увлекся математикой и астрономией и вскоре получил приглашение на должность преподавателя математики в гимназии австрийского города Грац. Там он снискал себе репутацию блестящего астролога благодаря ряду сбывшихся метеорологических прогнозов на 1595 год. Начиная с 1598 года Кеплер и другие протестанты стали подвергаться в католическом Граце жестоким религиозным гонениям, и в 1600 году ученый по приглашению датского астронома Тихо Браге переехал в Прагу. Работы Кеплера основывались на наблюдениях, сделанных Тихо Браге. Его дальнейшая жизнь сложилась трагично. Он жил в бедности и умер от лихорадки по дороге в Австрию, куда он отправился в надежде получить причитающееся ему жалование.

от Солнца, тем длиннее периметр ее орбиты. Во-вторых, с ростом расстояния от Солнца снижается и линейная скорость движения планеты.

В своих законах Кеплер просто констатировал факты, изучив и обобщив результаты наблюдений. Если бы вы спросили его, чем обусловлена эллиптичность орбит или равенство площадей секторов, он бы вам не ответил. Это просто следовало из проведенного им анализа. Если бы вы спросили его об орбитальном движении планет в других звездных системах, он также не нашел бы, что вам ответить. Ему бы пришлось начинать все сначала — накапливать данные наблюдений, затем анализировать их и стараться выявить закономерности. То есть у него просто не было бы оснований полагать, что другая планетная система подчиняется тем же законам, что и Солнечная система.

Один из величайших триумфов классической механики Ньютона как раз и заключается в том, что она дает фундаментальное обоснование законам Кеплера и утверждает их универсальность. Оказывается, законы Кеплера можно вывести из законов механики ньютона, закона всемирного тяготения ньютона и закона сохранения момента импульса путем строгих математических выкладок. А раз так, мы можем быть уверены, что законы Кеплера в равной мере применимы к любой планетной системе в любой точке Вселенной. Астрономы, ищущие в мировом пространстве новые планетные системы (а открыто их уже довольно много), раз за разом, как само собой разумеющееся, применяют уравнения Кеплера для расчета параметров орбит далеких планет, хотя и не могут наблюдать их непосредственно.

Третий закон Кеплера играл и играет важную роль в современной космологии. Наблюдая за далекими галактиками, астрофизики регистрируют слабые сигналы, испускаемые атомами водорода, обращающимися по очень удаленным от галактического центра орбитам — гораздо дальше, чем обычно находятся звезды. По эффекту Доплера в спектре этого излучения ученые определяют скорости вращения водородной периферии галактического диска, а по ним — и угловые скорости галактик в целом (см. также темная материя). Меня радует, что труды ученого, твердо поставившего нас на путь правильного понимания устройства нашей Солнечной системы, и сегодня, спустя века после его смерти, играют столь важную роль в изучении строения необъятной Вселенной.

Законы Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю (то есть количество зарядов, выходящих через этот узел, должно быть равно количеству входящих зарядов)

Сумма напряжений в любом замкнутом контуре электрической цепи равна нулю

1747	●	ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
XIX	●	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА
1845	●	ЗАКОНЫ КИРХГОФА
1897	●	ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА
1900	●	ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ

Карьера Густава Кирхгофа во многом типична для немецкого физика XIX столетия. Германия позже своих западных соседей подошла к индустриальной революции и потому сильнее нуждалась в передовых технологиях, которые способствовали бы ускоренному развитию промышленности. В результате ученые, прежде всего естественники, ценились в Германии очень высоко. В год окончания университета Кирхгоф женился на дочери профессора, «соблюдая, тем самым, — как пишет один из его биографов, — два обязательных условия успешной академической карьеры». Но еще до этого, в возрасте двадцати одного года, он сформулировал основные законы для расчета токов и напряжений в электрических цепях, которые теперь носят его имя.

Середина XIX века как раз стала временем активных исследований свойств электрических цепей, и результаты этих исследований быстро находили практические применения. Базовые правила расчета простых цепей, такие, как закон Ома, были уже достаточно хорошо проработаны. Проблема состояла в том, что из проводов и различных элементов электрических цепей технически уже можно было изготавливать весьма сложные и разветвленные сети — но никто не знал, как смоделировать их математически, чтобы рассчитать их свойства. Кирхгофу удалось сформулировать правила, позволяющие достаточно просто анализировать самые сложные цепи, и законы Кирхгофа до сих пор остаются важным рабочим инструментом специалистов в области электронной инженерии и электротехники.

Оба закона Кирхгофа формулируются достаточно просто и имеют понятную физическую интерпретацию. Первый закон гласит, что если рассмотреть любой *узел* цепи (то есть точку разветвления, где сходятся три или более проводов), то сумма поступающих в цепь электрических токов будет равна сумме исходящих, что, вообще говоря, является следствием закона сохранения электрического заряда. Например, если вы имеете Т-образный узел электрической цепи и по двум проводам к нему поступают электрические токи, то по третьему проводу ток потечет в направлении от этого узла, и равен он будет сумме двух поступающих токов. Физический смысл этого закона прост: если бы он не выполнялся, в узле непрерывно накапливался бы электрический заряд, а этого никогда не происходит.

Второй закон не менее прост. Если мы имеем сложную разветвленную цепь, ее можно мысленно разбить на ряд простых замкнутых контуров. Ток в цепи может различным образом распределяться по этим контурам, и сложнее всего определить, по какому именно маршруту потекут токи в сложной цепи. В каждом из контуров электроны могут либо приобретать дополнительную энергию (например, от батареи), либо терять ее (например, на сопротивлении или ином элементе). Второй закон Кирхгофа гласит, что чистое приращение энергии электронов в любом замкнутом контуре цепи равно нулю. Этот закон также имеет простую физи-

ческую интерпретацию. Если бы это было не так, всякий раз, проходя через замкнутый контур, электроны приобретали или теряли бы энергию, и ток бы непрерывно возрастал или убывал. В первом случае можно было бы получить вечный двигатель, а это запрещено первым началом термодинамики; во втором — любые токи в электрических цепях неизбежно затухали бы, а этого мы не наблюдаем.

Самое распространенное применение законов Кирхгофа мы наблюдаем в так называемых последовательных и параллельных цепях. В *последовательной цепи* (яркий пример такой цепи — елочная гирлянда, состоящая из последовательно соединенных между собой лампочек) электроны от источника питания по серии проводов последовательно проходят через все лампочки, и на сопротивлении каждой из них напряжение падает согласно закону Ома.

В *параллельной цепи* провода, напротив, соединены таким образом, что на каждый элемент цепи подается равное напряжение от источника питания, а это означает, что в каждом элементе цепи сила тока своя в зависимости от его сопротивления. Примером параллельной цепи являются лампы «лесенкой»: напряжение подается на шины, а лампы смонтированы на поперечинах. Токи, проходящие через каждый узел такой цепи, определяются по второму закону Кирхгофа.



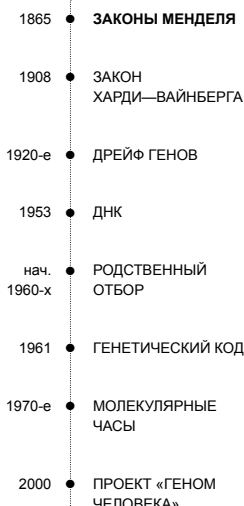
ГУСТАВ РОБЕРТ КИРХГОФ (Gustav Robert Kirchhof, 1824–77) — немецкий физик. Родился в Кёнигсберге (современный Калининград). Законы расчета электрических цепей сформулировал еще будучи студентом Кёнигсбергского университета. Продолжил свою блестящую карьеру в ряде германских университетов, последним из которых стал Берлинский, где он был профессором теоретической физики с 1875 года и до своей смерти. В период работы в университете г. Бреслау (на

территории современной Польши) совместно с Робертом Бунзеном разработал основы спектроскопии (см. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА). Кроме того, он открыл еще один цикл законов (названы его именем), описывающих тепловое поглощение и излучение. Хотя вторую половину своей жизни Кирхгоф в результате несчастного случая провел в инвалидной коляске, все современники отзывались о нем, как о приятнейшем человеке и убежденном оптимисте.

Законы Менделя

Наследственные признаки передаются из поколения в поколение с помощью генов

Потомки получают от каждого родителя по одному гену, кодирующему признак



Грегор Мендель, моравский монах, основатель генетики

Грегора Менделя по праву считают основателем современной генетики, и горох, с которым он экспериментировал, не менее известен в научном фольклоре, чем яблоко Ньютона. Его научные изыскания в монастырском фруктовом саду в городе Брюнн (сейчас Брно в Чехии), первоначально вызванные лишь интересом к земледелию, переросли в многолетнюю серию трудоемких опытов по скрещиванию растений, в результате чего Мендель пришел к выводу, что наследственность определяется генами.

Его работа была несложной, но кропотливой: он надевал на цветки гороха специальные мешочки, для того чтобы каждое растение опылялось лишь тщательно отобранной пылью. Затем, сравнивая признаки родительских и дочерних растений, он смог вывести законы наследования.

Классические эксперименты Менделя заключались в скрещивании двух линий гороха — высокорослой и низкорослой. Все дочерние растения первого поколения были высокими (а вовсе не низкого или среднего роста как ожидалось). Однако при последующем скрещивании растений первого поколения между собой только три четверти дочерних растений второго поколения оказались высокорослыми, оставшиеся растения были низкорослыми. Чтобы объяснить результаты этих (и многих других) экспериментов, Мендель постулировал следующее:

— существует единица наследственности (Мендель называл ее «фактором», мы сейчас называем ее *геном*), и дочерний организм получает от каждого родителя по одному гену, кодирующему данный признак;

— если дочерний организм получает гены, отвечающие за альтернативные признаки, то один из этих генов будет *доминантным* и будет *экспрессироваться* (т.е. кодируемый этим геном признак проявится у организма), а другой будет *рецессивным* (т.е. не экспрессируемым).

В случае с горохом это означает, что каждое дочернее растение первого поколения получило и ген высокорослости, и ген низкорослости — по одному от каждого родителя. Высокий рост потомства первого поколения указывает на доминантность гена высокорослости. Однако в наследственном материале каждого дочернего растения первого поколения сохранился и неэкспрессировавшийся ген низкорослости. В следующем поколении одно растение будет иметь в среднем два гена высокорослости, два растения — один ген высокорослости и один ген низкорослости и одно растение — два гена низкорослости; оно-то и будет низкорослым. Руководствуясь этой схемой, Мендель смог объяснить многие особенности наследования, до этого остававшиеся загадкой: например, почему некоторые болезни (такие, как гемофилия) передаются через поколение или почему у кареглазых родителей могут быть голубоглазые дети.

Как это нередко случается в истории науки, работа Менделя, законченная в 1865 году, не сразу получила должное признание

у современников. Итоги его опытов были обнародованы на заседании Общества естественных наук города Брюнна, а затем опубликованы в журнале этого Общества, но идеи Менделя в то время не нашли поддержки. Хотя этот журнал получали более ста научных организаций всего мира, номер журнала с описанием революционной работы Менделя в течение тридцати лет пылился в библиотеках. Лишь в конце XIX века ученые, занимавшиеся проблемами наследственности, открыли для себя труды Менделя, и он смог получить (уже посмертно) заслуженное признание.

Это не означает, что идеи Менделя были приняты безоговорочно. В научном мире долго обсуждалась теория *преформизма*, согласно которой яйцеклетка и сперматозоид каким-то образом содержат в себе взрослый организм в миниатюре. Например, Антоний Ван Левенгук (Anton van Leeuwenhoek, 1632–1723), ученый, который ввел в научный обиход микроскоп, считал, что внутри каждого сперматозоида уже содержится крохотный человеческий организм, а яйцеклетка нужна лишь для обеспечения его питательными веществами, необходимыми для роста. Вопрос заключался в том, что управляют развитием эмбриона внутренние, наследственные факторы, как полагал Мендель, или внешние факторы окружающей среды, которые могут, например, влиять на питательные вещества яйцеклетки. Сегодня, когда ученые уже могут во всех деталях проследить путь развития организма из оплодотворенной яйцеклетки, выясняется, что внешние факторы, например вещества, оказывающие внутриутробное воздействие на эмбрион, могут вызывать «включение» определенных генов и таким образом влиять на развитие организма.

Сегодня мы знаем, что открытые Менделем гены — это участки находящихся в клетке молекул ДНК. Согласно центральной догме молекулярной биологии, механизм действия генов состоит в том, чтобы кодировать белки, которые, в свою очередь, выступая в роли ферментов, регулируют все химические реакции в живых организмах (см. КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ).

ГРЕГОР ИОАНН МЕНДЕЛЬ (Gregor Johann Mendel, 1822–84) — моравский монах и генетик растений. Иоганн Мендель родился в местечке Хейнцендорф (ныне Гинчице в Чехии), где его отец владел небольшим крестьянским наделом. Принял имя Грегор при поступлении в монастырь близлежащего города Брюнна (сейчас Брно). В 1851 году настоятель монастыря направил Менделя учиться в венский университет, где он среди прочего изучал ботанику. После окончания университета Мендель преподавал естественные науки в

местной школе. В 1856 году начал проводить опыты по скрещиванию растений, в частности гороха, который он выращивал в монастырском саду, возможно, побуждаемый детскими воспоминаниями о работе с отцом в его хозяйстве. Результаты опытов Менделя, легшие в основу современной генетики, были опубликованы в 1865 году, не вызвав тогда интереса у современников. Тремя годами позже Мендель стал настоятелем монастыря города Брюнна и забросил исследования, посвятив себя исполнению административных обязанностей.

Законы механики Ньютона

В отсутствие внешних силовых воздействий тело будет продолжать равномерно двигаться по прямой

Ускорение движущегося тела пропорционально сумме приложенных к нему сил и обратно пропорционально его массе

Всякому действию сопоставлено равное по силе и обратное по направлению противодействие

1537	●	РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1687	●	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Законы Ньютона — в зависимости от того, под каким углом на них посмотреть, — представляют собой либо конец начала, либо начало конца классической механики. В любом случае это поворотный момент в истории физической науки — блестящая компиляция всех накопленных к тому историческому моменту знаний о движении физических тел в рамках физической теории, которую теперь принято именовать *классической механикой*. Можно сказать, что с законов движения Ньютона пошел отсчет истории современной физики и вообще естественных наук.

Однако Исаак Ньютон взял названные в его честь законы не из воздуха. Они фактически стали кульминацией долгого исторического процесса формулирования принципов классической механики. Мыслители и математики — упомянем лишь Галилея (см. *УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ*) — веками пытались вывести формулы для описания законов движения материальных тел и постоянно спотыкались о то, что лично я сам для себя называю непроговоренными условностями, а именно — обе основополагающие идеи о том, на каких принципах зиждется материальный мир, которые настолько устойчиво вошли в сознание людей, что кажутся неоспоримыми. Например, древним философам даже в голову не приходило, что небесные тела могут двигаться по орбитам, отличающимся от круговых; в лучшем случае возникала идея, что планеты и звезды обращаются вокруг Земли по концентрическим (то есть вложенным друг в друга) сферическим орбитам. Почему? Да потому, что еще со времен античных мыслителей Древней Греции никому не приходило в голову, что планеты могут отклоняться от совершенства, воплощением которого и является строгая геометрическая окружность. Нужно было обладать гением Иоганна Кеплера, чтобы честно взглянуть на эту проблему под другим углом, проанализировать данные реальных наблюдений и *вывести* из них, что в действительности планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим траекториям (см. *ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА*).

Первый закон Ньютона

Учитывая столь серьезный, исторически сложившийся провал, первый закон Ньютона сформулирован безоговорочно революционным образом. Он утверждает, что, если какую-либо материальную частицу или тело попросту не трогать, оно будет продолжать прямолинейно двигаться с неизменной скоростью само по себе. Если тело равномерно двигалось по прямой, оно так и будет двигаться по прямой с неизменной скоростью. Если тело покоилось, оно так и будет покоиться, пока к нему не приложат внешних сил. Чтобы просто сдвинуть физическое тело с места, к нему нужно *обязательно* приложить стороннюю силу. Возьмем самолет: он ни за что не стронется с места, пока не будут запущены двигатели. Казалось бы, наблюдение самоочевидное, однако стоит

нам отвлечься от прямолинейного движения, как оно перестает казаться таковым. При инерционном движении тела по замкнутой циклической траектории его анализ с позиции первого закона Ньютона только и позволяет точно определить его характеристики.

Представьте себе что-то типа легкоатлетического молота: ядро на конце струны, раскручиваемое вами вокруг вашей головы. Ядро в этом случае движется не по прямой, а по окружности — значит, согласно первому закону Ньютона, его что-то удерживает; это «что-то» и есть центростремительная сила, которую вы прилагаете к ядру, раскручивая его. Реально вы и сами можете ее ощутить — рукоять легкоатлетического молота ощутимо давит вам на ладони. Если же вы разожмете руку и выпустите молот, он в отсутствие внешних сил незамедлительно отправится в путь по прямой. Точнее будет сказать, что так молот поведет себя в идеальных условиях (например, в открытом космосе), поскольку под воздействием силы гравитационного притяжения Земли он будет лететь строго по прямой лишь в тот момент, когда вы его отпустили, а в дальнейшем траектория полета будет все больше отклоняться в направлении земной поверхности. Если же вы попытаетесь действительно выпустить молот, выяснится, что отпущенный с круговой орбиты молот отправится в путь строго по прямой, являющейся касательной (перпендикулярной к радиусу окружности, по которой его раскручивали), с линейной скоростью, равной скорости его обращения по «орбите».

Теперь заменим ядро легкоатлетического молота планетой, молотобойца — Солнцем, а струну — силой гравитационного притяжения: вот вам и ньютоновская модель Солнечной системы.

Такой анализ происходящего при обращении одного тела вокруг другого по круговой орбите на первый взгляд кажется чем-то само собой разумеющимся, но не стоит забывать, что он вообрал в себя целый ряд умозаключений лучших представителей научной мысли предшествующего поколения (достаточно вспомнить Галилео Галилея). Проблема тут в том, что при движении по стационарной круговой орбите небесное (и любое иное) тело выглядит весьма безмятежно и представляется пребывающим в состоянии устойчивого динамического и кинематического равновесия. Однако, если разобраться, сохраняется только *модуль* (абсолютная величина) линейной скорости такого тела, в то время как ее *направление* постоянно меняется под воздействием силы гравитационного притяжения. Это и значит, что небесное тело движется *равноускоренно*. Кстати, сам Ньютон называл ускорение «изменением движения».

Первый закон Ньютона играет и еще одну важную роль с точки зрения нашего естествоиспытательского отношения к природе материального мира. Он подсказывает нам, что любое изменение в характере движения тела свидетельствует о присутствии внешних сил, воздействующих на него. Условно говоря, если мы наблюдаем, как железные опилки, например, подпрыгивают и налипают на магнит, или, доставая из сушилки стиральной машины белье,

выясняем, что вещи слиплись и присохли одна к другой, мы можем чувствовать себя спокойно и уверенно: эти эффекты стали следствием действия природных сил (в приведенных примерах это силы магнитного и электростатического притяжения соответственно).

Второй закон Ньютона

Если первый закон Ньютона помогает нам определить, находится ли тело под воздействием внешних сил, то второй закон описывает, что происходит с физическим телом под их воздействием. Чем больше сумма приложенных к телу внешних сил, гласит этот закон, тем большее *ускорение* приобретает тело. Это раз. Одновременно, чем массивнее тело, к которому приложена равная сумма внешних сил, тем меньшее ускорение оно приобретает. Это два. Интуитивно эти два факта представляются самоочевидными, а в математическом виде они записываются так:

$$F = ma,$$

где F — сила, m — масса, a — ускорение. Это, наверное, самое полезное и самое широко используемое в прикладных целях из всех физических уравнений. Достаточно знать величину и направление всех сил, действующих в механической системе, массу материальных тел, из которых она состоит, и можно с исчерпывающей точностью рассчитать ее поведение во времени.

Именно второй закон Ньютона придает всей классической механике ее особую прелесть — начинает казаться, будто весь физический мир устроен, как наиточнейший хронометр, и ничто в нем не ускользнет от взгляда пытливого наблюдателя. Назовите мне пространственные координаты и скорости всех материальных точек во Вселенной, словно говорит нам Ньютон, укажите мне направление и интенсивность всех действующих в ней сил, и я предскажу вам любое ее будущее состояние. И такой взгляд на природу вещей во Вселенной бытовал вплоть до появления квантовой механики.

Третий закон Ньютона

За этот закон, скорее всего, Ньютон и снискал себе почет и уважение со стороны не только естествоиспытателей, но и ученых-гуманитариев и попросту широких масс. Его любят цитировать (по делу и без дела), проводя самые широкие параллели с тем, что мы вынуждены наблюдать в нашей обыденной жизни, и притягивают чуть ли не за уши для обоснования самых спорных положений в ходе дискуссий по любым вопросам, начиная с межличностных и заканчивая международными отношениями и глобальной политикой. Ньютон, однако, вкладывал в свой названный впоследствии третьим закон совершенно конкретный физический смысл и едва ли замыслил его в ином качестве, нежели как точное средство

описания природы силовых взаимодействий. Закон этот гласит, что если тело А воздействует с некоей силой на тело В, то тело В также воздействует на тело А с равной по величине и противоположной по направлению силой. Иными словами, стоя на полу, вы воздействуете на пол с силой, пропорциональной массе вашего тела. Согласно третьему закону Ньютона, пол в это же время воздействует на вас с абсолютно такой же по величине силой, но направленной не вниз, а строго вверх. Этот закон экспериментально проверить нетрудно: вы постоянно чувствуете, как земля давит на ваши подошвы.

Тут важно понимать и помнить, что речь у Ньютона идет о двух силах совершенно разной природы, причем каждая сила воздействует на «свой» объект. Когда яблоко падает с дерева, это Земля воздействует на яблоко силой своего гравитационного притяжения (вследствие чего яблоко равноускоренно устремляется к поверхности Земли), но при этом и яблоко притягивает к себе Землю с равной силой. А то, что нам кажется, что это именно яблоко падает на Землю, а не наоборот, это уже следствие второго закона Ньютона. Масса яблока по сравнению с массой Земли низка до неопределимости, поэтому именно его ускорение заметно для глаз наблюдателя. Масса же Земли, по сравнению с массой яблока, огромна, поэтому ее ускорение практически незаметно. (В случае падения яблока центр Земли смещается вверх на расстояние менее радиуса атомного ядра.)

По совокупности же три закона Ньютона дали физикам инструменты, необходимые для начала комплексного наблюдения всех явлений, происходящих в нашей Вселенной. И, невзирая на все колоссальные подвижки в науке, произошедшие со времен Ньютона, чтобы спроектировать новый автомобиль или отправить космический корабль на Юпитер, вы воспользуетесь все теми же тремя законами Ньютона.

ИСААК НЬЮТОН (Isaac Newton, 1642–1727) — англичанин, которого многие считают вообще величайшим ученым всех времен и народов. Родился в семье мелкопоместных дворян в окрестностях г. Вулсторпа (графство Линкольншир, Англия). Отец умер за три месяца до его рождения. Вступив в повторный брак, мать оставила двухлетнего Исаака на попечение его бабушки. Своеобразное эксцентричное поведение уже взрослого ученого многие исследователи его биографии как раз и приписывают тому факту, что до девятилетнего возраста, когда последовала смерть его отца, мальчик был полностью лишен родительской заботы.

Какое-то время юный Исаак изучал премудрости сельского хозяйства в ремесленном училище. Как это часто случается с великими впоследствии людьми, о его чудачествах в ту раннюю пору его жизни до сих пор ходит масса легенд. Так, в частности, рассказывают, будто однажды его отправили на выпас сторожить скот, который благополучно разбрелся в неизвестном направлении, пока мальчик сидел под деревом и увлеченно читал заинтересовавшую его книгу. Так это или не так, но тягу подростка к знаниям вскоре заметили и отправили обратно в гимназию г. Грантем, по окончании которой юноша успешно поступил в Тринити-колледж Кембриджского университета.

Ньютон быстро овладел учебной программой и перешел к изучению трудов ведущих ученых того времени, в частности последователей французского философа Рене Декарта (René Descartes, 1596–1650), который придерживался механистических взглядов на Вселенную. Весной 1665 года он получил ученую степень бакалавра, а дальше случились самые невероятные события в истории науки. В том же самом году в Англии разразилась последняя эпидемия бубонной чумы, все чаще раздавался звон погребальных колоколов, и Кембриджский университет был закрыт. Ньютон почти на два года вернулся в Вулсторп, успев захватить с собой всего несколько книг и свой недюжинный интеллект в придачу.

Когда через два года Кембриджский университет вновь открылся, Ньютон уже (1) разработал дифференциальное исчисление — отдельный раздел математики, (2) изложил основы современной теории цвета, (3) вывел закон всемирного тяготения и (4) решил несколько математических задач, которые до него никто решить не смог. Как говорил сам Ньютон: «В те дни я был в расцвете своих изобретательских сил, и математика и философия с тех пор меня уже ни разу не захватывали так сильно, как тогда». (Я часто спрашиваю своих студентов, рассказывая им в очередной раз о достижениях Ньютона: «А что *вы* успели сделать за летние каникулы?»)

Вскоре после возвращения в Кембридж Ньютон был избран в ученый совет Тринити-колледжа, его статуя до сих пор украшает университетскую церковь. Он прочитал курс лекций по теории цвета, в которых показывал, что цветовые различия объясняются основными характеристиками световой волны (или, как теперь говорят, длины волны) и что свет имеет корпускулярную природу. Он также сконструировал зеркальный телескоп, и это изобретение привлекло к нему внимание Королевского общества. Многолетние исследования света и цветов были опубликованы в 1704 году в его фундаментальном труде «Оптика» (*Optics*).

Отстаивание Ньютоном «неправильной» теории света (в то время господствовали волновые представления) привело к конфликту с Робертом Гуком (см. закон Гука), главой Королевского общества.

В ответ Ньютон высказал гипотезу, сочетавшую корпускулярные и волновые представления о свете. Гук обвинил Ньютона в плагиате и выступил с притязаниями на приоритет в этом открытии. Конфликт продолжался до самой смерти Гука в 1702 году и произвел на Ньютона такое гнетущее впечатление, что он на шесть лет отказался от участия в интеллектуальной жизни. Впрочем, некоторые психологи того времени объясняют это нервным расстройством, обострившимся после смерти его матери.

В 1679 году Ньютон вернулся к работе и снискал себе славу, исследуя траектории движения планет и их спутников. В результате этих исследований, также сопровождавшихся спорами с Гукем о приоритете, были сформулированы закон всемирного тяготения и законы механики Ньютона, как мы теперь их называем. Свои исследования он обобщил в книге «Математические начала натуральной философии» (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*), представленной Королевскому обществу в 1686 году и опубликованной годом позже. Эта работа, положившая начало тогдашней научной революции, принесла Ньютону всемирное признание.

Его религиозные взгляды, его твердая приверженность протестантизму также привлекали к Ньютону внимание широких кругов английской интеллектуальной элиты, и особенно философа Джона Локка (John Locke, 1632–1704). Проводя все больше времени в Лондоне, Ньютон втянулся в политическую жизнь столицы и в 1696 году был назначен смотрителем Монетного двора. Хотя эта должность традиционно считалась sinecurой, Ньютон подошел к своей работе со всей серьезностью, рассматривая перечекушку английской монеты как действенную меру борьбы с фальшивомонетчиками. Как раз в это время Ньютон был вовлечен в очередной спор о приоритете, на сей раз с Готфридом Лейбницем (Gottfried Leibniz, 1646–1716), по поводу открытия дифференциального исчисления. В конце жизни Ньютон выпустил новые издания своих основных трудов, а также работал на посту президента Королевского общества, занимая при этом пожизненную должность директора Монетного двора.

Законы электролиза Фарадея

При электролизе масса превращенного вещества прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через электролитическую ячейку

При прохождении через электролит одного и того же количества электричества масса превращенного вещества зависит от массы и заряда ионов вещества

1834 • ЗАКОНЫ
ЭЛЕКТРОЛИЗА
ФАРАДЕЯ

Два закона электролиза — это всего лишь небольшая часть вклада Майкла Фарадея в науку. *Электролиз* — это совокупность процессов, происходящих при пропускании электрического тока через *электролит* — плавленное ионное вещество (например, плавленная соль) или раствор, в котором присутствуют ионы. Электрический ток проходит через электролит от одного электрода к другому. Положительно заряженные ионы при этом движутся к отрицательному электроду, *катоде*, а отрицательно заряженные — к положительному электроду, *аноду*. Химические реакции происходят на электродах. Фарадей провел фундаментальные исследования электролитов и создал законы, в которых говорится, что химические превращения связаны с потоком электронов (то есть электрическим током): чем больше электронов, тем больше химических превращений.

Электролиз — это важный промышленный процесс, используемый как при получении определенных металлов, так и при конечной обработке поверхностей методом нанесения гальванического покрытия. Примером электролиза в действии может быть электролитическое рафинирование меди после ее выделения из руды. Выступающие в качестве катода тонкие листы чистой меди опускают в электролит, содержащий раствор сульфата меди и серную кислоту, а слитки неочищенной меди подвешивают в этом же растворе, и они действуют как анод. При пропускании электрического тока анод начинает растворяться, и ионы меди вместе с некоторым количеством ионов железа и цинка поступают в электролит. Остальные спутники меди, содержавшиеся в слитках (включая значительное количество серебра, золота и платины), выпадают в осадок и накапливаются на дне электролитической ванны. Ионы меди через электролит направляются к катоду и осаждаются на нем. Цинк и железо остаются в растворе.

В промышленных масштабах в подобных ваннах за месяц можно очистить всего несколько тонн меди, но при этом получается продукт 99,96-процентной чистоты. Более того, благодаря извлечению из осадка благородных металлов окупается весь процесс очистки. Кроме меди, электролитическим методом в промышленных масштабах очищаются также магний, натрий и алюминий.

В описанном выше процессе рафинирования меди атом меди переходит в электролит в виде иона, теряя два электрона. Следовательно, на аноде он принимает два электрона, и ион снова превращается в нейтральный атом меди (можно представить себе, что эти два электрона бегут по проводу, как электрический ток). Согласно первому закону Фарадея, для того чтобы очистить в два раза больше меди, необходимо в два раза больше электронов.

Законы электромагнитной индукции Фарадея

Изменение магнитного потока, проходящего через площадь, приводит к возникновению электрического поля вдоль контура, ограничивающего эту площадь

Интенсивность этого электрического поля пропорциональна скорости изменения магнитного потока

1785	•	ЗАКОН КУЛОНА
1820	•	ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	•	ЗАКОН АМПЕРА
1820	•	ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	•	ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	•	ПРАВИЛО ЛЕНЦА

На гравюре: Майкл Фарадей читает лекцию с наглядными демонстрациями своих опытов в Королевском институте в Лондоне в 1830 году

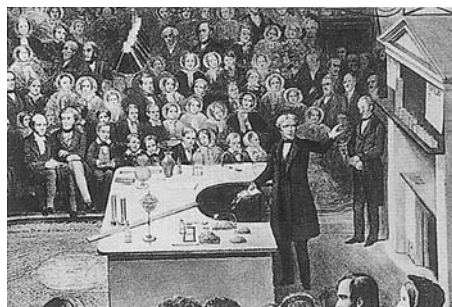
После того как в начале XIX века было установлено, что электрические токи порождают магнитные поля (см. ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА, ЗАКОН БИО—САВАРА), ученые заподозрили, что должна наблюдаться и обратная закономерность: магнитные поля должны каким-то образом производить электрические эффекты. В 1822 году в своей записной книжке Майкл Фарадей записал, что должен найти способ «превратить магнетизм в электричество». На решение этой задачи у него ушло почти десять лет.

Не раз за эти годы он возвращался к данной проблеме, пока не придумал серию экспериментов, кажущихся крайне незамысловатыми по современным меркам. На железную катушку в форме бублика, например, он с одной стороны намотал плотные витки длинного, заизолированного от железного сердечника проводника, подключаемые к сильной электрической батарее, а с другой — плотные витки электрического проводника, подключенного к *гальванометру* — прибору для обнаружения электрического тока. Железный сердечник был нужен для «поимки» силовых линий образующегося магнитного поля и передачи их внутрь контура второй обмотки.

Первые результаты пришли не сразу. Сначала, сколько Фарадей ни наблюдал за своей установкой, при протекании электрического тока по первичной обмотке тока во вторичной обмотке не возбуждалось. Могло показаться, что предположения Фарадея относительно «преобразования» электричества в магнетизм и обратно ошибочны. И тут на помощь пришел случай: обнаружилось, к полному удивлению Фарадея, что стрелка гальванометра в цепи вторичной обмотки скачкообразно отклоняется от нулевого положения лишь при подключении или отключении батареи. И тогда Фарадея посетило великое прозрение: электрическое поле возбуждается лишь при *изменении* магнитного поля. Самого по себе присутствия магнитного поля недостаточно. Сегодня эффект возникновения электрического поля при изменении магнитного физики называют *электромагнитной индукцией*.

Повторяя свои опыты и анализируя результаты, Фарадей вскоре пришел к выводу, что протекающий по контуру электрический заряд пропорционален изменению т. н. *магнитного потока*, проходящего через него. Представьте себе, что замкнутый электропроводящий контур положен на лист бумаги, через который проходят силовые линии магнитного поля. Магнитным потоком называется произведение площади контура на напряженность (условно говоря, число силовых

линий) магнитного поля, проходящего через эту площадь перпендикулярно ей. В первоначальной формулировке закон электромагнитной индукции Фарадея гласил, что при изменении магнитного потока, проходящего через контур, по проводящему



контур протекает электрический заряд, пропорциональный изменению магнитного потока, который возбуждается без всякого внешнего источника питания типа электрической батареи. Не будучи до конца удовлетворенным формулировкой, в которой фигурировала столь трудноизмеримая величина, как электрический заряд, Фарадей вскоре объединил свой закон с законом Ома и получил формулу (иногда ее принято называть *вторым законом электромагнитной индукции Фарадея*) для определения электродвижущей силы, возникающей в результате изменения магнитного потока через контур.

Изменить магнитный поток через контур можно тремя способами:

- изменить площадь контура;
- изменить интенсивность магнитного поля;
- изменить взаимную ориентацию магнитного поля и плоскости, в которой лежит контур.

Последний метод работает, поскольку при таком движении изменяется проекция магнитного поля на перпендикуляр к площади контура, хотя ни напряженность магнитного поля, ни площадь контура не меняются. Это очень важно с практической точки зрения, поскольку именно это явление лежит в основе действия любого *электрогенератора*. В самом простом варианте генератора проволочный контур вращается между полюсами сильного магнита. Поскольку в процессе вращения магнитный поток, проходящий через контур, постоянно меняется, по нему все время протекает электрический ток. Согласно *правилу Ленца*, на протяжении одного полуоборота контура ток будет течь в одну сторону, а на протяжении следующего полуоборота — в другую. Собственно, по этому принципу и вырабатывается так хорошо нам знакомый *переменный ток*, который поступает в дома жителей всего мира по сетям энергоснабжения. И не важно, что частота его в Америке равна 60 герц, а в Европе — 50 герц; важен сам принцип его получения. А тот факт, что американские генераторы совершают 60 оборотов в секунду, а европейские — 50 оборотов в секунду, — это уже дань исторической традиции.

Электрогенераторы играли, играют и будут играть важнейшую роль в развитии нашей технологической цивилизации, поскольку позволяют получать энергию в одном месте, а использовать ее в другом. Паровая машина, например, может преобразовывать энергию сгорания угля в полезную работу, но использовать эту энергию можно только там, где установлены угольная топка и паровой котел. Электростанция же может размещаться весьма далеко от потребителей электроэнергии и тем не менее снабжать ею заводы, дома и т. п.

Рассказывают (скорее всего, это всего лишь красивая сказка), будто Фарадей, демонстрировал прототип электрогенератора Джону Пилу (John Peel), канцлеру казначейства Великобритании, и тот спросил ученого: «Хорошо, мистер Фарадей, все это очень интересно, а какой от всего этого толк?»

«Какой толк? — якобы удивился Фарадей. — Да вы знаете, сэр, сколько налогов в казну эта штука со временем будет приносить?!»

Зеленая революция

Численность популяции увеличивается экспоненциально, тогда как количество пищи возрастает в арифметической прогрессии. Поэтому всегда существует риск, что запасов пищи хватит не всем. Во второй половине XX века внедрение в сельском хозяйстве новых зерновых культур привело к резкому повышению производства продуктов питания



В течение всей своей истории человечество вело непрерывающуюся борьбу за то, чтобы научиться производить пищу в количестве, необходимом для все появляющихся новых членов общества. По словам британского священника и экономиста Томаса Мальтуса (Thomas Malthus, 1766–1834): «Я полагаю, что справедливы два постулата. Во-первых, пища необходима для существования человека. Во-вторых, влечение между двумя полами необходимо и будет поддерживаться примерно на существующем уровне». Другими словами, увеличение численности популяции всегда будет описываться моделью экспоненциального роста, и всегда будет опережать темпы роста пищевых ресурсов. В последние два столетия, ознаменовавшиеся невиданным экономическим ростом, значение этого мрачного прогноза в отношении будущего человечества (названного *мальтузианской дилеммой*, или теорией народонаселения) постепенно уменьшается.

По отношению к мальтузианской дилемме философы разделились на два интеллектуальных лагеря — назовем их мальтузианцы и техно-оптимисты. Мальтузианцы утверждали, что рано или поздно численность народонаселения превзойдет предельную продуктивность источников пищи, установленную природой, во всем мире наступит голод, и каждое новое человеческое существо будет еще более способствовать истощению биосферы. Им возражали техно-оптимисты (к которым принадлежу и я), которые говорили, что благодаря технологиям постоянно совершенствуются наши возможности производить все необходимое для выживания, включая пищу. Поскольку технологии являются продуктом человеческого разума, каждый новый человек потенциально способен отодвинуть мальтузианские границы в более далекое будущее и должен рассматриваться как ценностный фактор.

В течение двух последних столетий техно-оптимисты неизменно одерживали победу. Наиболее впечатляющей победой некоторые считают «зеленую революцию». Начиная с 1950-х годов благодаря внедрению усовершенствованных сортов зерновых культур производство пищевых продуктов во всем мире резко возросло. Этому можно найти многочисленные подтверждения: например, с 1950-го по 1990 год урожайность в Индии возрастала на 2,8% ежегодно, тогда как ежегодный прирост численности населения составил 2,1%. Зерновые культуры, благодаря которым стала возможной «зеленая революция», были получены не с помощью современных генно-инженерных методов, а с помощью обычного, применявшегося десятилетиями скрещивания растений. Генетическая инженерия обещает, что в будущем нас ждут новые «зеленые революции» и что урожайность зерновых культур (особенно риса) значительно возрастет.

Большинство мальтузианцев признают успехи «зеленой революции», но сомневаются в том, что она сможет устойчиво обеспечивать будущие потребности. Они подчеркивают, что одной из причин успеха «зеленой революции» стало широкое использо-

вание удобрений (см. круговорот азота в природе) и что вмешательство человека в круговорот азота не может продолжаться бесконечно. Они также обращают внимание на то, что Зеленая революция повлекла за собой широкое распространение *монокультур* — когда на поле из года в год выращивают один и тот же вид растений. Эти монокультуры подвержены внезапному уничтожению вредителями или заболеваниями. Например, в начале картофельного голода в Ирландии (1845–47) практически весь урожай картофеля был уничтожен в течение недели.

Так обстоит дело, и я полагаю, что спор этот в той или иной форме будет продолжаться и через сто лет.

Излучение Черенкова*

При прохождении частицы через материальную среду со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде, наблюдается характерное излучение

1621	●	ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
1887	●	УДАРНЫЕ ВОЛНЫ
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
1934	●	ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРЕНКОВА

* Более точное название излучения Черенкова, принятое в российской научной традиции, — «излучение Черенкова—Вавилова», или «эффект Черенкова—Вавилова». Павел Черенков проводил свои исследования под руководством Сергея Ивановича Вавилова, который умер в 1951 г., и потому, согласно правилам присуждения Нобелевских премий, не был включен в число лауреатов. — *Прим. переводчика.*

При прохождении света через прозрачный материал, например стекло, свет распространяется медленнее, чем в вакууме. Как при перелете через континент с промежуточными посадками пассажир неизбежно теряет во времени по сравнению с беспосадочным перелетом, так и световые лучи затормаживаются, взаимодействуя с атомами среды, и не могут двигаться так же быстро, как в вакууме. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ гласит: ни одно материальное тело, включая быстрые элементарные частицы высоких энергий, не может двигаться со скоростью, равной скорости света в вакууме. Но к скорости движения в прозрачных средах это ограничение не относится. В стекле или в воде, например, свет распространяется со скоростью, составляющей 60–70% от скорости света в вакууме, и ничто не мешает быстрой частице (например, протону или электрону) двигаться быстрее света в такой среде.

В 1934 году Павел Черенков (под руководством Сергея Ивановича Вавилова. — *Прим. переводчика*) проводил исследования люминесценции жидкостей под воздействием гамма-излучения и обнаружил слабое голубое свечение (которое теперь названо его именем), вызванное быстрыми электронами, выбитыми из атомов среды гамма-излучением. Чуть позже выяснилось, что эти электроны двигались со скоростью выше скорости света в среде. Это был как бы оптический эквивалент ударной волны, которую вызывает в атмосфере сверхзвуковой самолет, преодолевая звуковой барьер. Представить это явление нам поможет аналогия с волнами Гюйгенса (*см. принцип ГЮЙГЕНСА*), расходящимися в виде концентрических кругов со скоростью света, причем каждая новая волна испускается из следующей точки на пути движения частицы. Если частица летит быстрее скорости распространения света в среде, она обгоняет волны. Пики амплитуды этих волн и образуют волновой фронт излучения Черенкова.

Излучение расходится конусом вокруг траектории движения частицы. Угол при вершине конуса зависит от скорости частицы и от скорости света в среде. Это как раз и делает излучение Черенкова столь полезным с точки зрения физики элементарных частиц, поскольку, определив угол при вершине конуса, физики могут рассчитывать по нему скорость частицы. В сочетании с результатами других замеров это позволяет обнаруживать элементарные частицы на своем оборудовании. В современных лабораториях детекторы Черенкова установлены в комплексе с другими измерительными приборами на огромных многоэтажных стеллажах. В качестве примера можно привести детектор «Супер-Камиоканде» в лаборатории г. Камиока в Японии, который вмещает 50 000 тонн воды и оснащен 11 000 светочувствительных элементов. Излучение Черенкова можно наблюдать и невооруженным взглядом на небольших исследовательских ядерных реакторах, которые часто устанавливают на дне бассейна для обеспечения радиационной защиты. Сердечник реактора в этом случае окружен эффектным голубым

свечением — это и есть излучение Черенкова под воздействием быстрых частиц, излучаемых в результате ядерной реакции.

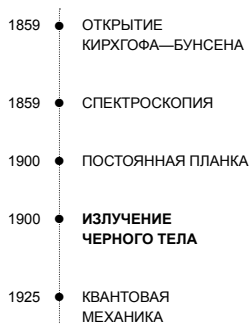
Поскольку анализ этого излучения сыграл важнейшую роль в зарождающейся экспериментальной ядерной физике, в 1958 году Черенков совместно с Игорем Таммом (1895–1971) и Ильей Франком (1908–90) был удостоен Нобелевской премии по физике. (Инициатор исследования С. И. Вавилов скончался в 1951 году и, согласно правилам присуждения Нобелевских премий, в число лауреатов включен не был. — *Прим. переводчика.*) Тамм и Франк в 1937 году окончательно установили механизм возникновения свечения под воздействием электронов, движущихся быстрее скорости света в среде (например, в воде), а вслед за тем предсказали вскоре обнаруженное излучение Черенкова в твердых телах и газах.

ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ ЧЕРЕНКОВ
(1904–90) — советский физик. Родился в селе Новая Чигла Воронежской губернии в крестьянской семье. В 1928 году окончил Воронежский университет, два года работал учителем. С 1930 года и до конца

своих дней работал в Физическом институте им. Лебедева Академии наук СССР (ФИАН). После работы, приведшей к открытию излучения Черенкова, занимался изучением космических лучей и разработкой ускорителей тяжелых частиц.

Излучение черного тела

Абсолютно черное тело, полностью поглощающее электромагнитное излучение любой частоты, при нагревании излучает энергию в виде волн, равномерно распределенных по всему спектру частот



К концу XIX века ученые, исследуя взаимодействие электромагнитного излучения (в частности, света) с атомами вещества, столкнулись с серьезными проблемами, решить которые удалось только в рамках КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ, которая во многом и зародилась благодаря тому, что эти проблемы возникли. Чтобы понять первую и, пожалуй, самую серьезную из этих проблем, представьте себе большой черный ящик с зеркальной внутренней поверхностью, в одной из стенок которого проделана маленькая дырочка. Луч света, проникающий в ящик через микроскопическое отверстие, навсегда остается внутри, бесконечно отражаясь от стенок. Объект, не отражающий света, а полностью поглощающий его, выглядит черным, поэтому его и принято называть *черным телом*. (Абсолютно черное тело — подобно многим другим концептуальным физическим явлениям — объект чисто гипотетический, хотя, например, полая, равномерно разогреваемая зеркальная изнутри сфера, свет в которую проникает через единственное крохотное отверстие, является хорошим приближением.)

Вам, однако, наверняка доводилось и в реальности видеть достаточно близкие аналоги черного тела. В очаге, например, случается, что несколько поленьев сложатся практически вплотную, а внутри них выгорит довольно большая полость. Снаружи поленья остаются темными и не светятся, в то время как внутри выгоревшей полости накапливаются жар (инфракрасное излучение) и свет, и, прежде чем вырваться наружу, эти лучи многократно отражаются от стен полости. Если заглянуть в щель между такими поленьями, вы увидите яркое желто-оранжевое высокотемпературное свечение и, оттуда на вас буквально полыхнет жаром. Просто лучи на какое-то время оказались пойманными в ловушку между поленьями подобно тому, как свет полностью улавливается и поглощается вышеописанным черным ящиком.

Модель такого черного ящика помогает нам понять, как ведет себя поглощенный черным телом свет, взаимодействуя с атомами его вещества. Тут важно понять, что свет поглощается атомом, тут же испускается им и поглощается другим атомом, снова испускается и поглощается, и так будет происходить до момента достижения состояния равновесного насыщения. При нагревании черного тела до равновесного состояния интенсивность испускания и поглощения лучей внутри черного тела уравниваются: при поглощении некоего количества света определенной частоты одним атомом другой атом где-то внутри одновременно испускает такое же количество света той же частоты. Таким образом, количество поглощенного света каждой частоты внутри черного тела остается неизменной, хотя поглощают и испускают его разные атомы тела.

До этого момента поведение черного тела остается достаточно понятным. Проблемы в рамках классической физики (под «классической» здесь имеется в виду физика до появления КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ) начались при попытках подсчитать энергию

излучения, сохраняемую внутри абсолютно черного тела в равновесном состоянии. И скоро выяснились две вещи:

- чем выше волновая частота лучей, тем больше их накапливается внутри черного тела (то есть, чем короче длины волн исследуемой части спектра волн излучения, тем больше лучей этой части спектра внутри черного тела предсказывает классическая теория);
- чем выше частота волны, тем большую энергию она несет и, соответственно, тем больше ее сохраняется внутри черного тела.

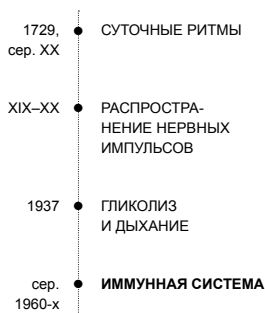
По совокупности два этих заключения привели к немыслимому результату: энергия излучения внутри черного тела должна быть бесконечной! Эта злая насмешка над законами классической физики была окрещена *ультрафиолетовой катастрофой*, поскольку высокочастотное излучение лежит в ультрафиолетовой части спектра.

Порядок удалось восстановить немецкому физiku Максy Планку (см. постоянная планка) — он показал, что проблема снимается, если допустить, что атомы могут поглощать и излучать свет только порциями и только на определенных частотах. (Позже Альберт Эйнштейн обобщил эту идею, введя понятие *фотонов* — строго определенных порций светового излучения.) По такой схеме многие частоты излучения, предсказываемые классической физикой, просто не могут существовать внутри черного тела, поскольку атомы не способны ни поглощать, ни испускать их; соответственно, эти частоты выпадают из рассмотрения при расчете равновесного излучения внутри черного тела. Оставив только допустимые частоты, Планк предотвратил ультрафиолетовую катастрофу и направил науку по пути верного понимания устройства мира на субатомном уровне. Кроме того, он рассчитал характерное распределение равновесного излучения черного тела по частотам.

Это распределение получило всемирную известность через многие десятилетия после его публикации самим Планком, когда ученые-космологи выяснили, что открытое ими реликтовое микроволновое излучение (см. большой взрыв) в точности подчиняется распределению Планка по своим спектральным характеристикам и соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре около трех градусов выше абсолютного нуля.

Иммунная система

Иммунная система призвана распознавать «чужаков», вторгшихся в наш организм, передавать эту информацию специализированным клеткам и отражать нападение



Среда обитания человека и других живых организмов весьма агрессивна. Нас подстерегают всевозможные вирусы и бактерии, ожидающие своего часа, чтобы напасть, поэтому задача нашей иммунной системы — защитить нас от их нападения. Некоторые рубежи обороны — чисто анатомические: например, кожа и слизистые оболочки образуют физический барьер, препятствующий вторжению. Если эти внешние границы нарушены, организм часто противопоставляет агрессии генерализованную воспалительную реакцию, при которой усиливается приток крови к пораженному участку. Кровь доставляет лейкоциты, которые, проникнув через стенку капилляров, захватывают внедрившегося агрессора. Именно такой реакцией объясняется хорошо знакомая нам краснота вокруг небольшого пореза.

Однако работа иммунной системы строится на иных принципах, а именно на вербовке специализированных молекулярных структур, действие которых направлено на специфичные мишени. К наиболее важным из этих структур относятся *антитела* — Y-образные молекулы. На концах Y-молекул собраны молекулы аминокислот (*см. БЕЛКИ*) различной формы. Каждая форма соответствует агрессору, или *антигену*, определенного вида. В организме взрослого человека насчитывается до 100 миллионов различных видов антител, отличающихся формой. В некотором смысле, иммунная система похожа на крупный магазин готового платья, где в наличии любые размеры одежды. При вторжении чужеродного организма можно с большой вероятностью надеяться на то, что один из 100 миллионов нарядов, имеющихся на вешалках, окажется ему впору. То, как антитела циркулируют в организме, определяется расположением аминокислот в «ножке» буквы Y — некоторые из них, например, циркулируют в кровяном русле и крайне эффективно уничтожают бактерии и вирусы, тогда как другие связываются со специализированными клетками в коже и слизистой оболочке кишечника.

В-клетки, или *В-лимфоциты*, — это главные клетки, отвечающие за функцию распознавания чужеродных организмов антителами. (Название связано с тем, что рост и созревание этих клеток происходит в костном мозге — bone marrow.) Эти клетки имеют форму, близкую к сферической, и на их внешней оболочке находятся разнообразные специализированные антитела. Когда чужеродный организм распознан — то есть когда антиген входит в контакт с соответствующим ему антителом на определенном В-лимфоците, — начинается размножение В-лимфоцитов. Процесс размножения преследует две цели. Во-первых, при этом происходит образование клеток (называемых *плазматическими клетками*), синтезирующих в большом количестве молекулы антител, специфичные по отношению к агрессору. Во-вторых, образуются клетки памяти, способные отреагировать на присутствие антигена спустя месяцы и годы после первого вторжения.

Одна плазматическая клетка способна образовывать до 30 000 молекул антител в секунду. Эти молекулы связываются с вторгшимися в организм бактериями, заставляя их собираться в группы, после чего эти скопления могут быть удалены другими клетками из организма. Однако для созревания плазматическим клеткам может потребоваться несколько дней. О победе антител организм обычно сигнализирует появлением лихорадки. Плазматические клетки живут лишь несколько дней, тогда как продолжительность жизни клеток памяти намного больше — иногда они сохраняются до конца жизни человека. В случае повторного вторжения того же самого антигена эти клетки сразу вступают в бой и немедленно синтезируют в огромном количестве антитела, минуя съедающий драгоценное время процесс распознавания. Именно этим объясняется наш иммунитет к последующим инфекциям. Основная цель вакцинации состоит как раз в образовании клеток памяти.

В-клетки защищают организм в основном от внешних вторжений — от молекул, имеющих «чужеродный» химический состав. Иммунные клетки другого типа — *Т-клетки* (или *Т-лимфоциты*) — имеют дело с клетками организма, видоизмененными из-за поражения инфекцией или раком. (В действительности этим занимается лишь около половины Т-лимфоцитов; вторая половина регулирует активность В-лимфоцитов.)

Т-лимфоциты получили название от тимуса — железы, в которой они растут и созревают. На внешней оболочке Т-лимфоцитов находятся белки, распознающие специфичные молекулы, а не специфичные антигены (в отличие от В-лимфоцитов). Т-лимфоциты реагируют с антигенами после объединения с молекулами другого типа, называемыми *комплексом гистосовместимости* и присутствующими во всех клетках индивидуума. Т-лимфоцит исполняет роль часового, который переходит с одного места на другое и окликает другие клетки, спрашивая у них пароль. Если на поверхности клетки оказывается верный комплекс гистосовместимости, Т-лимфоцит проходит дальше. Если что-то не в порядке, например комплекс изменен белком вирусной оболочки, Т-лимфоцит взаимодействует с клеткой и разрушает ее.

Трансплантация органов является настолько сложной проблемой именно из-за способности Т-лимфоцитов распознавать «чужаков». Т-лимфоциты стремятся атаковать пересаженный орган, поэтому их необходимо сдерживать с помощью лекарственных иммунодепрессантов. Кроме того, Т-лимфоциты являются мишенью для вируса, вызывающего СПИД, который во многом совпадает с рецепторами Т-лимфоцитов. Наконец, случается, что способность Т-лимфоцитов распознавать «своих» постепенно снижается, и тогда иммунная система может атаковать собственные клетки организма. Так возникают аутоиммунные заболевания, например ревматоидный артрит.

Интерференция

Интерференция волн может приводить как к усилению, так и к гашению их амплитуды

1690	●	ПРИНЦИП ГЮЙЕНСА
1807	●	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1818	●	ДИФРАКЦИЯ

Волны — один из двух путей переноса энергии в пространстве (другой путь — корпускулярный, при помощи частиц). Волны обычно распространяются в какой-то среде (например, волны на поверхности озера распространяются в воде), однако направление движения самой среды не совпадает с направлением движения волн. Представьте себе поплавков, покачивающийся на волнах. Поднимаясь и опускаясь, поплавок повторяет движения воды, в то время как волны проходят мимо него.

Явление интерференции происходит при взаимодействии двух и более волн одинаковой частоты, распространяющихся в различных направлениях. При этом оно наблюдается и у волн, распространяющихся в средах, и у электромагнитных волн (см. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ). То есть интерференция является свойством волн как таковых и не зависит ни от свойств среды, ни от ее наличия. Чтобы понять ее механизм, проще всего вернуться к примеру волн на водной поверхности и представить себе, что каждая волна несет в себе инструкцию для элементов поверхности, например «подняться на 1 метр» или «опуститься на 30 см». В точке взаимодействия двух волн поверхность просуммирует две такие инструкции — в данном примере, она поднимется на 70 см (1 м – 30 см).

Самое поразительное происходит в точке встречи двух волн равной амплитуды, достигших места встречи *в противофазе* (то есть когда пик максимума амплитуды одной волны накладывается на пик минимума амплитуды другой). В таком случае, условно говоря, одна волна передает поверхности инструкцию «подняться на 1 м», а другая — «опуститься на 1 м», в результате чего поверхность воды просто остается на месте. В этом случае на воде мы наблюдаем *точку штиля*. В акустике — *мертвую точку*. В оптике — *точку полного затемнения*. Это явление называется *интерференционным гашением* волн, или *деструктивной интерференцией*.

Возможна и прямо противоположная ситуация, когда две волны встречаются в точке *совпадения фаз*, и амплитуды колебаний среды складываются (при равной амплитуде встретившихся волн, например, амплитуда линейных колебаний среды удвоится). Это явление называется *интерференционным усилением* волн, или *конструктивной интерференцией*. Волны на поверхности воды в таких точках будут самыми высокими, звуки — самыми громкими, свет — самым ярким. Естественно, имеется множество промежуточных значений интерференционной амплитуды колебаний, лежащих в пределах от полностью конструктивной до полностью деструктивной интерференции, которые образуют причудливую и в то же время упорядоченную *интерференционную картину* взаимодействия волн.

Эффект интерференционного гашения позволяет нам судить, имеем мы дело с волной или с частицей. Действительно, при встрече двух бильярдных шаров трудно представить ситуацию, при

которой оба шара просто исчезнут, — самое большое, при сильном соударении они могут раскрошиться. Фактически, именно явление интерференции света окончательно убедило ученых XIX столетия в его волновой природе.

Одним из простейших экспериментальных доказательств стал опыт британского ученого Томаса Юнга. Пучок света направлялся на непрозрачный экран-ширму с двумя параллельными прорезями, позади которого был установлен второй, проекционный экран. Если бы свет состоял из частиц, на проекционном экране мы увидели бы всего две параллельных полосы света, прошедших через прорези ширмы. А между ними проекционный экран оставался бы практически неосвещенным.

Если же, с другой стороны, свет представляет собой распространяющиеся волны, картина должна наблюдаться принципиально иная. Согласно принципу гюйгенса, каждая прорезь является источником вторичных волн. Эти волны, в частности, достигли бы линии в середине экрана, находящейся на равном удалении от прорезей синхронно и в одной фазе — гребень к гребню, провал к провалу. Значит, на срединной линии экрана оказалось бы выполненным условие максимального интерференционного усиления, и там должен наблюдаться максимум яркости. То есть наивысшая яркость окажется именно там, где она должна быть практически нулевой в случае справедливости корпускулярной гипотезы света. На каком-то удалении от центральной линии, напротив, волны должны оказаться в противофазе, и там будет наблюдаться темная полоса. По мере дальнейшего удаления от средней линии яркость будет снова возрастать до максимума, затем снова убывать и т.д. Таким образом, на проекционном экране мы должны получить целый ряд чередующихся интерференционных полос. И опыт Юнга это с блеском подтвердил, развеяв все сомнения в волновой природе света.

Сюрприз ждал физиков столетием позже, когда через аналогичный экран с двумя щелями пустили пучок электронов. Выяснилось, что и они образуют на проекционном экране четкую интерференционную картину с чередованием «светлых» и «темных» полос. Следовательно, для электронов действительно выполняется соотношение де Бройля, хотя все привыкли считать их частицами!

Интерференция сегодня широко применяется в экспериментальной физике, будучи положена в основу действия измерительного прибора под названием *интерферометр*. Интерферометры бывают самых разных конструкций, в зависимости от того, что именно они должны измерять, но принцип работы у любого интерферометра один и тот же: луч разбивается на два *синфазных* луча посредством использования частично пропускающего луч зеркала, после чего один луч направляется на экран напрямую, а другой — через исследуемый образец (конструкция прибора и частоты лучей могут быть самыми различными в зависимости от объ-

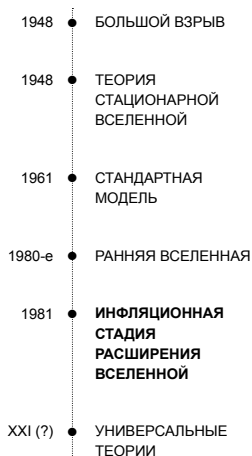
екта исследований). В конечном итоге оба луча попадают на регистрационный экран, и по полученной интерференционной картине можно с большой точностью судить о свойствах исследуемого образца, поскольку смещение интерференционных полос позволяет отслеживать малейшие смещения фазы луча в результате взаимодействия с исследуемым веществом. Интерферометры позволяют регистрировать задержки светового луча на время значительно меньше полупериода световой волны. Именно опыт Майкельсона—Морли, проведенный с использованием точнейшего интерферометра и не выявивший эфирного ветра, заставил ученых окончательно отказаться от идеи мирового эфира.

ТОМАС ЮНГ (Thomas Young, 1773–1829) — английский ученый широкого профиля. Родился в Милвертоне, графство Сомерсет (Milverton, Somerset), в семье плотника. Проявил себя вундеркиндом: к шести годам прочитал всю Библию, к тринадцати — свободно владел несколькими европейскими языками. Формально получив медицинское образование, был видным членом целого ряда Лондонских научных обществ, в 1809 году был избран в

Королевскую коллегию врачей. Прославившись более всего опытом по доказательству волновой природы света, сделал немало и для развития других областей естествознания, в частности открыл изменение формы хрусталика человеческого глаза. Многие сделал для развития теории упругости (см. Закон Гука). В последние годы жизни вернулся к изучению древних языков, участвовал в расшифровке текстов Розеттского камня.

Инфляционная стадия расширения Вселенной

Сразу после зарождения Вселенная расширялась невероятно быстро



С 30-х годов XX века астрофизики уже знали, что, согласно закону Хаббла, Вселенная расширяется, а значит, она имела свое начало в определенный момент в прошлом. Задача астрофизиков, таким образом, внешне выглядела простой: отследить все стадии хаббловского расширения в обратной хронологии, применяя на каждой стадии соответствующие физические законы, и, пройдя этот путь до конца — точнее, до самого начала, — понять, как именно все происходило.

В конце 1970-х годов, однако, оставались нерешенными несколько фундаментальных проблем, связанных с ранней Вселенной, а именно:

— *Проблема антивещества.* Согласно законам физики, вещество и антивещество имеют равное право на существование во Вселенной (см. античастицы), однако Вселенная практически полностью состоит из вещества. Почему так произошло?

— *Проблема горизонта.* По фоновому космическому излучению (см. большой взрыв) мы можем определить, что температура Вселенной везде примерно одинакова, однако отдельные ее части (скопления галактик) не могли находиться в контакте (как принято говорить, они были за пределами горизонта друг друга). Как же получилось, что между ними установилось тепловое равновесие?

— *Проблема распрямления пространства.* Вселенная, судя по всему, обладает именно той массой и энергией, которые необходимы для того, чтобы замедлить и остановить хаббловское расширение. Почему из всех возможных масс Вселенная имеет именно такую?

Ключом к решению этих проблем послужила идея, что сразу после своего рождения Вселенная была очень плотной и очень горячей. Все вещество в ней представляло собой раскаленную массу кварков и лептонов (см. стандартная модель), у которых не было никакой возможности объединиться в атомы. Действующим в современной Вселенной различным силам (таким, как электромагнитные и гравитационные силы) тогда соответствовало единое поле силового взаимодействия (см. универсальные теории). Но когда Вселенная расширилась и остыла, гипотетическое единое поле распалось на несколько сил (см. ранняя Вселенная).

В 1981 году американский физик Алан Гут осознал, что выделение сильных взаимодействий из единого поля, случившееся примерно через 10^{-35} секунды после рождения Вселенной (только задумайтесь — это 34 нуля и единица после запятой!), стало поворотным моментом в ее развитии. Произошел *фазовый переход* вещества из одного состояния в другое в масштабах Вселенной — явление, подобное превращению воды в лед. И как при замерзании воды ее беспорядочно движущиеся молекулы вдруг «схватываются» и образуют строгую кристаллическую структуру,

так под влиянием выделившихся сильных взаимодействий произошло мгновенная перестройка, своеобразная «кристаллизация» вещества во Вселенной.

Кто видел, как лопаются водопроводные трубы или трубки автомобильного радиатора на сильном морозе, стоит только воде в них превратиться в лед, тот на собственном опыте знает, что вода при замерзании расширяется. Алану Гуту удалось показать, что при разделении сильных и слабых взаимодействий во Вселенной произошло нечто подобное — скачкообразное расширение. Это расширение, которое называется *инфляционным*, во много раз быстрее обычного хаббловского расширения. Примерно за 10^{-32} секунды Вселенная расширилась на 50 порядков — была меньше протона, а стала размером с грейпфрут (для сравнения: вода при замерзании расширяется всего на 10%). И это стремительное инфляционное расширение Вселенной снимает две из трех вышеназванных проблем, непосредственно объясняя их.

Решение *проблемы распрямления пространства* нагляднее всего демонстрирует следующий пример: представьте координатную сетку, нарисованную на тонкой эластичной карте, которую затем смяли как попало. Если теперь взять и сильно встряхнуть эту смятую в комок эластичную карту, она снова примет плоский вид, а координатные линии на ней восстановятся, независимо от того, насколько сильно мы деформировали ее, когда скомкали. Аналогичным образом, не важно, насколько искривленным было пространство Вселенной на момент начала ее инфляционного расширения, главное — по завершении этого расширения пространство оказалось полностью распрямым. А поскольку из теории относительности мы знаем, что кривизна пространства зависит от количества материи и энергии в нем, становится понятно, почему во Вселенной находится ровно столько материи, сколько необходимо, чтобы уравновесить хаббловское расширение.

Объясняет инфляционная модель и *проблему горизонта*, хотя не так прямо. Из теории излучения черного тела мы знаем, что излучение, испускаемое телом, зависит от его температуры. Таким образом, по спектрам излучения удаленных участков Вселенной мы можем определить их температуру. Такие измерения дали ошеломляющие результаты: оказалось, что в любой наблюдаемой точке Вселенной температура (с погрешностью измерения до четырех знаков после запятой) одна и та же. Если исходить из модели обычного хаббловского расширения, то вещество сразу же после Большого взрыва должно было разлететься слишком далеко, чтобы температуры могли уравниваться. Согласно же инфляционной модели, вещество Вселенной до момента $t = 10^{-35}$ секунды оставалось гораздо более компактным, чем при хаббловском расширении. Этого чрезвычайно короткого периода было вполне достаточно, чтобы установилось термическое равновесие, которое не было нарушено на стадии инфляционного расширения и сохранилось до сих пор.

Инфляционная гипотеза не снимает *проблемы антивещества*, но эту проблему можно объяснить, обратившись к другим процессам, происходившим в то же время. Обнаруживаются интересные вещи: при бурном образовании элементарных частиц в ранней Вселенной примерно на 100 000 001 обычных частиц пришлось 100 000 000 античастиц. В следующую долю секунды частицы и античастицы, объединившись в пары, аннигилировали друг друга с гигантским выбросом энергии — масса превратилась в излучение. После такой «прополки» во Вселенной остался лишь жалкий клочок обычной материи. Вот из этого «космического мусора» и состоит вся известная нам сегодня Вселенная.

АЛАН ХАРВИ ГУТ (Alan Harvey Guth, р. 1947) — американский физик, специалист в области элементарных частиц и космологии. Родился в Нью-Брюнsvике, штат Нью-Джерси. Докторскую степень получил в Массачусетском технологическом институте, куда в 1986 году

и вернулся, став профессором физики. Свою теорию инфляционного расширения Вселенной Гут разработал еще в Стэнфордском университете, занимаясь теорией ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. Известен его отзыв о Вселенной как о «бескрайней скатерти-самобранке».

Катализаторы и ферменты

Катализатором, или ферментом (в случае биохимической реакции), называется вещество, помогающее протеканию химической реакции, но не изменяющееся в ходе нее



Скорость протекания химической реакции можно значительно увеличить, если добавить вещество, которое участвует в этой реакции, но при этом само не расходуется. Чтобы лучше это понять, представим себе работу брокера по операциям с недвижимостью. Брокер находит и собирает вместе людей, желающих продать какое-либо имущество, и людей, желающих его купить, таким образом способствуя его продаже и передаче другому владельцу. При этом сам брокер в ходе сделки ничего реально не покупает и не продает. Так же и катализатор, или фермент, способствует протеканию реакции между двумя веществами, но к концу реакции остается в первоначальном виде.

Пожалуй, самый известный катализатор находится у нас в машине, в каталитическом нейтрализаторе отработавших газов. Он представляет собой мелкоячеистую металлическую сетку, сделанную из палладия и платины, через которую пропускаются выхлопы из автомобильного двигателя. Эти металлы катализируют ряд химических взаимодействий. Во-первых, они абсорбируют окись углерода (CO), окись азота (NO) и кислород, причем каждая молекула NO распадается на составляющие ее атомы. CO соединяется с атомом кислорода, образуя диоксид углерода, а атомы азота соединяются, и получаются молекулы азота. В то же время избыток кислорода дает возможность углеводородам, не до конца сгоревшим в автомобильных цилиндрах, полностью окислиться до диоксида углерода и воды. Вот так выхлопные газы, которые содержат окись углерода (смертельный яд) и вещества, приводящие к кислотным дождям, а также несгоревшие фрагменты исходных молекул бензина, превращаются в относительно безвредную смесь диоксида углерода, азота и воды.

Чтобы понять действие ферментов, необходимо знать, что для взаимодействия сложных органических молекул недостаточно их простого контакта. Чтобы реакция протекала, определенные атомы в сближающихся молекулах должны быть правильно сориентированы друг относительно друга (так же как ключ определенным образом должен быть вставлен в замок), только тогда смогут образоваться химические связи. То есть для химических процессов, протекающих в биологических системах (см. **БИОЛОГИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЫ**), чрезвычайно важную роль играет пространственная геометрия.

В биохимии крайне мала вероятность того, что две сложные молекулы, предоставленные сами себе, случайно окажутся друг относительно друга в правильной ориентации, необходимой для взаимодействия. Чтобы такая реакция протекала с ощутимой скоростью, нужна помощь молекул определенного типа — ферментов. Фермент притягивает к себе две другие молекулы и удерживает их в правильном положении, чтобы взаимодействие состоялось. Как только реакция произошла, фермент освобождается и повторяет те же действия с другим набором молекул. Все ферменты в биологических системах представляют собой белки, которые могут принимать разнообразные сложные формы. Как и все белки, они закодированы в ДНК и в качестве ферментов управляют скоростью протекания химических реакций.

Квантовая механика

На субатомном уровне частицы описываются волновыми функциями

1900	• ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА
1923	• ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ
1924	• СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	• КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	• УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1927	• ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	• ОПЫТ ДЭВИССОНА—ДЖЕРМЕРА
1964	• ТЕОРЕМА БЕЛЛА

Слово «квант» происходит от латинского *quantum* («сколько, как много») и английского *quantum* («количество, порция, квант»). «Механикой» издавна принято называть науку о движении материи. Соответственно, термин «квантовая механика» означает науку о движении материи порциями (или, выражаясь современным научным языком науку о движении *квантующейся* материи). Термин «квант» ввел в обиход немецкий физик Макс Планк (см. ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА) для описания взаимодействия света с атомами.

Квантовая механика часто противоречит нашим понятиям о здравом смысле. А все потому, что здравый смысл подсказывает нам вещи, которые берутся из повседневного опыта, а в своем повседневном опыте нам приходится иметь дело только с крупными объектами и явлениями макромира, а на атомарном и субатомном уровне материальные частицы ведут себя совсем иначе. ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА как раз и очерчивает смысл этих различий. В макромире мы можем достоверно и однозначно определить местонахождение (пространственные координаты) любого объекта (например, этой книги). Не важно, используем ли мы линейку, радар, сонар, фотометрию или любой другой метод измерения, результаты замеров будут объективными и не зависящими от положения книги (конечно, при условии вашей аккуратности в процессе замера). То есть некоторая неопределенность и неточность возможны, но лишь в силу ограниченных возможностей измерительных приборов и погрешностей наблюдения. Чтобы получить более точные и достоверные результаты, нам достаточно взять более точный измерительный прибор и постараться воспользоваться им без ошибок.

Теперь, если вместо координат книги нам нужно измерить координаты микрочастицы, например электрона, то мы уже не можем пренебречь взаимодействиями между измерительным прибором и объектом измерения. Сила воздействия линейки или другого измерительного прибора на книгу пренебрежимо мала и не сказывается на результатах измерений, но, чтобы измерить пространственные координаты электрона, нам нужно запустить в его направлении фотон, другой электрон или другую элементарную частицу сопоставимых с измеряемым электроном энергий и замерить ее отклонение. Но при этом сам электрон, являющийся объектом измерения, в результате взаимодействия с этой частицей изменит свое положение в пространстве. Таким образом, сам акт замера приводит к изменению положения измеряемого объекта, и неточность измерения обуславливается самим фактом проведения измерения, а не степенью точности используемого измерительного прибора. Вот с какой ситуацией мы вынуждены мириться в микромире. Измерение невозможно без взаимодействия, а взаимодействие — без воздействия на измеряемый объект и, как следствие, искажения результатов измерения.

О результатах этого взаимодействия можно утверждать лишь одно:

$$\begin{aligned} & \text{неопределенность пространственных координат} \times \\ & \times \text{ неопределенность скорости частицы} > h/m, \end{aligned}$$

или, говоря математическим языком:

$$\Delta x \times \Delta v > h/m,$$

где Δx и Δv — неопределенность пространственного положения и скорости частицы соответственно, h — постоянная Планка, а m — масса частицы.

Соответственно, неопределенность возникает при определении пространственных координат не только электрона, но и любой субатомной частицы, да и не только координат, но и других свойств частиц, таких, как скорость. Аналогичным образом определяется и погрешность измерения любой такой пары взаимно увязанных характеристик частиц (пример другой пары — энергия, излучаемая электроном, и отрезок времени, за который она испускается). То есть если нам, например, удалось с высокой точностью измерить пространственное положение электрона, значит, мы *в этот же момент времени* имеем лишь самое смутное представление о его скорости, и наоборот. Естественно, при реальных измерениях до этих двух крайностей не доходит, и ситуация всегда находится где-то посередине. То есть, если нам удалось, например, измерить положение электрона с точностью до 10^{-6} м, значит, мы одновременно можем измерить его скорость, в лучшем случае, с точностью до 650 м/с.

Из-за принципа неопределенности описание объектов квантового микромира носит иной характер, нежели привычное описание объектов ньютоновского макромира. Вместо пространственных координат и скорости, которыми мы привыкли описывать механическое движение, например шара по бильярдному столу, в квантовой механике объекты описываются так называемой *волновой функцией*. Гребень «волны» соответствует максимальной вероятности нахождения частицы в пространстве в момент измерения. Движение такой волны описывается уравнением Шрёдингера, которое и говорит нам о том, как изменяется со временем состояние квантовой системы.

Картина квантовых событий в микромире, рисуемая уравнением Шрёдингера, такова, что частицы уподобляются отдельным приливным волнам, распространяющимся по поверхности океана-пространства. Со временем гребень волны (соответствующий пику вероятности нахождения частицы, например электрона, в пространстве) перемещается в пространстве в соответствии с волновой функцией, являющейся решением этого дифференциального уравнения. Соответственно, то, что нам традиционно представляется частицей, на квантовом уровне проявляет ряд характеристик, свойственных волнам.

Согласование волновых и корпускулярных свойств объектов микромира (см. соотношение де Бройля) стало возможным после того, как физики условились считать объекты квантового мира не частицами и не волнами, а чем-то промежуточным и обладающим как волновыми, так и корпускулярными свойствами; в ньютоновской механике аналогов таким объектам нет. Хотя и при таком решении парадоксов в квантовой механике все равно хватает (см. ТЕОРЕМА БЕЛЛА), лучшей модели для описания процессов, происходящих в микромире, никто до сих пор не предложил.

Квантовая хромо-динамика

Сильное взаимодействие между кварками, удерживающее их внутри элементарных частиц, основано на обмене особыми частицами — глюонами



Согласно СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ — лучшей на сегодняшний день теории строения материи, — кварки, объединяясь, образуют все многообразие ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, из которых, в свою очередь, состоят ядра атомов. Взаимодействие между кварками описывает теория квантовой хромодинамики (сокращенно КХД). В соответствии с этой теорией кварки взаимодействуют друг с другом, обмениваясь особыми частицами — глюонами.

В обычной ньютоновской физике любая сила — это либо притяжение, либо отталкивание, изменяющее характер движения тела. Но в современных квантовых теориях сила, действующая между элементарными частицами, интерпретируется несколько иначе. Считается, что сила возникает в результате того, что две частицы обмениваются третьей.

Приведем следующую аналогию. Представьте себе пару фигуристов на катке, едущих друг другу навстречу. Приблизившись, один из них вдруг выплескивает на другого ведро воды. Тот, кто выплеснул воду, от этого затормозит и изменит направление движения. И тот, кто получил порцию воды, также затормозит и изменит направление. Таким образом, «обменявшись» водой, оба фигуриста изменили направление движения. Согласно ЗАКОНАМ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА, это означает, что между фигуристами произошло силовое взаимодействие. В приведенном примере нетрудно увидеть, что эта сила возникла из-за (или, как сказали бы физики, передалась «через» или «посредством») обмена водой.

Все современные теории стремятся описывать силовые взаимодействия именно в терминах обмена частицами (см. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕОРИИ). Их называют *калибровочными теориями*, и они основаны на идеях симметрии и инвариантности в системе частиц и полей. Уравнения, описывающие такую систему, остаются неизменными, когда что-либо происходит со всей совокупностью частиц. Например, когда положительный и отрицательный заряды в системе меняются местами, силы, действующие между частицами, остаются прежними.

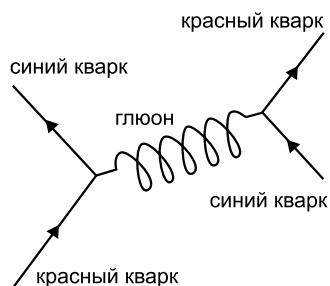
КХД развивает идеи первой успешной теории из ряда калибровочных — квантовой электродинамики, или КЭД. (По-английски это сокращение выглядит весьма символично, поскольку совпадает с латинским сокращением QED (quod erat demonstrandum — «что и требовалось доказать»), которое ставится в конце строгого доказательства математических теорем. — *Прим. автора.*) Согласно КЭД, электромагнитная сила между электрически заряженными частицами возникает в результате обмена фотонами (квантами света).

Аналогично устроена и КХД, только вместо электрических зарядов взаимодействия между кварками обусловлены свойством особого рода, который ученые называли *цветом*. Он может иметь три значения или, если хотите, три оттенка. Ученые условно называют их *красный*, *желтый* и *синий*, но буквально эти термины понимать не следует. Просто, к несчастью, в 1970-е годы среди

физиков-теоретиков было весьма распространено некоторое легкомыслие при выборе названий для открываемых ими явлений — в результате те же кварки имеют такие свойства, как «странность» и «очарование», хотя можно было бы придумать названия и посерьезнее. В любом случае, фраза «кварк имеет красный цвет» имеет не больше (и не меньше) смысла, чем фраза «электрон имеет отрицательный заряд».

Однако калибровочные теории в случае КЭД и КХД отличаются одним важным аспектом — характером их симметрии. Если в КЭД последовательность двух операций преобразования (прямая или обратная) не влияет на итоговый результат, то в КХД это не так, что делает эту теорию гораздо более сложной, чем КЭД.

Цвет присущ только кваркам, но не барионам и мезонам, в состав которых они входят. *Барионы* (к которым относятся, в частности, протон и нейтрон) состоят из трех кварков — красного, желтого и синего — цвета которых взаимно гасятся. А *мезоны* — из пары «кварк + антикварк», поэтому они тоже бесцветны. Вообще, в КХД действует принцип, согласно которому кварки в природе могут образовывать только такие комбинации, суммарный цвет которых оказывается нейтральным.



Взаимодействие между кварками в составе элементарных частиц можно графически представить в виде диаграммы Фейнмана, названной так в честь американского физика Ричарда Фейнмана (Richard Feynman, 1918–1988). На представленной диаграмме красный и синий кварки обмениваются глюоном и меняют свой цвет по взаимодействию

Взаимодействие между кварками осуществляется посредством восьми разновидностей частиц, называемых глюонами (от английского *glue* — «клей, клеить»; глюоны как бы «склеивают» кварки между собой). Именно они выступают в роли ведер с водой, если вернуться к аналогии с фигуристами. Однако в отличие от фотонов в КЭД, которые электрическим зарядом не обладают (хотя и выступают в роли носителей электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами), глюоны имеют собственный цветовой заряд и могут изменять цвет кварков, с которыми взаимодействуют. (Это как если бы наши фигуристы меняли

пол с мужского на женский и наоборот, обменявшись ведром воды!) Например, если при поглощении глюона синий кварк превращается в красный, значит, глюон нес на себе единичный положительный заряд красного цвета и единичный отрицательный заряд синего. Поскольку совокупный цветовой заряд кварка при этом не меняется, такие взаимодействия в рамках КХД допустимы (и даже необходимы).

КХД зародилась в середине 1980-х годов и с тех пор успешно прошла целый ряд экспериментальных проверок — пока что все ее прогнозы относительно результатов соударений элементарных частиц высоких энергий подтверждаются фактическими данными, полученными на ускорителях. Сегодня эта теория живет и здравствует. Более того, физики-экспериментаторы безбоязненно планируют новые опыты, исходя из того, что эта теория их не подведет. Что еще, собственно, нужно от хорошей теории?

Квантовый туннельный эффект

Имеется вероятность, что квантовая частица проникнет за барьер, который непреодолим для классической элементарной частицы

1900	●	РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД
XX	●	ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД
1924	●	КВАНТОВЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ
1925	●	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	●	УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1962	●	ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА

Представьте шарик, катающийся внутри сферической ямки, вырытой в земле. В любой момент времени энергия шарика распределена между его кинетической энергией и потенциальной энергией силы тяжести в пропорции, зависящей от того, насколько высоко шарик находится относительно дна ямки (согласно первому началу термодинамики). При достижении шариком борта ямки возможны два варианта развития событий. Если его совокупная энергия превышает потенциальную энергию гравитационного поля, определяемую высотой точки нахождения шарика, он выпрыгнет из ямки. Если же совокупная энергия шарика меньше потенциальной энергии силы тяжести на уровне борта лунки, шарик покатится вниз, обратно в ямку, в сторону противоположного борта; в тот момент, когда потенциальная энергия будет равна совокупной энергии шарика, он остановится и покатится назад. Во втором случае шарик никогда не выкатится из ямки, если не придать ему дополнительную кинетическую энергию, например, подтолкнув. Согласно законам механики Ньютона, шарик никогда не покинет ямку без придания ему дополнительного импульса, если у него недостаточно собственной энергии для того, чтобы выкатиться за борт.

А теперь представьте, что борта ямы возвышаются над поверхностью земли (наподобие лунных кратеров). Если шарiku удастся перевалить за приподнятый борт такой ямы, он покатится дальше. Важно помнить, что в ньютоновском мире шарика и ямки сам факт, что, перевалив за борт ямки, шарик покатится дальше, не имеет смысла, если у шарика недостаточно кинетической энергии для достижения верхнего края. Если он не достигнет края, он из ямы просто не выберется и, соответственно, ни при каких условиях, ни с какой скоростью и никуда не покатится дальше, на какой бы высоте над поверхностью снаружи ни находился край борта.

В мире квантовой механики дело обстоит иначе. Представим себе, что в чем-то вроде такой ямы находится квантовая частица. В этом случае речь идет уже не о реальной физической яме, а об условной ситуации, когда частице требуется определенный запас энергии, необходимый для преодоления барьера, мешающего ей вырваться наружу из того, что физики условились называть «*потенциальной ямой*». У этой ямы есть и энергетический аналог борта — так называемый «*потенциальный барьер*». Так вот, если снаружи от потенциального барьера уровень напряженности энергетического поля ниже, чем энергия, которой обладает частица, у нее имеется шанс оказаться «за бортом», даже если реальной кинетической энергии этой частицы недостаточно, чтобы «перевалить» через край борта в ньютоновском понимании. Этот механизм прохождения частицы через потенциальный барьер и назвали квантовым туннельным эффектом.

Работает он так: в квантовой механике частица описывается через волновую функцию, которая связана с вероятностью местонахождения частицы в данном месте в данный момент времени.

Если частица сталкивается с потенциальным барьером, УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА позволяет рассчитать вероятность проникновения частицы через него, поскольку волновая функция не просто энергетически поглощается барьером, но очень быстро гасится — по экспоненте. Иными словами, потенциальный барьер в мире квантовой механики размыт. Он, конечно, препятствует движению частицы, но не является твердой, непроницаемой границей, как это имеет место в классической механике Ньютона.

Если барьер достаточно низок или если суммарная энергия частицы близка к пороговой, волновая функция, хотя и убывает стремительно при приближении частицы к краю барьера, оставляет ей шанс преодолеть его. То есть имеется определенная вероятность, что частица будет обнаружена по другую сторону потенциального барьера — в мире механики Ньютона это было бы невозможно. А раз уж частица перевалила через край барьера (пусть он имеет форму лунного кратера), она свободно покатится вниз по его внешнему склону прочь от ямы, из которой выбралась.

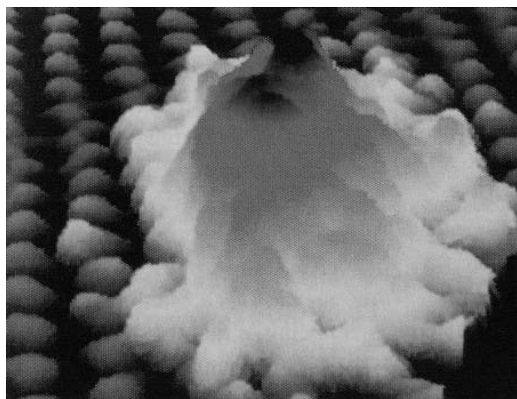
Квантовый туннельный переход можно рассматривать как своего рода «утечку» или «просачивание» частицы через потенциальный барьер, после чего частица движется прочь от барьера. В природе достаточно примеров такого рода явлений, равно как и в современных технологиях. Возьмем типичный РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД: тяжелое ядро излучает альфа-частицу, состоящую из двух протонов и двух нейтронов. С одной стороны, можно представить себе этот процесс таким образом, что тяжелое ядро удерживает внутри себя альфа-частицу посредством сил внутриядерной связи, подобно тому как шарик удерживался в ямке в нашем примере. Однако даже если у альфа-частицы недостаточно свободной

энергии для преодоления барьера внутриядерных связей, все равно имеется вероятность ее отрыва от ядра. И, наблюдая спонтанное альфа-излучение, мы получаем экспериментальное подтверждение реальности туннельного эффекта.

Другой важный пример туннельного эффекта — процесс термоядерного синтеза, питающий энергией звезды (см. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД). Один из этапов термоядерного синтеза — столкновение двух ядер дейтерия (по одному протону и одному нейтрону в каждом), в результате чего

образуется ядро гелия-3 (два протона и один нейтрон) и испускается один нейтрон. Согласно закону КУЛОНА, между двумя частицами с одинаковым зарядом (в данном случае протонами, входящими в состав ядер дейтерия) действует мощнейшая сила взаимного отталкивания — то есть налицо мощнейший потенциальный барьер. В мире по Ньютону ядра дейтерия попросту не могли бы сблизиться на достаточное расстояние и синтезировать ядро гелия.

Пример образа атомной структуры, полученного при помощи электронного микроскопа, использующего квантовый туннельный эффект. Атомы золота (желтые, красные и коричневые) в три слоя на графитовой подложке

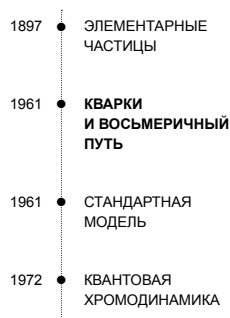


Однако в недрах звезд температура и давление столь высоки, что энергия ядер приближается к порогу их синтеза (в нашем смысле, ядра находятся почти на краю барьера), в результате чего начинает действовать туннельный эффект, происходит термоядерный синтез — и звезды светят.

Наконец, туннельный эффект уже на практике применяется в технологии электронных микроскопов. Действие этого инструмента основано на том, что металлическое острие щупа приближается к исследуемой поверхности на сверхмалое расстояние. При этом потенциальный барьер не дает электронам из атомов металла перетечь на исследуемую поверхность. При перемещении щупа на предельно близком расстоянии вдоль исследуемой поверхности он как бы перебирает атом за атомом. Когда щуп оказывается в непосредственной близости от атомов, барьер ниже, чем когда щуп проходит в промежутках между ними. Соответственно, когда прибор «нащупывает» атом, ток возрастает за счет усиления утечки электронов в результате туннельного эффекта, а в промежутках между атомами ток падает. Это позволяет подробнейшим образом исследовать атомные структуры поверхностей, буквально «картографируя» их. Кстати, электронные микроскопы как раз и дают окончательное подтверждение атомарной теории строения материи.

Кварки и восьмеричный путь

Все частицы в составе атомного ядра состоят из еще более фундаментальных частиц — кварков



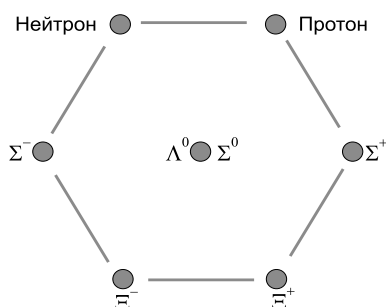
Схематическое изображение одной из восьмеричных групп адронов. В нижнем ряду — два кси-гиперона (отрицательно и положительно заряженные); в среднем ряду — три сигма-гиперона и парный нейтральному сигма-гиперону лямбда-гиперон; в верхнем ряду — нейтрон и протон. Интересно, что по своим свойствам гиперон лямбда ноль Λ^0 ничем не отличается от гиперона сигма ноль Σ^0 , однако это разные частицы: они являются зеркальным отражением друг друга с точки зрения их структурного строения

На протяжении двух последних веков ученые, интересующиеся строением Вселенной, искали базовые строительные блоки, из которых состоит материя, — самые простые и неделимые составляющие материального мира. АТОМНАЯ ТЕОРИЯ объяснила все многообразие химических веществ, постулировав существование ограниченного набора атомов так называемых химических элементов, объяснив природу всех остальных веществ через различные их сочетания. Таким образом, от сложности и многообразия на внешнем уровне ученым удалось перейти к простоте и упорядоченности на элементарном уровне.

Но простая картина атомного строения вещества вскоре столкнулась с серьезными проблемами. Прежде всего, по мере открытия все новых и новых химических элементов стали обнаруживаться странные закономерности в их поведении, которые, правда, удалось прояснить благодаря вводу в научный обиход ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА. Однако представления о строении материи все равно сильно усложнились.

В начале XX столетия стало ясно, что атомы отнюдь не являются элементарными «кирпичиками» материи, а сами имеют сложную структуру и состоят из еще более элементарных частиц — нейтронов и протонов, образующих атомные ядра, и электронов, которые эти ядра окружают. И снова усложненность на одном уровне, казалось бы, сменила простота на следующем уровне детализации строения вещества. Однако и эта кажущаяся простота продержалась недолго, поскольку ученые стали открывать все новые и новые ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. Труднее всего было разобраться с многочисленными *адронами* — тяжелыми частицами, родственными нейтрону и протону, которые, как оказалось, во множестве рождаются и тут же распадаются в процессе различных ядерных процессов.

Более того, в поведении различных адронов были обнаружены необъяснимые закономерности — и из них у физиков стало складываться некое подобие периодической таблицы. Используя математический аппарат так называемой *теории групп*, физикам удалось объединить адроны в группы по восемь — два типа частиц в центре и шесть в вершинах правильного шестиугольника. При этом частицы из каждой восьмеричной группы, располагающиеся



на одном и том же месте в таком графическом представлении, обладают рядом общих свойств, подобно тому как схожие свойства демонстрируют химические элементы из одного столбца таблицы Менделеева, а частицы, расположенные по горизонтальным линиям в каждом шестиугольнике, обладают

приблизительно равной массой, но отличаются электрическими зарядами (см. рисунок). Такая классификация получила название *восьмеричный путь* (в честь одноименной доктрины в буддистской теологии). В начале 1960-х годов теоретики поняли, что такую закономерность можно объяснить лишь тем, что элементарные частицы на самом деле таковыми не являются, а сами состоят из еще более фундаментальных структурных единиц.

Эти структурные единицы называли *кварками* (слово позаимствовано из замысловатого романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану»). Эти новые обитатели микромира оказались существами весьма странными. Для начала, они обладают дробным электрическим зарядом: $1/3$ или $2/3$ заряда электрона или протона (см. таблицу). А далее по мере развития теории выяснилось, что отдельно их не увидишь, поскольку они вообще не могут пребывать в свободном, не связанном друг с другом внутри элементарных частиц состоянии, и о самом факте их существования можно судить только по свойствам, проявляемым адронами, в состав которых они входят. Чтобы лучше понять этот феномен, получивший название *пленение* или *заточение кварков*, представьте, что у вас в руках длинный эластичный шнур, каждый конец которого представляет собой кварк. Если приложить к такой системе достаточно энергии — растянуть и порвать шнур, то он порвется где-то посередине, и свободного конца вы не получите, а получите два резиновых шнура покороче, и у каждого из них опять окажется два конца. То же и с кварками: какими бы энергиями мы ни воздействовали на элементарные частицы, стремясь «выбить» из них кварки, нам этого не удастся — частицы будут распадаться на другие частицы, сливаться, перестраиваться, но свободных кварков мы не получим.

Сегодня, согласно теории, предсказывается существование шести разновидностей кварков, и в лабораториях уже открыты элементарные частицы, содержащие все шесть типов. Самые распространенные кварки — *верхний*, или *протонный* (обозначается *u* — от английского *up*, или *p* — *proton*) и *нижний*, или *нейтронный* (обозначается *d* — от *down*, или *n* — от *neutron*), поскольку именно из них состоят единственные по-настоящему долгоживущие адроны — протон (*uud*) и нейтрон (*udd*). Следующий дублет включает *странные* кварки *s* (*strange*) и *очарованные* кварки *c* (*charmed*). Наконец, последний дублет состоит из *красивых* и *истинных* кварков — *b* (от *beauty*, или *bottom*) и *t* (от *truth*, или *top*). Каждый из шести кварков, помимо электрического заряда, характеризуется *изотопическим* (условно направленным) *спином*. Наконец, каждый из кварков может принимать три значения квантового числа, которое называется его *цветом* (*color*) и обладает *ароматом* (*flavor*). Конечно же, кварки не пахнут и не имеют цвета в традиционном понимании, просто такое название сложилось исторически для обозначения их определенных свойств (см. КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА).

Шесть типов кварков
и их заряд (измеренный
в зарядах электрона).
Кроме того, у каждого
кварка есть своя собс-
твенная АНТИЧАСТИЦА

Кварк	Заряд
u или p (верхний или протонный)	+2/3
d или n (нижний или нейтронный)	-1/3
c (очарованный)	+2/3
s (странный)	-1/3
b (красивый)	+2/3
t (истинный)	-1/3

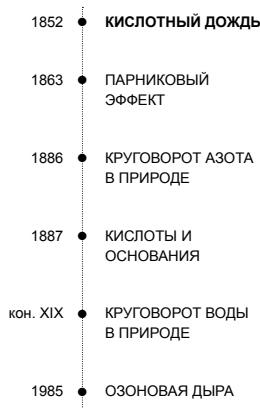
СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ останавливается на уровне кварков в детализации строения материи, из которой состоит наша Вселенная; кварки — самое фундаментальное и элементарное в ее структуре. Однако некоторые физики-теоретики полагают, что «луковицу можно лущить и дальше», но это уже чисто умозрительные построения. По моему личному мнению, стандартная модель правильно описывает строение вещества, и хотя бы в этом направлении наука дошла до логического завершения процесса познания.

МАРРИ ГЕЛЛ-МАНН (Murray Gell-Mann, р. 1929) — американский физик. Родился в Нью-Йорке в семье иммигрантов из Австрии. Его книга «Восьмеричный путь» (*Eightfold Way*, 1964), написанная в соавторстве с Ювалем Неэманом (Yuval Ne'eman, 1925–2006) позволила систематизировать во множестве расплывшиеся элементарные частицы подобно тому, как предложенная

Дмитрием Ивановичем Менделеевым периодическая таблица помогла в свое время упорядоченно классифицировать химические элементы. За эту работу и развитие теории кварков и субатомных взаимодействий Гелл-Манн был удостоен Нобелевской премии по физике за 1969 год. Позже Гелл-Манн занялся исследованием сложных АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ.

Кислотный дождь

Серные и азотные соединения, содержащиеся в атмосфере, повышают кислотность дождя



Как мы знаем еще из школьного курса химии, чистая вода состоит из молекул, содержащих два атома водорода и один атом кислорода. Однако в каждый момент времени некоторые из этих молекул диссоциируют на положительно заряженные ионы водорода (то есть протоны, H^+) и отрицательно заряженные гидроксид-ионы (OH^-); одновременно с этим какие-то соседние ионы H^+ и OH^- соединяются с образованием молекул воды. Таким образом, даже в самой чистой воде сохраняется динамический баланс, *равновесие*, с присутствием определенного количества ионов водорода (протонов). Эти протоны связаны с молекулами воды, образуя *ионы гидрония* — три атома водорода и один атом кислорода. В чистой воде концентрация ионов гидрония составляет 10^{-7} молей (см. закон АВОГАДРО) на литр.

Для оценки количества ионов водорода в воде химики используют понятие водородного показателя pH (сокр. от англ. «power of hydrogen» — «степень водорода»). Условились считать, что pH чистой воды равен 7. Такой водородный показатель соответствует химически нейтральной среде (см. кислоты и основания). С повышением концентрации ионов водорода pH понижается, и такие жидкости уже называются кислотами. Благодаря избыточному содержанию ионов водорода кислоты активно реагируют с другими веществами.

Термин «кислотный дождь» появился в середине XIX века, когда британские ученые заметили, что загрязнение воздуха в промышленно развитой центральной Англии привело к выпадению более кислых, чем обычно, дождей. Но только во второй половине XX века стало понятно, что кислотные дожди несут в себе угрозу окружающей среде.

Надо сказать, что обычный дождь является кислым сам по себе, даже в отсутствие заводов. Это происходит из-за того, что в процессе формирования и выпадения дождевые капли растворяют находящийся в воздухе углекислый газ и реагируют с ним с образованием угольной кислоты (H_2CO_3). Чистый дождь, проходящий через незагрязненный воздух, представляет собой водный раствор с pH 5,6 (к моменту удара о землю). Как мы увидим дальше, основная причина выпадения кислотных дождей — это деятельность человека, однако есть и естественные причины, начиная с извержения вулканов и разряда молнии и кончая жизнедеятельностью бактерий. В общем, даже если бы мы закрыли все фабрики и перестали ездить на машинах и грузовиках, значение pH дождя все равно было бы примерно 5,0. Поэтому сейчас принято считать дождь кислотным, если его pH ниже 5,0.

В современном промышленном мире избыточная кислотность дождя обусловлена в основном присутствием двух веществ:

— *Оксиды серы*. Эти соединения попадают в атмосферу естественным путем при извержениях вулканов, но значительная часть атмосферных оксидов серы образуется в результате сжигания природного топлива. Уголь и нефть

содержат небольшое количество серы. При сжигании этих видов топлива в атмосферу попадает сера в соединении с кислородом. Растворяясь в дождевых каплях, оксид серы образует серную кислоту.

— *Оксиды азота.* При достаточно высокой температуре содержащийся в воздухе азот соединяется с кислородом с образованием оксида азота. В природе это может произойти во время разряда молнии, но основная часть оксидов образуется при сжигании бензина в двигателях внутреннего сгорания (например, в автомобилях) или при сжигании угля. При растворении этих веществ в капельках воды образуется азотная кислота.

Таким образом, дожди становятся кислотными при вымывании из воздуха серных и азотных соединений. Это явление имеет несколько последствий, губительных для природы. Например, многие исторические здания в Европе построены из известняка — строительного материала, реагирующего с кислотой. С течением времени кислотные дожди буквально разъедают поверхность этих зданий. При выпадении кислотных дождей также происходит закисление почвы и ухудшаются условия существования лесов. Некоторое время думали, что массовое отмирание верхушек деревьев в лесах на востоке США и в Германии обусловлено кислотными дождями, но теперь эта точка зрения не поддерживается. (Действительно, леса гибнут, но связано это с другими причинами.) И наконец, кислотные дожди повышают кислотность рек и озер, тем самым создавая угрозу флоре и фауне.

Методы борьбы с образованием кислотных дождей направлены на улучшение технологии удаления соединений серы из воздушных выбросов промышленных предприятий и электростанций, для чего обычно используют устройство под названием скруббер. Правительства некоторых государств даже приняли законы, ограничивающие содержание загрязняющих веществ в выхлопах транспортных средств.

Кислоты и основания

Кислоту можно определить как вещество, высвобождающее в воде ион водорода, либо как вещество, которое может передавать протон, либо как вещество, способное присоединять электронную пару

Основание можно определить как вещество, высвобождающее в воде гидроксид-ион, либо как вещество, которое может принимать протон, либо как вещество, способное отдавать электронную пару



	ph
морская вода	7,8–8,3
кровь человека	7,3–7,5
безалкогольные напитки	2,5–3,5
уксус	2,4–3,4

Некоторые значения ph

Из нашего повседневного опыта мы знаем, что некоторые вещества обладают высококоррозионными свойствами. Например, если кислота из аккумулятора вашей машины попадет на одежду, она сразу же ее проест. Иногда мы используем аммиак и другие вещества для домашней уборки. Эти коррозионные вещества известны химикам как кислоты и основания. На поверхностном уровне их различить совсем не сложно. Кислоты кислые на вкус и окрашивают лакмусовую бумажку в красный цвет, щелочи же мыльные на ощупь и окрашивают лакмусовую бумажку в синий цвет. Однако химики редко довольствуются такого рода феноменологическими определениями. Они ищут ответ на вопрос: «Что делает вещество кислотой или основанием на молекулярном уровне?» Вот уже больше века химики бьются над определением кислот и оснований.

Первая попытка определить понятие кислоты восходит к 1778 году. Антуан Лавуазье смог объяснить, что именно происходит при горении, опровергнув бытовавшую до того теорию о флогистоне. Содержащийся в воздухе газ, который соединяется с веществами, когда они горят, он назвал *кислородом* — от греческого «производящий кислоту», поскольку он считал (как потом оказалось, ошибочно), что все кислоты содержат кислород.

Определение Аррениуса

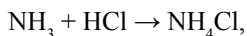
Современный подход к этой проблеме впервые сформулировал шведский химик Сванте Аррениус (Svante Arrhenius, 1859–1927). Его определение, выдвинутое в 1877 году, было очень простым: если некоторое вещество при растворении в воде высвобождает ион водорода (то есть протон, H^+), значит, это кислота. Если же при растворении в воде высвобождается гидроксид-ион (OH^-), то это основание. Согласно этому определению, аккумуляторная кислота, представляющая собой водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), является кислотой, потому что атомы водорода серной кислоты в растворе становятся ионами водорода. Соответственно, гидроксид натрия ($NaOH$) является основанием, так как в воде он высвобождает гидроксид-ион. Это определение объясняет, почему кислоты и основания нейтрализуют друг друга. Когда гидроксид-ион встречается с ионом водорода, они соединяются с образованием H_2O , обычной воды.

Между прочим, Аррениус активно участвовал в дискуссии о внеземном разуме (см. ПАРАДОКС ФЕРМИ). Он был сторонником теории *панспермии* — гипотезы о том, что жизнь с планеты на планету могут переносить микроорганизмы, перемещающиеся через космос, а значит, достаточно было жизни развиться лишь однажды, а не на каждой планете, где она есть. На смену этой гипотезе пришла теория *направленной панспермии*, в соответствии с которой где-то в Галактике существует цивилизация, которая рассылает зародыши жизни с целью заселения подходящих планет. Однако все эти теории только отодвигают решение проблемы

происхождения жизни, потому что все равно остается вопрос, как жизнь зародилась в самом первом месте.

Определение Брёнстеда—Лаури

Определение Аррениуса довольно точное, но область его применения ограничена — оно годится только для водных растворов (веществ, растворенных в воде). Вот пример реакции, на которую не распространяется определение Аррениуса: если вы поместите рядом сосуда с соляной кислотой (HCl) и аммиаком (NH₃), вы увидите белый дымок над сосудами. Пары аммиака и соляной кислоты смешиваются в воздухе над сосудами, и происходит химическая реакция



в которой кислота и основание соединяются с образованием хлорида аммония. Поскольку в этой реакции не участвует вода, определение Аррениуса здесь просто неприменимо.

В 1923 году датский химик Йоханнес Николаус Брёнстед (Johannes Nicolaus Brønsted, 1879–1947) и британский химик Томас Мартин Лаури (Thomas Martin Lowry, 1874–1936) предложили новое определение. В соответствии с ним кислота представляет собой молекулу или ион, способные отдавать протон (то есть ион водорода H⁺), а основание представляет собой молекулу или ион, способные принимать протон. Если рассматриваемая реакция протекает в водной среде, это определение по сути то же, что и определение, предложенное Аррениусом, однако оно распространяется также на реакции, протекающие в отсутствие воды, такие как образование хлорида аммония, описанное выше.

Определение Льюиса

Наконец, последнее обобщение сделало определение кислот и оснований не зависящим не только от присутствия воды, но и от образования протонов. Его выдвинул в 1923 году американский химик Гилберт Ньютон Льюис (Gilbert Newton Lewis, 1875–1946). Это определение основано на том, каким способом образуются химические связи в химических реакциях между кислотами и основаниями, а не на том, присоединяются или отдаются протоны. По Льюису, кислота — это химическое соединение, способное принимать электронную пару с последующим образованием ковалентной связи, а основание — это соединение, способное отдавать электронную пару.

Определение Льюиса включает в себя оба более ранних определения, а также объясняет те реакции, в которых не участвует водород. Например, когда диоксид серы реагирует с ионом кислорода с образованием серного ангидрида (эта реакция играет немаловажную роль в образовании кислотных дождей), ион

кислорода отдает два электрона для образования ковалентной связи — иными словами, ведет себя как основание, в то время как диоксид серы принимает электроны и, следовательно, ведет себя как кислота. Эта реакция, протекающая без протона и без воды, подходит под определение Льюиса, но не подходит ни под одно из предшествующих определений.

Показатель pH: измерение кислотности

Для водных растворов широко используется система определения концентрации кислоты или основания, которая лучше всего может быть объяснена в терминах теории Брёнстеда—Лаури. В чистой воде в каждый момент времени какие-то молекулы H_2O диссоциируют на ионы водорода (H^+) и гидроксид-ионы (OH^-), и одновременно с этим какие-то соседние ионы H^+ и OH^- соединяются с образованием молекул воды. Таким образом, в воде всегда присутствуют ионы водорода (протоны). Молярная концентрация (см. закон Авогадро) водорода в чистой воде составляет 10^{-7} моль на литр. Это означает, что одна молекула H_2O из каждых 10 миллионов находится в форме ионов.

Условились считать, что водородный показатель pH (сокр. от англ. power of hydrogen — «степень водорода») чистой воды равен 7 — это математический показатель степени из выражения 10^{-7} , взятый с положительным знаком. Мы можем повысить концентрацию ионов водорода в воде, добавив кислоту. Например, если мы добавим в чистую воду соляную кислоту (HCl), концентрация ионов водорода возрастет. Если мы достигнем точки, в которой молярная концентрация составляет 10^{-1} моль на литр, мы получим примерное значение кислотности желудочного сока. pH этого раствора составит 1. Таким образом, pH ниже 7 характеризует кислоту, и чем меньше значение pH, тем сильнее кислота.

Подобным образом можно понизить концентрацию ионов водорода в чистой воде, добавив основание (ионы OH^- основания будут реагировать с ионами H^+ с образованием молекул воды). Так, у аммиака, применяемого в домашнем хозяйстве, молярная концентрация ионов водорода составляет всего 10^{-11} моль на литр, и, следовательно, pH равен 11. А поскольку pH больше 7, это основание.

Клеточная теория

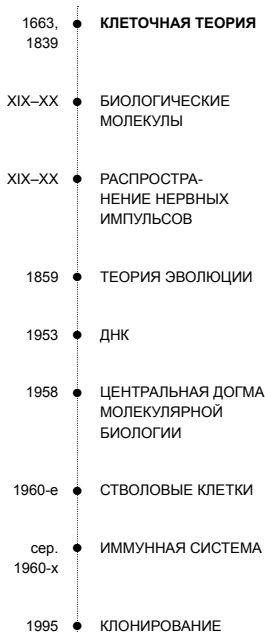
- (1) Все живые организмы состоят из одной или нескольких клеток;
 (2) химические реакции, происходящие в живых организмах, локализованы внутри клеток;
 (3) все клетки ведут начало от других клеток;
 (4) в клетках содержится наследственная информация, которая передается от одного поколения к следующему

Первым человеком, увидевшим клетки, был английский ученый Роберт Гук (известный нам благодаря закону гукa). В 1663 году, пытаясь понять, почему пробковое дерево так хорошо плавает, Гук стал рассматривать тонкие срезы пробки с помощью усовершенствованного им микроскопа. Он обнаружил, что пробка разделена на множество крошечных ячеек, напомнивших ему монастырские кельи, и он назвал эти ячейки *клетками* (по-английски *cell* означает «келья, ячейка, клетка»). В 1674 году голландский мастер Антоний ван Левенгук (Anton van Leeuwenhoek, 1632–1723) с помощью микроскопа впервые увидел в капле воды «зверьков» — движущиеся живые организмы. Таким образом, к началу XVIII века ученые уже знали, что в живых организмах есть клетки.

Однако лишь в 1838 году Маттиас Шлейден, посвятивший много лет жизни подробнейшему изучению растительных тканей, предположил, что все растения состоят из клеток. А год спустя Шлейден и Теодор Шванн высказали гипотезу, что клеточное строение имеют все живые организмы. Так была заложена основа современной клеточной теории. В 1858 году теорию дополнил немецкий патолог Рудольф Вирхов (Rudolph Virchow, 1821–1902). Ему принадлежит высказывание: «Там, где есть клетка, должна быть и предшествующая ей клетка». Иными словами, живое может возникнуть только от другого живого. Когда были переоткрыты законы Менделя и ученые заинтересовались вопросами наследственности, клеточная теория была дополнена четвертым из перечисленных выше тезисов. Сегодня хорошо известно, что наследственный материал содержится в клеточной ДНК (см. центральная догма молекулярной биологии).

МАТТИАС ЯКОБ ШЛЕЙДЕН (Matthias Jacob Schleiden, 1804–81) — немецкий ботаник, родился в Гамбурге в семье известного врача. Он учился на адвоката, но забросил юриспруденцию, чтобы изучать ботанику, и со временем стал профессором Йенского университета. В отличие от других ботаников, которые в то время ограничивались систематикой растений, основным инструментом Шлейдена при изучении роста и структуры растений был микроскоп.

ТЕОДОР ШВАНН (Theodor Schwann, 1810–82) — немецкий физиолог, родился в Нейсе. Он готовился стать священником, но вскоре увлекся медициной. Получив степень доктора медицины в Берлине, Шванн совершил ряд открытий в области биохимии. Позднее, уже будучи профессором Льежского университета, Шванн перешел на позиции религиозного мистицизма.



Клонирование

Можно получить потомство млекопитающих, генетически идентичное живым взрослым особям



В 1996 году весь мир был взбудоражен новостью об овечке Долли. В результате экспериментов, выполненных под руководством Яна Уилмута, родилась овца, генетически идентичная взрослой овце. В норме (см. законы Менделя) особь вырастает из одной оплодотворенной яйцеклетки, получив половину генетического материала от одного родителя и вторую половину — от второго. При клонировании же генетический материал берут из клетки одной живущей особи. Делается это так: из одной оплодотворенной клетки (*зиготы*) удаляют ядро (в котором находится ДНК). Затем извлекают ядро из клетки взрослой особи этого же вида и имплантируют его в лишённую ядра зиготу. Это яйцо имплантируют в матку самки данного вида и дают ему возможность расти, пока не придет время родов.

Сенсационность клонирования, принесшая Яну Уилмуту и Долли мировую известность, заключается в характере изменений клеточной ДНК по мере развития эмбриона. В начале в зиготе «включены» все гены, другими словами, все они могут работать. Однако в определенные сроки клетки становятся специализированными — в них отключаются разные гены, и их эффект больше не проявляется (на языке генетиков это называется «они не могут *экспрессироваться*»). Например, в каждой клетке вашего организма есть гены, отвечающие за синтез инсулина, но при этом инсулин вырабатывается только определенными участками поджелудочной железы. Во всех остальных клетках вашего тела (например, в клетках кожи, нервных клетках головного мозга) ген инсулина отключен.

Очевидно, что в ДНК, имплантированной в оплодотворенную яйцеклетку, какие-то гены уже отключены; какие именно и в какой последовательности — определяется тем, из какого органа взрослой особи была получена клетка. Оказывается, оплодотворенное яйцо — мы до конца не понимаем, как это происходит, — способно вновь установить часы клетки на 0, т.е. вновь включить все гены, благодаря чему становится возможным нормальное развитие эмбриона. В этом суть великого открытия Уилмута.

Не все попытки клонирования оказываются успешными. Одновременно с Долли эксперимент по замене ДНК был проведен на 273 других яйцеклетках, и лишь в одном случае выросло живое взрослое животное. После Долли были клонированы многие виды млекопитающих, назовем лишь некоторых — корова, мышь и свинья. Из яйцеклетки мыши получено несколько поколений клонированных животных — клоны, клоны из клонов, клоны из клонов и т.д.

Серьезнейшие разногласия вызвала возможность применения данной технологии к человеку. С одной стороны, новая технология несет ужасающую угрозу нравственности, поэтому клонирование человека надо запретить. С другой стороны, благодаря этой технологии много бесплодных супружеских пар получают шанс иметь

биологически родственных им детей, и, значит, по мнению многих, это вполне этично.

Пока споры продолжаются, обратим внимание на один важный аспект. С технической точки зрения клон, каким является Долли, всего лишь особь, ДНК которой идентична ДНК другой особи. Нам нередко приходится сталкиваться с особями, имеющими идентичную ДНК — мы называем их близнецами. Клон — это просто-напросто близнец, родившийся на несколько лет или десятилетий позже — «асинхронный близнец». Так же как нам никогда не пришло бы в голову ожидать, что один близнец может отдать другому свое сердце для пересадки, перспектива выращивания клонов для заготовки пересаживаемых органов — лишь страшный сон, который никогда не станет явью. Я на собственном опыте убедился, что стоит заменить слово «клон» на «близнец», как дебаты по клонированию человека утрачивают пафос.

Не могу поручиться, но думаю, что ближе к 2010 году клонирование будет считаться не более предосудительным, чем оплодотворение в пробирке или другие современные методы лечения бесплодия. Поскольку клонирование — довольно простая процедура, предусматривающая использование стандартных приемов, я ожидаю в скором времени появления клонированных людей (если только это уже не произошло к тому моменту, когда вы читаете эти строки).

ЯН УИЛМУТ (Ian Wilmut, р. 1944) — шотландский эмбриолог, родился в английском городке Хэмптон-Люси. В 1971 году окончил Ноттингемский университет, а в 1974 году получил докторскую степень за разработку методов замораживания свиной спермы. В том же году перешел в Институт Рослина рядом с Эдинбургом, где продолжает заниматься генетической инженерией

домашнего скота. Уилмут установил причины внутриутробной смерти овец и свиней, связанные с нарушением развития и физиологией, затем начал исследовать методы улучшения поголовья домашнего скота. В связи с полемикой по поводу клонированных животных Уилмут заметил: «Я не провожу бессонных ночей. Я верю в высокую нравственность нашего вида».

Ян Уилмут с овечкой Долли — первым млекопитающим-клоном, родившимся в 1996 году. Долли была создана из клеток, взятых у шотландской черномордой и финской дорсетской овцы



Космический треугольник

Распределение совокупной массы и энергии Вселенной по трем независимым пространственным измерениям неизбежно приводит к тому, что большая часть материи Вселенной остается невидимой для нас в силу особенностей ее структурного строения



Со времени доказательства существования темной материи мы знаем, что большая часть вещества Вселенной для нас невидима, и о самом существовании скрытой материи мы можем судить лишь по неизбежным гравитационным проявлениям ее присутствия. Один из таких эффектов — расширение Вселенной (см. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ, ЗАКОН ХАББЛА): скорость расширения зависит от плотности вещества в ней. До недавних пор у астрофизиков было единственное средство для оценки плотности материи (как видимой, так и скрытой) во Вселенной — посредством прямого измерения скорости разбегания галактик с последующими весьма приблизительными расчетами нынешней плотности вещества во Вселенной по ее предполагаемой исходной массе, поделенной на пространственный объем, который успело занять разбегающееся вещество с момента Большого взрыва. Традиционно речь шла о выборе между двумя моделями замкнутой Вселенной, в которой достаточно материи, чтобы со временем расширение сменилось сжатием, или открытой Вселенной, которая так и будет расширяться до бесконечности.

В конце 1990-х годов астрофизикам удалось связать воедино три метода наблюдения за веществом Вселенной — три микроскопа, если хотите, позволяющих пристально рассматривать процессы в космических глубинах. Одни из этих методов были совершенно новыми, другие — усовершенствованными старыми. Главное, что каждый из трех методов позволяет дать достаточно полную картину строения Вселенной и определить собственные пределы допустимого. И вот что поразительно: все три метода дали картину совершенно неожиданную: никто и представить не мог, что Вселенная ведет себя именно таким образом.

Первый «микроскоп» измеряет рентгеновские излучения межгалактического газа в скоплениях галактик. Идея такова, что, чем массивнее скопление, тем больше межгалактического газа оно «засасывает» и тем горячее будет этот газ. Поскольку основная масса вещества Вселенной (как видимого, так и скрытого) сосредоточена именно в галактических скоплениях, такая техника позволяет оценить общую плотность материи во Вселенной. Результаты таких оценок показали: совокупная масса вселенской материи составляет порядка 20–30% от массы, необходимой для перехода Вселенной от расширения к сжатию. То есть, по этим оценкам, мы живем в открытой Вселенной.

Вторым «микроскопом» стали тщательные измерения реликтового микроволнового фона (см. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ). Полная однородность и изотропность этого фона указывают, что Вселенная является совершенно «плоской» в геометрическом понимании, хотя данные исследования рентгеновских лучей, казалось бы, показывают, что массы вселенской материи недостаточно, чтобы «расплющить» пространство до совершенно плоского состояния. Иными словами, два первых «микроскопа» показывают прямо противоположные результаты (если не предположить, что кроме

видимой и скрытой материи во Вселенной не существуют и еще какие-то формы материи), а из этого следует одно из двух: либо нам открывается неполная картина явлений во вселенском масштабе, либо в корне неверны наши основополагающие гипотезы и теории.

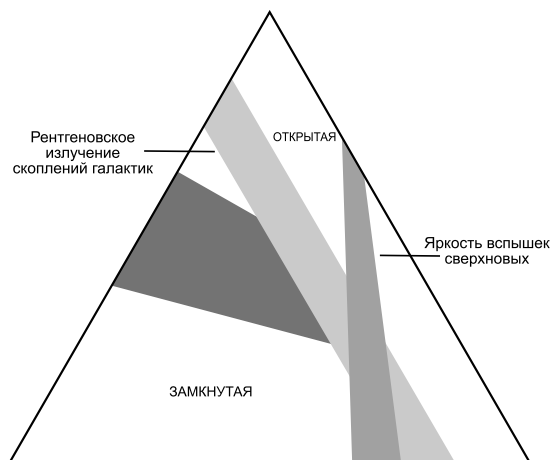
И наконец, самый новый «микроскоп» — метод прямого измерения скорости расширения Вселенной. Идея такова: изучая излучение галактики, удаленной от нас на расстояние в 10 миллиардов световых лет, мы видим Вселенную такой, какой она была за 10 миллиардов лет до нас. В частности, мы видим, с какой скоростью она в то время расширялась. Сравнив эту скорость с текущей скоростью расширения Вселенной, мы можем определить, насколько снизилась скорость расширения за прошедшие 10 миллиардов лет и по этому показателю рассчитать совокупную массу материи во Вселенной.

Астрономы долго боролись с т. н. *параметром замедления*, не зная которого, невозможно определить истинное расстояние до удаленного космического объекта, каковым является соседняя галактика. И тут подоспел на помощь новый инструмент измерения. Имеется несколько типов сверхновых звезд (сверхмощных вспышек при смерти массивной звезды; см. эволюция звезд). Один из типов вспышки сверхновой называется *сверхновая типа Ia* — такая вспышка происходит в двойных звездных системах, где одна из звезд представляет собой белый карлик и «перетягивает» на себя вещество второй, горячей звезды. После накопления на поверхности белого карлика критической массы «ворованного» вещества запускается цепная реакция термоядерного синтеза, и весь этот наносной слой взрывается наподобие гигантской водородной бомбы. Поскольку критическая масса и мощность такого ядерного взрыва поверхности любой сверхновой типа Ia не отличаются друг от друга, яркость любой сверхновой типа Ia практически неизменна, это и есть ключ к работе третьего «микроскопа». Отыскав в далекой галактике сверхновую типа Ia и сравнив наблю-

даемую яркость вспышки с расчетной, астрофизики могут определить реальное расстояние до галактики.

И тут результаты получились просто ошеломляющие: расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется! Это явление вообще невозможно объяснить, оставаясь в рамках предположения, что Вселенная состоит лишь из видимой и скрытой материи, поскольку в этом случае ее гравитационное притяжение неизбежно должно приводить к замедлению темпов разбегания галактик. Единственно возможное объяснение — во Вселенной существует *нечто*, какая-

Упрощенная схема космического треугольника, на которой отражены три области допустимых состояний Вселенной



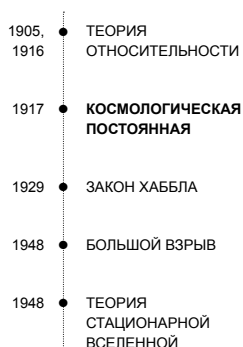
то субстанция бытия, до сих пор выходившая за пределы понимания бледной в своей традиционности научной мысли. Это своего рода антигравитация — сила взаимного отталкивания материи, действующая на космических расстояниях (и действие ее *усиливается* с ростом расстояния, чем это поле принципиально отличается от всех других силовых полей, начиная с обычного гравитационного, которые убывают с расстоянием). Астрофизики условились обозначать природу этой непостижимой пока силы термином *темная энергия*. Лично мне это название нравится, поскольку мы пока что ничего не знаем о происхождении этого явления.

Итак, три описанных микроскопа дают нам такую картину устройства Вселенной, из которой следует, что обычного вещества во Вселенной недостаточно, чтобы до конца «распрямить» ее в пространстве, однако этот дефицит с запасом покрывается темной энергией непонятной нам природы, под воздействием которой Вселенная расширяется ускоряющимися темпами, и будет расширяться до бесконечности, невзирая на то, что геометрия Вселенной уже в целом выпрямилась. Если взглянуть на вещи именно так, кажущаяся противоречивость картины, которую мы наблюдаем посредством трех вышеописанных «микроскопов», устраняется, и мы видим перед собой то, что принято называть *космическим треугольником*, схематическое представление которого представлено на рисунке. Внутри треугольника разной штриховкой заполнены «теоретически» допустимые области согласно результатам наблюдений через каждый из трех «микроскопов», а реальная Вселенная находится в точке взаимного пересечения всех трех областей. Из диаграммы видно, что около одной трети энергии Вселенной пребывает в материальном состоянии (в форме наблюдаемой и скрытой материи), а около двух третей — в форме темной энергии. И опять же мы видим, насколько мизерен по своим масштабам наш обыденный мир на фоне устройства Вселенной в целом.

Возможное (и самое распространенное среди астрофизиков) объяснение происхождения темной энергии состоит в том, что она — суть физическое проявление космологической постоянной, предложенной Альбертом Эйнштейном в начале XX века. Однако у гипотезы объяснения темной энергии физическим проявлением космологической константы сегодня имеются и противники. Ими выдвигается гипотеза о существовании *квинтэссенции* — неизвестной нам новой силы, свойства которой пока совершенно не изучены. Само ее название в переводе с греческого означает «пятый элемент» — в дополнение к четырем элементам или стихиям, из которых, по представлениям древнегреческих философов, состоял мир: земля, огонь, воздух и вода. Какая из двух гипотез в будущем подтвердится фактами, станет ясно лишь после того, как ученые разработают новые эксперименты и методы измерения.

Космологическая постоянная

Космологическая постоянная, если таковая действительно существует, могла бы послужить объяснением наблюдаемому расширению Вселенной с нарастающей скоростью расширения



Постулируя общую теорию относительности Альберт Эйнштейн был уверен в стационарности Вселенной, то есть в том, что положение галактик относительно друг друга практически не меняется. Однако он не мог не заметить, что в силу действия закона всемирного тяготения ньютона Вселенная должна сжиматься, что противоречит здравому смыслу. Поэтому, чтобы уравновесить силы гравитации, ведущие Вселенную к неизбежному и скоростному коллапсу, Эйнштейну пришлось ввести в уравнения общей теории относительности дополнительное слабое — *космологический член*, своего рода антигравитационную поправку на необъяснимую силу отталкивания, буквально растаскивающую галактики и противодействующую силе их взаимного гравитационного притяжения. Эта сила, согласно Эйнштейну, возрастает с расстоянием с коэффициентом пропорциональности, равным так называемой *космологической постоянной*, которую ученый обозначил греческой прописной буквой Λ (лямбда).

Противореча, на первый взгляд, критерию красоты теории, эта добавка оказалась неизбежной с точки зрения сохранения ее непротиворечивости. Однако после открытия явления расширения Вселенной (см. закон Хаббла), Эйнштейн понял, что нужда в космологической постоянной отпала. Эйнштейн тут же исключил космологический член из своих уравнений и впоследствии неоднократно называл его первоначальное появление в них грубейшей из допущенных им за всю свою жизнь ошибок.

После этого почти до конца XX столетия космологическая постоянная впала в немилость в теоретической физике. Редкие смельчаки из числа физиков-теоретиков, пытавшихся хотя бы заикнуться об ее возвращении в модель устройства Вселенной для объяснения той или иной неразрешимой головоломки, немедленно подвергались жестокому высмеиванию со стороны коллег. А затем в конце 1990-х годов история физики приняла неожиданный поворот, и Λ гордо вернулась на сцену и оказалась в центре всеобщего внимания.

Теория большого взрыва неизбежно подразумевает вопрос: и чем все это представление завершится? Либо разбегающиеся галактики в какой-то момент повернут вспять под воздействием сил гравитационного притяжения, и Вселенная сожмется обратно в точку в момент того, что иногда называют *большой крах* по аналогии с большим взрывом; либо Вселенная так и будет расширяться до бесконечности во тьму пространства, пока не обратится в рассеянный холодный прах в результате *тепловой смерти*. Казалось бы, третьего не дано. Как правоверные христиане не видят для себя после смерти иной альтернативы, кроме попадания в рай или ад, все космологи строили догадки исключительно на предмет того, какая из двух судеб предначертана Вселенной.

Одним из методов получения ответа на этот вопрос явилось измерение скорости удаления галактик, отстоящих от Земли на самые большие расстояния — в миллиарды световых лет. Пос-

кольку свет от них шел до Земли миллиарды лет, по доплеровскому смещению в их спектрах мы можем вычислить, с какой скоростью они удалялись миллиарды лет назад. Сравнив эту скорость с современной скоростью разбегания ближайших галактик, мы узнаем, насколько силы гравитационного притяжения успели замедлить расширение Вселенной, а там, можно надеяться, и вычислим ее судьбу.

Измерение скорости удаления галактик на сегодняшний день задача решаемая (см. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА) — достаточно измерить красное смещение в спектре излучения их звезд. Гораздо труднее



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН (Albert Einstein, 1879–1955) — один из величайших физиков-теоретиков XX века. Родился в Ульме, Германия; жил и работал в Германии, Швейцарии и США. Сын владельца маленького электромеханического заводика в Мюнхене; в этом городе и началось его формальное образование. После того как семейный бизнес пришел в полный упадок, семья Эйнштейнов перебралась в Италию, а юный Альберт отправился в Цюрих (Швейцария), где и продолжил формальное образование. (Тут самое время развеять устойчивый миф о том, что в юности Эйнштейн был нерадивым студентом и даже получал двойки по математике. С учебой у Эйнштейна проблем не возникало, зато он имел массу дисциплинарных взысканий, однако проблемы с администрацией застенелой в те годы германской системы образования возникали у многих студентов, отличавшихся свободомыслием.)

В 1901 году Эйнштейн устроился на работу в Швейцарское патентное бюро в Берне и в том же году получил швейцарское гражданство по причине острого недовольства жестким и милитаризованным режимом, воцарившимся в Германии. За семь лет, проведенных на этой должности, он и внес свой основной вклад в науку, включая теоретическое объяснение фотоэлектрического эффекта и броуновского движения и специальную теорию относительности. В 1909 году, получив признание в академических кругах, стал профессором Цюрихского, затем Пражского университетов и, наконец, возглавил Институт физики им. Кайзера Вильгельма в Берлине. Ранний брак с однокурсницей Милевой Марич (Mileva Marić) сложился неудачно; в 1919 году Эйнштейн развелся со своей первой

женой и вскоре женился на своей кузине Эльзе.

В том же году к Эйнштейну пришла всемирная слава — замеры отклонения световых лучей при их прохождении в непосредственной близости от Солнца стали экспериментально подтверждать предсказания общей теории относительности. Однако, будучи пацифистом и сионистом по убеждениям, Эйнштейн находил политическую обстановку, складывающуюся в Германии, все более невыносимой. В 1933 году, с окончательным утверждением у власти Адольфа Гитлера, ученый покинул историческую родину и отправился в Принстон (США) для продолжения работы в Институте фундаментальных исследований (Princeton Institute for Advanced Study), а в 1940 году принял американское подданство. В годы Второй мировой войны направил президенту США Франклину Рузвельту письмо, в котором предупредил об опасности разработки атомного оружия, хотя и не ясно, не стало ли именно это письмо своеобразным катализатором, побудившим администрацию США к реализации программы скорейшего создания атомной бомбы. Как бы то ни было, после войны Эйнштейн выступал последовательным поборником мира во всем мире и уделял миротворческой деятельности немало времени.

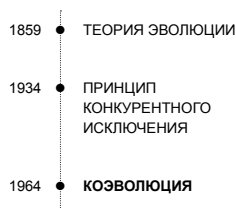
Будучи непримиримым противником квантовой механики как таковой, Эйнштейн своим скептическим отношением к этой теории немало способствовал развитию и оттачиванию ее сторонниками, в частности его старым другом Нильсом Бором, своих идей. На склоне лет Эйнштейн безуспешно пытался связать воедино теорию гравитации с теориями других природных сил (см. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕОРИИ).

измерить расстояние до этих галактик. Для этого астрономам нужна так называемая *стандартная свеча* — объект с заведомо известной исходной светимостью. Сравнив энергию доходящего до нас излучения с исходной энергией, испускаемой таким объектом в пространство по всем направлениям и рассеивающейся в нем, мы можем оценить расстояние до него.

В 1990-е годы астрофизикам удалось наконец найти подходящую стандартную свечу — на эту роль идеально подошли сверхновые типа Ia (см. КОСМИЧЕСКИЙ ТРЕУГОЛЬНИК). Использование этого метода дало, мягко выражаясь, озадачивающие результаты. Расширение Вселенной не просто не замедляется со временем — оно ускоряется! Судя по всему, имеется какая-то неизвестная нам сила, которая буквально растаскивает Вселенную на куски, — какая-то, по сути, антигравитация, причем настолько сильная, что она побеждает силу тяжести и под ее воздействием галактики разлетаются с неуклонно возрастающей скоростью. И стоило астрофизикам осознать этот факт, как им пришлось срочно реабилитировать опальную космологическую постоянную Λ . Вся космологическая теория была еще раз поставлена с ног на голову, и теперь физики-теоретики бьются над тем, как вернуть «грубейшую ошибку» Эйнштейна на законное место в своих теориях. Другой вопрос, навсегда ли космологическая постоянная возвращается в теоретическую физику.

Козволюция

Эволюция одного организма может зависеть от эволюции другого



Согласно теории эволюции, с течением времени живые существа видоизменяются под воздействием внешней среды. Обычно под факторами естественного отбора понимают, например, климат, обеспеченность пищей или доступность воды. Однако понятие «внешняя среда» может включать в себя и другие живые существа. Изменения в одном организме могут приводить к изменениям в другом; эти изменения, в свою очередь, вызывают изменения в первом организме и так далее. Такой «вальс организмов» во времени называется козволюцией.

Например, у растения может образоваться жесткий покров на листьях, чтобы его не смогли съесть насекомые. В ответ у одного из насекомых, питающихся этим растением, могут так развиваться части ротового аппарата, чтобы преодолеть это защитное приспособление растения. Растение может затем создать еще более мощную защиту (колючки, например), чтобы не подпускать насекомое, а насекомое опять может выработать средства противодействия этой новой оборонной стратегии. Здесь растение и насекомое реагируют не на изменения среды обитания, а на мутации агрессора и источника пищи.

Козволюция иногда может приводить к поразительным результатам — результатам, которые часто ставили в тупик биологов-эволюционистов. Например, у некоторых видов насекомых ротовой аппарат настолько узко приспособлен, что они могут добывать нектар только из цветков одного-единственного вида растений. В свою очередь, цветки этого растения могут опылять (то есть переносить пыльцу с одного цветка на другой) только насекомые данного вида. Можно сказать, что эти два вида козволюционировали во что-то третье, что пока еще не является единым организмом, но уже и не может считаться двумя независимыми организмами.

Подобные системы иногда ошибочно приводят в пример как свидетельство против теории эволюции — якобы их существование доказывает, что какие-то виды создавались с заранее определенной узкой направленностью. Однако, как мы видим, появление таких «сверхъестественных» союзов нетрудно объяснить законами естественного отбора.

Критерий красоты

Существуют не только прагматические, но и эстетические критерии оценки научных теорий...

...иными словами, к научной теории можно подходить не только как к инструменту для объяснения явлений природы, но и как к произведению искусства. Эта мысль вряд ли удивит кого-нибудь из ученых — каждый из них за время своей работы не раз сталкивался с подобными рассуждениями, а иногда и сам принимал в них участие. Зато широкую публику тот факт, что ученые не безнадежные практики и рационалисты, какими их принято изображать, а такие же, как и все, ценители красоты и изящества, может даже шокировать.

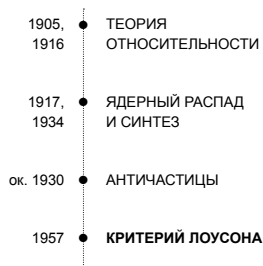
Существует множество примеров того, как этот критерий работает в науке. Так, общая теория относительности благодаря своему изяществу была почти сразу принята учеными, хотя потребовались десятилетия, чтобы экспериментально подтвердить ее предсказания. Этот пример показывает — я хочу это специально подчеркнуть, — что, хотя красота и изящество и могут склонить ученых в пользу той или иной теории, они все же не могут изменить экспериментальные данные на противоположные. Если бы теория относительности не нашла экспериментального подтверждения, ее бы изменили или отвергли, несмотря на всю ее красоту. Таким образом, критерий красоты может повышать или понижать вес той или иной теории, но не является сам по себе решающим фактором в принятии этой теории.

Однако критерий красоты — вещь довольно расплывчатая и субъективная. Он определен не так четко, как другие понятия, которые мы используем в этой книге. Например, нет ясного толкования слова «красота» в контексте научных теорий. Тем не менее существуют некоторые общепринятые положения. Например, чем универсальнее теория, тем больше шансов, что она будет признана красивой. Чем менее случайные и наскоро сколоченные данные использовались при построении теории, тем меньше шансов, что ее сочтут просто подогнанной под конкретный набор фактов, и тем более изящной покажется эта теория. И конечно же, не последнюю роль в признании теории изящной играет ее простота (см. БРИТВА ОККАМА). Надо думать, что хотя бы в отношении этих трех положений среди ученых существует определенное единодушие.

Естественно, возникает вопрос: можно ли сформулировать критерий научной красоты — более объективный, чем тот, который мы применяем, скажем, в живописи или в музыке? Когда я читаю чужие рассуждения о научной красоте, я часто ловлю себя на том, что не согласен с автором в его оценке той или иной научной идеи. Например, некоторые находят идею плоской Вселенной — где пространство-время выглядят координатной сеткой на поверхности стола — красивой. Мне же эта идея не кажется ни красивой, ни безобразной. Другие считают, что Вселенная, в которой ускорение вызывает космологическая постоянная, прекрасна, однако мой друг Роки Колб, известный астрофизик, находит такую Вселенную «невыразимо уродливой». В науке, как и в искусстве, у каждого свое представление о красоте.

Критерий Лоусона

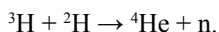
Чтобы термоядерный синтез стал источником энергии, производство плотности частиц и времени их удержания на предельно близком расстоянии друг от друга должно превышать определенную величину



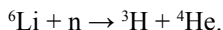
В принципе, термоядерный синтез — реакция, при которой из ядер легких химических элементов образуются более тяжелые (см. ЯДЕРНЫЙ РАСПАД И СИНТЕЗ), — может послужить для человечества источником энергии. При некоторых реакциях масса получающихся ядер (плюс масса образующихся в качестве побочного продукта элементарных частиц) меньше массы исходных ядер, участвующих в реакции, а избыток массы преобразуется в энергию в точном соответствии с хорошо известной формулой Эйнштейна $E = mc^2$.

Основным источником энергии звезд служит термоядерный синтез гелия из ядер водорода — протонов (см. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД). Эта реакция происходит в три этапа; на первом из обычного водорода образуется дейтерий (тяжелый изотоп водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона) — происходит это в результате столкновения двух протонов. Попытки воспроизвести управляемый синтез водорода — простейшую из термоядерных реакций — находятся в центре пристального внимания физиков-ядерщиков начиная с середины XX века. Мотивация тут проста: запасы дейтерия в мировом океане практически неограниченны, и он может стать буквально неисчерпаемым источником энергии для человечества на многие века но лишь при условии, что удастся заставить ядра дейтерия вступить между собой в реакцию синтеза.

Попытки поставить ядерный синтез на службу человечеству в качестве источника энергии идут в обход первичного этапа термоядерного синтеза, который происходит в недрах звезд; ученые стремятся искусственно воспроизвести реакцию синтеза дейтерия (дейтерий обозначается символом ^2H) и трития (изотоп водорода с одним протоном и двумя нейтронами в ядре, обозначается ^3H). В результате должен получиться атом гелия, испуститься один нейтрон (n) и выделиться искомая энергия. Формула этой реакции такова:



Для поддержания запасов трития его, в свою очередь, нужно «воспроизводить» путем улавливания тяжелым изотопом лития (Li) нейтронов, излучаемых в процессе реакции:



Основная проблема с получением управляемого термоядерного синтеза трития и дейтерия заключается в том, как разогнать два положительно заряженных ядра до нужной скорости и заставить их сблизиться на необходимое для начала реакции синтеза минимальное расстояние, преодолев силу электростатического отталкивания. На практике это означает, что смесь трития с дейтерием нужно разогреть до температуры в миллионы градусов, а такой температуры не выдержит никакая материальная оболочка (фактически, речь идет об удержании плазмы; см. АГРЕГАТНЫЕ СОСТО-

яния вещества). Но, даже добившись столь высокой температуры (а современные технологии это позволяют), мы не будем иметь гарантию, что в результате реакции термоядерного синтеза будет получено больше энергии, чем затрачено нами на разогрев смеси и запуск реакции.

Критерий Лоусона как раз и определяет минимальную частоту реакций синтеза в секунду, необходимую для устойчивого поддержания реакции в материальной среде. Искусственного синтеза можно добиться либо за счет создания крайне высокой плотности взаимодействующих частиц (и, как следствие, повышения до нужного уровня вероятности их соударения) или за счет более длительного удержания частиц на предельно малом расстоянии друг от друга (давая тем самым частицам больше времени для вступления в реакцию). Получается, что для того, чтобы термоядерный синтез начал производить энергию, должно быть соблюдено условие:

$$Nt > \text{около } 10^{20},$$

где N — концентрация частиц (число частиц в кубометре объема), а t — время (в секундах). Это и есть критерий Лоусона, определяющий условия начала управляемой реакции термоядерного синтеза. Его смысл в том, что по достижении температуры запуска реакции необходим компромисс между концентрацией (или плотностью) частиц и временем их удержания в объеме, обеспечивающем эту плотность. Можно «разжечь» термоядерный синтез при меньшей концентрации частиц за счет более длительного удержания плазмы, а можно — при меньшем времени удержания плазмы за счет повышения плотности частиц в ней.

Соответственно, инженеры-ядерщики пытались добиться управляемого термоядерного синтеза двумя путями, используя два различных подхода к решению проблемы сжатия водорода, его разогрева до состояния плазмы и удержания в процессе реакции термоядерного синтеза. Эти подходы получили название, соответственно, «магнитная ловушка» и «инерциальная ловушка».

При использовании *магнитной ловушки* плазма удерживается сверхмощным магнитным полем. По мере повышения температуры силовые линии магнитного поля уплотняются, и горячая плазма стягивается от стен контейнера к его центру. Как только плотность и время удержания частиц достигнут порога, определяемого критерием Лоусона, запустится реакция термоядерного синтеза. В принципе, магнитные ловушки уже реализованы технически; в частности, условия, необходимые для запуска реакции управляемого термоядерного синтеза, достигнуты на установке «Торус» общеевропейского проекта JET (Joint European Torus) в Калхэме (Великобритания), однако по причине несовершенства и неэффективности оборудования затраты энергии на запуск реакции термоядерного синтеза по-прежнему превышают энергетическую отдачу от полученной реакции. (В отечественной прикладной науке описываемое

устройство принято называть *токамак*: ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками. — Прим. переводчика.)

Смысл *инерциальной ловушки* заключается в том, что капля глубоко охлажденной смеси трития и дейтерия помещается в стеклянную капсулу, а затем со всех сторон обстреливается мощными лазерными лучами. Внешний слой капли моментально испаряется, в результате чего на внутренние слои капли воздействуют сходящиеся ударные волны. Эти ударные волны сжимают и разогревают водород до температуры запуска реакции термоядерного синтеза. В настоящее время лазерная установка для возбуждения инерциальной реакции термоядерного синтеза строится на базе Ливерморской лаборатории (Livermore Laboratory) в Калифорнии. Ее запуск планируется на 2006 год, и каплю водорода там будут облучать 192 лазера с разовым энергетическим импульсом 1,8 мегаджоулей.

ДЖОН ДЭВИД ЛОУСОН (John David Lawson, р. 1923) — английский физик. Родился в Ковентри. В 1943 году окончил Кембриджский университет. До окончания войны занимался прикладными исследованиями в области разработки микроволновых антенн. В 1947 году вошел в число сотрудников Британского научно-исследовательского института атомных исследований, занимался экспериментами

на ускорителе элементарных частиц первого поколения, а в 1957 году опубликовал статью, где впервые сформулировал критерий, который теперь носит его имя. В дальнейшем Лоусон занимался исследованиями прикладных проблем электромагнетизма, связанных с работой микроволновых ламп и ускорителей элементарных частиц, а также лучевыми исследованиями.

Критерий Рэлея

Два точечных источника света различимы в окуляре, если дифракционный максимум одного из них накладывается на дифракционный минимум другого

1807	•	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1818	•	ДИФРАКЦИЯ
1896	•	КРИТЕРИЙ РЭЛЕЯ



Джон Стретт, впоследствии лорд Рэлей. Автопортрет (1870)

Лорд Рэлей — один из ярких представителей поколения британских «ученых-джентльменов» Викторианской эпохи. Будучи всесторонне эрудированным естествоиспытателем, он отметился во многих отраслях науки, прославившись, прежде всего, открытием аргона. В то же время нельзя не отметить и его вклад в развитие различных разделов физики, в частности оптики. Изучая феномен рассеяния света, Рэлей сформулировал весьма важный критерий различимости источников света в оптических приборах, который теперь носит его имя.

Предположим, вы едете ночью по прямому неосвещенному шоссе. Навстречу вам едет другая машина с включенным дальним светом фар. Сначала вы видите вдали размытое световое пятно. Однако по мере ее приближения вы начинаете различать два отдельных источника света. Тут самое время вспомнить, что свет фар встречной машины вы наблюдаете через тонкий оптический прибор, коим является человеческий глаз: свет фар вы воспринимаете благодаря поступлению оптических лучей через линзу хрусталика на сетчатку глазного дна. Вопрос: как близко должна находиться встречная машина, чтобы мы начали воспринимать две фары по отдельности?

Согласно классической теории дифракции, луч света от удаленного источника, попадая в круглый окуляр, формирует изображение, состоящее из ряда светлых и темных концентрических полос вокруг яркой центральной точки, — так называемую *дифракционную картину*. Законы оптики говорят нам, что реальный источник света в нашем восприятии будет размыт, и такое размытие наблюдается в любом оптическом приборе. Если мы наблюдаем два близких источника света, их размытые образы накладываются один на другой. Рэлей как раз и показал, что если центральное световое пятно дифракционной картины одного источника света удалено от центрального светового пятна другого источника света на расстояние не менее радиуса первой темной дифракционной полосы, то мы начинаем воспринимать два источника света раздельно: это расстояние называется *линейным разрешением оптического прибора*. Если два источника света удалены друг от друга на расстояние d , расстояние от них до нас равно D , длина световой волны равна λ , а диаметр окуляра равен A , то, согласно критерию Рэлея, условием оптического разрешения двух источников в окуляре будет:

$$d/D > 1,22\lambda/A.$$

Иными словами, если точечные источники света разнесены на расстояние не меньше d , наблюдатель, находясь на удалении D , сможет различить их в окуляре диаметром A как раздельные, в противном случае они сольются. Отношение d/D представляет собой

угловую меру в радианах (для перевода в градусы нужно умножить ее на 57,3) между направлениями на два источника света. Критерий Рэлея, таким образом, устанавливает границы углового разрешения для любого оптического инструмента, будь то телескоп, фотоаппарат или человеческий глаз. (Коэффициент 1,22 определен математически и требует, чтобы размер окуляра и длина световой волны были измерены в одних и тех же единицах.)

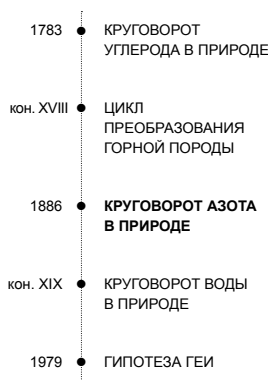
Согласно критерию Рэлея, оптическое разрешение человеческого глаза равняется 25 угловым секундам, а это меньше одной сотой градуса! Но это в идеале. На практике же даже самые зоркие люди способны различать источники света с разрешением от 3 до 5 угловых минут, то есть на порядок хуже. И виновата в этом сетчатка — ее строение не обеспечивает полного использования возможностей хрусталика. Таким образом, возвращаясь к исходному примеру, в идеале две фары на прямом шоссе можно было бы различить как два отдельных источника света с расстояния около 10 км. На практике же человеческий глаз начинает различать их лишь с расстояния около 1 км. Реальный водитель, скорее всего, будет просто ослеплен и постарается сосредоточиться на дороге, в результате чего воспримет свет двух встречных фар отдельно с еще меньшего расстояния.

ДЖОН УИЛЬЯМ СТРЕТТ, БАРОН РЭЛЕЙ (РЕЙЛИ) III (John William Strutt, Third Baron Rayleigh, 1842–1919) — английский физик. Родился в Уитеме, графство Эссекс (Witham, Essex). Титул унаследовал в 1873 году после смерти отца. Долгую и разностороннюю научную карьеру начал в семейном поместье, занявшись всевозможными физическими и химическими экспериментами. Со временем стал профессором Кембриджского университета. Добился успеха в самых разных областях естествознания: фундаментальный теоретический труд Рэлея «Теория

звука» (*Theory of Sound*) до сих пор остается настольной книгой инженеров-акустиков. В 1904 году Рэлей получил Нобелевскую премию за открытие аргона. До этого много лет посвятил проработке теории взаимодействия света с веществом. В частности, Рэлей открыл закономерность, согласно которой степень рассеяния света зависит от длины волны: чем короче длина волны, тем сильнее рассеяние, то есть синий свет рассеивается сильнее красного (этим, в частности, объясняется, почему небо синее; см. ДИСПЕРСИЯ: АТОМНАЯ ТЕОРИЯ).

Круговорот азота в природе

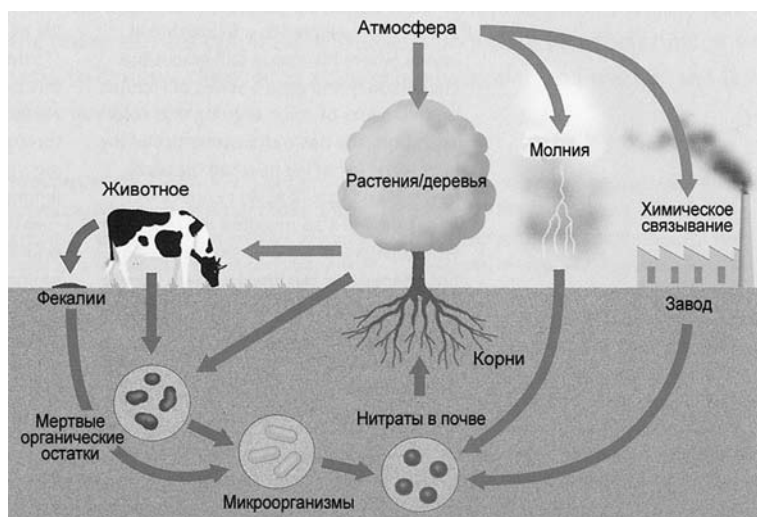
Азот непрерывно циркулирует в земной биосфере под влиянием различных химических и нехимических процессов, причем в последнее время связанный азот попадает в атмосферу в основном благодаря деятельности человека



Азот непрерывно циркулирует в земной биосфере по сети замкнутых взаимосвязанных путей. В настоящее время к природным процессам, в которых участвует азот, добавляется еще и извлечение его из атмосферы в целях производства минеральных удобрений

Азот — одно из самых распространенных веществ в биосфере, узкой оболочке Земли, где поддерживается жизнь. Так, почти 80% воздуха, которым мы дышим, состоит из этого элемента. Основная часть атмосферного азота находится в свободной форме (см. химические связи), при которой два атома азота соединены вместе, образуя молекулу азота N_2 . Из-за того, что связи между двумя атомами очень прочные, живые организмы не способны напрямую использовать молекулярный азот — его сначала необходимо перевести в «связанное» состояние. В процессе связывания молекулы азота расщепляются, давая возможность отдельным атомам азота участвовать в химических реакциях с другими атомами, например с кислородом, и таким образом мешая им вновь объединиться в молекулу азота. Связь между атомами азота и другими атомами достаточно слабая, что позволяет живым организмам усваивать атомы азота. Поэтому связывание азота — чрезвычайно важная часть жизненных процессов на нашей планете.

Круговорот азота представляет собой ряд замкнутых взаимосвязанных путей, по которым азот циркулирует в земной биосфере. Рассмотрим сначала процесс разложения органических веществ в почве. Различные микроорганизмы извлекают азот из разлагающихся материалов и переводят его в молекулы, необходимые им для обмена веществ. При этом оставшийся азот высвобождается в виде аммиака (NH_3) или ионов аммония (NH_4^+). Затем другие микроорганизмы связывают этот азот, переводя его обычно в форму нитратов (NO_3^-). Поступая в растения (и в конечном счете попадая в организмы живых существ), этот азот участвует в образовании биологических молекул. После гибели организма азот возвращается в почву и цикл начинается снова. Во время этого цикла возможны как потери азота — когда он включается в состав отложений или высвобождается в процессе жизнедеятельности некоторых бактерий (так называемых денитрифицирующих бактерий), — так



и компенсация этих потерь за счет извержения вулканов и других видов геологической активности.

Представьте себе, что биосфера состоит из двух сообщающихся резервуаров с азотом — огромного (в нем находится азот, содержащийся в атмосфере и океанах) и совсем маленького (в нем находится азот, содержащийся в живых существах). Между этими резервуарами есть узкий проход, в котором азот тем или иным способом связывается. В нормальных условиях азот из окружающей среды попадает через этот проход в биологические системы и возвращается в окружающую среду после гибели биологических систем.

Приведем несколько цифр. В атмосфере азота содержится примерно 4 квадрильона ($4 \cdot 10^{15}$) тонн, а в океанах — около 20 триллионов ($20 \cdot 10^{12}$) тонн. Незначительная часть этого количества — около 100 миллиардов тонн — ежегодно связывается и включается в состав живых организмов. Из этих 100 миллиардов тонн связанного азота только 4 миллиарда тонн содержится в тканях растений и животных — все остальное накапливается в разлагающих микроорганизмах и в конце концов возвращается в атмосферу.

Главный поставщик связанного азота в природе — бактерии: благодаря им связывается приблизительно от 90 до 140 миллионов тонн азота (точных цифр, к сожалению, нет). Самые известные бактерии, связывающие азот, находятся в клубеньках бобовых растений. На их использовании основан традиционный метод повышения плодородия почвы: на поле сначала выращивают горох или другие бобовые культуры, потом их запахивают в землю, и накопленный в их клубеньках связанный азот переходит в почву. Затем поле засевают другими культурами, которые этот азот уже могут использовать для своего роста.

Некоторое количество азота переводится в связанное состояние во время грозы. Вы удивитесь, но вспышки молний происходят гораздо чаще, чем вы думаете, — порядка ста молний каждую секунду. Пока вы читали этот абзац, во всем мире сверкнуло примерно 500 молний. Электрический разряд нагревает атмосферу вокруг себя, азот соединяется с кислородом (происходит реакция горения) с образованием различных оксидов азота. И хотя это довольно зрелищная форма связывания, она охватывает только 10 миллионов тонн азота в год.

Таким образом, в результате естественных природных процессов связывается от 100 до 150 миллионов тонн азота год. В ходе человеческой деятельности тоже происходит связывание азота и перенос его в биосферу (например, все то же засевание полей бобовыми культурами приводит ежегодно к образованию 40 миллионов тонн связанного азота). Более того, при сгорании ископаемого топлива в электрогенераторах и в двигателях внутреннего сгорания происходит разогрев воздуха, как и в случае с разрядом молнии. Всякий раз, когда вы совершаете поездку на автомобиле, в биосферу поступает дополнительное количество связанного азота.

Примерно 20 миллионов тонн азота в год связывается при сжигании природного топлива.

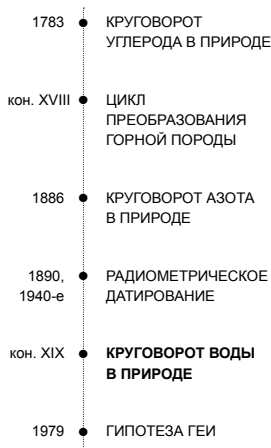
Но больше всего связанного азота человек производит в виде минеральных удобрений. Как это часто бывает с достижениями технического прогресса, технологией связывания азота в промышленных масштабах мы обязаны военным. В Германии перед Первой мировой войной был разработан способ получения аммиака (одна из форм связанного азота) для нужд военной промышленности. Недостаток азота часто сдерживает рост растений, и фермеры для повышения урожайности покупают искусственно связанный азот в виде минеральных удобрений. Сейчас для сельского хозяйства каждый год производится чуть больше 80 миллионов тонн связанного азота (заметим, что он употребляется не только для выращивания пищевых культур — пригородные лужайки и сады удобряют им же).

Суммировав весь вклад человека в круговорот азота, получаем цифру порядка 140 миллионов тонн в год. Примерно столько же азота связывается в природе естественным образом. Таким образом, за сравнительно короткий период времени человечество стало иметь преобладающее влияние на круговорот азота в природе. Каковы будут последствия? Каждая экосистема способна усвоить определенное количество азота, и последствия этого в целом благоприятны — растения станут расти быстрее. Однако при насыщении экосистемы азот начнет вымываться в реки. *Эвтрофикация* (загрязнение водоемов водорослями) озер — пожалуй, самая неприятная экологическая проблема, связанная с азотом. Азот удобряет озерные водоросли, и они разрастаются, вытесняя все другие формы жизни в этом озере, поскольку, когда водоросли погибают, на их разложение расходуется почти весь растворенный в воде кислород.

Тем не менее приходится признать, что видоизменение круговорота азота — еще далеко не худшая проблема из тех, с которыми столкнулось человечество. В связи с этим можно привести слова Питера Витошека, эколога из Стэнфордского университета, изучающего растения: «Мы движемся к зеленому и заросшему сорняками миру, но это не катастрофа. Очень важно уметь отличить катастрофу от деградации».

Круговорот воды в природе

Вода непрерывно циркулирует на земном шаре, при этом ее общее количество остается неизменным



Вода циркулирует в земной биосфере, испаряясь с поверхности Мирового океана, превращаясь в облака, выпадающая в виде осадков на землю и опять возвращаясь в Мировой океан

Земля образовалась более четырех миллиардов лет назад. И любая первичная атмосфера, которая могла бы появиться в то время, была бы уничтожена потоками энергетических частиц от новорожденного Солнца. Ранняя Земля представляла собой горячий голый шар в космосе. В течение долгого времени, благодаря извержениям вулканов и другим геотермальным процессам, газы (в том числе и водяной пар) из недр Земли поступали в образующуюся атмосферу. С тех пор общее количество воды на поверхности планеты практически не изменилось. Однако в отдельно взятый момент воду можно обнаружить в различных местах в разных агрегатных состояниях. Процесс циклического перемещения воды в земной биосфере называется круговоротом воды в природе.

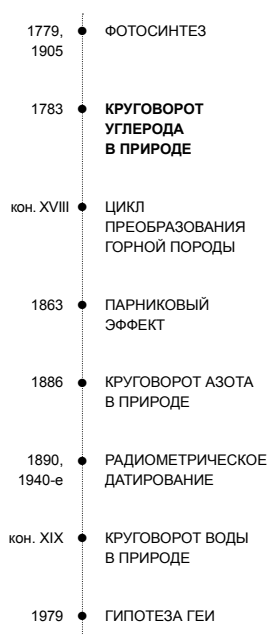
Представьте, что теплым летним днем вы лежите на морском берегу. Под действием солнечного тепла вода испаряется с поверхности океана, водяной пар поднимается в атмосферу, где из него образуются облака. В конце концов вода вернется на поверхность в виде осадков (дождя, снега или града) и начнется ее долгий путь обратно в море или озеро. Вода может течь по поверхности в руслах рек или просачиваться в подземные стоки. Оттуда воду могут добыть люди для собственных нужд. Если осадки в виде снега выпадают вблизи полюсов или в высоких горах, вода может оказаться в составе ледника или многолетнего (пакового) льда и оставаться в таком виде до начала таяния льдов. Но в конце концов судьба этой воды будет все та же: она попадет обратно в море, где, дождавшись солнечного тепла, вновь поднимется в атмосферу и начнется новый цикл.

Из того факта, что общее количество воды на Земле более или менее постоянно, следуют интересные выводы. Во время последнего ледникового периода большие водные запасы сконцентрировались в горах, в ледниковых шапках, спустившихся с полюсов, поэтому уровень воды в океанах был намного ниже, чем в настоящее время. Если бы мы жили 18 тысяч лет назад, мы могли бы прогуляться по суше от Англии до Европы или от Азии до Аляски, а западное побережье Англии тогда располагалось на 150 км западнее, чем сейчас.



Круговорот углерода в природе

Углерод непрерывно циркулирует в биосфере Земли под влиянием химических и прочих процессов



Вся земная жизнь основана на углероде. Каждая молекула живого организма построена на основе углеродного скелета. Атомы углерода постоянно мигрируют из одной части биосферы (узкой оболочки Земли, где существует жизнь) в другую. На примере круговорота углерода в природе можно проследить в динамике картину жизни на нашей планете.

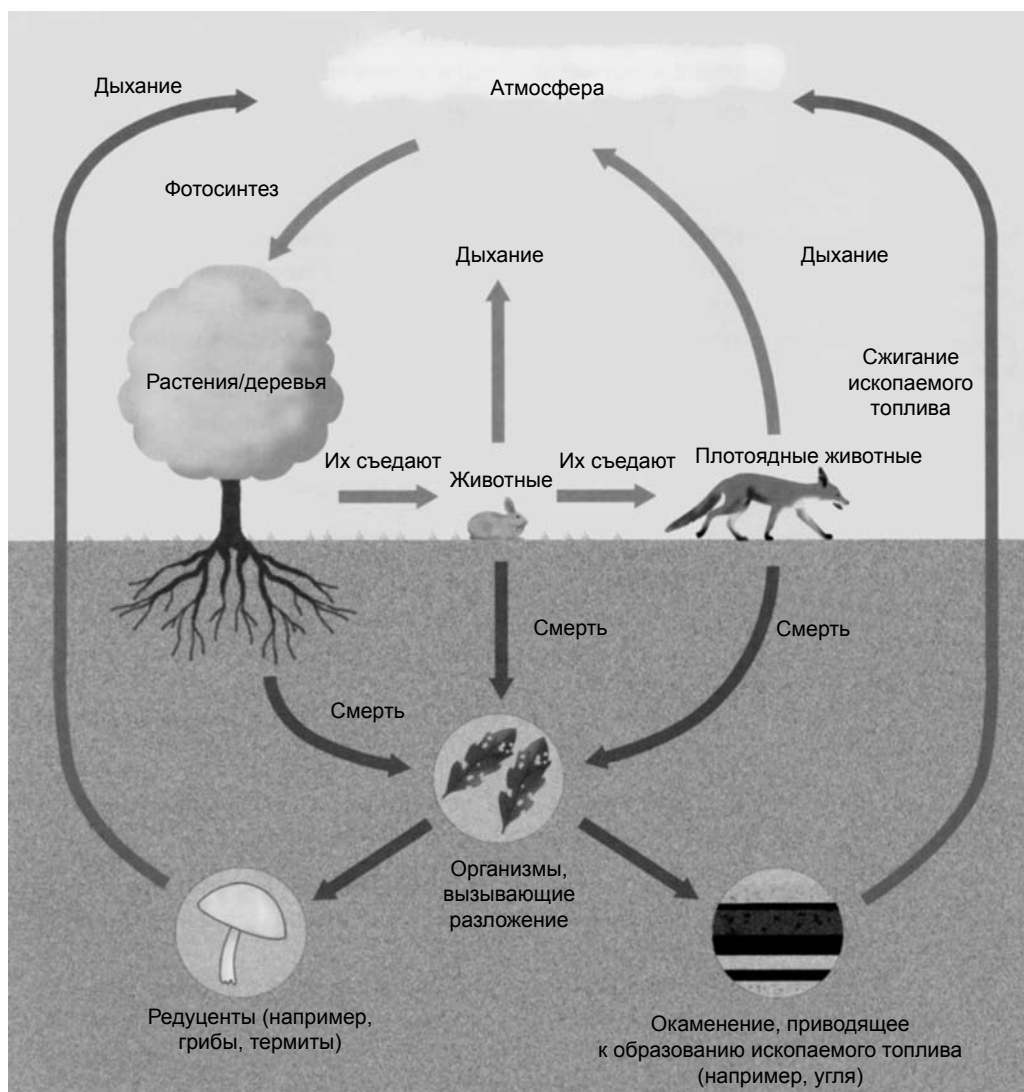
Основные запасы углерода на Земле находятся в виде содержащегося в атмосфере и растворенного в Мировом океане диоксида углерода, то есть углекислого газа (CO_2). Рассмотрим сначала молекулы углекислого газа, находящиеся в атмосфере. Растения поглощают эти молекулы, затем в процессе фотосинтеза атом углерода превращается в разнообразные органические соединения и таким образом включается в структуру растений. Далее возможно несколько вариантов:

- углерод может оставаться в растениях, пока растения не погибнут. Тогда их молекулы пойдут в пищу *редуцентам* (организмам, которые питаются мертвым органическим веществом и при этом разрушают его до простых неорганических соединений), таким как грибы и термиты. В конце концов углерод вернется в атмосферу в качестве CO_2 ;
- растения могут быть съедены травоядными животными. В этом случае углерод либо вернется в атмосферу (в процессе дыхания животных и при их разложении после смерти), либо травоядные животные будут съедены плотоядными (и тогда углерод опять же вернется в атмосферу теми же путями);
- растения могут погибнуть и оказаться под землей. Тогда в конечном итоге они превратятся в ископаемое топливо, например, в уголь.

В случае же растворения исходной молекулы CO_2 в морской воде также возможно несколько вариантов:

- углекислый газ может просто вернуться в атмосферу (этот вид взаимного газообмена между Мировым океаном и атмосферой происходит постоянно);
- углерод может войти в ткани морских растений или животных. Тогда он будет постепенно накапливаться в виде отложений на дне Мирового океана и в конце концов превратится в известняк (см. ЦИКЛ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ) или из отложений вновь перейдет в морскую воду.

Если углерод вошел в состав осадочных отложений или ископаемого топлива, он изымается из атмосферы. На протяжении существования Земли изъятый таким образом углерод замещался углекислым газом, попадавшим в атмосферу при вулканических извержениях и других геотермальных процессах. В современных условиях к этим природным факторам добавляются также выбросы



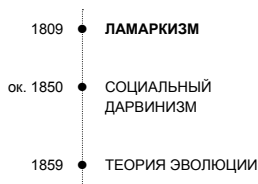
Углерод постоянно циркулирует в земной биосфере по замкнутым взаимосвязанным путям. В настоящее время к природным процессам добавляются последствия сжигания ископаемого топлива

при сжигании человеком ископаемого топлива. В связи с влиянием CO_2 на парниковый эффект исследование круговорота углерода стало важной задачей для ученых, занимающихся изучением атмосферы.

Составной частью этих поисков является установление количества CO_2 , находящегося в тканях растений (например, в только что посаженном лесу) — ученые называют это *стоком углерода*. Поскольку правительства разных стран пытаются достичь международного соглашения по ограничению выбросов CO_2 , вопрос сбалансированного соотношения стоков и выбросов углерода в отдельных государствах стал главным яблоком раздора для промышленных стран. Однако ученые сомневаются, что накопление углекислого газа в атмосфере можно остановить одними лесопосадками.

Ламаркизм

*Эволюция
происходит путем
наследования
приобретенных
признаков*



Еще до появления разработанной Чарлзом Дарвином теории эволюции путем естественного отбора многие ученые пытались объяснить разнообразие форм жизни на нашей планете. Самый выдающийся из них — Жан-Батист Ламарк. Как и другие ученые XVIII века, он заметил, что чем старше пласты горных пород, тем более простые формы жизни они содержат, поэтому история живых существ отражает развитие от простых организмов к более сложным (см. закон последовательности напластования горных пород).

На основании этого Ламарк сделал вывод, что в природе имеет место эволюция (он употреблял термин «продвижение»). Он предположил, что эволюция происходит под влиянием двух факторов. Первый из них (и именно с ним ассоциируется имя Ламарка) связан с наследованием *приобретенных признаков*. По мнению Ламарка, если в течение жизни у какого-нибудь организма развились особые способности, его потомство унаследует эти способности. К примеру, дети тяжелоатлетов должны были быть более мускулистыми, дети интеллигентов — более умными и так далее. В качестве иллюстрации своей теории Ламарк часто приводил в пример жирафа, шея которого удлинялась в течение многих поколений из-за того, что животные тянули ее, чтобы достать вкусные молодые листочки с верхних веток деревьев. Второй менее известный фактор по Ламарку — существование универсальной созидательной движущей силы, изначального стремления к совершенствованию, под воздействием которого происходит постепенное усложнение всех форм жизни.

Конечно, сегодня известно, что наследственность зависит от генов, закодированных в молекуле ДНК, и что эволюция происходит в результате естественного отбора этих генов. Если жизнь стала сложнее, то это произошло только из-за того, что сложные организмы успешнее используют окружающую среду и система воспроизводства у них продуктивнее. И нет никакого мистического «стремления к совершенствованию».

ЖАН-БАТИСТ ПЬЕР-АНТУАН ДЕ МОНЕ, ШЕВАЛЬЕ ДЕ ЛАМАРК (Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck, 1744–1829) — французский естествоиспытатель. Родился в Базантене (Пикардия) и был одиннадцатым ребенком в семье наполовину обедневших дворян. Пошел добровольцем в армию и служил во время Семилетней войны в разных французских военных учреждениях в районе Средиземного моря. Во время поездок заинтересовался растениями, и эти исследования принесли ему первое признание фран-

цузского научного сообщества. После увольнения из армии некоторое время работал в банке, был трижды женат, но оставался бедным. Интересы Ламарка были очень разнообразны: ботаника (до Французской революции он был смотрителем Королевского ботанического сада), беспозвоночные животные (именно он впервые ввел этот термин), химия, метеорология, геология и палеонтология, что в конце концов и привело его к созданию первой целостной теории эволюции, изложенной в книге *Философия зоологии* (1809).

Магнетизм

Благодаря различию свойств на уровне атомно-молекулярного строения все вещества по своим магнитным свойствам подразделяются на три класса — ферромагнетики, парамагнетики или диамагнетики

1600	●	МАГНЕТИЗМ
1820	●	ЗАКОН АМПЕРА
1895	●	ЗАКОН КЮРИ
1895	●	ТОЧКА КЮРИ
1931	●	МАГНИТНЫЕ МОНОПОЛИ

Согласно закону АМПЕРА, электрический ток производит магнитное поле. Электрон, вращающийся вокруг атома, можно рассматривать как циклический электрический ток очень малой силы и радиуса. Однако магнитное поле он, и это не удивительно, все равно индуцирует. Фактически же, все электроны, вращаясь вокруг атомов, производят свое магнитное поле, и каждый атом, как следствие, обладает собственным магнитным полем, которое представляет собой суммарное поле, или *суперпозицию* магнитных полей отдельных электронов.

Теперь мы подходим к главному. В некоторых атомах равное число электронов вращается во всевозможных направлениях, и их магнитные поля взаимно гасятся. Однако в атомах некоторых элементов орбиты электронов могут быть ориентированы таким образом, что часть электронов производит магнитные поля, остающиеся некомпенсированными за счет полей электронов, обращающихся в противоположном направлении. И когда такие магнитные поля, связанные с вращением электронов по орбите, к тому же оказываются одинаково направленными у всех атомов кристаллической структуры вещества, он в целом создает вокруг себя стабильное и достаточно сильное магнитное поле. Любой фрагмент такого вещества представляет собой маленький магнит с четко выраженными северным и южным полюсами.

Именно совокупное поведение таких мини-магнитов атомов кристаллической решетки и определяет *магнитные свойства вещества*. По своим магнитным свойствам вещества делятся на три основных класса: *ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики*. Имеется также два обособленных подкласса материалов, выделенных из общего класса ферромагнетиков — *антиферромагнетики* и *ферримагнетики*. В обоих случаях эти вещества относятся к классу ферромагнетиков, но обладают особыми свойствами при низких температурах: магнитные поля соседних атомов выстраиваются строго параллельно, но в противоположных направлениях. Антиферромагнетики состоят из атомов одного элемента и, как следствие, их магнитное поле становится равным нулю. Ферримагнетики представляют собой сплав двух и более веществ, и результатом суперпозиции противоположно направленных полей становится макроскопическое магнитное поле, присущее материалу в целом.

Ферромагнетики

Некоторые вещества и сплавы (прежде всего, следует отметить железо, никель и кобальт) при температуре ниже точки Кюри приобретают свойство выстраивать свою кристаллическую решетку таким образом, что магнитные поля атомов оказываются одина направленными и усиливают друг друга, благодаря чему возникает макроскопическое магнитное поле за пределами материала. Из таких материалов получаются *постоянные магниты*. На самом

деле магнитное выравнивание атомов обычно не распространяется на неограниченный объем ферромагнитного материала: *намагничивание* ограничивается объемом, содержащим от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч атомов, и такой объем вещества принято называть *доменом* (от английского *domain* — «область»). При остывании железа ниже точки Кюри формируется множество доменов, в каждом из которых магнитное поле ориентировано по-своему. Поэтому в обычном состоянии твердое железо не намагничено, хотя внутри него образованы домены, каждый из которых представляет собой готовый мини-магнит. Однако под воздействием внешних условий (например, при застывании выплавленного железа в присутствии мощного магнитного поля) домены выстраиваются упорядоченно и их магнитные поля взаимно усиливаются. Тогда мы получаем настоящий магнит — тело, обладающее ярко выраженным внешним магнитным полем. Именно так устроены *постоянные магниты*.

Парамагнетики

В большинстве материалов внутренние силы выравнивания магнитной ориентации атомов отсутствуют, домены не образуются, и магнитные поля отдельных атомов направлены случайным образом. Из-за этого поля отдельных атомов-магнитов взаимно гасятся, и внешнего магнитного поля у таких материалов нет. Однако при помещении такого материала в сильное внешнее поле (например, между полюсами мощного магнита) магнитные поля атомов ориентируются в направлении, совпадающем с направлением внешнего магнитного поля, и мы наблюдаем эффект *усиления* магнитного поля в присутствии такого материала. Материалы, обладающие подобными свойствами, называются парамагнетиками. Стоит, однако убрать внешнее магнитное поле, как парамагнетик тут же *размагничивается*, поскольку атомы снова выстраиваются хаотично. То есть парамагнетики характеризуются способностью к *временному намагничиванию*.

Диамагнетики

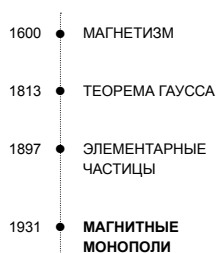
В веществах, атомы которых не обладают собственным магнитным моментом (то есть в таких, где магнитные поля гасятся еще в зародыше — на уровне электронов), может возникнуть магнетизм иной природы. Согласно второму закону электромагнитной индукции Фарадея, при увеличении потока магнитного поля, проходящего через токопроводящий контур, изменение электрического тока в контуре противодействует увеличению магнитного потока. Вследствие этого, если вещество, не обладающее собственными магнитными свойствами, ввести в сильное магнитное поле, электроны на атомных орбитах, представляющие собой микроскопические контуры с током, изменят характер своего

движения таким образом, чтобы воспрепятствовать увеличению магнитного потока, то есть создадут собственное магнитное поле, направленное в противоположную по сравнению с внешним полем сторону. Такие материалы принято называть диамагнетиками.

В отношении магнитных свойств вещества важно усвоить, что они зависят от конфигурации электронных орбит атомов. Даже после разбиения на отдельные атомы железо, например, сохранит свои ферромагнитные свойства. А вот при дальнейшем дроблении вы получите лишь элементарные частицы, которые собственными магнитными свойствами не обладают, и описать природу магнетизма будет уже нельзя. Итак, магнитные свойства вещества зависят исключительно от конфигурации элементарных частиц в составе атома и организации кристаллических доменов, но никак не от свойства заряженных частиц атомной структуры.

Магнитные монополи

В природе до сих пор не найдено изолированных магнитных зарядов. Поток магнитного поля, проходящий через замкнутую поверхность, равен нулю



У любого магнита есть два полюса — северный (отрицательный) и южный (положительный). Однако, если разрезать магнит пополам, вы не получите отдельно южный и отдельно северный полюс: вы получите два магнита половинного размера, и у каждого снова окажется два полюса, ориентированные так же, как и у исходного магнита. И сколько бы вы ни повторяли процесс такого деления магнитов, вы просто будете получать все больше и больше двухполюсных магнетиков или, выражаясь научным языком, *магнитных диполей*. Как бы вы ни изощрялись, однополярного магнита — положительного или отрицательного магнитного заряда, или *монополя*, — вы не получите. Иными словами, в природе магнитных монополей не существует.

Этот факт сразу же подчеркивает удивительную асимметрию между магнетизмом и электричеством. Согласно закону Био — Савара, магнитные поля возбуждаются при движении электрических зарядов, а первый из законов электромагнитной индукции Фарадея показывает, что движение магнитов возбуждает электрические токи. Однако носители электрических зарядов выделить можно — например, электроны несут отрицательный единичный заряд, а протоны — положительный. С магнитами же, судя по всему, дело обстоит иначе.

Ученые уже давно ведут теоретические дискуссии о том, существуют ли магнитные монополи, и пытаются обнаружить их экспериментально, однако до сих пор тщетно. Во многом эти усилия обусловлены критерием красоты теории. Для физиков-теоретиков Вселенная без магнитного монополя подобна прекрасной картине с зияющей дырой в холсте. В ранней Вселенной должно было сформироваться великое множество магнитных монополей, однако при последующем стремительном расширении они оказались размазанными очень тонким слоем по холсту мироздания. Возможно, во всей видимой части Вселенной существуют считанные единицы магнитных монополей, хотя, рискну предположить, что их все-таки несколько больше, и рано или поздно они объявятся.

Если монополи будут открыты, придется пересмотреть формулировки некоторых законов, описывающих явления магнетизма, в частности теорему Гаусса для магнитного поля. Представьте себе изолированный в пространстве магнитный монополь, окруженный замкнутой поверхностью произвольной конфигурации. В каждой точке поверхности будет наблюдаться магнитное поле, производимое монополем. Согласно закону Гаусса, суммарный магнитный поток, проходящий через такую замкнутую поверхность, должен равняться нулю, а в случае присутствия внутри нее магнитного монополя он будет, очевидно, отличен от нуля. То есть закон Гаусса не допускает существования магнитных монополей.

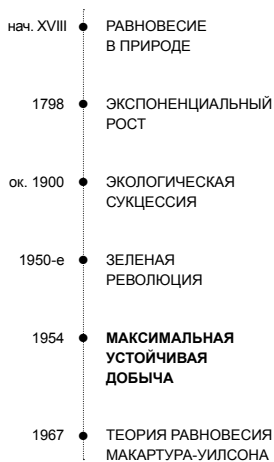
Закон Гаусса, собственно, и исходит из того, что магнитные поля производятся диполями, их силовые линии замыкаются и, как

следствие, проходят сквозь окружающую поверхность дважды — в ту и другую сторону. Поэтому суммарное поле и обнуляется. В случае же монополя, каковым, в частности, является электрический заряд, силовые линии не замыкаются сами на себя, и закон Гаусса не выполняется.

То есть, если допустить существование магнитного монополя, суммарный поток магнитного поля через поверхность *не будет* равен нулю, а будет пропорционален магнитному заряду и будут выполняться два закона Гаусса для электрического поля.

Максимальная устойчивая добыча

Существует максимальное число особей, которых можно удалить из данной популяции, не ставя ее под угрозу исчезновения



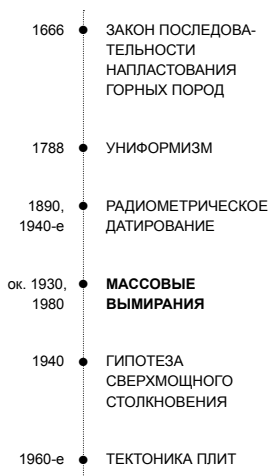
Численность популяции живых существ, например рыб или дичи, не постоянна — она меняется в зависимости от условий внешней среды и плотности этой популяции. Стандартный метод представления этих изменений — так называемая *кривая роста популяции* — график, показывающий, как меняется чистый прирост популяции (число рождений минус число смертей) с изменением плотности популяции. При низкой плотности происходит небольшое увеличение численности («прирост») популяции, просто потому, что слишком мало особей, приносящих потомство. Однако при высокой плотности возникает острая конкуренция за ресурсы, и чистый прирост вновь снижается, поскольку высока смертность. Между этими двумя крайними значениями скорость роста популяции повышается до некоторого максимального значения, а затем с увеличением плотности падает.

Точка максимума на кривой роста популяции соответствует максимальному числу особей, которые могут добавиться к популяции в результате естественных процессов. Если из популяции удаляется большее число особей, популяция пойдет на убыль, и вид будет обречен на вымирание. Максимальное число особей, которое можно удалить из популяции без ущерба для нее, устанавливается как точка максимума на кривой роста популяции. Это число и называется максимальной устойчивой добычей (или *оптимальной добычей*). Оно имеет чрезвычайно важное значение в деле охраны и регулирования ресурсов дикой природы — например, это число используется для установки максимальных квот на добычу промысловой рыбы по всему миру, а также квот на отстрел дичи в сезон охоты.

Однако концепцию максимальной устойчивой добычи не всегда легко применить на практике. Во-первых, биологи не всегда имеют достаточно данных, чтобы точно определить кривую роста популяции. Во-вторых, предположение, что кривая роста популяции имеет только один максимум, может оказаться неверным, и это может серьезно запутать дело. Чтобы учесть эти моменты при установлении планов добычи, биологи обычно вводят поправочные коэффициенты запаса.

Массовые вымирания

*Несколько событий
в истории нашей
планеты вызвали
вымирание
значительной части
живших в то время
видов*



Долгое время палеонтологи пытались понять, почему же вымерли динозавры. Все-таки динозавры господствовали более 100 миллионов лет. Они были самой процветающим классом животных на нашей планете. А потом за какое-то время — может, за несколько тысяч лет, а может, за пару дней — они исчезли. Так что же случилось?

Предлагалось множество объяснений — от фантастических (динозавров истребили охотившиеся на них маленькие зеленые человечки на летающих тарелках) до весьма правдоподобных (изменение климата разрушило их экологическую нишу). Больше всего мне нравится объяснение, связывающее вымирание динозавров с появлением цветковых растений, произошедшим, как считается, 65 миллионов лет назад — как раз тогда, когда исчезли динозавры. Смысл в том, что до этого динозавры питались главным образом сосновыми иголками и подобной им пищей, насыщенной натуральными маслами, а когда им пришлось переключиться на траву, все они умерли от запора!

На самом деле палеонтологи редко фокусируют внимание на одном лишь вымирании динозавров — ведь 65 миллионов лет назад, когда динозавры были повержены в прах, вместе с ними исчезло 70% всех видов на Земле. Это событие, чем бы оно ни было вызвано, ученые называют массовым вымиранием. Мы знаем о многих таких событиях, и массовое вымирание, которое постигло динозавров, не было ни самым масштабным, ни самым последним из них. В зависимости от того, какое исчезновение видов называть «массовым», за последние 500 миллионов лет было от пяти до двенадцати массовых вымираний. Самое крупное произошло примерно 280 миллионов лет назад, а самое последнее — примерно 13 миллионов лет назад. Хотя некоторые ученые считают, что причина у всех массовых вымираний была одна и та же, объяснения сводятся в основном к изменению земного климата.

В 1980 году команда ученых из Калифорнийского университета в Беркли, состоящая из отца и сына, натолкнулась на факт, который привел к созданию лучшей на данный момент теории вымирания динозавров. Нобелевский лауреат Луис Альварес и его сын Уолтер провели тщательный анализ осадочных отложений, образование которых относится к тому же периоду, что и вымирание динозавров. В отложениях они обнаружили аномально высокую концентрацию химического элемента иридия — тяжелого металла, похожего на платину. Иридий крайне редко встречается на поверхности Земли, поскольку она в своем развитии уже давно прошла фазу расплавленного состояния, когда тяжелые металлы опускались ближе к центру Земли. Однако иридий в гораздо больших количествах содержится в некоторых типах астероидов. Итак, гипотеза, которую иногда называют *гипотезой Альвареса*, состояла в том, что иридий появился в осадочных отложениях в результате удара о Землю астероида диаметром около 11 км. Главным оружием убийства было облако пыли, которое несколько лет окуты-

вало Землю, не пропуская солнечные лучи и губя таким образом все живое на планете.

Вначале ученые отнеслись к этому заявлению весьма скептически, даже враждебно. Но через несколько лет стали появляться свидетельства в его пользу. Например, геологи при изучении отложений, образовавшихся во время гипотетического удара, обнаружили так называемый ударный кварц — минерал, который мог сформироваться только при высоких температуре и давлении, вызванных ударом астероида. Понемногу мнения специалистов стали склоняться к гипотезе Альвареса. Позже, в 1992 году, была найдена первое доказательство — кратер диаметром более 170 км на полуострове Юкатан в Мексике, большей частью похороненный под донными океанскими отложениями. Кратер Чиксулуб (он был назван по имени близлежащей рыбацкой деревушки) — один из самых крупных земных кратеров, и причиной его образования сегодня принято считать астероидный удар, который и положил конец эпохе динозавров. Недавние открытия, показавшие присутствие изотопов, характерных для астероидов, также и в ряде других отложений, говорят о том, что массовое вымирание, произошедшее 280 миллионов лет назад, могло быть вызвано аналогичными причинами.

Споры об астероидном ударе ученые теперь перенесли на другие массовые вымирания: были ли они также вызваны столкновением с каким-то небесным телом или же у них были иные причины — например, многочисленные извержения вулкана или внезапное изменение уровня моря? Сегодня ученые-эволюционисты пытаются ответить уже на эти вопросы.

ЛУИС УОЛТЕР АЛЬВАРЕС (Luis Walter Alvarez, 1911–88) — американский физик. Родился в Сан-Франциско, получил образование в Чикагском университете. В годы Второй мировой войны принимал участие в разработке радиолокационных систем захода на посадку, работал в Лос-Аламосе над проектом создания атомной бомбы. В Калифорнийском универ-

ситете в Беркли усовершенствовал пузырьковую камеру — устройство для регистрации взаимодействий частиц высокой энергии, за что получил Нобелевскую премию по физике 1968 года. Гипотеза Альвареса появилась в результате исследований, которые он провел в 1980 году вместе со своим сыном — геологом Уолтером Альваресом (Walter Alvarez, р. 1940).

Механическая теория теплоты

Теплота представляет собой форму энергии, связанную с хаотичным движением атомов или молекул вещества

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1827	• БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Теплота — вещь мистическая. Можно взять в руку кусок дерева, и от него руке не будет, по большому счету, ни тепло, ни холодно. Однако стоит бросить его в огонь — и оно, загоревшись, будет выделять теплоту в большом количестве. Откуда же берется теплота? Издревле люди считали, что теплота представляет собой особую жидкость под названием флогистон, или теплород, заключенную в дереве и других горючих субстанциях и высвобождающуюся при горении. К концу XVIII века, однако, накопилось достаточно экспериментальных данных, чтобы убедиться в ошибочности такой теории.

Одним из первых современные представления о природе теплоты предложил Бенджамин Томпсон (граф Румфорд). Он всегда отличался техническим складом ума и всю свою жизнь интересовался наукой применительно к баллистике и оружейному делу, которым посвятил свою жизнь. Уже живя в Баварии, он был техническим управляющим пушечного завода. Грубо отлитые стволы обрабатывались изнутри сверлильной фрезой для доведения до нужного калибра и придания им должной гладкости. Румфорд заметил, что при расточке стволы нагреваются, причем тем сильнее, чем тупее фреза. Измерив теплоемкость металлической стружки, ему удалось показать, что тепло никак не могло храниться до расточки в веществе ствола, а следовательно, теплота возникает в результате трения. Рассказывают, что он даже помещал рассверливаемую пушку в воду и сверлил ее, пока вода не закипела спустя несколько часов.

Сегодня мы понимаем теплоту (точнее сказать, тепловую или термальную энергию) как особую форму энергии, связанную с движением атомов или молекул, из которых состоит материал. При притоке энергии извне атомы или молекулы разогреваются — т. е. начинают колебаться или двигаться быстрее, при остывании же движение замедляется. В жидкостях и газах увеличивается скорость хаотического броуновского движения и частота соударений атомов или молекул друг с другом. В твердых же телах атомы с большей амплитудой колеблются вокруг своих мест в кристаллической решетке. В обоих случаях, однако, то, что мы воспринимаем как теплоту или термальную энергию, на самом деле является кинетической энергией атомов или молекул. Как и все другие формы энергии, подчиняющиеся первому началу термодинамики, тепловая энергия может переходить в другие формы энергии, и это используется, например, в двигателях внутреннего сгорания и электрогенераторах.

БЕНДЖАМИН ТОМПСОН (граф фон Румфорд) (Benjamin Thompson (Count Rumford), 1753–1814) — американский, а затем немецкий администратор и ученый. Родился в Вобурне, штат Массачусетс. Во время Войны за независимость США выступил на стороне Великобритании, куда и вынужден был бежать, бросив семью, в 1775 году после поражения колониальной армии и выдвигения против него обвинений в шпионаже. Позже переехал в Мюнхен (Бавария), где занимал высокие государственные посты. В 1790 году Томп-

сону за заслуги был пожалован титул графа, причем титульным графством было названо графство (округ) Румфорд (Rumford County, в настоящее время переименовано в Concord County) в штате Нью-Гемпшир, где он жил с первой женой до эмиграции из США. Вернувшись в Лондон, в 1800 году основал там знаменитый Королевский институт. В 1804 году переехал в Париж, женившись на вдове Антуана Лавуазье (см. флогистон). Брак не сложился; известна фраза фон Румфорда: «Лавуазье повезло, что он умер на гильотине».

Микробная теория инфекционных заболеваний

Инфекционные заболевания вызываются микроорганизмами, которые попадают в организм человека извне

- 1877 • **МИКРОБНАЯ ТЕОРИЯ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**
- 1928 • ОТКРЫТИЕ ПЕНИЦИЛЛИНА
- 1947 • УСТОЙЧИВОСТЬ МИКРОБОВ К АНТИБИОТИКАМ
- сер. 1960-х • ИММУННАЯ СИСТЕМА

Луи Пастер в своей лаборатории. Хотя аналогичные идеи возникали и у других ученых, именно благодаря экспериментам Пастера было установлено, что причина болезней — микроорганизмы, а его имя увековечено в термине «пастеризация»

В середине XIX века среди медиков разгорелся спор о происхождении инфекционных заболеваний. Представители одного лагеря защищали старую точку зрения, что причина заболевания — нарушение равновесия в организме, возможно, обостренное внешними воздействиями. Им противостояла группа ученых, отстаивавших революционное представление, согласно которому инфекционные заболевания возникают в результате внедрения в тело микроорганизмов.

Новое течение возглавлял французский ученый Луи Пастер. В своих исследованиях он шел не таким путем, как все. В 1854 году он был профессором химии в Лилле, где деятельность университета была направлена в основном на помощь местной промышленности. Пастер изучал процесс брожения, который, безусловно, очень важен для получения вина. Он пришел к заключению, что брожение вызвано микробами, которые питаются сахаром, содержащимся в виноградном соке, и производят в качестве побочного продукта своей жизнедеятельности спирт. Пастеру стало ясно, что брожение — это биохимический процесс, а не просто химический, как считали многие, и этот процесс невозможен без микроорганизмов, а именно дрожжей.

Пастер также обнаружил, что нагревание способствует более длительному хранению вина. Оно убивает микробов, которые в противном случае запустили бы дальнейшие реакции, приводящие к порче вина. Этот принцип лег в основу *пастеризации*, до сих пор применяющейся в молочной промышленности большинства стран мира для предохранения молока от скисания.

Подобно многим своим современникам, Пастер предчувствовал, что между процессом брожения и болезнетворным процессом в организме человека должно быть нечто общее. В конце XIX века представление о том что, заболевание, подобно брожению, вызывается микроорганизмами, уже имело немало сторонников, и количество доказательств в пользу этой точки зрения все возрастало. Пастер смог показать, что болезнь, нанеся огромный ущерб шелковичным червям во Франции, имела бактериальное происхождение. В 1860-е годы английский хирург Джозеф Листер (Joseph Lister, 1827–1912), разделявший представ-



ления Пастера, с их помощью продемонстрировал преимущества антисептической хирургии, а немецкий бактериолог Роберт Кох (Robert Koch, 1843–1910) добился успеха в обосновании бактериального происхождения сибирской язвы — болезни крупных животных (которой иногда болеет и человек). Пастер показал, что сибирская язва может передаваться даже с сильно разбавленной кровью, но не передается с кровью, пропущенной через фильтр (процесс фильтрования приводит к удалению бактерий). Вскоре он обнаружил, что микробы вызывают и ряд других заболеваний, включая родильную лихорадку (послеродовой сепсис), которая в то время была основной причиной смертности среди женщин. Пастер даже навлек на себя гнев медиков, установив, что врачи сами распространяют это заболевание, переходя от одной роженницы к другой.

Впоследствии Пастер, изучая холеру домашней птицы, обнаружил (почти случайно), что после длительного выдерживания вирулентность микроорганизмов снижается. Такие ослабленные микроорганизмы стали использоваться в качестве вакцины. Затем последовало создание вакцины против сибирской язвы, а также против бешенства — эта вакцина принесла Пастеру известность. Еще до смерти Пастера в 1895 году микробная теория инфекционных заболеваний была признана в научных и медицинских кругах.

ЛУИ ПАСТЕР (Louis Pasteur, 1822–95) — французский химик и микробиолог, родился в небольшой деревне в семье кожевника. Изучал химию в парижской Высшей нормальной школе и в 1847 году получил докторскую степень. Первые научные работы Пастера посвящены оптическим свойствам материалов. В 1854 году, после непродолжительной работы в университетах Дижона и Страсбурга, Пастер получил должность профессора химии в Лилльском университете, где занимался исследованием брожения. В 1867 году переехал в Сорбонну, где занимал должность

профессора химии, а с 1888 года и до конца жизни возглавлял Институт Пастера в Париже. Наиболее важное достижение Пастера в области химии — это открытие оптических изомеров: химических соединений-двойников, имеющих одинаковую формулу, но вращающих плоскость поляризованного света в противоположных направлениях. Микробиологические работы и эксперименты в области брожения и гниения внесли огромный вклад в борьбу с болезнями: Пастер первый сделал овцам прививку против сибирской язвы, а человеку против бешенства.

Мимикрия

В процессе эволюции одни организмы начинают подражать другим — либо чтобы отпугнуть возможных хищников, сигнализируя об опасности, либо чтобы приобрести сходство с теми видами, которых принято избегать

1852, 1878 • МИМИКРИЯ

1873 • ПРИНЦИП МУТУАЛИЗМА

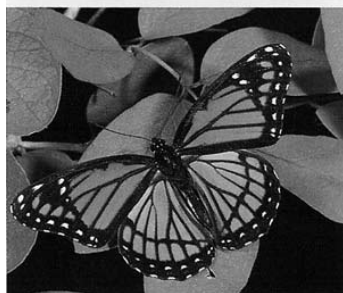
1877 • СИМБИОЗ

Окраска бабочки ленточника (внизу) сходна с окраской бабочки монарха (вверху). Ленточник не содержит токсина, присутствующего в организме монарха, и такая мимикрия помогает ему защититься от разборчивых хищников

В соответствии с теорией эволюции, живые организмы стремятся развивать те признаки и особенности, которые повышают их приспособленность, то есть способность передавать свои гены следующему поколению. Некоторые виды в результате такой эволюции приобрели поразительное внешнее сходство с другими видами — это явление называют мимикрией.

У многих видов в процессе их развития сформировалась система заблаговременного предупреждения, предостерегающая потенциальных противников, — вспомните белые полосы скунса или бросающуюся в глаза полосатость жалящих насекомых, вроде ос или пчел. Причина формирования таких сигналов ясна. Противник, столкнувшийся со скунсом или осой со всеми вытекающими последствиями, в будущем, вероятно, будет избегать встречи с представителями этого вида. Следовательно, представители этого вида, несущие гены этих отличительных признаков, будут выживать в течение более длительного времени и оставят больше потомства — классический пример естественного отбора в действии. Однако для того, чтобы система предупреждения была действенной, столкновения между потенциальными агрессорами и представителями вида должны происходить достаточно часто. Вот эту способность воспроизводить знаки, предупреждающие об опасности, и стараются развить в себе другие виды, выживающие за счет мимикрии.

Впервые одну из форм мимикрии описал в 1852 году Генри Бейтс. Самый наглядный пример так называемой *бейтсовской мимикрии* можно наблюдать у бабочек. Гусеницы бабочки монарха накапливают гликозид — токсичное химическое вещество, образующееся у них как побочный продукт метаболизма, и это вещество передается взрослой бабочке. Из-за этого бабочка неприятна на вкус (и даже ядовита) для птиц — главных охотников на бабочек. Поэтому, однажды попробовав бабочку монарха, птицы в дальнейшем уже не посягают на них. Несколько вполне приятных на вкус и безвредных бабочек использовали в своих целях дурную славу химического оружия, которое бабочка монарх применяет для защиты от хищников. Например, бабочка ленточник имеет такую же черно-оранжевую окраску, как и бабочка монарх, и их легко перепутать. Поэтому хищники не трогают бабочку ленточника, а значит, с точки зрения теории Дарвина она тоже «более приспособлена».



Другую форму мимикрии впервые описал в 1878 году немецкий натуралист Фриц Мюллер (Fritz Müller, 1822–97). Наилучшей иллюстрацией *мюллеровской мимикрии*, как ее теперь называют, являются жалящие насекомые, такие, как осы и пчелы. На теле этих насекомых имеется хорошо заметный полосатый рисунок. Идея заключается в том, при расширении «кольца» насекомых с отличительной окраской потенциальные агрессоры с большей вероятностью пройдут описанный выше процесс обучения. Например, птица, ужаленная осой одного вида, будет избегать ос и других видов. Согласно принципу мюллеровской мимикрии, каждый вид с подражательной окраской или формой может оставить о себе неприятные воспоминания — острую боль в случае пчел и ос.

При бейтсовской мимикрии между имитатором и моделью существует неустойчивое равновесие. Например, если в определенной местности популяция ленточника будет чрезмерно многочисленной, птице, вероятно, попадется одна из вкусных бабочек ленточников раньше, чем она увидит бабочку монарха. В этом случае защита монарха (и подражание ленточника) резко упадет в цене. (Применительно к паре монарх—ленточник такое равновесие было нарушено в январе 2002 года, когда из-за сильного шторма в Мексике, где зимует бабочка монарх, погибло почти четверть миллиарда этих бабочек.) Следовательно, бейтсовская мимикрия эффективна лишь в том случае, когда имитатор значительно уступает модели в численности. Как это часто бывает в жизни, хорошего понемножку.

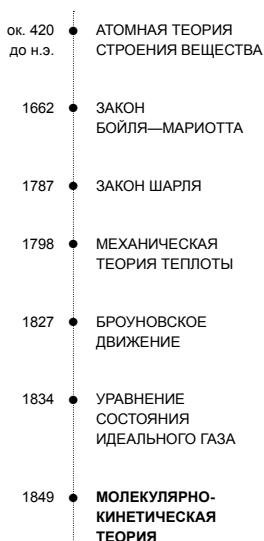
Итак, основное различие между двумя формами мимикрии заключается в следующем: осы действительно жалят, поэтому в основе мюллеровской мимикрии лежит реальность, тогда как бейтсовская мимикрия не более чем блеф, и хищников, игнорирующих отпугивающую окраску, не ожидают никакие неприятности.

ГЕНРИ УОЛТЕР БЕЙТС (Henry Walter Bates, 1825–92) — английский натуралист и исследователь. Родился в Лестере в семье фабриканта. Бейтс прожил необычную жизнь. В 13 лет ему пришлось завершить школьное образование: его отдали учиться на местную трикотажную фабрику. Бейтс был страстным энтомологом, и в возрасте 18 лет опубликовал свою первую статью о жуках. Позднее он путешествовал в бассейне

Амазонки, собирая насекомых для английских коллекционеров, и открыл 8000 новых видов. По настоятельной просьбе Чарлза Дарвина Бейтс опубликовал несколько книг о своих путешествиях и изученных им насекомых. Со временем он занял должность помощника секретаря в Королевском географическом обществе в Лондоне, и его заслуги как выдающегося ученого были признаны всеми его коллегами.

Молекулярно-кинетическая теория

Термодинамические свойства газа зависят от средней скорости движения атомов или молекул, из которых он состоит



Атомы или молекулы, из которых состоит газ, свободно движутся на значительном удалении друг от друга и взаимодействуют только при соударениях друг с другом (далее, чтобы не повторяться, я буду упоминать только «молекулы», подразумевая под этим «молекулы или атомы»). Поэтому молекула движется прямолинейно лишь в промежутках между соударениями, меняя направление движения после каждого такого взаимодействия с другой молекулой. Средняя длина прямолинейного отрезка движения молекулы газа называется *усредненным свободным путем*. Чем выше плотность газа (и, следовательно, меньше среднее расстояние между молекулами), тем короче средний свободный путь между столкновениями.

Во второй половине XIX века столь простая внешне картина атомно-молекулярной структуры газов усилиями ряда физиков-теоретиков развилась в мощную и достаточно универсальную теорию. В основу новой теории легла идея о связи измеримых *макроскопических* показателей состояния газа (температуры, давления и объема) с *микроскопическими* характеристиками — числом, массой и скоростью движения молекул. Поскольку молекулы постоянно находятся в движении и, как следствие, обладают кинетической энергией, эта теория и получила название *молекулярно-кинетической теории* газов.

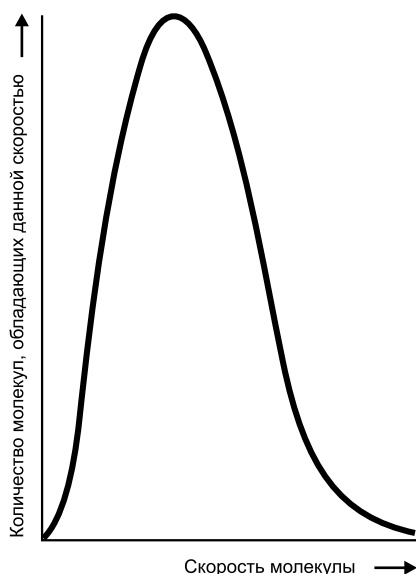
Возьмем, к примеру, давление. В любой момент времени молекулы ударяются о стенки сосуда и при каждом ударе передают им определенный импульс силы, который сам по себе крайне мал, однако суммарное воздействие миллионов молекул приводит к значительному силовому воздействию на стенки, которое и воспринимается нами как давление. Например, накачивая автомобильное колесо, вы перегоняете молекулы атмосферного воздуха внутрь замкнутого объема шины дополнительно к числу молекул, уже находящихся внутри нее; в результате концентрация молекул внутри шины оказывается выше, чем снаружи, они чаще ударяются о стенки, давление внутри шины оказывается выше атмосферного, и шина становится накачанной и упругой.

Смысл теории состоит в том, что по среднему свободному пути молекул мы можем рассчитать частоту их столкновений со стенками сосуда. То есть, располагая информацией о скорости движения молекул, можно рассчитать характеристики газа, поддающиеся непосредственному измерению. Иными словами, молекулярно-кинетическая теория дает нам прямую связь между миром молекул и атомов и осязаемым макромиром.

То же самое касается и понимания температуры в рамках этой теории. Чем выше температура, тем больше средняя скорость молекул газа. Эта взаимосвязь описывается следующим уравнением:

$$\frac{1}{2}mv^2 = kT,$$

где m — масса одной молекулы газа, v — средняя скорость теплового движения молекул, T — температура газа (в Кельвинах),



Максвелл показал, что молекулы в газе имеют различные скорости: одни движутся быстрее, а другие медленнее средней скорости

молекул, обладающих определенной скоростью v или энергией E , не меняется. Происходит это потому, что со статистической точки зрения вероятность того, что молекула с энергией E изменит свою энергию и перейдет в близкое энергетическое состояние, равна вероятности того, что другая молекула, наоборот, перейдет в состояние с энергией E . Таким образом, хотя каждая отдельно взятая молекула обладает энергией E лишь эпизодически, среднее число молекул с энергией E остается неизменным. (Аналогичную ситуацию мы наблюдаем в человеческом обществе. Никто не остается семнадцатилетним дольше одного года — и слава богу! — однако в среднем процент семнадцатилетних в стабильном человеческом сообществе остается практически неизменным.)

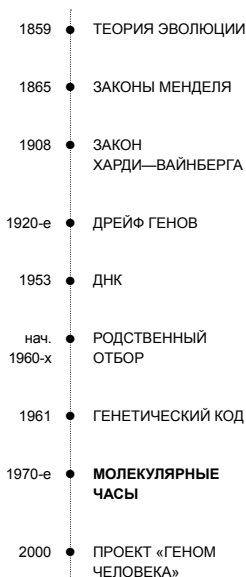
Эта идея усредненного распределения молекул по скоростям и ее строгая формулировка принадлежит Джеймсу Кларку Максвеллу. Этому же выдающемуся теоретику принадлежит и строгое описание электромагнитных полей (см. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА). Именно он вывел распределение молекул по скоростям при заданной температуре (см. рисунок). Больше всего молекул пребывают в энергетическом состоянии, соответствующем пику *распределения Максвелла* и средней скорости, однако фактически скорости молекул варьируются в достаточно больших пределах.

а k — постоянная Больцмана. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории определяет прямую связь между молекулярными характеристиками газа (слева) и измеримыми макроскопическими характеристиками (справа). Температура газа прямо пропорциональна квадрату средней скорости движения молекул.

Молекулярно-кинетическая теория также дает достаточно определенный ответ на вопрос об отклонениях скоростей отдельных молекул от среднего значения. Каждое столкновение между молекулами газа приводит к перераспределению энергии между ними: слишком быстрые молекулы замедляются, слишком медленные — ускоряются, что и приводит к усреднению. В любой момент в газе происходят несчетные миллионы таких столкновений. Тем не менее выяснилось, что при заданной температуре газа, находящегося в стабильном состоянии, среднее число

Молекулярные часы

Чем больше времени отделяет два вида от той эпохи, когда жил их общий предок, тем больше различаются ДНК этих видов



Согласно центральной догме молекулярной биологии, химическая индивидуальность каждого живого организма определяется последовательностью пар оснований в ДНК этого организма. Теория эволюции утверждает, что виды развиваются в течение времени, и параллельно этому развитию изменяются их ДНК. К изменению ДНК могут привести различные события. Например, медленное накопление мутаций, массовые ошибки при копировании или проникновение последовательности вирусных нуклеиновых кислот. Но одно можно утверждать смело — чем больше прошло времени с тех пор, как жил общий предок двух видов, тем длиннее период, в течение которого происходили эти изменения, и, следовательно, тем сильнее отличаются последовательности ДНК этих двух видов.

Следует отметить несколько моментов, касающихся этого утверждения. Во-первых, подсчитав различия между последовательностями ДНК, мы можем построить генеалогическое древо всех живых организмов. Например, у человека и шимпанзе совпадают 98% ДНК. Это означает, что наш общий предок жил совсем недавно. В то же время у человека и лягушек совпадающая часть ДНК значительно меньше, следовательно наша ветвь отделилась от ветви, занимаемой земноводными, значительно раньше. Теория эволюции предсказывает, что построенное таким образом генеалогическое древо должно быть сходно с древом, построенным в прошлом веке на основании изучения окаменелостей. По моему мнению, совпадение двух генеалогических древ является одним из самых убедительных доказательств эволюции. Оно также показывает, что теория эволюции может быть подвергнута проверке (как уже говорилось во введении, это одно из важнейших требований любой научной теории), поскольку *могло* оказаться, что люди генетически более близки к лягушкам, чем к шимпанзе.

Метод молекулярных часов использует данные ДНК более фундаментально. Если изменения ДНК происходят с некоторой средней скоростью — если молекулярные часы тикают равномерно — то, подсчитывая количество различающихся пар оснований в последовательностях двух видов, мы можем получить представление о времени жизни их последнего общего предка. Если частота изменений ДНК постоянна, анализ современной ДНК может рассказать нам о шкалах времени на разных этапах развития генеалогического древа.

В 1980-е годы, когда впервые была предложена концепция молекулярных часов, от исследователей ожидали услышать, что изменения во всех ДНК происходят с одинаковой скоростью — что все часы тикают с одним и тем же интервалом. Однако оказалось, что существует много разных молекулярных часов, и все они идут с разной скоростью. Например, пары оснований в последовательности важного гена не могут сильно измениться без ущерба для организма в целом, поэтому часы, показывающие время для пар оснований в таких генах, идут относительно медленно. С другой

стороны, большинство сегментов ДНК не влияют на химические процессы в организме, поэтому для этих сегментов часы могут идти быстрее.

Пожалуй, больше всего привлекает в методе молекулярных часов перспектива его применения к недавней эволюции человека. Чтобы лучше все это понять, вам нужно знать, что внутри каждой клетки высокоразвитых организмов имеются крохотные органеллы — *митохондрии*. В них сгорает топливо клетки, то есть осуществляется важнейшая функция обмена веществ. Считается, что митохондрии впервые проникли в более сложно организованные клетки миллионы лет назад в процессе симбиоза. Две клетки, эволюционировавшие независимо друг от друга, обнаружили, что им пойдет на пользу партнерские отношения, при которых одна клетка будет жить внутри другой. Тот факт, что в митохондриях содержится собственная небольшая петлевидная ДНК (в митохондриальной ДНК человека 26 генов), говорит о том, что это событие произошло очень давно.

В сперматозоидах нет митохондрий, поэтому вся митохондриальная ДНК в вашем организме получена вами из яйцеклетки матери. Другими словами, митохондриальная ДНК передается по материнской линии. Установлено, что молекулярные часы митохондриальной ДНК тикают почти в 10 раз быстрее, чем часы ДНК, содержащейся в клеточном ядре. Поэтому для анализа и была выбрана митохондриальная ДНК — ведь за определенный промежуток времени в ней произойдет значительно больше изменений, чем в ядерной ДНК.

Митохондриальная ДНК впервые привлекла к себе всеобщее внимание после того, как в 1987 году группа американских исследователей получила митохондриальные ДНК от 147 представителей различных рас из разных уголков мира и установила количество мутаций, их различающих. По результатам первого анализа складывалось впечатление, что все современные люди ведут свою родословную от одной и той же женщины, которая жила в Африке около 200 000 лет назад. Эту женщину немедленно нарекли Евой (или, для большей наукообразности, Митохондриальной Евой) и даже поместили ее на обложку крупного общественно-политического журнала.

К сожалению, этот сногшибательный результат не выдержал испытания более полным анализом, и ученые больше не вспоминают Еву (она пала жертвой критического анализа ДНК, сделанного компьютерной программой). Согласно последним научным веяниям, данные ДНК указывают на то, что все современные люди произошли от довольно небольшой популяции — около 5–10 тысяч человек — жившей в Африке 100–200 тысяч лет назад.

Нулевая гипотеза

Проводя статистическое исследование, необходимо учитывать, что никакой закономерности может и не быть

Проводя научный эксперимент, мы анализируем полученную информацию, чтобы иметь возможность выбирать между *гипотезами*. К примеру, если вы полагаете, что природа должна вести себя в данной ситуации таким-то образом, и проводите эксперимент, чтобы это доказать или опровергнуть, вы ведь хотите иметь возможность заявить, что экспериментальные данные подтверждают вашу гипотезу, а не чью-либо еще. Иными словами, мы ожидаем, что данные докажут ту, а не иную зависимость результатов эксперимента от переменных. В большинстве случаев не существует единственного «чистого» эксперимента, так что нам приходится многократно повторять измерения, чтобы получить гарантию достоверности результата. Поэтому мы часто нуждаемся в статистическом анализе полученной информации. Часто оказывается, что результат зависит от множества факторов. В этом случае нам необходимо отделить главные из них от второстепенных — зерно от шелухи.

Например, когда ученый хочет найти связь между курением и раком легких, ему не достаточно найти одного курильщика, получившего (или не получившего) рак легких. Должен быть собран и проанализирован значительный объем данных, прежде чем этот ученый сможет утверждать, что между курением и раком легких *существует* зависимость. В исследованиях такого рода нулевая гипотеза играет ключевую роль. Нулевая гипотеза — это, по сути, предположение, что результата — конечной цели любого исследования — не существует. И как бы далеко ни зашли ваши поиски взаимосвязи между курением и раком легких, нулевая гипотеза будет утверждать, что никакой такой взаимосвязи не существует. Встает вопрос, в какой момент собранных данных станет достаточно, чтобы отвергнуть это утверждение.

Если говорить о курении и раке легких, то нулевая гипотеза была исключена уже давно: ни один уважающий себя ученый не прибегнет к ней сейчас. Но было время, когда просто-напросто не хватало данных, чтобы ее исключить; и исследователи не могли доказать, что заболеваемость раком легких среди курящих и некурящих людей не была лишь делом случая. Только имея большой массив данных и тем самым сводя возможность случайного результата к минимуму, можно исключить нулевую гипотезу.

В нашем примере приходилось накапливать большое количество данных — ученые скажут «большую *выборку*», — чтобы исключить нулевую гипотезу. Но может быть и по-другому. Например, Тихо Браге, чья многолетняя работа привела к созданию *законов КЕПЛЕРА* о планетарном движении, просто проводил наиболее точные измерения, которых оказалось достаточно, чтобы отвергнуть нулевую гипотезу и убедиться в верности результата.

Итак, когда вы в следующий раз будете читать работу, в которой утверждается о наличии корреляции между заболеванием и его предполагаемой причиной, спросите себя, действительно ли исследователи рассмотрели достаточное количество случаев, прежде чем исключить нулевую гипотезу.

Объяснение Бора

Главное, чтобы работало, а веришь ты в это или нет — не важно

Нильс Бор — один из пионеров физики XX столетия, основатель копенгагенской школы квантовой механики — среди прочих почестей в 1922 году был удостоен Нобелевской премии по физике. Помимо выдающихся научных достижений он стал буквально отцом и наставником для целого поколения европейских и американских физиков-теоретиков и пользовался глубочайшим уважением даже со стороны ученых, принципиально расходившихся с ним во взглядах.

Рассказывают, что Бор часто приглашал своих учеников и коллег в гости к себе на дачу, расположенную на одном из многочисленных прибрежных датских островков. Однажды молодой физик, переживавший этап воинствующего рационализма в своем мировоззрении, что в юности свойственно многим, заметил над входной дверью дачного домика прибитую гвоздем лошадиную подкову.

— Но вы же, профессор Бор, — возмутился он, — не верите во всю эту чушь, будто бы подкова приносит удачу?!

— Конечно, не верю, — улыбнулся в ответ Бор. — Главное, что работает, а веришь ты в это или нет — не суть важно.

НИЛЬС ХЕНРИК ДАВИД БОР (Niels Hendrik David Bohr, 1885–1962) — выдающийся датский физик-теоретик, один из основателей квантовой механики. Бор родился в Копенгагене в семье известного профессора-физиолога и быстро проявил многообещающую способность к наукам. Его диссертация на степень магистра, которую он защитил в Копенгагенском университете, посвященная изучению поверхностного натяжения жидкостей, до сих пор считается эталоном в гидродинамике. За эту работу он получил Золотую медаль Академии наук Дании и снискал себе репутацию восходящей звезды датской науки. Вслед за тем Бор переключился на теоретическую физику (которой и посвятил всю свою оставшуюся жизнь) и включился в осмысление проблем, не дававших покоя физикам в начале XX века, прежде всего, проблем, связанных с миром атома. Темой для докторской диссертации ученый выбрал поведение электронов в металлах.

После защиты докторской диссертации Бор в 1911 году отправился в Англию — как бы мы сказали сегодня, в порядке научного обмена — и приступил к работе в лаборатории Дж. Дж. Томсона, первооткрывателя электрона. Проработал он там недолго (Томсон, судя по всему, утратил интерес к изучению атомной структуры) и вскоре переехал в Манчестер, где присоединился к группе,

которую возглавлял Эрнест Резерфорд, только что экспериментально подтвердивший существование атомного ядра (см. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА). Там всего за несколько месяцев 1912 года, датчанину удалось создать модель атома БОРА, которая лежит в основе современного понимания субатомного мира.

Хотя физики первоначально относились скептически к революционной идее Бора (а в некоторых консервативных университетах Германии она даже вызвала возмущение), новая модель атома очень скоро завоевала признание физиков-экспериментаторов, поскольку разрешала многие трудности с объяснением наблюдаемых атомных спектров (см. СПЕКТРОСКОПИЯ). Бору были предложены должности сначала доцента в Манчестере, а затем профессора в Копенгагене. Через три года после возвращения ученого в родной город датское правительство субсидировало строительство лаборатории для него. Так возник знаменитый Институт теоретической физики, ставший главным центром разработки квантовой механики в последующие десятилетия. Все крупные теоретики квантовой механики работали там вместе с Бором, а так называемая «копенгагенская интерпретация» послужила основой для всего развития квантово-механической теории в последующие полвека с лишним.



Нильс Бор, один из основоположников современных представлений о субатомном мире, разработчик первой квантовой механической модели строения атома

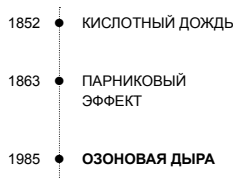
За свою работу в 1922 году Бор был удостоен Нобелевской премии по физике. Относительно короткий разрыв по времени между выдвижением теории и присуждением премии — верное свидетельство фундаментальной значимости работы Бора. Не будучи любителем почивать на лаврах, в 1930-е годы Нильс Бор увлек свой институт в новую область ядерной физики и вместе с коллегами занялся теоретическим моделированием процессов ядерного распада урана и разработкой ядерного реактора и атомной

бомбы. Вскоре после начала Второй мировой войны ученый нелегально эмигрировал из оккупированной нацистами Дании в США, где участвовал в Манхэттенском проекте по разработке ядерного оружия.

После войны ученый выдвинул идею «открытого мира», считая, что без этого человечество не сможет справиться с ядерной угрозой. Его сын Оге Нильс Бор (Aage Niels Bohr) (р. 1922) также был удостоен Нобелевской премии по физике (1975) — за работу по исследованию структуры атомного ядра.

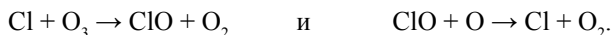
Озоновая дыра

Когда в южном полушарии весна, озоновый слой над Южным полюсом истончается



Прежде всего следует уяснить: озоновая дыра, вопреки своему названию, — это не брешь в атмосфере. Молекула озона отличается от обычной молекулы кислорода тем, что состоит не из двух, а из трех атомов кислорода, соединенных друг с другом. В атмосфере озон сконцентрирован в так называемом *озоновом слое*, на высоте примерно 30 км в пределах стратосферы. В этом слое происходит поглощение ультрафиолетовых лучей, испускаемых Солнцем, — иначе солнечная радиация могла бы нанести большой вред жизни на поверхности Земли. Поэтому любая угроза озоновому слою заслуживает самого серьезного отношения. В 1985 году британские ученые, работавшие на Южном полюсе, обнаружили, что во время антарктической весны уровень озона в атмосфере там значительно ниже нормы. Ежегодно в одно и то же время количество озона уменьшалось — иногда в большей степени, иногда в меньшей. Подобные, но не столь ярко выраженные озоновые дыры появлялись также над Северным полюсом во время арктической весны.

В последующие годы ученые выяснили, отчего появляется озоновая дыра. Когда солнце прячется и начинается долгая полярная ночь, происходит резкое падение температуры, и образуются высокие стратосферные облака, содержащие кристаллики льда. Появление этих кристалликов вызывает серию сложных химических реакций, приводящих к накоплению молекулярного хлора (молекула хлора состоит из двух соединенных атомов хлора). Когда появляется солнце и начинается антарктическая весна, под действием ультрафиолетовых лучей происходит разрыв внутримолекулярных связей, и в атмосферу устремляется поток атомов хлора. Эти атомы выступают в роли катализаторов реакций превращения озона в простой кислород, протекающих по следующей двойной схеме:

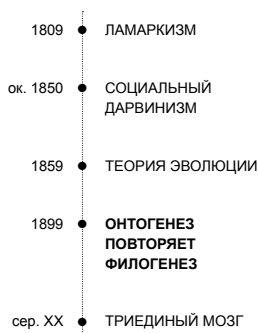


В результате этих реакций молекулы озона (O_3) превращаются в молекулы кислорода (O_2), причем исходные атомы хлора остаются в свободном состоянии и снова участвуют в этом процессе (каждая молекула хлора разрушает миллион молекул озона до того, как они удалятся из атмосферы под действием других химических реакций). Вследствие этой цепочки превращений озон начинает исчезать из атмосферы над Антарктидой, образуя озоновую дыру. Однако вскоре с потеплением антарктические вихри разрушаются, свежий воздух (содержащий новый озон) устремляется в этот район, и дыра исчезает.

В 1987 году в Монреале состоялась Международная конференция, посвященная угрозе озоновому слою, и промышленно развитые страны договорились о сокращении, а в конечном итоге и о прекращении производства *хлорированных и фторированных углеводородов* (*хлорфторуглеродов, ХФУ*) — химических веществ, разрушающих озоновый слой. К 1992 году замена этих веществ на безопасные проходила так успешно, что было принято решение о полном их уничтожении к 1996 году. Сегодня ученые верят, что лет через пятьдесят озоновый слой восстановится полностью.

Онтогенез повторяет филогенез

Зародыш в своем развитии проходит весь путь эволюции своего вида



В XIX веке ученые, изучавшие *внутриутробное* развитие человеческого эмбриона, заметили, что в первые месяцы жизни он обладает поразительным сходством с другими позвоночными. Например, в месячном возрасте у человеческого эмбриона в области шеи заметны щели, во всех отношениях похожие на зачаточные жабры. Позднее зародыш имеет сходство с земноводными, затем с птицами и наконец с другими млекопитающими. Это сходство привело к появлению приведенного выше изречения, сделанного немецким натуралистом Эрнстом Геккелем (Ernst Haeckel, 1834–1919) в его книге *«Решето вселенной»*, опубликованной в 1899 году. Имеется в виду, что *онтогенез* живого существа (развитие индивида) повторяет путь *филогенеза* (развития *типа, класса или вида* — см. СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ЛИННЕЯ). Так, человеческий эмбрион сначала похож на эмбрион рыбы, затем рептилии и так далее до тех пор, пока не проявится его принадлежность к роду людей. Такова одна из этих идей — ясных, красивых, разумных и в корне неверных.

На самом деле у человеческого зародыша никогда не бывает жабр или каких-либо других придатков, которые ему следовало бы в соответствии с этой концепцией иметь на той или иной стадии развития. Появляющиеся жабероподобные щели называются *второй жаберной дугой*. У рыб эти образования действительно развиваются в жабры, но у человека они служат предшественниками частей головы и шеи. Точно так же, как ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ предполагает не то, что человек произошел от приматов, а то, что он имеет с ними общего предка. Так и эмбриология утверждает не то, что человеческий зародыш в своем развитии проходит все ступени эволюции, а просто то, что в нем развиваются другие органы из тех же зародышевых клеток. (Идея о том, что «онтогенез повторяет филогенез», чем-то напоминает столь же неверную теорию ТРИЕДИННОГО МОЗГА.)

Удивительно, но несмотря на то, что эта идея, которая удостоилась даже статуса *закона биогенетики*, была опровергнута почти сразу после того, как была выдвинута, она тем не менее смогла просуществовать до наших дней (ее даже можно найти еще в некоторых учебниках!). Между онтогенезом и филогенезом действительно есть связь, но нет эмбриологического повторения. К очевидным вещам иногда полезно относиться скептически!

Опыт Дэвиссона—Джермера

Электрон может проявлять свойства не только частицы, но и волны

1924	•	СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1927	•	ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	•	ОПЫТ ДЭВИССОНА— ДЖЕРМЕРА

Согласно принципу дополнительности частицы в рамках квантовой механики могут проявлять волновые свойства, а волны — корпускулярные. Электрон, например, традиционно представляли себе в виде отрицательно заряженного миниатюрного шарика, однако в 1924 году Луи де Бройль (см. СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ) показал, что любую частицу, обладающую импульсом p можно представить в виде волны, длина которой (λ) равна:

$$\lambda = h/p,$$

где h — постоянная планка.

Естественно, ученые сразу же стали проверять эту гипотезу, и самым естественным методом проверки оказались попытки обнаружить волновую дифракцию электронов. Однако успехом эти попытки увенчались лишь в 1927 году благодаря классическим опытам, поставленным американцами Клинтон Дэйвиссоном и Лестером Джермером и независимо от них англичанином Джорджем Томсоном.

Американские экспериментаторы в качестве источника свободных электронов использовали раскаленную нить, помещенную в вакуумную камеру. Полученный направленный пучок быстрых электронов они рассеивали на кристалле. В итоге им удалось обнаружить интерференционные пики интенсивности рассеянных электронов, первый из которых приходился на угол рассеяния около 65° .

То есть фактически они воспроизвели эксперимент по рассеянию рентгеновских лучей (приведший к открытию их дифракции на кристаллах и выводу закона БРЭГГА), используя вместо рентгеновского луча сфокусированный поток электронов. По сути, каждый атом кристалла, согласно принципу ГЮЙГЕНСА, является источником вторичных волн и они взаимно усиливаются в результате ИНТЕРФЕРЕНЦИИ между ними при рассеянии под определенными углами, когда фазы интерферирующих вторичных волн совпадают. И Дэвиссону с Джермером удалось найти такой угол максимума числа рассеянных электронов. Рассчитав по этому углу и импульсу электронов длину волны, ученые выяснили, что она в точности совпадает с длиной волны, предсказываемой СООТНОШЕНИЕМ ДЕ БРОЙЛЯ. Так была доказана гипотеза о наличии у элементарных частиц волновых свойств.

Поработав на протяжении своей долгой жизни в целом ряде университетов и промышленных лабораторий, Клинтон Дэвиссон завершил свою карьеру в Университете штата Вирджиния. Когда я там работал преподавателем, мне выделили его бывший кабинет. На видном месте на стене была вывешена пожелтевшая таблица ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА 1954 года издания, когда-то принадлежавшая этому выдающемуся ученому. Когда я переходил на мое нынешнее место работы, я также не стал снимать ее со стены, посчитав ее культурно-историческим достоянием. Хочется надеяться, что она все еще там!

КЛИНТОН ДЖОЗЕФ ДЭВИССОН

(Clinton Joseph Davisson, 1881–1958) — американский физик. Родился в г. Блумингтон, штат Иллинойс. Окончил Чикагский университет, докторскую степень получил в 1911 году в Принстоне. Работал в Кавендишской лаборатории в Англии ассистентом Дж. Дж. Томсона (первооткрывателя электрона), в 1917 году перешел в лабораторию компании Western Electric (ныне Lucent Technologies) в Нью-Йорке, где первое время исследовал излучение элект-

ронов металлами, и проработал там до 1946 года. Совместно с Лестером Халбертом Джермером (Lester Halbert Germer, 1896–1971) сделал открытие волновых свойств электрона при рассеянии пучка электронов на монокристалле. За свою работу разделил Нобелевскую премию по физике за 1937 год с Джорджем Томсоном (George Thomson, 1892–1975), сыном Дж. Дж. Томсона, который независимо от американских ученых в том же 1927 году экспериментально открыл дифракцию электронов в Англии.

Опыт Майкельсона—Морли

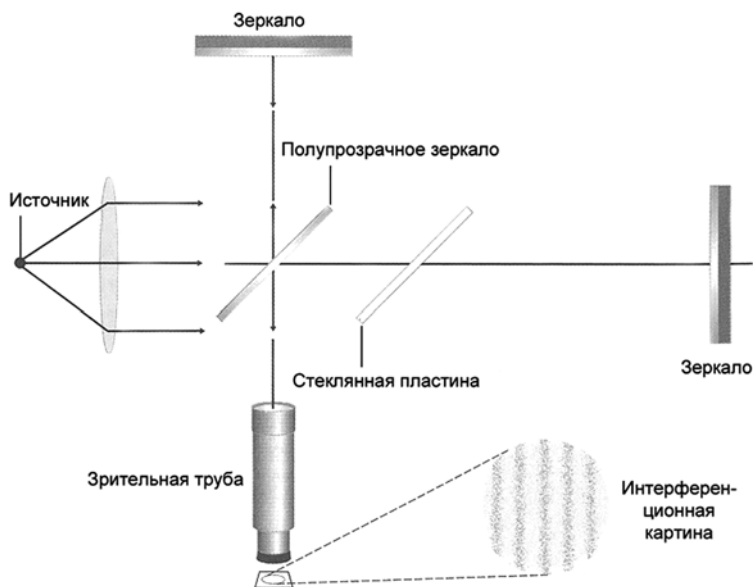
Чтобы распространяться в пространстве, свет не нуждается в «светоносном эфире»

1807	•	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1887	•	ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА—МОРЛИ
1905, 1916	•	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Трудно представить себе абсолютную пустоту — полный вакуум, не содержащий чего бы то ни было. Человеческое сознание стремится заполнить его хоть чем-то материальным, и на протяжении долгих веков человеческой истории считалось, что мировое пространство заполнено эфиром. Идея состояла в том, что межзвездное пространство заполнено какой-то невидимой и неосязаемой тонкой субстанцией. Когда была получена система уравнений МАКСВЕЛЛА, предсказывающая, что свет распространяется в пространстве с конечной скоростью, даже сам автор этой теории полагал, что электромагнитные волны распространяются в среде, подобно тому, как акустические волны распространяются в воздухе, а морские — в воде. В первой половине XIX столетия ученые даже тщательно проработали теоретическую модель эфира и механику распространения света, включая всевозможные рычаги и оси, якобы способствующие распространению колебательных световых волн в эфире.

В 1887 году два американских физика — Альберт Майкельсон и Генри Морли — решили совместно провести эксперимент, призванный раз и навсегда доказать скептикам, что *светоносный эфир* реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны. Майкельсон обладал непререкаемым авторитетом как конструктор оптических приборов, а Морли славился как неутомимый и непогрешимый физик-экспериментатор. Придуманный ими опыт проще описать, чем провести практически.

Майкельсон и Морли использовали *интерферометр* — оптический измерительный прибор, в котором луч света расщепляется



надвое полупрозрачным зеркалом (стеклянная пластина посеребрена с одной стороны ровно настолько, чтобы частично пропускать поступающие на нее световые лучи, а частично отражать их; аналогичная технология сегодня используется в зеркальных фотоаппаратах). В итоге луч расщепляется и два получившихся *когерентных* луча расходятся под прямым углом друг к другу, после чего отражаются от двух равноудаленных от полупрозрачного зеркала зеркал-отражателей и возвращаются на полупрозрачное зеркало, результирующий пучок света от которого позволяет наблюдать интерференционную картину и выявлять малейшую *десинхронизацию* двух лучей (запаздывание одного луча относительно другого; см. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ).

Опыт Майкельсона—Морли был принципиально направлен на то, чтобы подтвердить (или опровергнуть) существование мирового эфира посредством выявления «эфирного ветра» (или факта его отсутствия). Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом. Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода — в другую. Итак, наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине: полный эфирный штиль! (Современные эксперименты подобного рода, проведенные с максимально возможной точностью, включая эксперименты с лазерными интерферометрами, дали аналогичные результаты.) Итак, эфирного ветра, а стало быть и эфира не существует.

В отсутствие эфирного ветра и эфира как такового стал очевиден неразрешимый конфликт между классической механикой Ньютона (подразумевающей некую абсолютную систему отсчета) и уравнениями Максвелла (согласно которым скорость света имеет предельное значение, не зависящее от выбора системы отсчета), что и привело в итоге к появлению теории относительности. Опыт Майкельсона—Морли окончательно показал, что «абсолютной системы отсчета» в природе не существует. И сколько бы Эйнштейн впоследствии ни утверждал, что вообще не обращал внимания на результаты экспериментальных исследований при разработке теории относительности, сомневаться в том, что результаты опытов Майкельсона—Морли способствовали быстрому восприятию столь радикальной теории научной общественностью всерьез, вряд ли приходится.



АЛЬБЕРТ АБРАХАМ МАЙКЕЛЬСОН (Albert Abraham Michelson, 1852–1931) — американский физик, немец по национальности (на снимке). Родился в местечке Стрельно (ныне Штсельно) на территории современной Польши (в те годы входившей в состав Российской империи). В возрасте двух лет вместе с родителями эмигрировал в США. Вырос в Калифорнии в эпоху знаменитой «золотой лихорадки», однако отец будущего ученого занимался не поисками золота, а мелкооптовой торговлей в городах, охваченных этим недугом. Поступил в Академию ВМФ США по особой рекомендации некоего конгрессмена от своего штата, был принят на действительную службу, прошел полный курс строевой подготовки, после чего был назначен преподавателем физики. Благодаря этому у него появилась возможность заниматься оптикой и, в частности, строительством прибора для определения скорости света. После выхода в отставку с действительной службы в 1881 году стал преподавателем Школы прикладных наук им. Кейса (Case School of Applied Sciences) в Кливленде, штат Огайо, где и продолжил свои исследования. В 1907 году Майкельсон был

удостоен Нобелевской премии по физике «за создание прецизионных оптических инструментов и за выполненные с их помощью исследования», а именно, за точное определение длины стандартного метра и скорости света в вакууме.

ЭДВАРД УИЛЬЯМС МОРЛИ (Edward Williams Morley, 1838–1923) — американский физик и химик. Родился в Ньюарке, штат Нью-Джерси в семье церковнослужителя-конгрегационалиста. По причине слабого здоровья школу не посещал, а учился дома, причем отец готовил его к продолжению служения церкви, однако мальчик предпочел естественные науки и занялся изучением химии и природоведения. В конце концов из него получился непревзойденный экспериментатор. Именно Морли удалось с непревзойденной точностью определить удельные массы водорода и кислорода в составе чистой воды. Когда же судьба свела его с Альбертом Майкельсоном, его навыки экспериментатора оказались просто незаменимыми, и теперь имена двух этих ученых неразрывно связаны благодаря их знаменитому опыту.

Опыт Милликаена

*Заряд электрона
приблизительно
равен
 $1,6 \times 10^{-19}$ кулонов*

1851	●	ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПАДЕНИЯ
1897	●	ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА
1911	●	ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА
1913	●	АТОМ БОРА
1913	●	ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

После открытия электрона ученые прекрасно осознали, что эта частица является фундаментальной составляющей всего материального мира. Соответственно, встал вопрос об изучении и измерении ее свойств. Первое прецизионное измерение электрического заряда электрона — заслуга Роберта Милликаена. Его экспериментальная установка представляла собой большой и емкий плоский конденсатор из двух металлических пластин с камерой между ними. На обкладки конденсатора Милликен подавал постоянное напряжение от мощной батареи, создавая на них высокую разность потенциалов, а между обкладками помещал мелко распыленные капли — сначала воды, а затем масла, которое, как выяснилось, ведет себя в электростатическом поле значительно устойчивее, а главное, испаряется гораздо медленнее. Сначала Милликен измерил предельную скорость падения капель — то есть скорость, при которой сила земного притяжения, действующая на капли, уравнивается силой сопротивления воздуха. По этой скорости ученый определил объем и массу капель аэрозольной взвеси. После этого он распылил идентичный аэрозоль в присутствии электростатического поля, то есть при подключенной батарее. В этом случае масляные капли оставались в подвешенном состоянии достаточно долго, поскольку силы гравитационного притяжения Земли уравнивались силами электростатического отталкивания между каплями аэрозоля.

Причина, по которой капли масляного аэрозоля электризуются, банальна: это простой электростатический заряд, подобный тому, который накапливается, скажем, на белье, которое мы достаем из сушильной центрифуги. В результате того, что ткань трется о ткань — он возникает в результате трения капель о воздух, заполняющий камеру. Однако из-за микроскопического размера масляных капель в камере они не могут получить большого заряда, а величина заряда капель будет кратна единичному заряду электрона. Значит, постепенно понижая внешнее напряжение, мы будем наблюдать, как капли масла периодически «выпадают в осадок», и по градациям шкалы напряжения, при которых осаждается очередная порция аэрозоля, мы можем судить об абсолютной величине единичного заряда, поскольку дробного заряда наэлектризованные капли нести на себе не могут.

Кроме того, Милликен облучал масляную взвесь рентгеновскими лучами и дополнительно ионизировал ее органические молекулы, чтобы повысить их электризацию и продлить время экспериментального наблюдения, одновременно повышая напряжение в камере, и делал так многократно для уточнения полученных данных. Наконец, накопив достаточно экспериментальных данных для статистической обработки, Милликен вычислил величину единичного заряда и опубликовал полученные результаты, которые содержали максимально точно для тех лет рассчитанный заряд электрона.

Опыт Милликена был крайне трудоемок. Ученому приходилось, в частности, постоянно измерять и учитывать влажность воздуха и атмосферное давление — и так на протяжении всех пяти лет непрерывного наблюдения за своей установкой. Наградой за титанический труд стала Нобелевская премия по физике за 1923 год, присужденная Милликену за публикацию 1913 года. Интересно, что при всей кажущейся простоте камеры Милликена она не стала музейным экспонатом. Уже в 1960-е годы, когда появилась гипотеза кварков (см. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ), были построены современные усовершенствованные установки, работающие по вышеописанному принципу, на которых ученые безуспешно искали свободные кварки. Поскольку обнаружить таковые не удалось (кварки различных типов должны иметь электрические заряды, равные $1/3$ и $2/3$ заряда электрона), это послужило дополнительным подтверждением теории, согласно которой кварки в свободном виде в современной природе не встречаются и всегда находятся в связанном состоянии внутри других элементарных частиц.

РОБЕРТ ЭНДРУС МИЛЛИКЕН

(Robert Andrews Millikan, 1868–1953) — американский физик. Родился в г. Моррисон, штат Иллинойс, в семье священника-конгрегационалиста и учительницы приходской женской школы. Окончив Оберлинский колледж в Огайо, некоторое время преподавал греческий язык и по совместительству физику в начальной школе. Увлечшись последней, поступил на физический факультет Колумбийского университета, после окончания которого прошел годичную практику в ведущих лабораториях Европы, а затем был зачислен в преподавательский штат Чикагского университета. Там он получил всеобщее признание как авторитетный педагог (в частности, долгие годы по его учебникам преподавали физику в американских школах). Там же, в Чикаго, он и проводил на протяжении ряда лет свой знаменитый опыт, позволивший впервые определить с достаточной точностью заряд электрона и

выдвинувший Милликена в первые ряды представителей американской науки. В то же время ученый занимался активной общественной деятельностью и в какой-то мере способствовал формированию нового облика социально активного интеллектуала в сознании массового читателя.

В годы Первой мировой войны в звании полковника Миллиken возглавлял войска связи США. Ученый много времени уделял организации научно-исследовательских учреждений и в 1921 году фактически возглавил только что созданный Калифорнийский технологический институт в Пасадене. При этом Миллиken не оставлял и исследовательской деятельности, будучи одним из пионеров физики космических лучей. В итоге он стал олицетворенным символом своего поколения ученых, продолжив традиции англичан Джона Тиндала и Майкла Фарадея, и предвосхитил появление таких выдающихся ученых-популяризаторов, как Карл Сеган.

Опыт Резерфорда

Атом состоит из компактного и массивного положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных легких электронов вокруг него

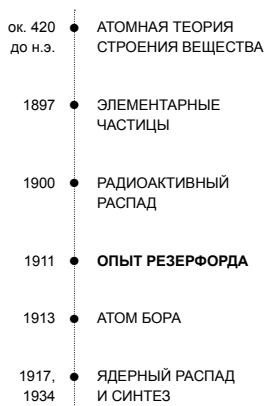
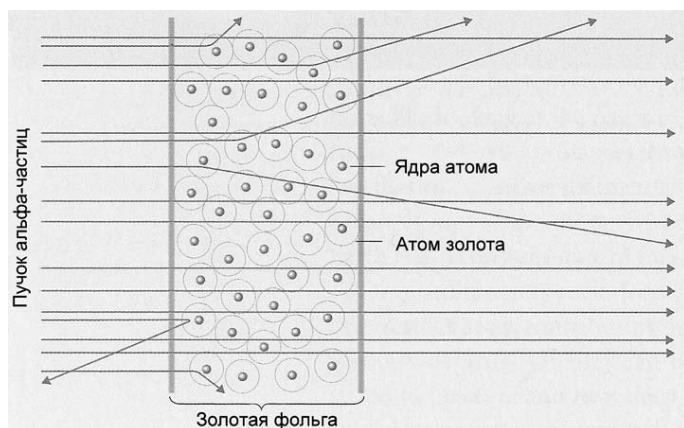


Схема опыта, с помощью которого было обнаружено существование атомного ядра



Эрнест Резерфорд — уникальный ученый в том плане, что свои главные открытия он сделал уже *после* получения Нобелевской премии. В 1911 году ему удалось эксперимент, который не только позволил ученым заглянуть вглубь атома и получить представление о его строении, но и стал образцом изящества и глубины замысла.

Используя естественный источник радиоактивного излучения, Резерфорд построил пушку, дававшую направленный и сфокусированный поток альфа-частиц (полностью ионизированные ядра водорода, состоящие из двух протонов и двух нейтронов). Пушка представляла собой свинцовый ящик с узкой прорезью, внутрь которого был помещен радиоактивный материал. Благодаря этому альфа-частицы, испускаемые радиоактивным веществом во всех направлениях, кроме одного, поглощались свинцовым экраном, и лишь через прорезь вылетал направленный пучок альфа-частиц. Далее на пути пучка стояло еще несколько свинцовых экранов с узкими прорезями, отсекавших частицы, отклоняющиеся от строго заданного направления. В результате к мишени подлетал идеально сфокусированный пучок альфа-частиц, а сама мишень представляла собой тончайший лист золотой фольги. В нее-то и ударял альфа-луч. После столкновения с атомами фольги альфа-частицы продолжали свой путь и попадали на люминесцентный экран, установленный позади мишени, на котором при попадании на него альфа-частиц регистрировались вспышки. По ним экспериментатор мог судить, в каком количестве и насколько альфа-частицы отклоняются от направления прямолинейного движения в результате столкновений с атомами фольги.

Эксперименты подобного рода проводились и раньше. Основная их идея состояла в том, чтобы по углам отклонения частиц накопить достаточно информации, по которой можно было бы сказать что-либо определенное о строении атома. В начале XX века ученые уже знали, что атом содержит отрицательно заряженные электроны. Однако преобладало представление, что атом представляет собой что-то похожее на положительно заряженную

тонкую сетку, заполненную отрицательно заряженными электронами-изюминами, — модель так и называлась «модель сетки с изюмом». По результатам подобных опытов ученым удалось узнать некоторые свойства атомов — в частности, оценить порядок их геометрических размеров.

Резерфорд, однако, заметил, что никто из его предшественников даже

не пробовал проверить экспериментально, не отклоняются ли некоторые альфа-частицы под очень большими углами. Модель сетки с изюмом просто не допускала существования в атоме столь плотных и тяжелых элементов структуры, что они могли бы отклонять быстрые альфа-частицы на значительные углы, поэтому никто и не озабочивался тем, чтобы проверить такую возможность. Резерфорд попросил одного из своих студентов переоборудовать установку таким образом, чтобы можно было наблюдать рассеяние альфа-частиц под большими углами отклонения, — просто для очистки совести, чтобы окончательно исключить такую возможность. В качестве детектора использовался экран с покрытием из сульфида натрия — материала, дающего флуоресцентную вспышку при попадании в него альфа-частицы. Каково же было удивление не только студента, непосредственно проводившего эксперимент, но и самого Резерфорда, когда выяснилось, что некоторые частицы отклоняются на углы вплоть до 180° !

В рамках устоявшейся модели атома полученный результат не мог быть истолкован: в сетке с изюмом попросту нет ничего такого, что могло бы отразить мощную, быструю и тяжелую альфа-частицу. Резерфорд вынужден был заключить, что в атоме большая часть массы сосредоточена в невероятно плотном веществе, расположенном в центре атома. А вся остальная часть атома оказывалась на много порядков менее плотной, нежели это представлялось раньше. Из поведения рассеянных альфа-частиц вытекало также, что в этих сверхплотных центрах атома, которые Резерфорд называл *ядрами*, сосредоточен также и весь положительный электрический заряд атома, поскольку только силами электрического отталкивания может быть обусловлено рассеяние частиц под углами больше 90° .

Годы спустя Резерфорд любил приводить по поводу своего открытия такую аналогию. В одной южноафриканской стране таможенно предупредили, что в страну собираются провезти крупную партию контрабандного оружия для повстанцев и оружие будет спрятано в тюках хлопка. И вот перед таможенником после разгрузки оказывается целый склад, забитый тюками с хлопком. Как ему определить, в каких именно тюках спрятаны винтовки? Таможенник решил задачу просто: он стал стрелять по тюкам, и, если пули рикошетируют от какого-либо тюка, он по этому признаку и выявлял тюки с контрабандным оружием. Так и Резерфорд, увидев, как альфа-частицы рикошетируют от золотой фольги, понял, что внутри атома скрыта гораздо более плотная структура, чем предполагалось.

Картина атома, нарисованная Резерфордом по результатам опыта, нам сегодня хорошо знакома. Атом состоит из сверхплотного, компактного ядра, несущего на себе положительный заряд, и отрицательно заряженных легких электронов вокруг него. Позже ученые подвели под эту картину надежную теоретическую базу (см. АТОМ БОРА), но началось все с простого эксперимента с маленьким образцом радиоактивного материала и куском золотой фольги.

ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД, впоследствии барон Резерфорд Нельсонский I (Ernest Rutherford, later First Baron Rutherford of Nelson, 1871–1937) — новозеландский физик. Родился в Нельсоне, в семье фермера-ремесленника. Выиграл стипендию для получения образования в Кембриджском университете в Англии. После его окончания получил назначение в канадский университет Мак-Гилл (McGill University), где совместно с Фредериком Содди (Frederick Soddy, 1877–1966) установил основные закономерности явления радиоактивности, за что в 1908 году был удостоен Нобелевской премии по химии. Вскоре ученый перебрался в Манчестерский университет, где под его руководством Ханс Гейгер (Hans Geiger, 1882–1945)

изобрел свой знаменитый счетчик Гейгера, занялся исследованиями строения атома и в 1911 году открыл существование атомного ядра. В годы Первой мировой войны занимался разработкой сонаров (акустических радаров) для обнаружения подводных лодок противника. В 1919 году был назначен профессором физики и директором Кавендишской лаборатории Кембриджского университета и в том же году открыл распад ядра в результате бомбардировки тяжелыми частицами высоких энергий. На этом посту Резерфорд оставался до конца жизни, одновременно являясь на протяжении многих лет президентом Королевского научного общества. Похоронен в Вестминстерском аббатстве рядом с Ньютоном, Дарвином и Фарадеем.

Опыт Штерна—Герлаха

Можно экспериментально доказать, что атомы и элементарные частицы обладают магнитными спинами, которые квантуются

1736	• ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА
1820	• ЗАКОН АМПЕРА
1921	• ОПЫТ ШТЕРНА—ГЕРЛАХА
1925	• КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Многие субатомные частицы обладают собственным угловым моментом (см. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МОМЕНТА ИМПУЛЬСА), который называли *спин*. Обладающая электрическим зарядом и спином элементарная частица (например, электрон или протон) может, в таком случае, быть представлена в виде микроскопического циркулярного тока, который, в свою очередь, производит *магнитный момент*, связанный со спином, и заряженная частица ведет себя еще и как микроскопический магнит. Итак, и атомы, и элементарные частицы должны производить магнитные поля: первые — в силу циркуляции электронов на орбитах; вторые — в силу присущего им спина.

Разумно предположить, что северный и южный полюса этих атомных и субатомных магнитов могут быть ориентированы произвольным образом. Постулаты квантовой механики, однако, такого произвола не допускают. Подобно всем иным свойствам частиц в мире квантовой физики, направление магнитного спина квантуется: во внешнем электромагнитном поле он может принимать только направления, относящиеся к фиксированному набору. Отто Штерн и Вальтер Герлах в 1921 году как раз и провели опыт, позволивший экспериментально подтвердить как наличие у атомов спина, так и факт его пространственного квантования.

В основе их экспериментальной установки лежал мощный постоянный магнит, между близко расположенными полюсами которого образовывалось сильно неоднородное магнитное поле. Под воздействием такого поля частица, обладающая собственным магнитным моментом, обязана отклоняться в направлении, зависящем от ориентации ее магнитного спина.

Если бы атом управлялся законами классической механики Ньютона (то есть квантования спинов не наблюдалось бы), полюса микроскопических магнитов были бы ориентированы хаотичным образом, и они отклонялись бы во всевозможных направлениях. Где бы позади магнита мы ни разместили датчики, какие-то атомы обязательно отклонялись бы в этом направлении и попадали на них. Если же верна квантово-механическая гипотеза, и спины атомов и частиц квантуются, они будут отклоняться лишь в «разрешенных» направлениях и на разрешенные углы.

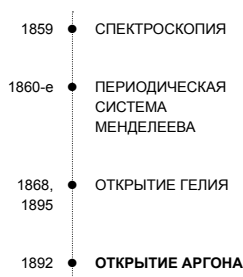
В исходном эксперименте исследовались свойства именно атомов (сначала серебра, а затем и других металлов. — *Прим. переводчика*), и атомы некоторых веществ, как выяснилось, вообще отклоняются лишь в двух направлениях (условно говоря, «вверх» или «вниз» в зависимости от ориентации их магнитного спина «на север» или «на юг»). Позже уже одному Штерну удалось получить аналогичные результаты и для пучков протонов и электронов. Тем самым, этот опыт стал одним из главных подтверждений правильности постулатов квантовой механики.

ОТТО ШТЕРН (Otto Stern, 1888–1969) — немецкий, затем американский физик. Родился в Зохлау (современный г. Жоры, Польша). Окончил Университет в Бреслау (современный Вроцлав). В 1921 году переехал во Франкфурт, где познакомился с уроженцем этого города и сотрудником местного университета Вальтером Герлахом (Walter Gerlach, 1889–1979), вместе с которым они в том же году и провели

прославивший их опыт. В качестве профессора физической химии Гамбургского университета Штерн изучал магнитные свойства элементарных частиц, за что был удостоен Нобелевской премии по физике в 1943 году. К тому времени Штерн уже 10 лет жил и работал в Технологическом институте Карнеги в Питтсбурге (США), ведущим сотрудником которого оставался до конца своих дней.

Открытие аргона

Благородный газ аргон был открыт благодаря небольшим расхождениям в результатах двух измерений



В 1892 году британский ученый Джон Стретт, более известный нам как лорд Рэлей (см. КРИТЕРИЙ РЭЛЕЯ), занимался одной из тех однообразных и не слишком увлекательных работ, без которых тем не менее не может существовать экспериментальная наука. Он исследовал оптические и химические свойства атмосферы, поставив перед собой цель измерить массу литра азота с точностью, которой до него никому не удавалось достичь.

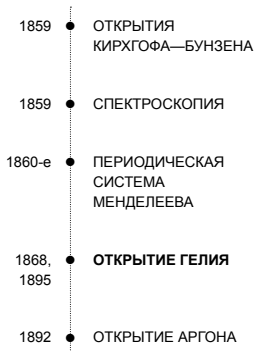
Однако результаты этих измерений казались парадоксальными. Масса литра азота, полученного методом удаления из воздуха всех других известных тогда веществ (таких, как кислород), и масса литра азота, полученного посредством химической реакции (пропусканием аммиака над нагретой до красного каления медью) оказывались разными. Получалось, что азот из воздуха на 0,5% тяжелее азота, полученного химическим путем. Это расхождение не давало Рэлею покоя. Убедившись, что никаких ошибок в эксперименте допущено не было, Рэлей опубликовал в журнале *Nature* письмо, в котором спрашивал, не может ли кто-нибудь объяснить причину этих расхождений.

Сэр Уильям Рамзай (Рэмзи) (Sir William Ramsay, 1852–1916), работавший в то время в университетском колледже Лондона, ответил Рэлею на это письмо. Рамзай предположил, что в атмосфере может присутствовать не открытый еще газ, и для выделения этого газа предложил использовать новейшее оборудование. В проведенном эксперименте обогащенный кислородом воздух, смешанный с водой, подвергался воздействию электрического разряда, что вызывало соединение атмосферного азота с кислородом и растворение образующихся окислов азота в воде. К концу эксперимента, после того как весь азот и кислород из воздуха уже были исчерпаны, в сосуде все еще оставался маленький пузырек газа. Когда через этот газ пропустили электрическую искру и подвергли его спектроскопии, ученые увидели неизвестные ранее спектральные линии (см. СПЕКТРОСКОПИЯ). Это означало, что был открыт новый элемент. Рэлей и Рамзай опубликовали свои результаты в 1894 году, назвав новый газ *аргоном*, от греческого «ленивый», «безразличный». А в 1904 году оба они за эту работу получили Нобелевскую премию. Однако она не была разделена между учеными, как это принято в наше время, а каждый получил премию в своей области — Рэлей по физике, а Рамзай — по химии.

Имел место даже своего рода конфликт. В то время многие ученые полагали, что «владеют» отдельными областями исследований, и не было до конца ясно, давал ли Рэлей Рамзаю разрешение работать над этой проблемой. К счастью, оба ученых оказались достаточно мудры, чтобы осознать преимущества совместной работы, и, сообщая опубликовать ее результаты, они исключили возможность неприятной борьбы за первенство.

Открытие гелия

Химический элемент гелий сначала был обнаружен на Солнце и лишь потом — на Земле



Основная часть элементов ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА была открыта в XIX и XX веках. Это объясняется тем, что большинство из них в природной форме встречается крайне редко и, чтобы их обнаружить (или получить), нужен определенный уровень развития техники. У каждого элемента своя история открытия. Пожалуй, наиболее поучительная — у гелия, ведь вплоть до конца 1930-х годов ученые не могли окончательно опровергнуть предположение, что где-нибудь во Вселенной могут существовать химические элементы, которых нет на Земле. Если бы это оказалось правдой, был бы подвергнут сомнению один из главных принципов современной науки, согласно которому все известные нам в настоящее время законы природы действовали и будут действовать всегда и во всех точках Вселенной (в этом состоит принцип КОПЕРНИКА).

Ключевую роль в истории открытия гелия сыграл Норман Локьер, основатель одного из передовых мировых научных изданий — журнала *Nature*. В процессе подготовки к выпуску журнала он познакомился с лондонским научным истеблишментом и увлекся астрономией. Это было время, когда, вдохновленные ОТКРЫТИЕМ КИРХГОФА—БУНЗЕНА, астрономы только начинали изучать спектр света, испускаемого звездами. Локьеру самому удалось сделать ряд важных открытий — в частности, он первым показал, что солнечные пятна холоднее остальной солнечной поверхности, а также первый указал на наличие у Солнца внешней оболочки, назвав ее *хромосферой*. В 1868 году, исследуя свет, излучаемый атомами в протуберанцах — огромных выбросах плазмы с поверхности Солнца, — Локьер заметил ряд прежде неизвестных спектральных линий (см. СПЕКТРОСКОПИЯ). Попытки получить такие же линии в лабораторных условиях окончились неудачей, из чего Локьер сделал вывод, что он обнаружил новый химический элемент. Локьер назвал его гелием, от греческого *helios* — «Солнце».

Ученые недоумевали, как им отнестись к появлению гелия. Одни предполагали, что при интерпретации спектров протуберанцев была допущена ошибка, однако эта точка зрения получала все меньше сторонников, поскольку все большему количеству астрономов удавалось наблюдать линии Локьера. Другие утверждали, что на Солнце есть элементы, которых нет на Земле — что, как уже говорилось, противоречит главному положению о законах природы. Третьи (их было меньшинство) считали, что когда-нибудь гелий будет найден и на Земле.

В конце 1890-х годов лорд Рэлей и сэр Уильям Рамзай провели серию опытов, приведших к ОТКРЫТИЮ АРГОНА. Рамзай переделал свою установку, чтобы с ее помощью исследовать газы, выделяемые урансодержащими минералами. В спектре этих газов Рамзай обнаружил неизвестные линии и послал образцы нескольким коллегам для анализа. Получив образец, Локьер сразу же узнал линии, которые более четверти века назад он наблюдал в солнечном свете.

Короний и небулий

Вопрос о том, есть ли где-нибудь во Вселенной химические элементы, которых нет на Земле, не потерял свою актуальность и в XX веке. При исследовании внешней солнечной атмосферы — солнечной *короны*, состоящей из горячей сильно разреженной плазмы, — астрономы обнаружили спектральные линии, которые им не удалось отождествить ни с одним из известных земных элементов. Ученые предположили, что эти линии принадлежат новому элементу, который получил название *короний*. А при изучении спектров некоторых *туманностей* — далеких скоплений газов и пыли в Галактике — были обнаружены еще одни загадочные линии. Их приписали другому «новому» элементу — *небулию*. В 1930-е годы американский астрофизик Айра Спрейг Боуэн (Ira Sprague Bowen, 1898–1973) пришел к выводу, что линии небулия на самом деле принадлежат кислороду, но приобрели такой вид из-за экстремальных условий, существующих на Солнце и в туманностях, причем условия эти не могут быть воспроизведены в земных лабораториях. Короний же оказался сильно ионизированным железом. А эти линии получили название *запрещенные линии*.

Загадка гелия была решена: газ, несомненно, находится на Солнце, но он существует также и здесь, на Земле. В наше время этот газ больше всего известен в обычной жизни как газ для надувания дирижаблей и воздушных шаров (см. ЗАКОН ГРЭМА), а в науке — благодаря его применению в *криогенике*, технологии достижения сверхнизких температур.

ДЖОЗЕФ НОРМАН ЛОКЬЕР (Joseph Norman Lockyer, 1736–1920) — английский ученый. Родился в городе Рагби в семье военного врача. Локьер пришел в науку необычным путем, начав свою карьеру чиновником в военном министерстве. Чтобы подработать, он, воспользовавшись общественным интересом к науке, стал издавать научно-популярный журнал. В 1969 году вышел первый номер журнала *Nature*,

и в течение 50 лет Локьер оставался его редактором. Он участвовал во многих экспедициях, наблюдающих за полными солнечными затмениями. Одна из таких экспедиций и привела его к открытию гелия. Локьер также известен как основатель археоастрономии — науки, изучающей астрономический смысл древних сооружений, таких как Стоунхендж, — и автор многих научно-популярных книг.

Открытие Кирхгофа—Бунзена

Частоты излучения и поглощения света в спектрах химических веществ совпадают

1890	ПОСТОЯННАЯ РИДБЕРГА
1859	ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА
1859	СПЕКТРОСКОПИЯ
1913	АТОМ БОРА

Больше всего Роберт Вильгельм Бунзен прославился благодаря разработанной им лабораторной горелке Бунзена, которую вам наверняка доводилось видеть во время демонстрации опытов на школьных уроках химии, а может быть, и самим использовать ее при проведении лабораторных работ. Она дает очень чистое белое пламя, и поэтому ее используют для разогрева веществ с целью наблюдения их цветового спектра (см. ПРОБА НА ОКРАШИВАНИЕ ПЛАМЕНИ). Лабораторное каление стало первым методом прямого обнаружения присутствия химических элементов в составе вещества без проведения химических реакций.

В середине XIX века Бунзен считался признанным мировым лидером в области получения чистых препаратов химических элементов. В 1859 году он решил пойти дальше и стал пропускать световые лучи от раскаленных образцов через призму, разлагая их на наглядный спектр. К тому времени он уже обнаружил, что отдельные ярко выраженные цвета в спектре раскаленных химических элементов, в частности натрия, удивительным образом полностью совпадают по длине волны и частоте с темными *линиями Фраунгофера* в спектре Солнца. Сегодня мы знаем, что это следствие поглощения части белого излучения Солнца более холодными химическими элементами, присутствующими в его внешней оболочке, и отсутствие в солнечных лучах спектральных линий того же натрия свидетельствует о его наличии в солнечной короне. Открытие совпадения спектров излучения и поглощения химических элементов пополнило собой длинный ряд экспериментальных открытий, далеко не сразу получивших теоретическое объяснение, поскольку во времена Бунзена было мало известно о механизмах взаимодействия света и атомов вещества.

В том же 1859 году коллега Бунзена, известный физик Густав Кирхгоф использовал совпадение спектров излучения и поглощения для калибровки оптического инструмента. Он пропускал через призму сначала свет от раскаленного натрия, а затем солнечный свет, добиваясь совпадения спектральных линий натрия с темными линиями в спектре Солнца. И тут он провел опыт, в результате которого выяснилось, что, если солнечные лучи пропустить через окрашенное натрием пламя горелки, темные линии натрия в спектре Солнца становятся еще более темными и выраженными. Иными словами, выяснилось, что раскаленный натрий не только испускает свет определенных спектральных частот, но и поглощает свет тех же длин волн, причем более интенсивно, если источник излучения разогрет до более высоких температур, чем натрий.

И тут Кирхгоф совершил интуитивный прорыв, догадавшись, что атом химического элемента способен излучать и поглощать свет лишь одних и тех же частот. Иными словами, если атом излучает свет какой-либо частоты, он обязательно способен и поглощать свет этой частоты. (И такая схема единственная была способна объяснить дальнейшее затемнение линий Фраунгофера в спектре Солнца: продолжая излучать на своих спектральных час-

РОБЕРТ ВИЛЬГЕЛЬМ БУНЗЕН (Robert Wilhelm Bunsen, 1811–99) — немецкий химик, уроженец Гёттингена. В 1830 году окончил местный университет и продолжил карьеру в германской системе высшего образования, преподавая химию сначала в родном университете, а затем в других немецких университетах, пока не стал в 1852 году профессором в Гейдельберге. Интересно, что горелка, названная его именем, разрабатывалась для проведения лабораторных исследований при его активном участии, но изначально ее идея была предложена не Бунзеном, так что это, как ни странно, не его изобретение, как принято считать. Первоначально Бунзен занимался исследованиями в области неорганической химии и, не брезгуя ручным трудом, стал одним из самых искусных стеклодувов своего времени, изготавливая лабораторную посуду. Как экспериментатор Бунзен отличался большой смелостью, в результате чего сначала был тяжело контужен и едва не лишился зрения во время взрыва в лаборатории, а позднее едва не погиб от тяжелого отравления мышьяком — можно сказать, дважды родился заново! Одновременно Бунзен оставил по себе память как блестящий преподаватель, воспитавший целое поколение немецких химиков.

татах, атомы раскаленного натрия поглощали еще больше энергии излучения на них же.)

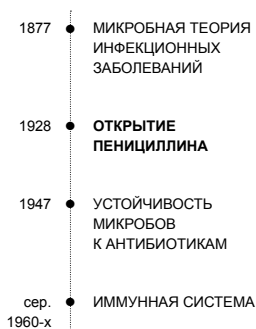
Из открытия Кирхгофа незамедлительно следовало, что темные спектральные линии в солнечном свете убедительно доказывают, что на Солнце реально имеются химические элементы, которым они соответствуют (натрий в том числе). Изучение, исходящее из внутренних слоев Солнца, имеет абсолютно белую спектрально-цветовую гамму, то есть изначально в спектре излучения Солнца присутствуют все без исключения цвета — он непрерывен. А темные линии появляются в нем в результате поглощения части спектра в поверхностных слоях Солнца и, следовательно, присутствуют в составе солнечного вещества.

С точки зрения модели атома Бора открытие Кирхгофа—Бунзена объясняется достаточно легко. Мы теперь знаем, что атом испускает свет квантами при скачке электронов с более высокой орбиты на более низкую. Энергия излучаемых фотонов при этом строго фиксирована и соответствует разнице между энергетическими уровнями орбит — именно она определяет частоту и длину световой волны. При поглощении света атомом он, опять же, поглощается путем «усвоения» электронами фотонов тех же энергий, которые необходимы для перехода на один уровень вверх. Соответственно, любой атом имеет в своем спектре фиксированный набор частот излучения и поглощения, соответствующий энергетическим разностям между электронными орбитами. В этом контексте открытие Кирхгофа—Бунзена — всего лишь дополнительное подтверждение того, что энергии перехода электрона с верхней орбиты на нижнюю и обратно равны. Это просто еще одно проявление закона сохранения энергии, аналогичное тому, как, спустившись на одну ступеньку лестницы вниз, мы теряем ровно столько потенциальной энергии, проделывая отрицательную работу, сколько мы получаем ее, поднимаясь на ту же ступеньку вверх и проделывая положительную.

Одним из главных и далеко идущих последствий открытия Кирхгофа—Бунзена стало то, что это открытие положило начало целой области прикладных исследований — спектроскопии, или *спектральному анализу*. Оно стало настоящей вехой в истории экспериментальной и прикладной науки. Достаточно упомянуть, что сегодня, изучая спектры излучения, астрофизики с большой точностью определяют химический состав не только Солнца, но любого видимого космического объекта во Вселенной, а ведь когда-то о таком никто не смел даже и мечтать. Сегодня десятки тысяч научных лабораторий во всем мире оснащены высокотехнологичными компьютерными спектрометрами и спектрографами, позволяющими изучать состав любых веществ практически без погрешностей, и стоимость такого спектрографического оборудования доходит нередко до миллионов долларов. Интересно, что бы сказали Кирхгоф и Бунзен, сравнив эти приборы со своими спектрометрами, сооруженными из обычных стеклянных призм и пары пустых ящиков из-под сигар.

Открытие пенициллина

Первый антибиотик — пенициллин — был открыт случайно. Его действие основано на подавлении синтеза внешних оболочек бактериальных клеток



Сэр Александр Флеминг в своей лаборатории за работой

В 1928 году Александр Флеминг проводил рядовой эксперимент в ходе многолетнего исследования, посвященного изучению борьбы человеческого организма с бактериальными инфекциями. Вырастив колонии культуры *Staphylococcus*, он обнаружил, что некоторые из чашек для культивирования заражены обыкновенной плесенью *Penicillium* — веществом, из-за которого хлеб при долгом лежании становится зеленым. Вокруг каждого пятна плесени Флеминг заметил область, в которой бактерий не было. Из этого он сделал вывод, что плесень вырабатывает вещество, убивающее бактерии. Впоследствии он выделил молекулу, ныне известную как пенициллин. Это и был первый современный антибиотик.

Принцип работы антибиотика состоит в торможении или подавлении химической реакции, необходимой для существования бактерии. Пенициллин блокирует молекулы, участвующие в строительстве новых клеточных оболочек бактерий — похоже на то, как наклеенная на ключ жевательная резинка не дает открыть замок. (Пенициллин не оказывает влияния на человека или животных, потому что наружные оболочки наших клеток коренным образом отличаются от клеток бактерий.)

В течение 1930-х годов предпринимались безуспешные попытки улучшить качество пенициллина и других антибиотиков, научившись получать их в достаточно чистом виде. Первые антибиотики напоминали большинство современных противораковых препаратов — было неясно, убьет ли лекарство возбудителя болезни до того, как оно убьет пациента. И только в 1938 году двум ученым Оксфордского университета Говарду Флори (Howard Florey, 1898–1968) и Эрнсту Чейну (Ernst Chain, 1906–79) удалось выделить чистую форму пенициллина. В связи с большими потребностями в медикаментах во время Второй мировой войны массовое производство этого лекарства началось уже в 1943 году. В 1945 году

Флемингу, Флори и Чейну за их работу была присуждена Нобелевская премия.

Благодаря пенициллину и другим антибиотикам было спасено бесчисленное количество жизней. Кроме того, пенициллин стал первым лекарством, на примере которого было замечено возникновение устойчивости микробов к антибиотикам.



АЛЕКСАНДР ФЛЕМИНГ (Alexander Fleming, 1881–1955) — шотландский бактериолог. Родился в Локфилде, графство Эйршир. Окончил Медицинскую школу при больнице св. Марии и проработал там практически всю жизнь. Лишь во время Первой мировой войны Флеминг служил военным врачом в медицинском

корпусе Королевской армии. Именно там он заинтересовался проблемой борьбы с раневыми инфекциями. Благодаря случайному открытию пенициллина в 1928 году (в этом же году Флеминг получил звание профессора бактериологии) он в 1945 году стал лауреатом Нобелевской премии в области физиологии и медицины.

Открытие электрона

Электрон представляет собой субатомную частицу, реагирующую на воздействие и электрических, и магнитных полей

1897	● ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ
1897	● ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА
1899	● ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
1900	● ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ
1911	● ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА
1913	● ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

На протяжении всей второй половины XIX века физики активно изучали феномен катодных лучей. Простейший аппарат, в котором они наблюдались, представлял собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом, в которую с двух сторон было впаяно по электроду: с одной стороны *катод*, подключавшийся к отрицательному полюсу электрической батареи; с другой — *анод*, подключавшийся к положительному полюсу. При подаче на катодно-анодную пару высокого напряжения разреженный газ в трубке начинал светиться, причем при низких напряжениях свечение наблюдалось лишь в области катода, а при повышении напряжения — внутри всей трубки; однако при откачивании газа из трубки, начиная с какого-то момента, свечение исчезало уже в области катода, сохраняясь около анода. Это свечение ученые и приписали *катодным лучам*.

К концу 1880-х годов дискуссия о природе катодных лучей приняла острый полемический характер. Подавляющее большинство видных ученых немецкой школы придерживалось мнения, что катодные лучи представляют собой, подобно свету, волновые возмущения невидимого эфира. В Англии же придерживались мнения, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа. У каждой стороны имелись веские доказательства в пользу своей гипотезы. Сторонники молекулярной гипотезы справедливо указывали на тот факт, что катодные лучи отклоняются под воздействием магнитного поля, в то время как на световые лучи магнитное поле никак не воздействует. Следовательно, они состоят из заряженных частиц. С другой стороны, сторонники корпускулярной гипотезы никак не могли объяснить ряда явлений, в частности обнаруженного в 1892 году эффекта практически беспрепятственного прохождения катодных лучей через тонкую алюминиевую фольгу.

Наконец в 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон положил конец этим спорам раз и навсегда, а заодно прославился в веках как первооткрыватель электрона. В своем опыте Томсон использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими (согласно **ЗАКОНУ АМПЕРА**) внутри трубки магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших внутри трубки электрическое поле. Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием и магнитного, и электрического поля.

Используя трубку новой конструкции, Томсон последовательно показал, что: (1) катодные лучи отклоняются в магнитном поле в отсутствие электрического; (2) катодные лучи отклоняются в электрическом поле в отсутствие магнитного; и (3) при одновременном действии электрического и магнитного полей сбалансированной интенсивности, ориентированных в направлениях, вызывающих по отдельности отклонения в противоположные стороны,

катодные лучи распространяются прямолинейно, то есть действие двух полей взаимно уравнивается.

Томсон выяснил, что соотношение между электрическим и магнитным полями, при котором их действие уравнивается, зависит от скорости, с которой движутся частицы. Проведя ряд измерений, Томсон смог определить скорость движения катодных лучей. Оказалось, что они движутся значительно медленнее скорости света, из чего следовало, что катодные лучи могут быть только частицами, поскольку любое электромагнитное излучение, включая сам свет, распространяется со скоростью света (см. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ). Эти неизвестные частицы Томсон назвал «корпускулами», но вскоре они стали называться «электронами».

Сразу же стало ясно, что электроны обязаны существовать в составе атомов — иначе, откуда бы они взялись? 30 апреля 1897 года — дата доклада Томсоном полученных им результатов на заседании Лондонского королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» атомов (см. АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА). Вкупе с последовавшим через десять с небольшим лет открытием атомного ядра (см. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА) открытие электрона заложило основу современной модели атома.

Описанные выше «катодные», а точнее, электронно-лучевые трубки стали простейшими предшественницами современных телевизионных кинескопов и компьютерных мониторов, в которых строго контролируемые количества электронов выбиваются с поверхности раскаленного катода, под воздействием переменных магнитных полей отклоняются под строго заданными углами и бомбардируют фосфоресцирующие ячейки экранов, образуя на них четкое изображение, возникающее в результате ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, открытие которого также было бы невозможным без нашего знания истинной природы катодных лучей.



ДЖОЗЕФ ДЖОН ТОМСОН (Joseph John Thomson, 1856–1940) — английский физик, более известный просто как Дж. Дж. Томсон. Родился в Читем-Хилле (Cheetham Hill), пригороде Манчестера, в семье букиниста-антиквара. В 1876 году выиграл стипендию на обучение в Кембридже. В 1884–1919 годах — профессор кафедры экспериментальной физики Кембриджского университета и по совместительству руководитель Кавендишской лаборатории, которая усилиями Томсона превратилась в один из самых известных научно-

исследовательских центров мира. Одновременно в 1905–1918 годах — профессор Королевского института в Лондоне. Лауреат Нобелевской премии по физике 1906 года с формулировкой «за исследования прохождения электричества через газы», которая, естественно, включает и открытие электрона. Сын Томсона Джордж Паджет Томсон (George Paget Thomson, 1892–1975) также со временем стал нобелевским лауреатом по физике в 1937 году за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах.

Открытие Эрстеда

Электрический ток порождает магнитное поле

1785	•	ЗАКОН КУЛОНА
1820	•	ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	•	ЗАКОН АМПЕРА
1820	•	ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	•	ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	•	ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Внешне электричество и магнетизм проявляют себя совершенно по-разному, но на самом деле они теснейшим образом связаны между собой. Заслуга окончательного слияния двух этих понятий принадлежит Джеймсу Кларку Максвеллу, разрабатывавшему единую теорию электромагнитных волн с 1850-х годов и до самой его безвременной кончины в 1879 году. Однако появлению УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА предшествовала целая череда открытий первой половины XIX века, начало которой положил датский физик Ханс Кристиан Эрстед.

Эрстеду были свойственны два качества, которые принято считать помехой для успешной карьеры исследователя, а именно: страстное увлечение философией и сильное желание донести науку до понимания масс. В начале своей стажировки в Париже, например, он серьезно подмочил свою научную репутацию, яростно защищая взгляды немецких философов-обскурантистов. На этом фоне и его доводы в пользу наличия связи между электричеством и магнетизмом были восприняты, по крайней мере, современниками, как очередное мистическое пустозвонство. Эрстед утверждал, например, что магнетизм возникает в результате неизбежного конфликта между положительным и отрицательным аспектом электричества.

Чем бы ученый ни руководствовался, но в 1820 году в Копенгагенском университете состоялась его лекция с демонстрацией, на которой он использовал только что изобретенную электрическую батарею в качестве источника тока. На этой лекции Эрстед продемонстрировал, что под воздействием поднесенного на близкое расстояние проводника магнитная стрелка компаса отклоняется. Это было первое наглядное и неоспоримое подтверждение существования прямой связи между электричеством и магнетизмом. Открытие Эрстеда буквально вдохновило целый ряд ученых, прежде всего Ампера (см. ЗАКОН АМПЕРА), а также Био и Савара (см. ЗАКОН БИО—САВАРА), на проведение новых экспериментов с целью определения математических закономерностей выявленной связи и, в конечном итоге, проложило дорогу к теории электромагнетизма Максвелла.

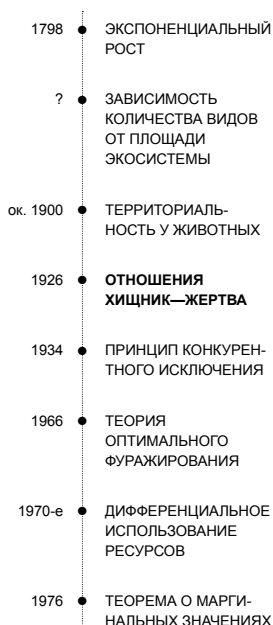
За преданность Эрстеда делу популяризации науки и публичную демонстрацию только что открытого явления Американская ассоциация учителей физики назвала премию, присуждаемую учителю года, «медалью Эрстеда».

ХАНС КРИСТИАН ЭРСТЕД (Hans Christian Oersted, 1777–1851) — датский физик. Родился в Рудкебинге в семье аптекаря. Начальное образование состояло преимущественно в изучении немецкого в приемной семье, в которой он какое-то время воспитывался, после чего Эрстед с одиннадцатилетнего возраста стал помогать отцу в аптеке, где на практике освоил аптечное дело. После переезда семьи в Копенгаген поступил в местный университет, в 1777 году получил диплом фармацевта, а еще через два года защитил докторскую диссертацию. Продолжил свое

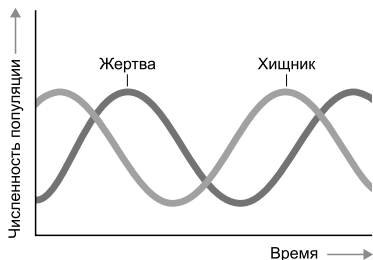
образование, переезжая из города в город и стажуясь в ведущих европейских лабораториях, где и познакомился с последними исследованиями электрических и магнитных явлений. После нескольких лет чтения публичных научно-популярных лекций в 1806 году получил преподавательскую должность в родном университете. В 1820 году Эрстед сделал свое уникальное открытие, наглядно демонстрирующее связь между электричеством и магнетизмом. С 1829 года работал директором Копенгагенского политехнического института.

Отношения хищник—жертва

Отношения между хищниками и их жертвами развиваются циклически, являясь иллюстрацией нейтрального равновесия



Циклические изменения численности видов хищника и его жертвы



Иногда простая математическая модель хорошо описывает сложную биологическую систему. Примером этого служат долговременные отношения между видами хищника и жертвы в какой-либо экосистеме. Математические расчеты роста популяции отдельно взятого вида (см. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ РОСТ) показывают, что пределы плотности популяции можно описать простыми уравнениями, которые на выходе дают характерную S-образную кривую. Это — кривая численности популяции, которая растет экспоненциально, пока она небольшая, а затем выравнивается, когда она достигает пределов возможности экосистемы поддерживать ее. Простое продолжение этой концепции позволяет нам понять экосистему, в которой взаимодействуют два вида — хищник и жертва.

Итак, если число растительноядных жертв H , а число плотоядных хищников C , то вероятность, что хищник встретится с травоядным, пропорциональна произведению HC . Другими словами, чем выше численность одного из видов, тем выше вероятность таких встреч. В отсутствие хищников популяция жертвы будет расти экспоненциально (по крайней мере вначале), а в отсутствие жертв популяция хищника сократится до нуля — либо из-за голода, либо в результате миграции. Теперь, если dH — изменение популяции растительноядных за время dt , а dC — изменение популяции плотоядных за тот же интервал времени, то две популяции описываются уравнениями:

$$dH/dt = rH - AHC \quad \text{и} \quad dC/dt = -qC + BHC$$

Здесь r — скорость роста численности травоядных в отсутствие хищников, а q — скорость сокращения численности плотоядных в отсутствие травоядных. Постоянные A и B — скорость, с которой встречи хищников с жертвами удаляют травоядных из популяции, и скорость, с которой эти встречи позволяют хищникам прибавлять численность своей популяции. Знак минус в первом уравнении показывает, что встречи сокращают популяцию жертвы, а знак плюс во втором говорит о том, что встречи увеличивают популяцию хищника. Как видите, любое изменение численности травоядных влияет на численность плотоядных, и наоборот. Две популяции необходимо рассматривать вместе.

Решение этих уравнений показывает, что обе популяции развиваются циклически. Если популяция травоядных увеличивается, вероятность встреч хищник—жертва возрастает и, соответственно (после некоторой временной задержки), растет популяция хищников. Но рост популяции хищников приводит к сокращению популяции травоядных (также после некоторой задержки), что ведет к снижению численности потомства хищников, а это повышает число травоядных и так далее. Эти две популяции как бы танцуют вальс во времени — когда изменяется одна из них, за ней следом изменяется и другая.

Парадокс Зенона

*Движение невозможно.
В частности, невозможно пересечь комнату, так как для этого нужно сначала пересечь половину комнаты, затем половину оставшегося пути, затем половину того, что осталось, затем половину оставшегося..*

Зенон Элейский принадлежал к той греческой философской школе, которая учила, что любое изменение в мире иллюзорно, а бытие едино и неизменно. Его парадокс (сформулированный в виде четырех апорий (от греч. *aporia* «безвыходность»), породивших с тех пор еще примерно сорок различных вариантов) показывает, что движение, образец «видимого» изменения, логически невозможно.

Большинству современных читателей парадокс Зенона знаком именно в приведенной выше формулировке (ее иногда называют *дихотомией* — от греч. *dichotomia* «разделение надвое»). Чтобы пересечь комнату, сначала нужно преодолеть половину пути. Но затем нужно преодолеть половину того, что осталось, затем половину того, что осталось после этого, и так далее. Это деление пополам будет продолжаться до бесконечности, из чего делается вывод, что вам никогда не удастся пересечь комнату.

Апория, известная под названием *Ахилл*, еще более впечатляюща. Древнегреческий герой Ахилл собирается состязаться в беге с черепахой. Если черепаха стартует немного раньше Ахилла, то ему, чтобы ее догнать, сначала нужно добежать до места ее старта. Но к тому моменту, как он туда доберется, черепаха проползет некоторое расстояние, которое нужно будет преодолеть Ахиллу, прежде чем догнать черепаху. Но за это время черепаха уползет вперед еще на некоторое расстояние. А поскольку число таких отрезков бесконечно, быстроногий Ахилл никогда не догонит черепаху.

Вот еще одна апория словами Зенона:

Если что-то движется, то оно движется либо в том месте, которое оно занимает, либо в том месте, где его нет. Однако оно не может двигаться в том месте, которое оно занимает (так как в каждый момент времени оно занимает все это место), но оно также не может двигаться и в том месте, где его нет. Следовательно, движение невозможно.

Этот парадокс называется *стрела* (в каждый момент времени летящая стрела занимает место, равное ей по протяженности, следовательно она не движется).

Наконец, существует четвертая апория, в которой речь идет о двух равных по длине колоннах людей, движущихся параллельно с равной скоростью в противоположных направлениях. Зенон утверждает, что время, за которое колонны пройдут друг мимо друга, составляет половину времени, нужного одному человеку, чтобы пройти мимо всей колонны.

Из этих четырех апорий первые три наиболее известны и наиболее парадоксальны. Четвертая просто связана с неправильным пониманием природы относительного движения.

Самый грубый и неизящный способ опровергнуть парадокс Зенона — это встать и пересечь комнату, обогнать черепаху или

ЗЕНОН ЭЛЕЙСКИЙ

(Zeno of Elea, ок. 490–420 до н.э.) — греческий философ. О его жизни известно немного, и о его трудах, включая его знаменитые парадоксы, мы знаем в основном из сочинений более поздних философов. Он был представителем Элейской школы, учеником Парменида (ок. 515–450 до н.э.), который утверждал, что истинная реальность должна быть вечной и неизменной, постижимой лишь разумом и логикой. Согласно легенде, элейский тиран Неарх пытал и казнил Зенона за участие в заговоре против правительства.

выпустить стрелу. Но это никак не затронет хода его рассуждений. Вплоть до XVII века мыслители не могли найти ключ к опровержению его хитроумной логики. Проблема была разрешена только после того, как Исаак Ньютон и Готфрид Лейбниц изложили идею дифференциального исчисления, которое оперирует понятием *предел*; после того как стала понятна разница между разбиением пространства и разбиением времени; наконец, после того, как научились обращаться с бесконечными и бесконечно малыми величинами.

Возьмем пример с пересечением комнаты. Действительно, в каждой точке пути вам надо пройти половину оставшегося пути, но только *на это вам понадобится в два раза меньше времени*. Чем меньший путь осталось пройти, тем меньше времени на это понадобится. Таким образом, вычисляя время, нужное для того, чтобы пересечь комнату, мы складываем бесконечное число бесконечно малых интервалов. Однако сумма всех этих интервалов не бесконечна (иначе пересечь комнату было бы невозможно), а равна некоторому конечному числу — и поэтому мы *можем* пересечь комнату за конечное время.

Такой ход доказательства аналогичен нахождению предела в дифференциальном исчислении. Попробуем объяснить идею предела в терминах парадокса Зенона. Если мы разделим расстояние, которое мы прошли, пересекая комнату, на время, которое мы на это потратили, мы получим среднюю скорость прохождения этого интервала. Но хотя и расстояние и время уменьшаются (и в конечном счете стремятся к нулю), их отношение может быть конечным — собственно, это и есть скорость вашего движения. Когда и расстояние, и время стремятся к нулю, это отношение называется пределом скорости. В своем парадоксе Зенон ошибочно исходит из того, что, когда расстояние стремится к нулю, время остается прежним.

Но мое любимое опровержение парадокса Зенона связано не с дифференциальным исчислением Ньютона, а с цитатой из скетча «Второго города», комедийного театра в моем родном Чикаго. В этом скетче лектор описывает различные философские проблемы. Дойдя до парадокса об Ахилле и черепахе, он произносит следующее:

Но это же просто смешно. Каждый сидящий в этой комнате может выиграть гонку с черепахой. Даже такой старый и степенный философ, как Бертран Рассел, — даже он может обогнать черепаху. Но если он и не сможет победить ее, он сможет ее перехитрить!

По-моему, неплохой итог для всего сказанного выше.

Парадокс Ольберса

Почему ночное небо кажется нам черным?



ГЕНРИХ ВИЛЬГЕЛЬМ МАТТЕУС ОЛЬБЕРС

(Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers, 1758–1840) — немецкий астроном, родился в Арбегене (Arbegen). Получил медицинское образование и успешно практиковал офтальмологию в северогерманском городе Бремен (Bremen). В свободное время увлекался астрономией. За долгие годы скопил одно из лучших библиотечных собраний трудов по астрономии в Европе — впоследствии это собрание было приобретено Пулковской обсерваторией и легло в основу ее богатейшей библиотеки. Ольберс открыл астероиды Паллада и Веста, а также предложил новые методы расчета орбит комет.

Самый большой парадокс с точки зрения истории науки здесь состоит, пожалуй, в том, почему именно фамилия немецкого астронома Вильгельма Ольберса оказалась закрепленной в названии этого загадочного явления. На самом деле это один из редких случаев, когда в названии феномена или закона фигурирует отнюдь не имя того, кто его впервые сформулировал. Историки науки скажут вам, что впервые проблема была упомянута в 1720 году английским астрономом Эдмундом Галлеем (Edmund Halley, 1656–1742), затем, независимо от него, в 1742 году ее сформулировал швейцарец Жан Филипп де Шезо (Jean Philippe de Chéseaux, 1781–1851) и дал на нее ответ, в принципе не отличающийся от предложенного в 1823 году Ольберсом.

Так называемый *фотометрический парадокс Ольберса* формулируется достаточно просто: если Вселенная бесконечна, однородна и стационарна (а в XVIII–XIX веках астрономы в этом не сомневались), то в небе — в каком направлении ни посмотри — рано или поздно окажется звезда. То есть *все небо* должно быть сплошным образом заполнено яркими светящимися точками звезд. То есть в ночи небо должно ярко светиться. А мы почему-то наблюдаем сплошное черное небо лишь с отдельными звездами.

Ольберс объяснил это явление поглощением света в межзвездном пространстве в силу того, что оно частично заполнено поглощающим свет веществом, например, межзвездными пылевыми облаками. Однако с появлением первого начала термодинамики, это объяснение стало отнюдь не бесспорным, поскольку, поглощая свет, межзвездное вещество неизбежно разогрелось бы и само начало испускать свет.

Окончательно парадокс Ольберса удалось разрешить лишь в XX столетии. Теперь мы знаем (см. закон Хаббла), что Вселенная имеет конечный возраст. Если, как предполагается, большой взрыв случился 15 миллиардов лет назад, астрономы способны наблюдать лишь светящиеся объекты, удаленные от нас на расстояние не более 15 млрд световых лет. Поэтому число звезд в ночном небе конечно, хотя и огромно, и поэтому не по каждому направлению наблюдения мы видим звезду. Кроме того, мы знаем, что звезды не вечны — со временем они умирают и перестают излучать свет (см. эволюция звезд). Поэтому, даже если в направлении наблюдения имеется звезда, это вовсе не означает, что она обязана светиться, поскольку это может оказаться древняя звезда, ядерное горючее внутри которой давно израсходовано. Любого из приведенных выше объяснений достаточно для того, чтобы считать вопрос с парадоксом Ольберса исчерпанным, хотя во времена самого Ольберса и его предшественников явления, объясняющие его, естественно, известны не были (кроме гипотезы о поглощении света в межзвездном пространстве).

Парадокс Ферми

Если разумная жизнь во Вселенной существует, то почему она не посылает в космос никаких сигналов и вообще никак себя не проявляет?

XVI	●	ПРИНЦИП КОПЕРНИКА
1950	●	ПАРАДОКС ФЕРМИ
1961	●	ФОРМУЛА ДРЕЙКА
1961	●	АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП

Поиск внеземного разума — или, как сегодня принято сокращенно называть это занятие по его английской аббревиатуре, *SETI* (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) — впервые был поставлен на повестку дня современной науки на конференции в радиообсерватории в Грин-Бэнке (Green Bank), штат Западная Виргиния, США, в 1961 году. Было отмечено, что, получив в свое распоряжение мощные радиотелескопы, ученые могут теперь заняться отслеживанием сигналов, направляемых в нашу сторону внеземными цивилизациями из-за пределов Солнечной системы (при условии, что такие цивилизации существуют и стремятся к установлению контакта). В те оптимистичные ранние дни энтузиасты SETI предполагали, что во Вселенной существуют тысячи и тысячи цивилизаций, объединенных в «галактические клубы», и что мы находимся на пороге вступления в такое межзвездное сообщество нашей Галактики (см. ФОРМУЛА ДРЕЙКА).

Возможно, они проявили бы большую сдержанность, если бы прислушались к мнению, высказанному за одиннадцать лет до этого американским физиком итальянского происхождения, нобелевским лауреатом Энрико Ферми. Как-то раз за обедом в Лос-Аламосе (Los Alamos), штат Калифорния, США, выслушав доводы своих коллег в пользу существования в Галактике великого множества высокоразвитых технологических цивилизаций, он после некоторой паузы просто спросил: «Ну и где они в таком случае?»

С тех пор этот аргумент, будучи сформулирован теми или иными словами, является главными вилами в бок сообщества SETI. Приведу пример одной из его развернутых формулировок: «Законы природы едины повсюду во Вселенной, поэтому любая высокоразвитая цивилизация располагает теми же научно-техническими и технологическими возможностями, что и человечество. Уже сейчас у нас имеются вполне реальные проекты межзвездных космолетов, способных развивать скорость порядка 10% скорости света, и такие корабли в обозримом будущем вполне могут доставить людей к ближайшим звездам. Любая цивилизация, располагающая такими кораблями, могла бы расселиться по всей Галактике и колонизировать пригодные для жизни планеты всего за несколько миллионов лет — срок огромный с точки зрения человеческой истории, но по космической шкале это просто миг. Если бы в Галактике сегодня действительно существовали тысячи цивилизаций, первые из них добрались бы сюда миллионы лет назад. Майкл Харт (Michael H. Hart, р. 1932) в 1975 году выдвинул аргумент, что само по себе отсутствие инопланетян на Земле прямо сейчас является убедительным доказательством отсутствия высокоразвитых внеземных цивилизаций как таковых (поэтому этот парадокс иногда называют еще *парадоксом Ферми—Харта*). Так действительно, где же они?

И от этого вопроса не отделаешься утверждениями наподобие того, что инопланетяне не склонны к путешествиям (*гипотеза картофельных грядок*) или исподволь наблюдают за нами со стороны (*гипотеза зоопарка*, где человечество является редким и оберегаемым экспонатом). Обе эти гипотезы — и многие другие — страдают одним неисправимым недостатком: они исходят из неоправданной предпо-

ЭНРИКО ФЕРМИ (Enrico Fermi, 1901–54) — итальянско-американский физик. Родился в Риме, окончил Пизанский университет, стал профессором физики Римского университета, когда ему не было и тридцати лет. В 1938 году эмигрировал в Америку. Ферми прославился тем, что ему первому удалось получить управляемую ядерную реакцию в построенном по его проекту реакторе «штабельного типа» (в штабель графитовых блоков вводятся урановые стержни), причем для постройки реактора хватило площади заброшенного теннисного корта на территории Чикагского университета. Сотый элемент периодической системы Менделеева назван фермием в его честь.

сылки, что *всем* внеземных цивилизациям присуще какое-либо общее качество: то ли все внеземные цивилизации склонны к патологическому домоседству, то ли у всех внеземных цивилизаций действует (и, к тому же, неукоснительно соблюдается!) один и тот же этический принцип невмешательства в инопланетные дела. Но ведь если цивилизаций в обозримом космосе тысячи, такое их единообразие практически невозможно по теории вероятностей! В конце концов, человечество устраивает на Земле заповедники для охраны редкой дичи, однако это далеко не всегда мешает браконьерскому промыслу.

Могу привести пример, почему гипотеза зоопарка, с моей точки зрения, несостоятельна. Когда я состоял во втором браке, тестем мне доводился егерь из заповедника в округе Карбон, штат Монтана, — безлюднейший и живописнейший уголок Северной Америки представляет собой эта местность. На десятки миль вокруг там нет ни одного населенного пункта, практически отсутствуют подъездные пути, однако практически ежедневно моему тестю приходилось иметь дело с браконьерами, охотившимися на дичь и ловившими рыбу в местных горных озерах. Так велики ли шансы, что *все без исключения* внеземные цивилизации не только запрещают своим представителям вступать в контакт с человечеством, но и способны обеспечить соблюдение этого запрета? По-моему, шансов мало.

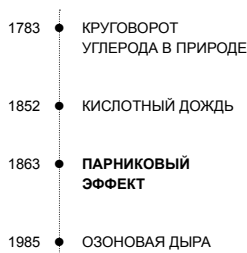
Начиная с 1961 года поиски радиосигналов от внеземных цивилизаций не раз прекращались, потом снова возобновлялись. Результаты же были неизменно отрицательными — свидетельств существования внеземного разума как не было, так и нет. Историю таких наблюдений можно использовать для очерчивания в дальнем космосе границ, за которыми существование технологически развитых цивилизаций все еще вероятно. Сегодня мы доподлинно знаем, например, что в радиусе 1000 световых лет от Земли в космосе нет ни одной цивилизации, которая генерировала бы сигналы каким-либо из известных нам способов.

Ученые, занимающиеся SETI, классифицируют цивилизации по их способности генерировать энергию. Цивилизации типа I генерируют энергию в объемах, примерно равных объемам энергии, получаемой их планетой от своей звезды, а цивилизации типа II — порядка энергии, излучаемой их звездой. (По этой классификации человечество относится к «типу 0,7» — на Земле вырабатывается 70% от количества энергии, необходимого, чтобы называться цивилизацией типа I.) Сегодня можно с уверенностью сказать, что цивилизаций типа I нет в радиусе десяти тысяч световых лет от Земли, а цивилизаций типа II — не только в пределах нашей Галактики, но и в сопредельных с нашей галактиках, составляющих с нею единое галактическое скопление. Предположительно эти пределы будут расширяться и далее.

Как вы, наверное, уже догадались, к перспективе обнаружения внеземных цивилизаций я отношусь весьма скептически. Тем не менее я твердо уверен в необходимости продолжения их поиска. Это, пожалуй, единственное научное исследование, результаты которого окажутся фантастическими при любом его исходе.

Парниковый эффект

Средняя температура поверхности Земли (или другой планеты) повышается за счет наличия у нее атмосферы



Садоводы хорошо знакомы с этим физическим явлением. Внутри парника всегда теплее, чем снаружи, и это помогает выращивать растения, особенно в холодное время года. Вы можете почувствовать аналогичный эффект, когда находитесь в автомобиле. Причина его состоит в том, что Солнце с температурой поверхности около 5000°C излучает главным образом видимый свет — часть ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА, к которой чувствительны наши глаза. Поскольку атмосфера в значительной степени прозрачна для видимого света, солнечное излучение легко проникает к поверхности Земли. Стекло также прозрачно для видимого света, так что солнечные лучи проходят внутрь парника и их энергия поглощается растениями и всеми объектами, находящимися внутри. Далее, согласно ЗАКОНУ СТЕФАНА—БОЛЬЦМАНА, каждый объект излучает энергию в какой-либо части электромагнитного спектра. Объекты с температурой около 15°C — средней температурой у поверхности Земли — излучают энергию в инфракрасном диапазоне. Таким образом, объекты в парнике испускают инфракрасное излучение. Однако инфракрасное излучение не может легко проходить сквозь стекло, поэтому температура внутри парника повышается.

Планета с устойчивой атмосферой, такая как Земля, испытывает практически такой же эффект — в глобальном масштабе. Чтобы поддерживать постоянную температуру, Земле необходимо самой излучать столько же энергии, сколько она поглощает из видимого света, излучаемого в нашу сторону Солнцем. Атмосфера служит как бы стеклом в парнике — она не столь прозрачна для инфракрасного излучения, как для солнечного света. Молекулы различных веществ в атмосфере (важнейшие из них — углекислый газ и вода) поглощают инфракрасное излучение, действуя как *парниковые газы*. Таким образом, инфракрасные фотоны, излучаемые земной поверхностью, не всегда уходят прямо в космос. Некоторые из них поглощаются молекулами парниковых газов в атмосфере. Когда эти молекулы вторично излучают энергию, которую они поглощали, они могут излучать ее как в сторону космоса, так и внутрь, обратно к поверхности Земли. Присутствие таких газов в атмосфере создает эффект укрывания Земли одеялом. Они не могут прекратить утечку тепла наружу, но позволяют сохранить тепло около поверхности более долгое время, поэтому поверхность Земли значительно теплее, чем была бы в отсутствие газов. Без атмосферы средняя температура поверхности составляла бы –20°C, что намного ниже точки замерзания воды.

Важно понимать, что парниковый эффект на Земле был всегда. Без парникового эффекта, обусловленного наличием углекислого газа в атмосфере, океаны давно бы замерзли и высшие формы жизни не появились бы. В настоящее время научные дебаты о парниковом эффекте идут по вопросу *глобального потепления*: не слишком ли мы, люди, нарушаем энергетический баланс планеты в результате сжигания ископаемых видов топлива и прочей

хозяйственной деятельности, добавляя при этом излишнее количество углекислого газа в атмосферу? Сегодня ученые сходятся во мнении, что мы ответственны за повышение естественного парникового эффекта на несколько градусов.

Парниковый эффект имеет место не только на Земле. В действительности самый сильный парниковый эффект, о котором мы знаем, — на соседней планете, Венере. Атмосфера Венеры почти целиком состоит из углекислого газа, и в результате поверхность планеты разогрета до 475°C. Климатологи полагают, что мы избежали такой участи благодаря наличию на Земле океанов. Океаны поглощают атмосферный углерод, и он накапливается в горных породах, таких как известняк, — посредством этого углекислый газ удаляется из атмосферы. На Венере нет океанов, и весь углекислый газ, который выбрасывают в атмосферу вулканы, там и остается. В результате мы наблюдаем на Венере *неуправляемый* парниковый эффект.

Периодическая система Менделеева

Если химические элементы расположить в порядке возрастания атомных номеров, то их химические свойства укладываются в определенную схему

1860-е	●	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕНДЕЛЕЕВА
1919	●	ПРАВИЛО ОКТЕТА
ок. 1920	●	ПРИНЦИП АUFBAU
1924	●	ПРИНЦИП ЗАПРЕТА ПАУЛИ
1930-е	●	ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

* Эти вещества называли инертными газами, но название было изменено в 1962 году, когда было обнаружено, что ксенон может все-таки реагировать с фтором. — Прим. автора

Дмитрий Иванович Менделеев любил рассказывать, что идея периодической системы пришла ему во сне. Как и многие химики середины XIX века, он пытался как-то систематизировать огромное количество открываемых химических элементов. Менделеев тогда работал над книгой «Основы химии», и ему все время казалось, что для веществ, которые он описывал, непременно должен существовать какой-то способ упорядочивания, который сделает их больше чем просто случайным набором элементов. Именно такой способ упорядочивания, такой закон он и увидел во сне.

В своей таблице (сегодня мы ее называем периодической таблицей, или системой, элементов) Менделеев расположил химические элементы по рядам в порядке возрастания их массы, подобрав длину рядов таким образом, чтобы химические элементы в одной колонке имели похожие химические свойства. Так, например, правая крайняя колонка таблицы содержит гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон. Это *благородные газы** — вещества, которые неохотно реагируют с другими элементами и проявляют низкую химическую активность. В противоположность этому элементы самой левой колонки — литий, натрий, калий и др. — реагируют с другими веществами бурно, процесс носит взрывной характер. Аналогичные утверждения можно сделать и о химических свойствах элементов в других колонках таблицы — внутри колонки эти свойства подобны, но варьируются при переходе от одной колонки к другой.

Нельзя не отдать дань смелости мысли Менделеева, решившего опубликовать свои результаты. С одной стороны, таблица в первоначальном виде содержала много пустых клеток. Элементы, о существовании которых мы сейчас знаем, тогда еще только предстояло открыть. (Действительно, открытие этих элементов, включая скандий и германий, стало одним из величайших триумфов периодической системы.) С другой стороны, Менделееву пришлось допустить, что атомные веса некоторых элементов были измерены неправильно, так как в противном случае они не вписались бы в систему. И опять оказалось, что он был прав.

Периодическая система в своем первом варианте просто отражала существующее в природе положение дел. Как и в случае с кеплеровскими законами движения планет, таблица никак не объясняла, почему это должно быть именно так. И только с появлением квантовой механики и в особенности принципа запрета Паули стал понятен истинный смысл расположения элементов в периодической таблице.

Сегодня мы смотрим на периодическую таблицу с точки зрения того, как электроны заполняют электронные слои в атоме (см. принцип АUFBAU). Химические свойства атома (то есть то, какого рода связи будут образованы с другими атомами) определяются числом электронов в наружном слое. Так, у водорода и лития только по одному внешнему электрону, поэтому в химических реакциях они ведут себя похоже. В свою очередь, гелий и неон оба имеют заполненные внешние оболочки и тоже ведут себя похоже, но совершенно не так, как водород и литий.

																1 H																	2 He
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																
55 Cs	56 Ba	57 to 71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Ti	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																
87 Fr	88 Ra	89 to 103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub		114 Uuq		116 Uuh		118 Uuo																
Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																	
Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																	

Таблица, без которой неммыслима химия. Первая колонка содержит щелочные металлы, вторая — щелочно-земельные металлы. Самые правые — благородные газы. Слева от них, над «ступенькой», располагаются неметаллы, под «ступенькой» — другие металлы. Между ними и щелочно-земельными металлами — переходные металлы. В отдельные ряды выделены лантаноиды и актиноиды. Водород (H) занял отдельное место вверху таблицы

Химические элементы вплоть до урана (содержит 92 протона и 92 электрона) встречаются в природе. Начиная с номера 93 идут искусственные элементы, созданные в лаборатории. Пока самый большой заявленный учеными номер — 118.

ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ МЕНДЕЛЕЕВ

(1834–1907) — русский химик. Родился в Сибири, в городе Тобольске, в семье был младшим из 17 детей. Детство Менделеева было нелегким. Его отец, школьный учитель, ослеп, и матери, чтобы содержать семью, пришлось управлять стекольным заводом. Отец умер, когда Менделееву было 13 лет, затем сгорел завод, а после этого умерла мать. Свои научные знания мальчик почерпнул у мужа сестры.

Перед смертью мать определила Дмитрия в Педагогический институт в Санкт-Петербурге. Там Менделеев получил научную степень по химии и продолжил свое обучение во Франции и Германии. В Карлсруэ он встретил итальянского химика Станислава Канницаро (Stanislao Cannizzaro, 1826–1910), чья идея о разграничении понятий атомного и молекулярного веса произвела большое впечатление на русского ученого. Вернувшись в Санкт-Петербург, Менделеев в 1864 году стал профессором химии Технологического института.

Периодическая таблица, которую Менделеев составлял с конца 1860-х годов, не сразу получила

признание, но впоследствии сделала его самым известным русским ученым. В 1890 году он высказался в поддержку студентов, выступавших за социальную реформу, за что был уволен из университета. Но большое всего судьба была несправедлива к Менделееву, когда в 1906 году ему не хватило всего одного голоса для получения Нобелевской премии в области химии. Премия досталась Анри Муассану (Henri Moissan, 1852–1907), которому удалось выделить фтор — всего лишь один химический элемент, в то время как Менделеев создал классификацию их всех.



Поверхностное натяжение

Силы притяжения между молекулами на поверхности жидкости удерживают их от движения за ее пределы

Молекулы жидкости испытывают силы взаимного притяжения — на самом деле именно благодаря этому жидкость моментально не улетучивается. На молекулы внутри жидкости силы притяжения других молекул действуют со всех сторон и поэтому взаимно уравновешивают друг друга. Молекулы же на поверхности жидкости не имеют соседей снаружи, и результирующая сила притяжения направлена внутрь жидкости. В итоге вся поверхность воды стремится стянуться под воздействием этих сил. По совокупности этот эффект приводит к формированию так называемой силы поверхностного натяжения, которая действует вдоль поверхности жидкости и приводит к образованию на ней подобия невидимой тонкой и упругой пленки.

Одним из следствий эффекта поверхностного натяжения является то, что для увеличения площади поверхности жидкости — ее растяжения — нужно проделать механическую работу по преодолению сил поверхностного натяжения. Следовательно, если жидкость оставить в покое, она стремится принять форму, при которой площадь ее поверхности окажется минимальной. Такой формой, естественно, является сфера — вот почему дождевые капли в полете принимают почти сферическую форму (я говорю «почти», потому что в полете капли слегка вытягиваются из-за сопротивления воздуха). По этой же причине капли воды на кузове покрытого свежим воском автомобиля собираются в бусинки.

Силы поверхностного натяжения используются в промышленности — в частности, при отливке сферических форм, например ружейной дроби. Каплям расплавленного металла просто дают застывать на лету при падении с достаточной для этого высоты, и они сами застывают в форме шариков, прежде чем упадут в приемный контейнер.

Можно привести много примеров сил поверхностного натяжения в действии из нашей будничной жизни. Под воздействием

Жук-плавунец умело использует силу поверхностного натяжения, удерживающую его на поверхности воды. Он не тонет, поскольку вес жука меньше силы поверхностного натяжения



ветра на поверхности океанов, морей и озер образуется рябь, и эта рябь представляет собой волны, в которых действующая вверх сила внутреннего давления воды уравнивается действующей вниз силой поверхностного натяжения. Две эти силы чередуются, и на воде образуется рябь, подобно тому как за счет попеременного растяжения и сжатия образуется волна в струне музыкального инструмента.

Будет жидкость собираться в «бусинки» или ровным слоем растекаться по твердой поверхности, зависит от соотношения сил межмолекулярного взаимодействия в жидкости, вызывающих поверхностное натяжение, и сил притяжения между молекулами жидкости и твердой поверхностью. В жидкой воде, например, силы поверхностного натяжения обусловлены водородными связями между молекулами (см. химические связи). Поверхность стекла водой смачивается, поскольку в стекле содержится достаточно много атомов кислорода, и вода легко образует водородные связи не только с другими молекулами воды, но и с атомами кислорода. Если же смазать поверхность стекла жиром, водородные связи с поверхностью образовываться не будут и вода соберется в капельки под воздействием внутренних водородных связей, обуславливающих поверхностное натяжение.

В химической промышленности в воду часто добавляют специальные реагенты-смачиватели — *сурфактанты*, — не дающие воде собираться в капли на какой-либо поверхности. Их добавляют, например, в жидкие моющие средства для посудомоечных машин. Попадая в поверхностный слой воды, молекулы таких реагентов заметно ослабляют силы поверхностного натяжения, вода не собирается в капли и не оставляет на поверхности грязных крапин после высыхания (см. подобное растворяется в подобном).

Подобное растворяется в подобном

*Вещество лучше
растворяется в
жидкости, если
оно обладает той
же полярностью и
сходными прочими
характеристиками*

Всем известно, что масло и вода не смешиваются: если мы добавим каплю масла в стакан с водой, с этой каплей ничего не произойдет, она не растворится. С другой стороны, если в воду капнуть спирт (или этанол, как говорят химики), капля сразу исчезнет, потому что она растворилась. Это можно проверить, добавив каплю красного вина в стакан с водой. Химики объясняют такое поведение веществ эмпирическим правилом «подобное растворяется в подобном».

Дело в том, что вода — полярная молекула. Электроны в молекуле воды большую часть времени проводят около кислорода, и, хотя суммарный электрический заряд всей молекулы равен нулю, молекула воды со стороны водорода становится положительно заряженной. Молекула этанола также полярная, и поэтому между молекулами воды и этанола могут образовываться водородные связи (см. химические связи). В каком-то смысле вода и этанол «хватаются» друг за друга. При перемешивании этих двух веществ их молекулы взаимодействуют и этанол быстро растворяется.

С другой стороны, масло состоит из неполярных молекул, поэтому между ними и молекулами воды нет связей. И вода не может «схватиться» за углеводородные молекулы масла. В свою очередь, масло не может присоединиться достаточно прочно к какой-либо молекуле воды, чтобы оттолкнуть другие молекулы воды, как происходило бы при растворении. Масло не «подобно» воде и не растворяется в ней.

В обычной жизни мы часто используем правило «подобное растворяется в подобном», хотя, наверное, не отдаем себе в этом отчета. Мы применяем моющие вещества — молекулы с особой структурой. У них длинный углеводородный хвост (неполярный, как и у масла) присоединен к сильно полярной головке. И, когда такая молекула встречается со слоем жира на поверхности, которую мы моем, хвост проникает внутрь этого слоя, а полярные головки торчат наружу. Эти головки затем связываются с полярными молекулами воды, и жир удаляется с поверхности. Вот за счет чего моющие средства отстирывают одежду и моют посуду.

Полосная теория твердотельной проводимости

Электрические свойства твердого тела зависят от того, как электроны составляющих его атомов распределяются по орбитальным уровням при его кристаллизации

ок. 420 до н.э.	●	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1900	●	ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ
1913	●	АТОМ БОРА
1926	●	УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1926	●	ПОЛОСНАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Как мы знаем из модели атома Бора, электроны в атоме расположены на различных орбитальных уровнях, характеризующихся различной удаленностью от ядра и, соответственно, различной энергией связи электрона с ядром. При образовании кристаллической решетки твердого тела орбиты электронов несколько деформируются и, соответственно, смещаются энергетические уровни удержания электронов на них. Это смещение можно представить себе двояко. С одной стороны, можно заметить, что, находясь в составе твердого тела, электрон не может не подвергаться электрическому воздействию со стороны соседних атомов — он притягивается к их ядрам и отталкивается их электронами. С другой стороны, два электрона, в силу принципа запрета Паули, не могут находиться на одной орбите в одном и том же энергетическом состоянии, то есть два любых электрона в любом случае находятся на несколько отличающихся друг от друга энергетических уровнях.

В любом случае можно понять, что при образовании твердого тела в смысле кристаллизации атомов в жесткую структуру каждый энергетический электронный уровень в атомах расщепляется на ряд близких подуровней, объединенных в *энергетический слой* или *полосу*. Все электроны, находящиеся в данной энергетической полосе, обладают очень близкими энергиями. На близких к ядру орбитах электроны находятся в связанном состоянии — они неспособны оторваться от ядра, поскольку, хотя теоретически перескок электрона из одного атома в другой — на ту же по энергии орбиту — возможен, все нижние орбиты соседних атомов заняты и реальная миграция электронов между ними невозможна.

Поэтому самой важной с точки зрения теории электрической проводимости является *валентная полоса* — размытый на подуровни внешний слой электронной оболочки атомов, который у большинства веществ не заполнен (исключение — инертные газы, но они кристаллизуются лишь при сверхнизких температурах). Поскольку внешний слой не насыщен электронами, в нем всегда имеются свободные подуровни, которые могут занять электроны из внешней оболочки соседних атомов. И электроны действительно проявляют удивительную подвижность, хаотично мигрируя от атома к атому в пределах валентного слоя, а в присутствии внешней разности электрических потенциалов они дружно «маршируют» в одном направлении, и мы наблюдаем электрический ток. Именно поэтому нижний слой, в котором имеются свободно перемещающиеся электроны, принято называть *проводящим слоем* — при этом это даже не обязательно самый верхний (валентный) орбитальный слой электронов в атоме.

Многослойную теорию строения твердого тела можно использовать для объяснения электрических свойств вещества. Если валентный слой твердого тела заполнен, а до следующей незаполненной энергетической полосы далеко, вероятность того, что электрон на нее запрыгнет, близка к нулю. Значит, электроны прочно привязаны к атомам и практически не образуют проводя-

щего слоя. Соответственно, и под воздействием электрической разности потенциалов с места они не двигаются, и мы имеем *изолятор* — вещество, не проводящее электрический ток.

Проводник, с другой стороны, как раз представляет собой вещество с частично заполненным валентным слоем, внутри которого электроны имеют значительную свободу перемещения от атома к атому. Наконец, *полупроводники* — это кристаллические вещества с заполненным валентным слоем, и в этом они подобны изоляторам, однако энергетический разрыв между валентным уровнем и следующим, проводящим энергетическим уровнем у них настолько незначителен, что электроны допрыгивают до него при обычных температурах чисто в силу теплового движения.

Постоянная Больцмана

Постоянная Больцмана перекидывает мост из макромира в микромир, связывая температуру с кинетической энергией молекул

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ
1872	• ПОСТОЯННАЯ БОЛЬЦМАНА

Людвиг Больцман — один из создателей молекулярно-кинетической теории газов, на которой зиждется современная картина взаимосвязи между движением атомов и молекул с одной стороны и макроскопическими свойствами материи, такими как температура и давление, с другой. В рамках такой картины давление газа обусловлено упругими ударами молекул газа о стенки сосуда, а температура — скоростью движения молекул (а точнее, их кинетической энергией). Чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура.

Постоянная Больцмана дает возможность напрямую связать характеристики микромира с характеристиками макромира — в частности, с показаниями термометра. Вот ключевая формула, устанавливающая это соотношение:

$$\frac{1}{2}mv^2 = kT,$$

где m и v — соответственно масса и средняя скорость движения молекул газа, T — температура газа (по абсолютной шкале Кельвина), а k — постоянная Больцмана. Это уравнение прокладывает мостик между двумя мирами, связывая характеристики атомного уровня (в левой части) с *объемными свойствами* (в правой части), которые можно измерить при помощи человеческих приборов, в данном случае термометров. Эту связь обеспечивает постоянная Больцмана k , равная $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К.

Раздел физики, изучающий связи между явлениями микромира и макромира, называется *статистической механикой*. В этом разделе едва ли найдется уравнение или формула, в которых не фигурировала бы постоянная Больцмана. Одно из таких соотношений было выведено самим австрийцем, и называется оно просто *уравнение Больцмана*:

$$S = k \log p + b,$$

где S — энтропия системы (см. второе начало термодинамики), p — так называемый *статистический вес* (очень важный элемент статистического подхода), а b — еще одна константа.

Всю жизнь Людвиг Больцман в буквальном смысле опережал свое время, разрабатывая основы современной атомной теории строения материи, вступая в яростные споры с подавляющим консервативным большинством современного ему научного сообщества, считавшего атомы лишь условностью, удобной для расчетов, но не объектами реального мира. Когда его статистический подход не встретил ни малейшего понимания даже после появления специальной теории относительности, Больцман в минуту глубокой депрессии покончил с собой. Уравнение Больцмана высечено на его надгробном памятнике.



ЛЮДВИГ ЭДВАРД БОЛЬЦМАН

(Ludwig Edward Boltzmann, 1844–1906) — австрийский физик. Родился в Вене в семье госслужащего. Учился в Венском университете на одном курсе с Йозефом Стефаном (см. закон Стефана—Больцмана). Защитившись в 1866 году, продолжил научную карьеру, занимая в разное время профессорские должности

на кафедрах физики и математики университетов Граца, Вены, Мюнхена и Лейпцига. Будучи одним из главных сторонников реальности существования атомов, сделал ряд выдающихся теоретических открытий, проливающих свет на то, каким образом явления на атомном уровне сказываются на физических свойствах и поведении материи.

Постоянная Планка

Постоянная Планка определяет границу между макромиром, где действуют законы механики Ньютона, и микромиром, где действуют законы квантовой механики



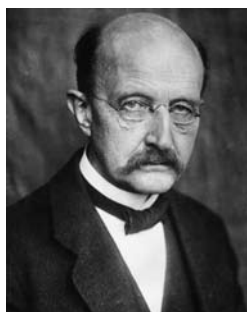
Макс Планк — один из основоположников квантовой механики — пришел к идеям квантования энергии, пытаясь теоретически объяснить процесс взаимодействия между недавно открытыми электромагнитными волнами (см. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА) и атомами и тем самым разрешить проблему излучения черного тела. Он понял, что для объяснения наблюдаемого спектра излучения атомов нужно принять за данность, что атомы излучают и поглощают энергию порциями (которые ученый назвал *квантами*) и лишь на отдельных волновых частотах. Энергия, переносимая одним квантом, равна:

$$E = h\nu,$$

где ν — частота излучения, а h — *элементарный квант действия*, представляющий собой новую универсальную константу, получившую вскоре название *постоянная Планка*. Планк же первым и рассчитал ее значение на основе экспериментальных данных $h = 6,548 \times 10^{-34}$ Дж·с (в системе СИ); по современным данным $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с. Соответственно, любой атом может излучать широкий спектр связанных между собой дискретных частот, который зависит от орбит электронов в составе атома. Вскоре Нильс Бор создаст стройную, хотя и упрощенную модель атома Бора, согласующуюся с распределением Планка.

Опубликовав свои результаты в конце 1900 года, сам Планк — и это видно из его публикаций — сначала не верил в то, что кванты — физическая реальность, а не удобная математическая модель. Однако, когда пять лет спустя Альберт Эйнштейн опубликовал статью, объясняющую фотоэлектрический эффект на основе *квантования энергии* излучения, в научных кругах формулу Планка стали воспринимать уже не как теоретическую игру, а как описание реального физического явления на субатомном уровне, доказывающее квантовую природу энергии.

Постоянная Планка фигурирует во всех уравнениях и формулах квантовой механики. Она, в частности, определяет масштабы, начиная с которых вступает в силу принцип неопределенности Гейзенберга. Грубо говоря, постоянная Планка указывает нам нижний предел пространственных величин, после которого нельзя не принимать во внимание квантовые эффекты. Для песчинок, скажем, неопределенность произведения их линейного размера на скорость настолько незначительна, что ею можно пренебречь. Иными словами, постоянная Планка проводит границу между макромиром, где действуют законы механики Ньютона, и микромиром, где вступают в силу законы квантовой механики. Будучи получена всего лишь для теоретического описания единичного физического явления, постоянная Планка вскоре стала одной из фундаментальных констант теоретической физики, определяемых самой природой мироздания.



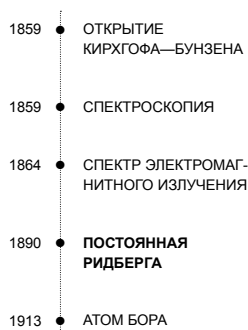
МАКС КАРЛ ЭРНСТ ЛЮДВИГ ПЛАНК

(Max Karl Ernst Ludwig Plank, 1858–1947) — немецкий физик. Родился в г. Киль в семье профессора юриспруденции. Будучи пианистом-виртуозом, Планк в юности был вынужден сделать нелегкий выбор между наукой и музыкой (рассказывают, что перед Первой мировой войной на досуге пианист Макс Планк часто составлял весьма профессиональный классический дуэт со скрипачом Альбертом Эйн-

штейном. — *Прим. переводчика*). Докторскую диссертацию по второму началу термодинамики Планк защитил в 1889 году в Мюнхенском университете и в том же году стал преподавателем, а с 1892 года — профессором Берлинского университета, где и проработал до своего выхода на пенсию в 1928 году. Планк по праву считается одним из отцов квантовой механики. Сегодня его имя носит целая сеть немецких научно-исследовательских институтов.

Постоянная Ридберга

Длины волн излучения атома определенного типа зависят от разности обратных квадратов расстояний между квантовыми числами



Во второй половине XIX столетия ученые поняли, что атомы различных химических элементов излучают свет строго определенных частот и длин волны, и такое излучение имеет *линейчатый спектр*, благодаря чему их свет имеет характерную окраску (см. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА). Чтобы убедиться в этом, достаточно взглянуть на уличные фонари. Обратите внимание, что на крупных автомагистралях яркие лампы дневного света имеют обычно желтоватый оттенок. Это следствие того, что они заполнены парами натрия, а в видимом спектре излучения натрия интенсивнее всего проявляются две спектральные линии желтого оттенка.

С развитием СПЕКТРОСКОПИИ стало ясно, что атом любого химического элемента имеет свой набор спектральных линий, по которым его можно вычислить даже в составе далеких звезд, как преступника по отпечаткам пальцев. В 1885 году швейцарский математик Иоганн Бальмер (Johann Balmer, 1825–98) сделал первый шаг в направлении расшифровки закономерности расположения спектральных линий в излучении атома водорода, эмпирически выведя формулу, описывающую длины волн в видимой части спектра атома водорода (так называемая *спектральная линия Бальмера*). Водород — самый простой по структуре атом, и поэтому математическое описание расположения линий его спектра было получено раньше всего. Четыре года спустя шведский физик Йоханнес Ридберг обобщил формулу Бальмера, распространив ее на все участки СПЕКТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ атома водорода, включая ультрафиолетовую и инфракрасную области. Согласно формуле Ридберга, длина световой волны, которую излучает атом водорода, равна

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где R — постоянная Ридберга, а n_1 и n_2 — натуральные числа (при этом $n_1 < n_2$). В частности, при $n_1 = 2$ и $n_2 = 3, 4, 5, \dots$ наблюдаются линии видимой части спектра излучения водорода ($n_2 = 3$ — красная линия; $n_2 = 4$ — зеленая; $n_2 = 5$ — голубая; $n_2 = 6$ — синяя) — это так называемая *серия Бальмера*. При $n_1 = 1$ водород дает спектральные линии в ультрафиолетовом диапазоне частот (*серия Лаймана*); при $n_2 = 3, 4, 5, \dots$ излучение переходит в инфракрасную часть электромагнитного спектра. Значение R было определено экспериментально.

Изначально выявленная Ридбергом закономерность считалась чисто эмпирической. Однако после появления модели атома БОРА стало ясно, что она имеет глубокий физический смысл и работает отнюдь не случайно. Рассчитав энергию электрона на n -й орбите от ядра, Бор установил, что она пропорциональна именно $-1/n^2$.

ЙОХАННЕС РОБЕРТ РИДБЕРГ

(Johannes Robert Rydberg, 1854–1919) — шведский физик. Родился в Лунде. После окончания местного университета и защиты диссертации в 1879 году остался работать в Лунде на всю жизнь, сначала в качестве доцента, а с 1901 года — профессора. Основные работы посвятил изучению периодической

СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА и атомных спектров и в конечном итоге увязал периодическую систему со строением атомов. Показал, что расположение линий в атомных эмиссионных спектрах может быть описано формулами, аналогичными формуле Бальмера для спектра водорода. Постоянная, входящая в эти формулы, названа именем Ридберга.

Правило Аллена

У теплокровных животных (то есть животных, которые выделяют тепло в процессе обмена веществ), живущих в холодном климате, конечности меньше, чем у таких же животных, обитающих в более теплом климате

XIX	•	ТЕПЛООБМЕН
1850	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ВТОРОЕ НАЧАЛО
1859	•	ТЕОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ
1877	•	ПРАВИЛО АЛЛЕНА

Большинство закономерностей, наблюдаемых в мире растений и животных, прямо следуют из теории эволюции, и правило Аллена — не исключение. Теплокровные животные, как и человек, имеют внутренний механизм, поддерживающий температуру тела на постоянном уровне. По сути, эти животные преобразуют энергию пищи в тепло для поддержания постоянной температуры своего тела.

Тепло переносится из внутренних органов теплокровных животных к более прохладной поверхности тела, откуда рассеивается в окружающую среду. Это потерянное тепло животному нужно снова выработать в процессе обмена веществ (метаболизма), а значит, в его же интересах, чтобы потери тепла были минимальными. Поэтому полярные животные имеют толстый слой меха или подкожного жира для теплоизоляции и уменьшения выноса тепла на поверхность.

Ясно, что чем меньше площадь поверхности, соприкасающейся с внешней средой, тем меньше тепла будет улетучиваться при данной температуре окружающей среды. Возьмем в качестве наглядного примера относительные пропорции конечностей овцебыка и жирафа (овцебык приспособлен к холодному климату, а жираф — к жаркому). Короткие ноги овцебыка в условиях холодного климата — эволюционное приспособление: уменьшается поверхность, с которой уходит тепло.

Правило Аллена иллюстрирует известные законы физики. Вырабатываемое внутри теплокровных животных тепло переходит в окружающую среду (см. ТЕПЛООБМЕН), где температура ниже (см. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ; ЗАКОН СТЕФАНА—БОЛЬЦМАНА), а отсюда оно улетучивается путем излучения или конвекции. Количество вырабатываемого тепла зависит от объема животного, а количество тепла, уходящего в окружающую среду, зависит от площади поверхности животного. Поэтому чем компактнее животное — или, выражаясь научно, чем меньше *отношение поверхности к объему*, — тем меньше будут потери тепла и тем больше тепла сохранится. Так что адаптивная ценность низкого отношения поверхности к объему в северном климате очевидна.

ДЖОЭЛ АСАФ АЛЛЕН (Joel Asaph Allen, 1838–1921) — американский териолог (специалист по млекопитающим) и орнитолог. Родился в Спрингфилде, штат Массачусетс; учился у Жана-Луи Агасси (Jean Louis Agassiz, 1807–73). Работал главным куратором по птицам в Музее сравнительной зоологии при Гарвардском университете, в 1885 году получил должность

куратора по млекопитающим и птицам в Американском музее естественной истории в Нью-Йорке. Мысль о том, что в популяции одного биологического вида может наблюдаться изменчивость, привела его к идее существования подвидов. Аллен выступал за создание заповедников в Америке, одним из первых поведал миру о бедственном положении бизонов.

Правило Ленца

Индукционный электрический ток в проводнике, возникающий при изменении магнитного потока, направлен таким образом, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока

1785	•	ЗАКОН КУЛОНА
1820	•	ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	•	ЗАКОН АМПЕРА
1820	•	ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	•	ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	•	ПРАВИЛО ЛЕНЦА

В 1831 году английский физик Майкл Фарадей открыл то, что теперь называют законом электромагнитной индукции ФАРАДЕЯ, согласно которому изменение магнитного потока внутри проводящего контура возбуждает в этом контуре электрический ток даже при отсутствии в контуре источника питания. Оставленный Фарадеем открытым вопрос о направлении индукционного тока вскоре решил российский физик Эмилий Христианович Ленц.

Представьте себе замкнутый круговой токопроводящий контур без подключенной батареи или иного источника питания, в который северным полюсом начинают вводить магнит. Это приведет к увеличению магнитного потока, проходящего через контур, и, согласно закону Фарадея, в контуре возникнет индуцированный ток. Этот ток, в свою очередь, согласно закону БИО—САВАРА будет генерировать магнитное поле, свойства которого ничем не отличаются от свойств поля обычного магнита с северным и южным полюсами. Ленцу как раз и удалось выяснить, что индуцированный ток будет направлен таким образом, что северный полюс генерируемого током магнитного поля будет ориентирован в сторону северного полюса вдвигаемого магнита. Поскольку между двумя северными полюсами магнитов действуют силы взаимного отталкивания, наведенный в контуре индукционный ток потечет именно в таком направлении, что будет противодействовать введению магнита в контур. И это лишь частный случай, а в обобщенной формулировке правило Ленца гласит, что индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать вызвавшей его первопречине.

Правило Ленца сегодня пытаются использовать в междугородном пассажирском транспорте. Уже построены и испытываются опытные образцы поездов на так называемой магнитной подушке. Под днищем вагона такого поезда смонтированы мощные магниты, расположенные в считанных сантиметрах от стального полотна. При движении поезда магнитный поток, проходящий через контур полотна, постоянно меняется, и в нем возникают сильные индукционные токи, создающие мощное магнитное поле, отталкивающее магнитную подвеску поезда (аналогично тому, как возникают силы отталкивания между контуром и магнитом в вышеописанном опыте). Сила эта настолько велика, что, набрав некоторую скорость, поезд буквально отрывается от полотна на 10–15 сантиметров и фактически летит по воздуху. Поезда на магнитной подушке способны развивать скорость свыше 500 км/ч, что делает их идеальным средством междугородного сообщения средней дальности.

ЭМИЛИЙ ХРИСТИАНОВИЧ ЛЕНЦ (Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804–65) — российский физик. Родился в Дерпте (ныне Тарту, Эстония), окончил Дерптский (ныне Тартуский) университет. Еще будучи студентом, участвовал в кругосветной геологической экспедиции. Препо-

давал в Петербургском университете, с 1836 года в качестве профессора. Ленц играл видную роль в российских научных кругах своего времени. Все основные научные исследования Ленца были направлены на изучение явлений электропроводности и электромагнетизма.

Правило октета

Атомы стремятся отдавать или принимать электроны до тех пор, пока в их внешнем слое не станет 8 электронов

ок. 420 до н.э.	•	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1860-е	•	ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕНДЕЛЕЕВА
1919	•	ПРАВИЛО ОКТЕТА
кон. 1920-х	•	ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОРБИТАЛЕЙ
1930-е	•	ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Расположение химических элементов в ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МЕНДЕЛЕЕВА объясняется тем, как электроны заполняют доступные энергетические уровни, или *слои*, в атоме. Например, *благородные газы*, такие как неон, ксенон и аргон, имеют во внешнем слое по 8 электронов (то есть слой заполнен), и поэтому они неохотно вступают в химические реакции. Самое низкое энергетическое состояние (и, следовательно, самое устойчивое) в большинстве случаев имеют атомы с заполненным внешним электронным слоем. На этом и построено правило октета.

Правило октета объясняет, как атомы образуют ионы. Рассмотрим в качестве примера натрий. В его атоме 11 электронов: два во внутреннем слое, восемь в следующем и один во внешнем слое. Этот внешний электрон очень подвижен, поэтому, если атому натрия передается энергия (например, в результате столкновения с другим атомом), он легко образует ион натрия с единичным положительным зарядом. Чтобы удалить электрон с внутреннего слоя, энергии потребуется в десять раз больше, поэтому ион натрия с двойным положительным зарядом — большая редкость. Точно так же кальций, имеющий 2 электрона во внешнем слое и 8 в следующем, более низком слое, образует ион, теряя 2 электрона. То есть, когда атомы превращаются в ионы, они по строению становятся похожи на атомы благородных газов.

Правило октета помогает нам понять, как устроены химические связи. Но оно работает далеко не для всех элементов. Например, олово имеет во внешнем незаполненном слое 14 электронов, но может отдавать только 2 или 4 электрона: отрыв большего количества электронов потребовал бы непомерных затрат энергии. Поэтому олово образует ионы с положительным зарядом 2 или 4.

Правило октета — одно из тех правил, которые отражают на первый взгляд случайные закономерности, выведенные химиками из опыта и наблюдений. Однако эти закономерности легко могут быть объяснены в терминах атомной теории строения вещества.

Правило Тициуса— Бодe

Расстояния от планет Солнечной системы до Солнца возрастают согласно простому арифметическому правилу

Есть что-то такое в нумерологии, что буквально завораживает людей. Будучи ученым, занимающимся общественно-просветительской деятельностью, я регулярно получаю письма от людей, нашедших очередную «разгадку» какой-либо тайны Вселенной посредством анализа последовательности десятичных знаков в записи числа π или массы одной из элементарных частиц. Логика у них простая: если найдена какая-то закономерность в числовой последовательности, благодаря которой удастся объяснить какое-либо природное явление, значит, за этим кроется что-то фундаментальное. Надуманным «законам» подобного рода в этой книге уделяется мало внимания, однако для правила Тициуса—Бодe, хотя оно и относится к вышеупомянутой категории, следует сделать исключение (ничего предосудительного в том, как оно изначально было выведено и проверено, нет; просто со временем выяснилось, что оно не всегда работает, — и мы это увидим).

В 1766 году немецкий астроном и математик Иоганн Тициус заявил, что выявил простую закономерность в нарастании радиусов околосолнечных орбит планет. Он начал с последовательности 0, 3, 6, 12, ..., в которой каждый следующий член образуется путем удвоения предыдущего (начиная с 3; то есть 3×2^n , где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$), затем добавил к каждому члену последовательности 4 и поделил полученные суммы на 10. В итоге получились весьма точные предсказания (см. таблицу) расстояний известных на то время планет Солнечной системы от Солнца в астрономических единицах (1 а.е. равна среднему расстоянию от Земли до Солнца).

Планета	Согласно правилу Тициуса—Бодe	Реальный радиус
Меркурий	0,4	0,39
Венера	0,7	0,72
Земля	1,0	1,00 (по определению)
Марс	1,6	1,52
«недостающая планета»	2,8	—
Юпитер	5,2	5,2
Сатурн	10	9,5

Радиусы планет (в астрономических единицах), предсказанные правилом Тициуса—Бодe (средняя колонка). Для сравнения даны их реальные радиусы (правая колонка)

Совпадение прогноза с результатом действительно впечатляет, особенно если учесть, что открытый лишь в 1781 году Уран также вписался в предложенную Тициусом схему: по Тициусу — 19,6 а.е., фактически — 19,2 а.е. Открытие Урана подогрело интерес к «закону», прежде всего к таинственному провалу на удалении 2,8 а.е. от Солнца. Там, между орбитами Марса и Юпитера, должна быть планета — считали все. Неужели она столь мала, что ее невозможно обнаружить в телескопы?

В 1800 году даже была создана группа из 24 астрономов, ведших круглосуточные ежедневные наблюдения на нескольких самых мощных в ту эпоху телескопах, они даже дали своему проекту громкое название «Небесная стража», но увы... Первую

малую планету, обращающуюся по орбите между Марсом и Юпитером, открыли не они, а итальянский астроном Джузеппе Пиацци (Giuseppe Piazzi, 1746–1826), и произошло это не когда-нибудь, а в новогоднюю ночь 1 января 1801 года, и открытие это ознаменовало наступление XIX столетия. Новогодний подарок оказался удален от Солнца на расстояние 2,77 а.е. Однако диаметр этого космического объекта (933 км) явно не позволял считать его искомым крупной планетой. Однако в течение всего нескольких лет после открытия Пиацци было обнаружено еще несколько малых планет, которые называли *астероидами*, и сегодня их насчитывается много тысяч. Подавляющее большинство из них обращается по орбитам, близким к предсказываемым правилом Тициуса—Боде, и по последним гипотезам они представляют собой «строительный материал», который так и не сформировался в планету (см. гипотеза газопылевого облака).

Немецкий астроном Иоганн Боде, будучи под большим впечатлением от выводов Тициуса, включил их в свой учебник по астрономии, изданный в 1772 году. Именно благодаря его роли как популяризатора его имя возникло в названии правила. Иногда его даже несправедливо называют просто правилом Боде.

И как реагировать человеку, столкнувшемуся с такой «магией» последовательности чисел? Я всегда рекомендую задающимся подобными вопросами придерживаться умного совета, который дал мне в свое время умудренный опытом преподаватель теории вероятностей и статистики. Он часто приводил пример поля для гольфа. «Предположим, — рассуждал он, — что мы задались целью рассчитать вероятность того, что шар для гольфа приземлится на точно заданную травинку. Такая вероятность будет практически нулевой. Но после того, как мы ударили клюшкой по шару, шару ведь надо куда-то упасть. И рассуждать о том, почему шар упал именно на эту травинку, бессмысленно, поскольку, если бы он упал не на нее, он упал бы на одну из соседних».

Применительно к правилу Тициуса—Боде: шесть цифр, входящих в эту формулу и описывающих удаление планет от Солнца, можно уподобить шести шарам для гольфа. Представим себе вместо травинок всевозможные арифметические комбинации чисел, которые призваны дать результаты для расчета радиусов орбит. Из бесчисленного множества формул (а их можно насчитать даже больше, чем имеется травинок на поляне для гольфа) обязательно найдутся и такие, что по ним будут получены результаты, близкие к предсказываемым правилом Тициуса—Боде. И то, что правильные предсказания дала именно их формула, а не чья-либо еще, не более чем игра случая, и к настоящей науке это «открытие» отношения не имеет.

В реальной жизни все оказалось даже проще, и к статистическим доводам для опровержения правила Тициуса—Боде прибегать не пришлось. Как это часто бывает, ложная теория была опровергнута новыми фактами, а именно открытием Нептуна и Плу-

тона. Нептун обращается по очень неправильной, с точки зрения Тициуса—Бодe, орбите (прогноз для его радиуса 38,8 а.е., в действительности — 30,1 а.е.). Что касается Плутона, то его орбита вообще лежит в плоскости, заметно отличающейся от орбит других планет, и характеризуется значительным эксцентриситетом, так что само упражнение с применением правила становится бессмысленным.

Так что же, выходит, правило Тициуса—Бодe относится к разряду псевдонаучных? Не думаю.

И Тициус, и Бодe искренне пытались отыскать математическую закономерность в строении Солнечной системы, и ученые продолжали и продолжают заниматься поисками подобного рода. Проблема в том, что ни тот, ни другой не пошли дальше игры чисел и не попытались отыскать *физическую*

причину того, почему орбиты ближних планет подчиняются подмеченной ими закономерности. А без физического обоснования «законы» и «правила» подобного рода остаются чистой нумерологией — и, как показывают имеющиеся сегодня данные, весьма некорректной нумерологией.



Иоганн Бодe, соавтор «закона», который оказался чистым совпадением

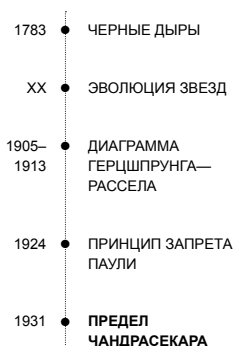
ИОГАНН ЭЛЕРТ БОДЕ (Johann Elert Bode, 1748–1826) — немецкий астроном и математик, родился в Гамбурге. Астроном-самоучка, первый трактат по астрономии опубликовал в возрасте 17 лет. С 1772 года и до самой своей смерти — главный редактор «Астрономического ежегодника» (*Astronomisches Jahrbuch*) Берлинской академии наук, превративший его в прибыльное и престижное издание. В 1781 году предложил для открытой Вильямом Гершелем (William Herschel) новой планеты название Уран. С 1786 года — директор Астрономической обсерватории Берлинской академии. Составитель звездных атласов, которые переиздаются до наших дней. Самый известный из них — «Уранография» (*Uranographia*, 1801), который до сих пор считается лучшим и самым красочным звездным атласом в истории человечества. Автор геометрических границ между созвездиями,

которые были пересмотрены лишь в 1931 году.

ИОГАНН ДАНИЕЛЬ ТИЦИУС (Johann Daniel Titius, 1729–96) — немецкий астроном, математик, физик и биолог. Родился в г. Конитц (Konitz), ныне Хойнице (Chojnice) в Польше. В 1752 году окончил Лейпцигский университет и остался при нем. Через четыре года перешел в Университет Виттенберга, в котором и проработал до конца жизни, занимая кафедры профессора математики и физики. К формулировке «правила» Тициуса подтолкнул осуществленный им перевод на немецкий книги французского натуралиста и естествоиспытателя Шарля Бонне (Charles Bonnet). Бонне утверждал, что в устройстве Солнечной системы присутствует гармония, свидетельствующая о ее Божественном происхождении. В 1784 году Бодe признал приоритет Тициуса в открытии правила, носящего их имя.

Предел Чандрасе- кара

*Белый карлик не
может быть
массивнее Солнца
более чем в 1,4 раза*



Как и все во Вселенной, звезды рождаются, живут и умирают в свой срок (см. Эволюция звезд). В зависимости от массы звезды она заканчивает свой жизненный путь или огненной вспышкой сверхновой, или тихим угасанием в виде белого карлика.

Вся жизнь звезды есть непрерывная борьба против центростремительных гравитационных сил. Прямо сейчас, например, в ядре нашего Солнца происходят термоядерные реакции, в ходе которых высвобождается энергия, поднимающая температуру вещества, из которого состоит Солнце, до столь высокого уровня, что оно начинает вести себя как идеальный газ. Согласно уравнению состояния идеального газа, рост температуры в неизменном объеме приводит к пропорциональному росту давления, в результате чего в ядре Солнца постоянно нагнетается давление, противодействующее силе тяжести и удерживающее внешние слои Солнца от *гравитационного коллапса* — стремительного падения к центру звезды.

Наступит время (ориентировочно через 6,5 миллиарда лет), когда в недрах Солнца иссякнут запасы горючего для его термоядерной топки и силы гравитационного притяжения после 11 миллиардов лет борьбы победят. Солнце начнет стремительно сжиматься, пока силы гравитации не натолкнутся на следующий (после побежденного термоядерного) рубеж обороны, который снова даст силам сжатия достойный отпор давлением. Для звезд категории Солнца таким барьером становятся свободные электроны внутри звезды. Электроны подчиняются принципу запрета Паули, согласно которому ни на одной орбите не могут находиться два электрона в одинаковом состоянии. Это положение подразумевает, что любому электрону необходимо «жизненное пространство» и сближаться они могут лишь до определенного предела.

При гравитационном коллапсе звезды с массой, близкой к солнечной, она сжимается до размеров порядка размеров Земли, после чего коллапс прекращается в силу противодействия электронов, которым «некуда» сближаться дальше. Генерировать энергию звезда на этой стадии уже не может (нет топлива), однако светиться, остывая, она продолжает еще достаточно долго. Такие звезды и получили название *белых карликов*, и среди видимых звезд в ночном небе их немало. По сути, белый карлик удерживается от полного коллапса равновесием двух сил — гравитационного притяжения и своего рода давления электронов изнутри. В астрофизике последнее принято называть *давлением вырожденного электронного газа*. (Более массивные звезды продолжают сжиматься, пока не взрываются вспышкой сверхновой — см. Эволюция звезд.)

В начале 1930-х годов молодой индийский физик-теоретик Субрахманьян Чандрасекар (Subrahmanyan Chandrasekhar), работая над теорией белых карликов, сформулировал важное следствие из запрета Паули, а именно: при превышении массой звезды определенного предела, равняющегося при-



Субрахманьян Чандрасекар в молодости. Именно он первым понял, что участь нашего Солнца — со временем превратиться в белого карлика

мерно 1,4 массы Солнца, гравитационные силы оказываются сильнее сил давления вырожденного газа и коллапс продолжается. Именно эта масса $M = 1,4M_{\odot}$ и получила название предела Чандрасекара.

СУБРАХМАНЬЯН ЧАНДРАСЕКАР

(Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910–95) — американский астрофизик индийского происхождения. Родился в Лахоре (тогда Индия, теперь Пакистан) в семье крупного чиновника британской колониальной администрации. Учился в университете г. Мадрас (Индия), затем в Кембриджском университете (Великобритания). В 1937 году вошел в преподавательский состав Чикагского университета (США), где и работал

до конца жизни. Внес значительный вклад в теоретическую физику и астрофизику, за открытие предела, названного его именем, в 1983 году был удостоен Нобелевской премии по физике. Чандрасекар отличался изысканными манерами, неизменно одевался в строгий черный костюм, много времени проводил в кругу молодых физиков-теоретиков, щедро делясь с ними своими идеями. Его имя теперь носит новая орбитальная обсерватория NASA.

Предельная скорость падения

Скорость падения тела в газе или жидкости стабилизируется по достижении телом скорости, при которой сила гравитационного притяжения уравнивается силой сопротивления среды

1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1851	●	ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПАДЕНИЯ
1913	●	ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

Согласно законам механики Ньютона, тело, находящееся в состоянии свободного падения, должно двигаться равноускоренно, поскольку на него действует ничем не уравновешенная сила земного притяжения. При падении тела в земной атмосфере (или любой другой газообразной или жидкой среде) мы, однако, наблюдаем иную картину, поскольку на сцену выходит еще одна сила. Падая, тело должно раздвигать собой молекулы воздуха, которые противодействуют этому, в результате чего начинает действовать сила *аэродинамического сопротивления* или *вязкого торможения*. Чем выше скорость падения, тем сильнее сопротивление. И когда направленная вверх сила вязкого торможения сравнивается по величине с направленной вниз гравитационной силой, их равнодействующая становится равной нулю и тело переходит из состояния ускоренного падения в состояние равномерного падения. Скорость такого равномерного падения называется предельной скоростью падения тела в среде.

Модуль предельной скорости падения зависит от аэродинамических или гидродинамических свойств тела, то есть от степени его обтекаемости. В самом простом случае идеально обтекаемого тела вокруг него не образуется никаких дополнительных завихрений, препятствующих падению — так называемых *турбулентностей*, — и мы наблюдаем *ламинарный поток*. В ламинарном потоке сила сопротивления вязкой среды возрастает прямо пропорционально скорости тела. Вокруг мелких дождевых капель в воздухе, например, образуется классический ламинарный поток. При этом предельная скорость падения таких капель будет весьма мала — около 5 км/ч, что соответствует скорости прогулочного шага. Вот почему моросящий дождь порой кажется «зависшим» в воздухе. Еще меньшую предельную скорость имели масляные капли, использованные в опыте Милликена.

При движении в вязкой среде более крупных объектов, однако, начинают преобладать иные эффекты и закономерности. При достижении дождевыми каплями диаметра всего лишь в десятые доли миллиметра вокруг них начинают образовываться так называемые *завихрения* в результате *срыва потока*. Вы их, возможно, наблюдали весьма наглядно: когда машина осенью едет по дороге, засыпанной опавшей листвой, сухие листья не просто разметаются по сторонам от машины, но начинают кружиться в подобии вальса. Описываемые ими круги в точности повторяют линии *вихрей фон Кармана*, получивших свое название в честь инженера-физика венгерского происхождения Теодора фон Кармана (Theodore von Kármán, 1881–1963), который, эмигрировав в США и работая в Калифорнийском технологическом институте, стал одним из основоположников современной прикладной аэродинамики. Этими турбулентными вихрями обычно и обусловлено торможение — именно они вносят основной вклад в то, что машина или самолет, разо-

гнавшись до определенной скорости, сталкиваются с резко возросшим сопротивлением воздуха и дальше ускоряться не в состоянии. Если вам доводилось на большой скорости разъезжаться на своем легковом автомобиле с тяжелым и быстрым встречным фургоном и машину начинало «водить» из стороны в сторону, знайте: вы попали в вихрь фон Кармана и познакомились с ним не понаслышке.

При свободном падении крупных тел в атмосфере завихрения начинаются практически сразу и предельная скорость падения достигается очень быстро. Для парашютистов, например, предельная скорость составляет от 190 км/ч при максимальном сопротивлении воздуха, когда они падают плашмя, раскинув руки, до 240 км/ч при нырянии «рыбкой» или «солдатиком».

Принцип Aufbau

Электроны в атоме заполняют сначала самые низкие орбиты, а затем более высокие



Атом водорода устроен достаточно просто: один электрон вращается по орбите вокруг ядра, состоящего из одного протона. Принцип Aufbau (от немецкого *Aufbau* — «строительство, сборка») помогает нам понять, как изменяется атомная структура при переходе от простейшего атома водорода к все более сложным атомам. Он исходит из двух предпосылок — из квантовой механики, которая объясняет, как функционируют электронные оболочки, расположенные вокруг ядра, и из принципа запрета Паули, согласно которому два электрона не могут находиться в одном состоянии. Из этого следует, что количество электронов, которые могут располагаться на одной электронной оболочке атома, ограничено.

Принцип Aufbau работает примерно так: представим, что мы создаем атомные структуры — начиная с водорода, мы раз за разом добавляем к ядру по одному протону (и соответствующее количество нейтронов), получая атомы большего размера. Каждый раз, когда мы добавляем к ядру положительно заряженный протон, необходимо добавить и дополнительный электрон. По мере перехода от маленьких атомов к большим свободные места на электронной орбитали заполняются и мы вынуждены помещать очередной электрон на первую позицию в следующей доступной орбитали (см. атом Бора). Что-то похожее мы наблюдаем, когда каменщик, строя стену, кирпич за кирпичом выкладывает один ряд и начинает следующий.

Принцип Aufbau непосредственно вытекает из принципа запрета Паули, согласно которому два электрона в атоме не могут находиться в одинаковом состоянии, — хотя эта связь не всегда была очевидна. То есть электроны на атомных орбиталях чем-то напоминают автомобили на парковке — если место уже занято, надо найти себе другое, свободное место. Точно так же, когда мы строим сложный атом, если места на низших орбитах уже заняты, электроны могут занять место только на более высокой орбите.

Чтобы понять, как работает принцип Aufbau, необходимо знать еще одну вещь — что электроны обладают *спином*. Представьте, что электроны вращаются вокруг своей оси так же, как Земля вращается вокруг оси, проходящей через ее полюса. При этом электроны часто образуют пары — один вращается по часовой стрелке, другой против.

На следующем уровне сложности после атома водорода находится атом гелия, который в нормальном состоянии имеет в ядре два протона и два нейтрона. Этот второй электрон, который нам нужно добавить, чтобы получить атом гелия, мы можем поместить на ту же орбиталь, что и первый — для этого нам просто нужно придать ему противоположный спин; при этом два электрона будут спарены. Итак, в соответствии с принципом Aufbau оба электрона в атоме гелия находятся на низшей доступной орбитали, но имеют противоположные спины. Это утверждение было подтверждено экспериментально.

Следующий элемент, литий, имеет в своем ядре три протона (и обычно четыре нейтрона), значит, в его атоме должно быть три электрона. Однако низшая электронная оболочка уже заполнена, поэтому дополнительный электрон должен занять место на один уровень выше. У бериллия (четыре протона) дополнительный электрон будет спарен с третьим электроном — тем самым, который участвовал в образовании лития.

Так мы можем продолжать заполнять вторую оболочку, где есть место для четырех пар электронов. (Элемент с десятью электронами, двумя на низшем уровне и восемью на следующем уровне, — неон.) Теперь можно перейти на третий электронный уровень. Атом с одним электроном на этом уровне — натрий, а когда уровень заполнится, мы получим атом аргона. После этого в соответствии с положениями квантовой механики орбитали становятся несколько сложнее — на третьей оболочке, например, могут располагаться девять пар электронов, а на четвертой и на высших уровнях еще больше. Тем не менее выполняется все тот же основной принцип. На каждой оболочке есть место только для определенного количества электронных пар, и как только уровень заполняется, принцип Aufbau говорит нам, что надо передвигаться на следующий.

Принцип Aufbau также объясняет регулярность химических свойств элементов, открытую Дмитрием Менделеевым и упорядоченную им в его ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ.

Принцип Гюйгенса

Каждую точку на пути распространения волны можно считать источником вторичных волн

1690	●	ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА
1807	●	ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ
1818	●	ДИФРАКЦИЯ



ХРИСТИАН ГЮЙГЕНС (Christiaan Huygens, 1629–95) — голландский астроном и физик. Родился в Гааге в семье дипломата. Получил хорошее домашнее образование, затем окончил Лейденский университет. В 1666 году переехал в Париж, где принимал участие в организации Академии наук Франции. Самую большую известность Гюйгенсу принесли работы по оптике и астрономии. Он значительно усовершенствовал конструкцию телескопов и открыл кольца Сатурна. Кроме того, Гюйгенс является изобретателем маятниковых часов.

Представьте себе волну на поверхности водоема. Проще всего, казалось бы, описать волновое движение воды чисто механически — рассчитать силы гидродинамического давления, действующие на частицы водной поверхности снизу, и противодействующие им силы гравитационного притяжения, суммарное воздействие которых и приводит к тому, что поверхность ритмично колеблется вверх-вниз. Однако в конце XVII века голландский физик Христиан Гюйгенс представил себе волновую картину несколько по-иному и вывел благодаря этому мощный принцип, в равной мере применимый к любым волнам — начиная от волн на водной поверхности и заканчивая гамма-излучением далеких галактик.

Смысл принципа Гюйгенса проще всего понять, если представить себе, что гребень волны на водной поверхности на мгновение застыл. Теперь представьте, что в этот миг вдоль всего фронта волны в каждую точку гребня брошено по камню, в результате чего каждая точка гребня становится источником новой круговой волны. Практически всюду вновь возбужденные волны взаимно погасятся и не проявятся на водной поверхности. И лишь вдоль фронта исходной волны вторичные маленькие волны взаимно усилятся и образуют новый волновой фронт, параллельный предыдущему и отстоящий от него на некоторое расстояние. Именно по такой схеме, согласно принципу Гюйгенса, и распространяется волна.

Так почему столь парадоксальный, казалось бы, взгляд на столь обычное природное явление, как распространение волн, оказывается полезен ученым? Представьте, что будет при столкновении волны с препятствием на пути ее распространения. Вернемся к примеру волны на водной поверхности и представим, что волна ударила о бетонный волнорез под углом к нему. Согласно принципу Гюйгенса, из тех точек волнового фронта, которые пришлось на волнорез, вторичные волны распространяться не будут, а из остальных будут. В результате волна продолжит свой путь и восстановится *позади* волнореза. То есть фактически при столкновении с препятствием волна спокойно *огibt* его, и любой моряк вам это подтвердит. (Это свойство волн называется **ДИФРАКЦИЕЙ**.)

Имеется и целый ряд других полезных применений принципа Гюйгенса при рассмотрении волновых явлений — порой весьма неожиданных. Он широко используется в волновой оптике и в телекоммуникационной инженерии, где волны (световые и радио- соответственно) регулярно сталкиваются с препятствиями на пути их распространения и *огibt* их.

К этому открытию Гюйгенса привели занятия астрономией, для развития которой он сделал немало, в частности, став в 1655 году первооткрывателем Титана — самого большого спутника Сатурна. Автоматическая космическая станция НАСА «Кассини» в 2004 году должна достигнуть Сатурна и отправить на поверхность Титана спускаемый аппарат для исследования состава его атмосферы и грунта. Этот спускаемый аппарат называется «Гюйгенс». Так наука чтит своих основателей.

Принцип дополни- тельности

Объекты микромира описываются и как частицы, и как волны, и одно описание дополняет другое

1913	•	АТОМ БОРА
1924	•	СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	•	УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1927	•	ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	•	ОПЫТ ДЭВИССОНА— ДЖЕРМЕРА

В повседневной жизни имеется два способа переноса энергии в пространстве — посредством частиц или волн. Чтобы, скажем, скинуть со стола костяшку домино, балансирующую на его краю, можно придать ей необходимую энергию двумя способами. Во-первых, можно бросить в нее другую костяшку домино (то есть передать точечный импульс с помощью частицы). Во-вторых, можно построить в ряд стоящие костяшки домино, по цепочке ведущие к той, что стоит на краю стола, и уронить первую на вторую: в этом случае импульс передастся по цепочке — вторая костяшка завалит третью, третья четвертую и так далее. Это — волновой принцип передачи энергии. В обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии видимых противоречий не наблюдается. Так, баскетбольный мяч — это частица, а звук — это волна, и все ясно.

Однако в квантовой механике все обстоит отнюдь не так просто. Даже из простейших опытов с квантовыми объектами очень скоро становится понятно, что в микромире привычные нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц (*фотонов*), а элементарные частицы, такие как электрон или даже массивный протон, нередко проявляют свойства волн.

Теперь давайте проведем несложный эксперимент для иллюстрации вышесказанного. Предположим, у нас есть замкнутая камера с двумя тонкими горизонтальными прорезями — одна выше средней линии, другая ниже. Теперь представим, что на эти прорези направлен параллельный пучок световых лучей. Естественно предположить, что частицы света будут проходить через оба отверстия прямо и на задней стенке камеры (на экране) будут наблюдаться две отчетливые световые полосы напротив каждой из прорезей, а посередине между ними свет попадать не должен.

Однако на практике мы наблюдаем совершенно иную картину. Согласно принципу гюйгенса, каждая из прорезей играет роль независимого источника вторичных световых волн и на экране на средней линии между двумя прорезями мы, напротив, должны наблюдать максимум амплитуды их колебаний. В частности, звуковые волны, исходящие из двух стереодинамиков, как раз и дают пик громкости на линии равного удаления между ними. То же самое касается и двух равноудаленных источников световых волн, проектируемых на экран. Иными словами, пик амплитуды волны приходится как раз на ту пространственную зону, куда, согласно корпускулярной теории, должно попадать минимальное число частиц.

Если направить на подобную камеру пучок электронов, на экране будут отчетливо прослеживаться свойственные волнам полосы пиков и спадов интенсивности излучения, то есть электрон будет вести себя как волна. С другой стороны, если «выстреливать» электроны по одному, каждый из них будет оставлять четкий след на экране — то есть вести себя как частица. Самое интересное,

что то же самое будет, если вместо пучка электронов вы возьмете пучок фотонов: в пучке они будут вести себя как волны, а по отдельности — как частицы (см. опыт ДЭВИССОНА—ДЖЕРМЕРА).

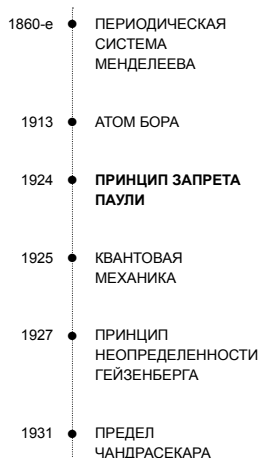
Подытожим сказанное. Если фотоны или электроны направлять в такую камеру по одному, они ведут себя как частицы; однако если собрать достаточную статистику таких одиночных экспериментов, то выяснится, что по совокупности эти же электроны или фотоны распределятся на задней стенке камеры так, что на ней будет наблюдаться знакомая картина чередующихся пиков и спадов интенсивности, свидетельствующая об их волновой природе. Иными словами, в микромире объекты, которые ведут себя как частицы, при этом как бы «помнят» о своей волновой природе, и наоборот. Это странное свойство объектов микромира получило название *квантово-волнового дуализма*. Проводилось множество экспериментов с целью «разоблачить истинную природу» квантовых частиц: использовались различные экспериментальные методики и установки, включая такие, которые позволили бы на полпути к приемнику выявить волновые свойства отдельной частицы или, напротив, определить волновые свойства светового пучка через характеристики отдельных квантов. Все тщетно. Судя по всему, квантово-волновой дуализм объективно присущ квантовым частицам.

Принцип дополнительности — простая констатация этого факта. Согласно этому принципу, если мы измеряем свойства квантового объекта как частицы, мы видим, что он ведет себя как частица. Если же мы измеряем его волновые свойства, для нас он ведет себя как волна. Оба представления отнюдь не противоречат друг другу — они именно *дополняют* одно другое, что и отражено в названии принципа.

Как я уже объяснял во введении, я полагаю, что философия науки выиграла от такого корпускулярно-волнового дуализма несопоставимо больше, чем было бы возможно при его отсутствии и строгом разграничении явлений на корпускулярные и волновые. Сегодня совершенно очевидно, что объекты микромира ведут себя принципиально иным образом, нежели объекты привычного нам макромира. Но почему? На каких скрижалях это записано? И, подобно тому как средневековые натурфилософы мучительно пытались понять, является ли полет стрелы «свободным» или «вынужденным», так и современные философы бьются над разрешением квантово-волнового дуализма. На самом же деле и электроны, и фотоны представляют собой не волны и не частицы, а нечто совершенно особенное по своей внутренней природе и потому не поддающееся описанию в терминах нашего повседневного опыта. Если же и дальше пытаться втиснуть их поведение в рамки знакомых нам парадигм, неизбежны все новые парадоксы. Так что главный вывод здесь состоит в том, что наблюдаемый нами дуализм порожден не присущими квантовым объектам свойствами, а несовершенством категорий, которыми мы мыслим.

Принцип запрета Паули

Два электрона в атоме не могут находиться в одном состоянии



Эффект Паули

Раньше ученые масштаба Исаака Ньютона или Майкла Фарадея успешно сочетали в себе навыки экспериментаторов и теоретиков — сами проводили эксперименты по исследованию различных аспектов физического мира и сами же разрабатывали теории для объяснения полученных (см. с. 296)

Австрийский физик Вольфганг Паули — один из нескольких европейских физиков-теоретиков, сформулировавших в конце 1920-х — начале 1930-х годов основные принципы и постулаты квантовой механики. Принцип, носящий его имя, является одним из основополагающих в этом разделе физической науки. Проще всего представить себе, в чем именно заключается принцип Паули, если сравнить электроны с автомобилями на многоярусной крытой стоянке. В каждый бокс помещается только одна машина, а после того, как все боксы на нижнем этаже стоянки заняты, автомобилям приходится в поисках свободного места заезжать на следующий этаж. Так же и электроны в атомах — на каждой орбите вокруг ядра их помещается не больше, чем там имеется «парковочных мест», а после того, как все места на орбите заняты, следующий электрон ищет себе место на более высокой орбите.

Далее, электроны ведут себя, условно говоря, так, будто они вращаются вокруг своей оси (то есть обладают собственным моментом вращения, который в этом случае принято называть *спином* и который может принимать лишь два значения: $+1/2$ или $-1/2$). Два электрона с противоположным спином *могут* занимать одно место на орбите. Это как если бы в один бокс помещались одновременно машина с правым рулем и машина с левым рулем, а две машины с одинаковым расположением руля не помещались. Вот почему в первом ряду ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА мы видим всего два атома (водород и гелий): на нижней орбите отведено всего одно двоящее место для электронов с противоположным спином. На следующей орбите помещается уже восемь электронов (четыре со спином $-1/2$ и четыре со спином $+1/2$), поэтому во втором ряду таблицы Менделеева мы видим уже восемь элементов. И так далее.

Внутри стареющих звезд температура настолько высока, что атомы в основном находятся в ионизированном состоянии и электроны свободно перемещаются между ядрами. И здесь снова срабатывает принцип запрета Паули, но уже в видоизмененной форме. Теперь он гласит, что в определенном пространственном объеме может одновременно находиться не более двух электронов с противоположным спином и определенными интервалами предельно допустимых скоростей. Однако картина резко изменяется после того, как плотность вещества внутри звезды превысит пороговое значение порядка 10^7 кг/м³ (для сравнения — это в 10 000 раз выше плотности воды; спичечный коробок такого вещества весит около 100 тонн). При такой плотности принцип Паули начинает выражаться в стремительном росте внутреннего давления в звезде. Это дополнительное *давление вырожденного электронного газа*, и его проявлением становится тот факт, что гравитационный коллапс старой звезды останавливается после того, как она сжимается до размеров, сопоставимых с размерами Земли. Такие звезды называют *белыми карликами*, и это последняя стадия эволюции звезд с массой, близкой к массе Солнца (см. ПРЕДЕЛ ЧАНДРАСЕКАРА).

Выше я описал действие запрета Паули применительно к электронам, но он действует и в отношении любых элементарных частиц с полуцелым спиновым числом ($1/2$, $3/2$, $5/2$ и т.д.). В частности, спиновое число нейтрона равно, как и у электрона, $1/2$. Это значит, что нейтронам, как и электронам, требуется определенное «жизненное

ими опытным путем результатов. Те времена прошли. Примерно с начала XX столетия узкая специализация, эпидемией пронесшаяся по всем отраслям человеческой деятельности, распространилась и на естествознание, включая физику. Сегодня мы видим, что подавляющее большинство ученых относится к одной из двух категорий — экспериментаторов или теоретиков. Совместить в себе две эти ипостаси в наше время практически невозможно.

Вольфганг Паули был ярко выраженным физиком-теоретиком и, как свойственно многим ученым этой категории, весьма презрительно относился к «сантехникам» (по его же выражению), марающим руки об экспериментальные установки. Снобизм Паули в отношении экспериментаторов, равно как и его полная неспособность заставить работать даже самую простую экспериментальную установку, вошли в легенду. Рассказывают, что стоило ему появиться в физической лаборатории, как какое-нибудь оборудование тут же выходило из строя. Говорят, что чудовищный взрыв в Лейденском университете (Нидерланды) произошел минута в минуту по прибытии Паули в этот город поездом из Цюриха.

Правда все это или нет, но «эффект Паули» — способность человека разрушительно влиять на эксперимент одним своим присутствием — прочно вошел в физический фольклор. Однако, как и в ОБЪЯСНЕНИИ БОРА, в нем, скорее всего, много преувеличений, если разобраться.

пространство» вокруг себя. Если масса белого карлика превышает 1,4 массы Солнца (см. ПРЕДЕЛ ЧАНДРАСЕКАРА), силы гравитационного притяжения заставляют протоны и электроны внутри звезды попарно объединяться в нейтроны. Но тогда нейтроны, подобно электронам в белых карликах, начинают производить внутренне давление, которое называется *давлением вырожденного нейтронного газа*, и в этом случае гравитационный коллапс звезды останавливается на стадии образования *нейтронной звезды*, диаметр которой сопоставим с размерами большого города. Однако при еще большей массе звезды (начиная примерно с тридцатикратной массы Солнца) силы гравитации слабевают и сопротивление вырожденного нейтронного газа и звезды коллапсируют дальше, превращаясь в ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ.

Принцип запрета Паули представляет собой яркий пример закона природы нового типа, и по мере развития компьютерных технологий такие «неявные» законы будут неизбежно играть все большую роль. Законы этого типа принципиально отличаются от законов классической физики, таких как законы механики Ньютона, — они не предсказывают, что произойдет в системе. Вместо этого они определяют, чего в системе *не может* произойти. Именно их биолог и структурный теоретик Харольд Моровиц (Harold Morowitz, p. 1927) назвал «правилами отсеечения»: такие правила, в частности принцип запрета Паули, сводятся к тому, что при решении самых сложных и комплексных проблем (а расчет орбит электронов в сложных атомах к таковым, несомненно, относится) следует запрограммировать компьютер таким образом, чтобы он даже *не рассматривал* заведомо невозможные варианты решения. Тем самым такое правило отсекает от ствола возможных решений задачи заведомо мертвые ветви, оставляя лишь допустимые возможности для ее решения, благодаря чему время компьютерных расчетов сокращается до разумных пределов. Таким образом, правила, подобные принципу запрета Паули, становятся все более важными, поскольку мы все больше зависим от компьютеров в решении самых сложных и комплексных проблем.

ВОЛЬФГАНГ ПАУЛИ (Wolfgang Pauli, 1900–58) — австрийский, затем швейцарский физик-теоретик. Родился в Вене, в семье профессора Венского университета. Крестным отцом Паули был Эрнст Мах (см. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ). Еще школьником освоил частную и общую теорию относительности. Изучал теоретическую физику в Мюнхенском университете в одной группе с Вернером Гейзенбергом (см. ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА), диплом защитил в 1922 году.

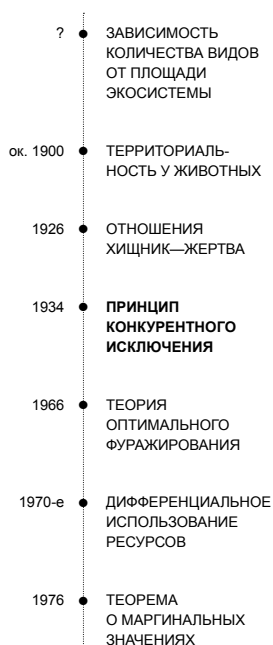
Паули явился одним из пионеров квантовой механики, внося в новую научную дисциплину ряд принципиальных вкладов, самым поразительным из которых, вероятно, является его принцип запрета, сформулированный в 1924 году, — за него в 1945 году Паули

был удостоен Нобелевской премии по физике. Его идея наличия квантовых спиновых чисел у элементарных частиц была экспериментально подтверждена двумя годами позже. Кроме того, Паули удалось объяснить кажущееся нарушение закона сохранения энергии при бета-распаде (см. РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД) посредством предположения об излучении при нем, помимо электрона, неизвестной частицы, позже названной *нейтрино*.

В годы Второй мировой войны Паули работал в США, в Принстонском институте перспективных исследований. По окончании войны вернулся в Европу, принял швейцарское гражданство и занял должность профессора экспериментальной физики в федеральном Институте технологии в Цюрихе.

Принцип конкурентного исключения

Если в стабильной среде сосуществуют два конкурирующих вида, это происходит в результате дифференциации ниш. Если такой дифференциации нет, один из видов обречен на вымирание



Самое важное понятие в экологии — это понятие экологической ниши. Под *нишей* подразумевают совокупность факторов окружающей среды, в пределах которых данный вид может развиваться и воспроизводиться. Например, у растения ниша может включать в себя количество осадков, солнечного света и почвенных минералов, необходимых для его роста. У животного-хищника к нише можно отнести климатические факторы, наличие подходящей жертвы и количество эндемичных заболеваний в данной местности.

Принцип конкурентного исключения гласит: если два вида конкурируют за одну нишу, есть только два возможных исхода. Либо эти два вида немного изменятся и каждый займет немного другую нишу (*дифференциация ниш*), либо один из видов обречен на вымирание. Например, два растения на одном лугу могут видоизмениться таким образом, что одно из них сможет обходиться меньшим количеством солнечного света, а другое — меньшим количеством фосфора в почве. Тогда, даже если на первый взгляд и покажется, что в одной нише по-прежнему сосуществуют два вида (что противоречит принципу), эта ниша станет в значительной степени дифференцированной и может уже рассматриваться как две ниши.

В экологии есть много примеров сосуществования видов, но почти во всех таких примерах можно выявить дифференциацию ниш. Если же такая дифференциация не обнаружена, это можно объяснить как нарушением принципа, так и тем, что ученые пока не нашли, что именно изменилось, — например, им надо было исследовать наличие калия, а не фосфора. Но поскольку в других ситуациях значительно больше фактов в пользу конкуренции и поскольку есть теоретические основания полагать, что конкуренция в природе есть, экологи склонны считать, что и в этих случаях действует принцип конкурентного исключения.

Принцип Коперника

Земля вовсе не занимает в космосе особого положения



Всякий раз, столкнувшись с нехваткой проверенных данных для продолжения развития теории мироустройства, ученые принимают за уопостроения. Если какая-то умозрительная идея выдвигается неоднократно и многократно и звучит убедительно, ее и возводят в ранг «принципа» — гипотетического умозаключения, не подтвержденного, однако, достаточным количеством фактов. Самая наглядная иллюстрация — вопрос о существовании жизни за пределами Земли. В деталях нами изучена лишь одна — наша — планетная система (хотя мы и установили, что планетные системы существуют и у других звезд, помимо Солнца); и жизнь мы знаем только одну — земную, белковую, основанную на угле-роде. И очень трудно, выражаясь еще весьма мягко, делать далеко идущие выводы на основании единственного известного нам факта существования жизни во Вселенной — а именно на Земле. Тут-то и вступает в действие принцип Коперника.

У принципа Коперника сегодня имеется много формулировок, однако в целом он сводится к тому, что Земля не уникальна и во Вселенной должно иметься множество звездных систем и планет с условиями, аналогичными земным, следовательно, ничто не могло препятствовать зарождению и развитию жизни и разума по земному сценарию в других уголках (если можно так выразиться) Вселенной. Иногда этот принцип называют еще *принципом усреднения*. Он основан на том, что по всей совокупности знаний, имеющих у человечества, мы можем утверждать, что законы природы универсальны и повсеместно действуют одинаково, а значит чисто статистически имеется ненулевая *вероятность*, что, помимо Солнца и Земли, во Вселенной существуют другие системы с идентичными условиями, где биологическая жизнь *не могла* не зародиться.

Благожелательное восприятие этого принципа учеными всего мира во многом обусловлено исторически. Именно Николай Коперник в конце концов первым выдвинул смелую гипотезу о том, что Земля вовсе не покоится в центре Вселенной, как считалось издревле, а обращается вокруг Солнца, что явилось вопиющим противоречием всем философским и религиозным канонам его времени. Это был первый шаг по пути развенчания устоявшегося тысячелетиями предрассудка об уникальном месте Земли в мироздании. Дальнейшие исследования показали, что и Солнце вовсе не является центром не только Вселенной, но и нашей Галактики. Затем было установлено, что и человек развился из низших форм биологической жизни. Так, шаг за шагом, человечество отодвигалось в собственном понимании все дальше от особого места во Вселенной, и это послужило еще одной хорошей иллюстрацией принципа Коперника в действии. И неудивительно после этого, что спустя несколько веков принцип Коперника не только не утратил своей актуальности, но фактически никем теперь и не оспаривается. Более того, он нашел свое логическое завершение в сформулированном уже в XX веке *космологическом принципе*, который

утверждает, что, согласно всем имеющимся на сегодня данным, имеются все основания предполагать, что Вселенная однородна по всем пространственным направлениям.

Некоторые критики утверждают, что Земля, не выделяясь из общего строя мироздания своим пространственным месторасположением, тем не менее является уникальным материальным образованием. По крайней мере, утверждают они, мы не знаем доподлинно о существовании разума в других точках Вселенной, невзирая на все рассуждения о наличии такой вероятности, а в пределах нашей Солнечной системы жизни нигде более не обнаружено. Предполагается даже, что зарождение жизни на Земле было обусловлено уникальными явлениями — такими, как присутствие на близкой и практически круговой орбите массивного естественного спутника, Луны, — и якобы без ее особого влияния на земные условия жизнь на нашей планете попросту не развилась бы. В поддержку этого мнения его сторонники ссылаются даже на ПАРАДОКС ФЕРМИ.

Однако на сегодняшний день подавляющее большинство ученых склонно соглашаться с принципом Коперника, поскольку не видит веских контраргументов. Верен он или нет, естественно, решат будущие прямые наблюдения. Пока же мнение по поводу приятия или неприятия принципа Коперника остается делом вкуса, а не предметом научных споров.



НИКОЛАЙ КОПЕРНИК (Nicholas Copernicus, 1473–1543) — польский астроном и церковный староста, впервые озвучивший гипотезу, согласно которой планеты, включая Землю, вращаются по круговым орбитам вокруг Солнца. Родился в городе Торунь (Toruń), учился в Краковском университете. Подобно большинству высокообразованных и амбициозных молодых людей своего времени, обладающих связями в обществе, практически не имел другого выбора, кроме как искать путей для карьерного роста в лоне римско-католической церкви. Будучи сыном епископа, был избран старостой кафедрального собора во Фрауенберге (Frauenberg), что гарантировало ему безбедную жизнь. До этого Коперник успел пройти стажировку по богословию и медицине в Италии — в университетах Болоньи, Падуи и Феррары.

Исполнение обязанностей церковного старосты отнимало у ученого много времени, но и связей в своей стране он сумел завести немало, и в государственных делах отметился. Среди прочего Коперник открыл во Фрауенберге бесплатную клинику, затем некоторое время был членом Польской королевской комиссии по денежной реформе.

Астрономией Коперник заинтересовался еще в Италии, а окончательно увлекся этой наукой после тщательно зафиксированного им наблюдения траверса Луны через яркую звезду Альдебаран в 1497 году. Во Фрауенберге Коперник построил (не своими, естественно, руками) небольшую астрономическую обсерваторию. Основные результаты своих наблюдений и выводы из них он изложил в книге «О вращении небесных сфер» (*De revolutionibus orbium coelestium*), где Солнце оказалось помещенным в центр Вселенной, а Земля, другие планеты и звезды вращались вокруг него.

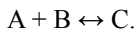
Тут важно понять, что до нашего современного представления об устройстве Солнечной системы и тем более Вселенной Коперник не дошел. Планеты у него, в частности, обращались вокруг Солнца на хрустальных концентрических сферах — в точности так же, как другие планеты и Солнце вращались вокруг Земли на хрустальных сферах в представлении древних греков. Но, удалив Землю из центра Вселенной, Коперник указал верный путь последующим поколениям астрономов, — а это, согласитесь, само по себе выдающееся достижение для одного человека.

Принцип Ле Шателье

Если находящаяся в химическом равновесии система подвергается внешнему воздействию, в ней возникают процессы, стремящиеся ослабить это воздействие

1888 • ПРИНЦИП
ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

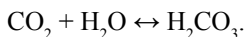
Чтобы легче понять принцип Ле Шателье, рассмотрим простую химическую реакцию. Два вещества (реактивы) взаимодействуют друг с другом, в результате взаимодействия образуется третье вещество (продукт), которое стремится к расщеплению на исходные вещества. Это можно изобразить в виде следующего уравнения:



Двойная стрелка обозначает обратимую реакцию. При протекании прямой реакции слева направо происходит образование вещества С из веществ А и В. В случае обратной реакции (справа налево) вещество С расщепляется на вещества А и В. Когда эта система находится в химическом равновесии, скорости прямой и обратной реакций одинаковы — в одной точке данной системы образуется молекула вещества С, а где-то в другом месте другая молекула вещества С распадается.

Если в систему добавить избыток вещества А, равновесие временно нарушится, так как вырастет скорость образования вещества С. Но чем быстрее будет расти концентрация вещества С, тем быстрее оно будет расщепляться — пока снова не будет достигнуто равновесие между прямой и обратной реакциями. Тогда скорость образования вещества С из веществ А и В сравняется со скоростью расщепления вещества С на вещества А и В.

Действие принципа Ле Шателье можно проследить на примере изменения химического состава дождя или растворения шипучей антацидной (снижающей кислотность желудочного сока) таблетки в воде. В обоих случаях в химической реакции участвуют углекислый газ (CO₂), вода (H₂O) и угольная кислота (H₂CO₃):



Когда дождевая капля попадает в воздух, она поглощает углекислый газ и концентрация в левой части реакции возрастает. Для поддержания равновесия образуется большее количество угольной кислоты. В результате дождь становится кислотным (см. кислотный дождь). Добавление углекислого газа смещает равновесие реакции вправо. Противоположная реакция происходит при опускании в воду таблетки антацида (вещества, нейтрализующего кислоту). Бикарбонат натрия (антацид) вступает в реакцию с водой, и образуется угольная кислота, что приводит к увеличению концентрации вещества в правой части реакции. Чтобы восстановилось равновесие, угольная кислота разлагается на воду и углекислый газ, который мы и наблюдаем в виде пузырьков.

АНРИ ЛУИ ЛЕ ШАТЕЛЬЕ (Henri Louis Le Chatelier, 1850–1936) — французский химик. Родился в городе Мирибель-лез-Эшель в семье ученых. Получил образование в престижной Парижской политехнической школе. Был профессором в Высшей горной школе и в Сорбонне, позже был назначен Генеральным инспектором шахт и рудников Франции (до него этот пост занимал его отец). Ле Шателье

изучал химические реакции, связанные с несчастными случаями на шахтах и в металлургическом производстве, участвовал в исследовании детонации рудничного газа. Разработал термоэлектрический пирометр (оптический прибор для определения температуры раскаленных тел по цвету) и гидравлические тормоза для железнодорожных составов; изобрел кислородно-ацетиленовую сварку.

Принцип мутуализма

Многие виды растений и животных оказывают друг другу существенные услуги



Принято считать, что растения и животные развиваются как различные, самостоятельные и независимые виды, и обычно это так и бывает. Но есть немало примеров того, как отдельные виды развиваются вместе: они либо зависят друг от друга (каждый вид получает от этого сосуществования определенную выгоду или даже не может без него выжить), либо один вид необходим остальным видам. Такое развитие по принципу коэволюции предусмотрено теорией эволюции.

Иногда этот *мутуализм* (взаимовыгодные отношения между разными видами) проявляется как принцип поведения. Например, рыба-клоун живет вблизи актиний. В случае угрозы рыба находит убежище в щупальцах актиний. При этом рыбы-клоуны отгоняют других рыб, которые любят полакомиться актиниями. Таким образом, оба организма получают взаимную выгоду от этого соседства. Разновидность такого вида мутуализма — когда один вид кормит другой: например, человек выращивает сельскохозяйственные растения и рогатый скот; муравьи выращивают грибы.

Самая тесная форма мутуализма — когда один организм живет внутри другого. Поразительным примером этого служит система органов пищеварения коров и других жвачных животных. Коровы, как и человек, не способны переварить целлюлозу — вещество, которое в большом количестве содержится в растениях. Но у жвачных животных есть особый орган — *рубец*. Он представляет собой полость, в которой живет множество микробов. Растительная пища, после того как животное ее прожевало, попадает в рубец, и там эти микробы разрушают целлюлозу. (Животное может отрыгнуть и вновь прожевать частично расщепленную пищу — именно этим и занимаются коровы, когда пережевывают свою жвачку.) Рубец коровы — это замкнутая микроэкосистема, образованная множеством различных микроорганизмов, задача которых состоит в переваривании целлюлозы для своего хозяина. Аналогично корневая система высших растений образована переплетением корневой ткани и грибных нитей, так что грибы снабжают растение минеральными веществами.

Мутуализм играет важную роль также в *круговороте азота* в природе. В атмосфере азот находится в основном в свободной форме — в виде молекул N_2 . Растения могут усваивать азот только в связанном виде (в виде атомов). Связывание азота происходит под воздействием некоторых видов бактерий, которые находятся с растениями в отношениях мутуализма. Наглядный пример этого симбиоза — клубеньки на корнях бобовых. При традиционном методе земледелия на поле вначале выращивают бобовые культуры, а потом запахивают их в землю, благодаря чему почва обогащается связанным азотом. Это способствует хорошему росту последующих посевов.

Принцип неопреде- ленности Гейзенберга

*Невозможно
одновременно
с точностью
определить
координаты и
скорость квантовой
частицы*

1924	•	СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1927	•	ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	•	ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА
1927	•	ОПЫТ ДЭВИССОНА— ДЖЕРМЕРА

В обыденной жизни нас окружают материальные объекты, размеры которых сопоставимы с нами: машины, дома, песчинки и т.д. Наши интуитивные представления об устройстве мира формируются в результате повседневного наблюдения за поведением таких объектов. Поскольку все мы имеем за плечами прожитую жизнь, накопленный за ее годы опыт подсказывает нам, что раз все наблюдаемое нами раз за разом ведет себя определенным образом, значит, и во всей Вселенной, во всех масштабах материальные объекты должны вести себя аналогичным образом. И когда выясняется, что где-то что-то не подчиняется привычным правилам и противоречит нашим интуитивным понятиям о мире, нас это не просто удивляет, а шокирует.

В первой четверти XX века именно такова была реакция физиков, когда они стали исследовать поведение материи на атомном и субатомном уровнях. Появление и бурное развитие квантовой механики открыло перед нами целый мир, системное устройство которого попросту не укладывается в рамки здравого смысла и полностью противоречит нашим интуитивным представлениям. Но нужно помнить, что наша интуиция основана на опыте поведения обычных предметов соизмеримых с нами масштабов, а квантовая механика описывает вещи, которые происходят на микроскопическом и невидимом для нас уровне, — ни один человек никогда напрямую с ними не сталкивался. Если забыть об этом, мы неизбежно придем в состояние полного замешательства и недоумения. Для себя я сформулировал следующий подход к квантово-механическим эффектам: как только «внутренний голос» начинает твердить «такого не может быть!», нужно спросить себя: «А почему бы и нет? Откуда мне знать, как все на самом деле устроено внутри атома? Разве я сам туда заглядывал?» Настроив себя подобным образом, вам будет проще воспринять статьи этой книги, посвященные квантовой механике.

Принцип Гейзенберга вообще играет в квантовой механике ключевую роль хотя бы потому, что достаточно наглядно объясняет, как и почему микромир отличается от знакомого нам материального мира. Чтобы понять этот принцип, задумайтесь для начала о том, что значит «измерить» какую бы то ни было величину. Чтобы отыскать, например, эту книгу, вы, войдя в комнату, окидываете ее взглядом, пока он не остановится на ней. На языке физики это означает, что вы провели визуальное измерение (нашли взглядом книгу) и получили результат — зафиксировали ее пространственные координаты (определили местоположение книги в комнате). На самом деле процесс измерения происходит гораздо сложнее: источник света (Солнце или лампа, например) испускает лучи, которые, пройдя некий путь в пространстве, взаимодействуют с книгой, отражаются от ее поверхности, после чего часть из них доходит до ваших глаз, проходя через хрусталик, фокусируется, попадает на сетчатку — и вы видите образ книги и определяете ее положение в пространстве. Ключ к измерению

здесь — взаимодействие между светом и книгой. Так и при любом измерении, представьте себе, инструмент измерения (в данном случае это свет) вступает во взаимодействие с объектом измерения (в данном случае это книга).

В классической физике, построенной на ньютоновских принципах и применимой к объектам нашего обычного мира, мы привыкли игнорировать тот факт, что инструмент измерения, вступая во взаимодействие с объектом измерения, воздействует на него и изменяет его свойства, включая, собственно, измеряемые величины. Включая свет в комнате, чтобы найти книгу, вы даже не задумываетесь о том, что под воздействием возникшего давления световых лучей книга может сдвинуться со своего места и вы узнаете ее искаженные под влиянием включенного вами света пространственные координаты. Интуиция подсказывает нам (и в данном случае совершенно правильно), что акт измерения не влияет на измеряемые свойства объекта измерения. А теперь задумайтесь о процессах, происходящих на субатомном уровне. Допустим, мне нужно зафиксировать пространственное местонахождение электрона. Мне по-прежнему нужен измерительный инструмент, который вступит во взаимодействие с электроном и возвратит моим детекторам сигнал с информацией о его местопребывании. И тут же возникает сложность: иных инструментов взаимодействия с электроном для определения его положения в пространстве, кроме других элементарных частиц, у меня нет. И, если предположение о том, что свет, вступая во взаимодействие с книгой, на ее пространственных координатах не сказывается, относительно взаимодействия измеряемого электрона с другим электроном или фотонами такого сказать нельзя.

В начале 1920-х годов, когда произошел бурный всплеск творческой мысли, приведший к созданию квантовой механики, эту проблему первым осознал молодой немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг. Начав со сложных математических формул, описывающих мир на субатомном уровне, он постепенно пришел к удивительной по простоте формуле, дающий общее описание эффекта воздействия инструментов измерения на измеряемые объекты микромира, о котором мы только что говорили. В результате им был сформулирован *принцип неопределенности*, названный теперь его именем:

неопределенность значения
координаты x неопределенность скорости $> h/m$,

математическое выражение которого называется *соотношением неопределенностей Гейзенберга*:

$$\Delta x \times \Delta v > h/m,$$

где Δx — неопределенность (погрешность измерения) пространственной координаты микрочастицы, Δv — неопределенность скорости частицы, m — масса частицы, а h — постоянная Планка,

названная так в честь немецкого физика Макса Планка, еще одного из основоположников квантовой механики. Постоянная Планка он равняется примерно $6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с, то есть содержит 33 нуля до первой значимой цифры после запятой.

Термин «неопределенность пространственной координаты» как раз и означает, что мы не знаем точного местоположения частицы. Например, если вы используете глобальную систему рекогносцировки GPS, чтобы определить местоположение этой книги, система вычислит их с точностью до 2–3 метров. (GPS, Global Positioning System — навигационная система, в которой задействованы 24 искусственных спутника Земли. Если у вас, например, на автомобиле установлен приемник GPS, то, принимая сигналы от этих спутников и сопоставляя время их задержки, система определяет ваши географические координаты на Земле с точностью до угловой секунды.) Однако с точки зрения измерения, проведенного инструментом GPS, книга может с некоторой вероятностью находиться где угодно в пределах указанных системой нескольких квадратных метров. В таком случае мы и говорим о неопределенности пространственных координат объекта (в данном примере книги). Ситуацию можно улучшить, если взять вместо GPS рулетку — в этом случае мы сможем утверждать, что книга находится, например, в 4 м 11 см от одной стены и в 1 м 44 см от другой. Но и здесь мы ограничены в точности измерения минимальным делением шкалы рулетки (пусть это будет даже миллиметр) и погрешностями измерения и самого прибора, — и в самом лучшем случае нам удастся определить пространственное положение объекта с точностью до минимального деления шкалы. Чем более точный прибор мы будем использовать, тем точнее будут полученные нами результаты, тем ниже будет погрешность измерения и тем меньше будет неопределенность. В принципе, в нашем обыденном мире свести неопределенность к нулю и определить точные координаты книги можно.

И тут мы подходим к самому принципиальному отличию микромира от нашего повседневного физического мира. В обычном мире, измеряя положение и скорость тела в пространстве, мы на него практически не воздействуем. Таким образом, в идеале мы можем *одновременно* измерить и скорость, и координаты объекта абсолютно точно (иными словами, с нулевой неопределенностью).

В мире квантовых явлений, однако, любое измерение воздействует на систему. Сам факт проведения нами измерения, например, местоположения частицы приводит к изменению ее скорости, причем непредсказуемому (и наоборот). Вот почему в правой части соотношения Гейзенберга стоит не нулевая, а положительная величина. Чем меньше неопределенность в отношении одной переменной (например, Δx), тем более неопределенной становится другая переменная (Δv), поскольку произведение двух погрешностей в левой части соотношения не может быть меньше константы в правой его части. На самом деле, если нам удастся с нулевой погрешностью (абсолютно точно) определить одну из

измеряемых величин, неопределенность другой величины будет равняться бесконечности и о ней мы не будем знать вообще ничего. Иными словами, если бы нам удалось абсолютно точно установить координаты квантовой частицы, о ее скорости мы не имели бы ни малейшего представления; если бы нам удалось точно зафиксировать скорость частицы, мы бы понятия не имели, где она находится. На практике, конечно, физикам-экспериментаторам всегда приходится искать какой-то компромисс между двумя этими крайностями и подбирать методы измерения, позволяющие с разумной погрешностью судить и о скорости, и о пространственном положении частиц.

На самом деле принцип неопределенности связывает не только пространственные координаты и скорость — на этом примере он просто проявляется нагляднее всего; в равной мере неопределенность связывает и другие пары взаимно увязанных характеристик микрочастиц. Путем аналогичных рассуждений мы приходим к выводу о невозможности безошибочно измерить энергию квантовой системы и определить момент времени, в который она обладает этой энергией. То есть, если мы проводим измерение состояния квантовой системы на предмет определения ее энергии, это измерение займет некоторый отрезок времени — назовем его Δt . За этот промежуток времени энергия системы случайным образом меняется — происходят ее *флуктуация*, — и выявить ее мы не можем. Обозначим погрешность измерения энергии ΔE . Путем рассуждений, аналогичных вышеприведенным, мы приходим к аналогичному соотношению для ΔE и неопределенности времени, которым квантовая частица этой энергией обладала:

$$\Delta E \Delta t > h.$$

Относительно принципа неопределенности нужно сделать еще два важных замечания:

он не подразумевает, что какую-либо одну из двух характеристик частицы — пространственное местоположение или скорость — нельзя измерить сколь угодно точно;

принцип неопределенности действует объективно и не зависит от присутствия разумного субъекта, проводящего измерения.

Иногда вам могут встретиться утверждения, будто принцип неопределенности подразумевает, что у квантовых частиц *отсутствуют* определенные пространственные координаты и скорости или что эти величины абсолютно непознаваемы. Не верьте: как мы только что видели, принцип неопределенности не мешает нам с любой желаемой точностью измерить каждую из этих величин. Он утверждает лишь, что мы не в состоянии достоверно узнать и то и другое одновременно. И, как и во многом другом, мы вынуждены идти на компромисс. Опять же писатели-антропософы из числа сторонников концепции «Новой эры» иногда утверждают, что якобы, поскольку измерения подразумевают присутствие разумного наблюдателя, то, значит, на некоем фундаментальном уровне

человеческое сознание связано с Вселенским разумом и именно эта связь обуславливает принцип неопределенности. Повторим по этому поводу еще раз: ключевым в соотношении Гейзенберга является взаимодействие между частицей — объектом измерения и инструментом измерения, влияющим на его результаты. А тот факт, что при этом присутствует разумный наблюдатель в лице ученого, отношения к делу не имеет; инструмент измерения в любом случае влияет на его результаты, присутствует при этом разумное существо или нет.



ВЕРНЕР КАРЛ ГЕЙЗЕНБЕРГ (Werner Karl Heisenberg, 1901–76) — немецкий физик-теоретик. Родился в Вюрцбурге. Его отец был профессором византологии Мюнхенского университета. Помимо блестящих математических способностей с детства проявлял склонность к музыке и вполне состоялся как пианист. Еще школьником был членом народной милиции, поддерживавшей порядок в Мюнхене в смутное время, наступившее после поражения Германии в Первой мировой войне. В 1920 году стал студентом кафедры математики Мюнхенского университета, однако, столкнувшись с отказом в посещении интересующего его семинара по актуальным в те годы вопросам высшей математики, добился перевода на кафедру теоретической физики. В те годы весь мир физиков жил под впечатлением нового взгляда на строение атома (см. атом Бора), и все теоретики из их числа понимали, что внутри атома происходит нечто странное.

Защитив диплом в 1923 году, Гейзенберг приступил к работе в Гёттингене над проблемами строения атома. В мае 1925 года у него случился острый приступ сенной лихорадки, вынудивший молодого ученого провести несколько месяцев в полном уединении на маленьком, отрезанном от внешнего мира острове Гельголанд, и этой вынужденной изоляцией от внешнего мира он воспользовался столь же продуктивно, как Исаак Ньютон многомесячным заключением в карантинном чумном бараке в далеком 1665 году. В частности, за эти месяцы ученым была разработана теория *матричной механики* — новый математический аппарат зарождающейся квантовой механики. Матричная механика, как показало время, в математическом понимании эквивалентна появившейся год спустя

квантово-волновой механике, заложенной в уравнении Шрёдингера, с точки зрения описания процессов квантового мира. Однако на практике использовать аппарат матричной механики оказалось труднее, и сегодня физики-теоретики в основном пользуются представлениями волновой механики.

В 1926 году Гейзенберг стал ассистентом Нильса Бора в Копенгагене. Именно там в 1927 году он и сформулировал свой принцип неопределенности — и можно с основанием утверждать, что это стало его самым большим вкладом в развитие науки. В том же году Гейзенберг стал профессором Лейпцигского университета — самым молодым профессором в истории Германии. Начиная с этого момента, он вплотную занялся созданием единой теории поля (см. универсальные теории) — по большому счету безуспешно. За ведущую роль в разработке квантово-механической теории в 1932 году Гейзенберг был удостоен Нобелевской премии по физике за создание квантовой механики.

С исторической же точки зрения личность Вернера Гейзенберга, вероятно, навсегда останется синонимом неопределенности несколько иного рода. С приходом к власти партии национал-социалистов в его биографии открылась самая трудно-понимаемая страница. Во-первых, будучи физиком-теоретиком, он оказался вовлеченным в идеологическую борьбу, в которой теоретическая физика как таковая получила ярлык «жидовской физики», а сам Гейзенберг был публично назван новыми властями «белым евреем». Лишь после ряда личных обращений к самым высокопоставленным лицам в рядах нацистского руководства ученому удалось остановить кампанию публичной травли в свой адрес.

Гораздо проблематичнее выглядит роль Гейзенберга в германской программе разработки ядерного оружия в годы Второй мировой войны. В то время, когда большинство его коллег эмигрировали или вынуждены были бежать из Германии под давлением гитлеровского режима, Гейзенберг возглавил германскую национальную ядерную программу.

Под его руководством программа всецело сконцентрировалась на постройке ядерного реактора, однако у Нильса Бора при его знаменитой встрече с Гейзенбергом в 1941 году сложилось впечатление, что это лишь прикрытие, а на самом деле в рамках этой программы разрабатывается ядерное оружие. Так что же произошло на самом деле? Действительно ли Гейзенберг умышленно и по велению совести завел германскую программу разработки

атомной бомбы в тупик и направил ее на мирные рельсы, как он впоследствии утверждал? Или просто он допустил какие-то просчеты в своем понимании процессов ядерного распада? Как бы то ни было, Германия атомного оружия создать не успела. Как показывает блестящая пьеса Майкла Фрэйна (Michael Frayn) «Копенгаген», эта историческая загадка, вероятно, даст достаточно материалов еще не для одного поколения беллетристов.

После войны Гейзенберг выступил активным сторонником дальнейшего развития западногерманской науки и ее воссоединения с международным научным сообществом. Его влияние послужило важным инструментом, позволившим добиться безъядерного статуса вооруженных сил Западной Германии в послевоенный период.

Принцип соответствия

При предельных значениях квантовых чисел результаты квантовой механики совпадают с результатами классической механики



В мире квантовой механики, где все определяют принцип неопределенности Гейзенберга и уравнение Шрёдингера, картина происходящего кардинально отличается от привычного нам мира классической механики, где действуют законы движения Ньютона. Однако же наш макроскопический мир соткан из микроскопических атомов, и законы макро- и микромира не могут не быть увязаны между собой. Впервые принцип соответствия законов микро- и макромира был озвучен датским физиком-теоретиком Нильсом Бором, и за иллюстрацией для лучшего понимания этого принципа лучше всего обратиться к упрощенной модели атома, которую также впервые представил миру этот ученый (см. атом Бора).

В атоме Бора электроны могут находиться только на «разрешенных» орбитах. Орбиты выстраиваются по *главным квантовым числам*. Ближайшая к ядру орбита имеет главное квантовое число, равное 1, следующая — 2 и т.д. Чем выше квантовое число электронной орбиты, тем дальше она удалена от ядра. По контрасту — в классическом ядре, предсказываемом ньютоновской механикой, электроны могут обращаться вокруг ядра по произвольным орбитам, находящимся от ядра на любом удалении (это, собственно, и могло бы происходить, не принимай мы во внимание квантовые эффекты).

Теперь, хотя физический радиус орбит и увеличивается неуклонно по мере возрастания главного квантового числа, кинетическая энергия электронов на этих орбитах увеличивается отнюдь не пропорционально расширению орбит, а снижающимися темпами, причем имеется верхний предел энергии удержания электронов на орбите вокруг ядра, который принято называть *энергией срыва*, или *энергией ионизации*. Разогнавшись до такой энергии, электрон теоретически оказывается на орбите бесконечного радиуса, то есть, иными словами, превращается в *свободный электрон* и высвобождается из *ионизированного атома*. Между этим крайним пределом энергии высвобождения электрона и другим крайним пределом энергии нахождения электрона на первой к ядру орбите имеется счетный (но бесконечный) ряд допустимых *дискретных* энергетических состояний, в которых может находиться удерживаемый ядром электрон, причем, согласно законам квантовой механики, на достаточно удаленных от ядра расстояниях допустимые орбиты электронов начинают накладываться одна на другую. Происходит это в силу того, что допустимая энергия электрона на определенной орбите (и радиус этой орбиты как следствие) определяется не точным квантовым числом, а, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, размыто — то есть мы имеем лишь распределение вероятностей нахождения электрона на одной из соседних орбит. Здесь и начинается «стирание различий» между квантово-механической моделью атома, где электрон может находиться лишь в фиксированных энергетических состояниях, поглощать и испускать энергию фик-

сированными порциями (квантами) и, соответственно, обитать на строго определенных орбитах, и классической моделью атома, где электрон обладает произвольной энергией и движется по произвольным орбитам. Иными словами, на больших удалениях от ядра атом начинает представлять собой классическую систему, подчиняющуюся законам механики Ньютона. Это, пожалуй, самый иллюстративный пример принципа соответствия в действии.

Принцип соответствия вступает в силу на нечеткой границе между квантовой и классической механикой и еще раз демонстрирует нам, что в природе нет явных границ между явлениями, как нет и четкого разграничения между теоретическими описаниями природных явлений. И еще он демонстрирует нам то, о чем уже говорилось во введении относительно тенденций развития теоретической науки. Квантовая механика, например, отнюдь не отменяет и не подменяет собой классическую механику Ньютона, а лишь представляет собой предельный случай при переходе явлений в масштабы микромира. Вообще естественнонаучные теории вырастают одна из другой по мере расширения наших ранее накопленных знаний подобно новым свежим побегам на древе познания окружающего мира.

Принцип Ферма

Луч света между двумя точками распространяется по тому пути, который занимает меньше всего времени

ок. 100 н.э.	●	ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА
1621	●	ЗАКОН СНЕЛЛИУСА
1650	●	ПРИНЦИП ФЕРМА

Принцип Ферма, названный так по имени сформулировавшего его французского физика и математика Пьера Ферма (см. ВЕЛИКАЯ ТЕОРЕМА ФЕРМА), является примером так называемого *принципа экстремума*. Принцип экстремума гласит, что любая система стремится к состоянию, при котором значение исследуемой величины принимает максимально или минимально возможное (т. н. экстремальное) значение. Вообще принцип экстремума лежит в основе целого ряда законов геометрической оптики и распространения света. Что касается принципа Ферма, то он является простым математическим обобщением ранее сделанных наблюдений такого рода, и ранее открытые ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА и ЗАКОН СНЕЛЛИУСА непосредственно вытекают из него. То есть принцип Ферма можно считать теоретическим обобщением всех полученных к моменту его формулировки экспериментальных данных о поведении света.

Например, при попадании светового луча внутрь стеклянного параллелепипеда принцип Ферма подскажет нам, на какой угол преломится луч. Весь вопрос сведется к тому, по какому пути должен распространяться луч внутри стекла, чтобы на это ушел минимум времени, учитывая, что в стекле свет распространяется медленнее, чем в воздухе. Поскольку луч в стекле затормаживается, он неизбежно отклонится от направления, под которым он вошел в стекло, иначе возрастет время луча в пути. С другой стороны, если луч внутри стекла пойдет строго перпендикулярно к поверхности стекла, это приведет к увеличению общего пути, пройденного лучом, включая отрезки за пределами стекла, и, как следствие, также к увеличению затраченного времени. Следовательно, для нахождения кратчайшей по времени траектории пути луча между двумя точками нужно найти компромисс между увеличением совокупного пути луча и сокращением пути луча в тормозящей его среде.

При строгом геометрическом решении этой задачи (оно не столь сложно, сколь громоздко, поэтому приводить его здесь я не буду) мы получим ЗАКОН СНЕЛЛИУСА, описывающий преломление света. Применив же его к отраженному от поверхности лучу, мы без труда, чисто геометрически, получим ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА, согласно которому угол падения равен углу отражения.

Иными словами, весь набор законов геометрической оптики выводится из принципа экстремума, согласно которому свет между двумя точками распространяется по пути, на преодоление которого у него уходит наименьшее время. Важно помнить и понимать, однако, что, подобно всем другим эмпирически выведенным законам природы, справедливость принципа Ферма полностью зависит от его экспериментальной проверки, однако данных, которые заставили бы в нем усомниться, на сегодняшний день не имеется.

Принцип эквивалентности

Невозможно определить экспериментальным путем, находится ли тело в гравитационном поле или в неинерциальной системе отсчета

1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1687	●	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1891	●	ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вам, возможно, доводилось испытывать странные физические ощущения в скоростных лифтах: когда лифт трогается вверх (или тормозит при движении вниз), вас придавливает к полу и вам кажется, что вы на мгновение потяжелели; а в момент торможения при движении вверх (или старта при движении вниз) пол лифта буквально уходит у вас из-под ног. Сами, возможно, того не сознавая, вы испытываете при этом на себе действие принципа эквивалентности инертной и гравитационной масс. Когда лифт трогается вверх, он движется с ускорением, которое приплюсовывается к ускорению свободного падения в неинерциальной (движущейся с ускорением) системе отсчета, связанной с лифтом, и ваш вес увеличивается. Однако как только лифт набрал «крейсерскую скорость», он начинает двигаться равномерно, «прибавка» в весе исчезает, и ваш вес возвращается к привычному для вас значению. Таким образом, ускорение производит тот же эффект, что и гравитация.

Теперь представьте, что вы находитесь в открытом космосе вдали от любых сколько-нибудь значительных гравитационных полей, но при этом ваш корабль движется с ускорением $9,8 \text{ м/с}^2$. Если вы встанете на весы, то обнаружите, что вес вашего тела не отличается от веса вашего тела на Земле. Если вы возьмете шар и отпустите его, он, как и на Земле, упадет на пол, и, если измерить изменение скорости его падения в пути, окажется, что он падал равноускоренно все с тем же ускорением $9,8 \text{ м/с}^2$, то есть динамика его падения ничем не отличается от земной. Принцип эквивалентности как раз и гласит, что, находясь в какой-либо замкнутой системе, вы не можете определить, вызвано ускорение свободно движущегося тела в ней гравитационным полем или же оно является собственным ускорением неинерциальной системы отсчета, в которой вы находитесь, иными словами, обусловлено действием силы инерции.

Из принципа эквивалентности следуют интересные предсказания относительно поведения света в гравитационном поле. Представьте, что в момент ускоренного движения вверх при старте лифта вы послали световой импульс (например, при помощи лазерной указки) в направлении мишени на противоположной стене лифта. За то время, пока импульс света находится в пути, мишень вместе с лифтом ускорится и световая вспышка на стене окажется ниже мишени. (Конечно же, в земных условиях вы этого отклонения не заметите, так что просто представьте, будто вы способны рассмотреть отклонение на тысячные доли микрона.) Теперь, возвращаясь к принципу эквивалентности гравитации и ускорения, можно сделать вывод, что аналогичный эффект отклонения светового луча должен наблюдаться не только в неинерциальной системе, но и в гравитационном поле. Для светового луча, согласно обобщенному принципу эквивалентности сил гравитации и инерции, введенному Эйнштейном в число постулатов общей теории относительности, отклонение светового луча

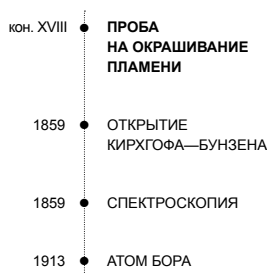
звезды, проходящего по касательной к периметру Солнца, должно составлять около 1,75 угловой секунды (примерно одна двухтысячная градуса), в то время как в рамках классической механики Ньютона луч также должен отклоняться в силу того, что свет обладает массой, но на значительно меньший угол (около 0,9 угловой секунды). Таким образом, измерения, проведенные сэром Артуром Эддингтоном (Arthur Eddington, 1882–1944) во время полного солнечного затмения 1919 года и выявившие отклонение луча на угол 1,6 угловой секунды, стали триумфальным экспериментальным подтверждением общей теории относительности.

Следуя аналогичным рассуждениям, нетрудно увидеть, что принцип эквивалентности предсказывает, что в спектре светового луча, направленного в сторону уменьшения интенсивности гравитационного поля (в земных условиях — вверх), должно наблюдаться красное смещение, и это предсказание также получило свое экспериментальное подтверждение.

Принцип эквивалентности лишь один из постулатов общей теории относительности. Он ограничивается рассмотрением эффектов гравитации и равноускоренного движения, однако каждое подтверждение принципа эквивалентности является одновременно и подтверждением общей теории относительности.

Проба на окрашивание пламени

Присутствие металлов можно идентифицировать по цвету пламени, образующегося при их горении



При совершении электроном квантового скачка с одной разрешенной орбитали на другую (см. атом Бора) атом испускает свет. А поскольку энергетические уровни атомов двух элементов различны, свет, испускаемый атомом одного элемента, будет отличаться от света, испускаемого атомом другого. Это положение лежит в основе науки, которую мы называем спектроскопией (см. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА).

На этом же положении (что атомы разных элементов испускают свет разной длины волны) основана проба на окрашивание пламени в химии. При нагревании в пламени газовой горелки раствора, содержащего ионы одного из щелочных металлов (то есть одного из элементов первой колонки ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕНДЕЛЕЕВА), пламя окрасится в определенный цвет в зависимости от того, какой металл присутствует в растворе. К примеру, ярко-желтый цвет пламени выдает присутствие натрия, фиолетовый — калия, а карминно-красный — лития. Происходит это окрашивание пламени так: столкновение с горячими газами пламени переводит электроны в возбужденное состояние, из которого они возвращаются в исходное, одновременно испуская свет характерной длины волны.

Это свойство атомов объясняет, почему лес, прибитый к океанскому берегу, так высоко ценится для топки каминов. Долгое время находясь в море, бревна адсорбируют большое количество разных веществ, и при горении бревен эти вещества окрашивают пламя во множество разных цветов.

Так выглядит проба на окрашивание пламени. Три металла (слева направо) — натрий, стронций и бор (содержащийся в борной кислоте) — при горении окрашивают пламя каждый в свой цвет



Проблема Гольдбаха

Любое четное число больше чем 2 можно представить в виде суммы двух простых чисел

1742

ПРОБЛЕМА
ГОЛЬДБАХА

ХРИСТИАН ГОЛЬДБАХ (Christian Goldbach, 1690–1764) — немецкий математик. Родился в Кёнигсберге в Пруссии (ныне Калининград, Россия). В 1725 году стал профессором математики в Санкт-Петербурге, тремя годами позже приехал в Москву в качестве домашнего учителя будущего царя Петра II. Во время путешествий по Европе Гольдбах познакомился со многими ведущими математиками своего времени, включая Готфрида Лейбница, Абрахама де Муавра и семью Бернулли. Многие его работы выросли из переписки с великим швейцарским математиком Леонардом Эйлером (Leonhard Euler, 1707–83). Утверждение, которое мы теперь называем проблемой Гольдбаха, впервые было выдвинуто в 1742 году в письме Гольдбаха к Эйлеру.

Самые простые математические утверждения иногда бывает сложнее всего доказать. Так, великая теорема Ферма была окончательно доказана лишь в конце XX века — через несколько сот лет после того, как была сформулирована. Существует еще одно утверждение, чем-то похожее на теорему Ферма, которое математики не смогли доказать до сих пор. Его называют проблемой Гольдбаха, и формулировка этого утверждения предельно проста. В нем всего лишь говорится, что каждое четное число больше 2 можно представить как сумму двух простых чисел. (Поясним: *простое число* — это число, которое делится только на 1 и на себя само. Так, 2, 3, 5, 7 — простые числа, а 4 (2×2), 6 (3×2), 9 (3×3) — нет.) Впервые это утверждение выдвинул Христиан Гольдбах в 1742 году. Из него следует, что 10 (возьмем пример попроще) как четное число можно записать в виде суммы $7 + 3$, где 7 и 3 — простые числа. Другая формулировка утверждения Гольдбаха, немного менее известная, — что любое нечетное число, большее или равное 9, можно представить в виде суммы трех простых чисел (например, $13 = 7 + 3 + 3 = 5 + 5 + 3$).

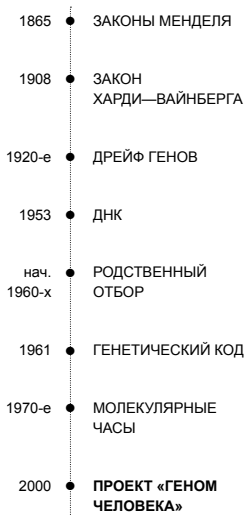
С тех пор как Гольдбах выдвинул эту гипотезу, математики не сомневались, что она, как и Великая теорема Ферма, верна. Тем не менее в отличие от теоремы Ферма никто никогда не претендовал на то, что сумел ее доказать. К решению этой проблемы существует подход «в лоб» — надолго запустить компьютерную программу, которая бы последовательно проверяла это утверждение на все больших и больших четных числах. Таким способом можно было бы *опровергнуть* теорему, будь она неверна. Но так нельзя *доказать* теорему — по той простой причине, что никогда нельзя гарантировать, что число, которое программа могла бы проверить за следующий свой шаг, не окажется первым исключением из правила. В действительности мы знаем, что проблема Гольдбаха верна по крайней мере для всех четных чисел, не превышающих 100 000.

В 30-е годы XX века группа русских математиков установила, что количество простых чисел, которые при сложении образуют четное число, конечно, а также что проблема Гольдбаха верна для большого класса четных чисел. Однако доказательство теоремы до сих пор не найдено.

Почему математики тратят столько времени на решение таких задач, как Великая теорема Ферма или проблема Гольдбаха? Ведь в этом нет практического смысла, из их решения нельзя извлечь никакой выгоды. На мой взгляд, это очень древний и очень свойственный человеческой природе вид деятельности — поиск самоочевидной, бесспорной истины. Философы тысячелетиями ищут истину. Математики надеются обнаружить такие истины, работая с системами, построенными на чистой логике. И то, что эти доказательства столь трудно достижимы, наверное, объясняется скорее самой природой логики, невозможностью найти истину в этом ненадежном, изменчивом мире, а не свойством математики как таковой.

Проект «Геном человека»

В июне 2000 года
был опубликован
предварительный
проект полной
последовательности
ДНК человека



Согласно центральной догме молекулярной биологии, основная программа химических процессов, происходящих в любом организме (в том числе организме человека), записана в последовательности пар оснований молекулы ДНК. В некотором смысле, если вы узнаете последовательность пар оснований, то она расскажет вам все о химических реакциях и наследственной информации данного вида. В 1986 году группа ученых в США начала работу над проектом, позднее названным «Геном человека». Цель этого проекта заключалась в том, чтобы представить в виде карты полную последовательность (геном) ДНК человека. Однако в 1980-е годы технологии были слишком примитивными для решения этой задачи. Предполагалось, что стоимость проекта составит миллионы долларов и что задача будет решена не ранее 2005 года.

В то время среди биологов было много противников этого проекта, которые предчувствовали, что его реализация будет сопровождаться вторжением некой корпоративной структуры, или Большой Науки, в их область, для которой прежде были типичны небольшие исследовательские группы, работавшие под руководством ведущего ученого лаборатории. Биологи всерьез опасались, что их всех заставят бесконечное количество раз выполнять скучные операции с ДНК человека. Как сказал мне один юный кандидат наук: «Я не хочу положить свою жизнь на то, чтобы определить последовательность 12-й хромосомы от 100 000-й до 200 000-й пары оснований». Такие опасения рассеялись после появления новых технологий, позволивших передать машинам рутинную работу по определению последовательности.

1990-е годы вошли в историю как годы уверенного совершенствования наших возможностей определять последовательность полных геномов. Так, в 1985 году Институтом изучения генома в Роквилле, штат Мэриленд, была опубликована первая полная последовательность ДНК живого организма — бактерии *Haemophilus influenzae*. На определение всей последовательности у ученых ушло несколько лет.

За этой бактерией вскоре последовали другие организмы. В 1996 году был определен первый геном эукариотической клетки (т.е. сложно-организованной клетки, ДНК которой заключена в ядре) — клетки дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Этим открытием увенчались совместные усилия шестисот ученых из Европы, Северной Америки и Японии. В 1998 году была опубликована первая последовательность ДНК многоклеточного организма — плоского червя *Caenorhabditis elegans*. Каждое такое достижение требовало определения все более и более длинной последовательности и было важной вехой на пути к определению собственно генома человека.

Важной фигурой в этом процессе стал Крейг Вентер (Craig Venter), основавший позднее частную корпорацию «Целерон» (Celoron). Вентер внедрил в науку метод определения последовательности ДНК, позднее названный «методом беспорядочной

стрельбы». Суть метода в том, что определяемую ДНК организма разбивают на множество небольших фрагментов, каждый из которых вводят в автомат, определяющий последовательность ДНК. Нечто похожее получится, если разодрать книгу по страницам и раздать их разным читателям. После того как будут определены последовательности каждого фрагмента, в действие вводят новейшие компьютерные программы, заново собирающие исходную последовательность. Такое интенсивное использование информационных технологий объясняет, почему многие ученые называют новую область исследований генома *биоинформационной*, а не биомолекулярной революцией.

В июне 2000 года Крейг Вентер и Фрэнсис Коллин (Francis Collins), руководитель проекта «Геном человека», осуществлявшегося в национальных институтах здоровья США, объявили о событии, названном ими «первой сборкой генома человека». По существу, это была первая реконструкция полного генома человека, выполненная методом беспорядочной стрельбы. Несколькими месяцами позже, в феврале 2001 года, был опубликован первый предварительный набросок генома человека. Обнаружились некоторые удивительные факты.

Например, давно было известно, что большая часть ДНК человека не входит в состав генов. Новые результаты показали, что ДНК человека содержит удивительно небольшое количество генов — порядка 30 000–50 000. (Я говорю «удивительно», потому что ученые ожидали значительно более высоких требований к генетической структуре такого сложного организма, каким является человек). Однако эти гены не организованы в одну длинную последовательность, а состоят из кодирующих участков, называемых *экзонами*, с вкраплениями случайных последовательностей — *интронов*. Выясняется, что аппарат, осуществляющий сборку белка, закодированного геном с последовательностью описанного типа, осуществляет выбор между несколькими вариантами компоновки белка. Так, каждый ген человека кодирует приблизительно три различных белка, а не один белок, как можно было предположить, основываясь на центральной догме молекулярной биологии.

Можно считать, что на первом этапе проекта «Геном человека» была расшифрована книга жизни. На следующем этапе предстоит выяснить, что представляют собой все гены и как кодируемые ими белки объединяются, образуя биологический портрет человека. По оценкам ученых, на то, чтобы добыть все данные и понять все механизмы реализации генома человека, потребуется еще одно столетие.

Я полагаю, что эта оценка очень пессимистична — возможно потому, что я верю в способность этих людей справляться со сложными задачами, ведущими к открытиям, больше, чем они сами. Так или иначе, мы продвигаемся к пониманию полного генетического портрета человека, и это будет иметь грандиозные последствия для медицины и благоденствия человека.

Равновесие

Равновесием называется такое состояние системы, при котором силы, действующие на систему, уравновешены между собой.

Равновесие может быть устойчивым, неустойчивым или безразличным

1537	●	РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
XVII	●	РАВНОВЕСИЕ
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА

Понятие равновесия — одно из самых универсальных в естественных науках. Оно применимо к любой системе, будь то система планет, движущихся по стационарным орбитам вокруг звезды, или популяция тропических рыбок в лагуне атолла. Но проще всего понять концепцию равновесного состояния системы на примере механических систем. В механике считается, что система находится в равновесии, если все действующие на нее силы полностью уравновешены между собой, то есть гасят друг друга. Если вы читаете эту книгу, например, сидя в кресле, то вы как раз и находитесь в состоянии равновесия, поскольку сила земного притяжения, тянущая вас вниз, полностью компенсирована силой давления кресла на ваше тело, действующей снизу вверх. Вы не проваливаетесь и не взлетаете именно потому, что пребываете в состоянии равновесия.

Различают три типа равновесия, соответствующие трем физическим ситуациям.

Устойчивое равновесие

Именно его большинство людей обычно и понимают под равновесием. Представьте себе шар на дне сферической чаши. В состоянии покоя он находится строго в центре чаши, где действие силы гравитационного притяжения Земли уравновешено силой реакции опоры, направленной строго вверх, и шар покоится там подобно тому, как вы покоитесь в своем кресле. Если сместить шар в сторону от центра, откатив его вбок и вверх в направлении края чаши, то стоит его отпустить, как он тут же устремится обратно к самой глубокой точке в центре чаши — в направлении положения устойчивого равновесия.

Вы, сидя в кресле, находитесь в состоянии покоя благодаря тому, что система, состоящая из вашего тела и кресла, находится в состоянии устойчивого равновесия. Поэтому при изменении каких-то параметров этой системы — например, при увеличении вашего веса, если, предположим, вам на колени сел ребенок, — кресло, будучи материальным объектом, изменит свою конфигурацию таким образом, что сила реакции опоры возрастет и вы останетесь в положении устойчивого равновесия (самое большее, что может произойти, — подушка под вами промнется чуть глубже).

В природе имеется множество примеров устойчивого равновесия в различных системах (и не только механических). Рассмотрим, например, отношения хищник—жертва в экосистеме. Соотношение численностей замкнутых популяций хищников и их жертв достаточно быстро приходит в равновесное состояние — столько-то зайцев в лесу из года в год стабильно приходится на столько-то лис, условно говоря. Если по каким-либо причинам численность популяции жертв резко изменяется (из-за всплеска рождаемости зайцев, например), экологическое равновесие будет очень скоро восстановлено за счет быстрого прироста поголовья хищников, которые начнут истреблять зайцев ускорен-

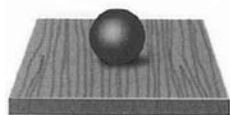
ными темпами, пока не приведут поголовье зайцев в норму и не начнут сами вымирать от голода, приводя в норму и собственное поголовье, в результате чего численности популяций и зайцев, и лис придут к норме, которая наблюдалась до всплеска рождаемости у зайцев. То есть в устойчивой экосистеме также действуют внутренние силы (хотя и не в физическом понимании этого слова), стремящиеся вернуть систему в состояние устойчивого равновесия в случае отклонения системы от него.

Аналогичные эффекты можно наблюдать и в экономических системах. Резкое падение цены товара приводит к всплеску спроса со стороны охотников за дешевизной, последующему сокращению товарных запасов и как следствие росту цены и падению спроса на товар — и так до тех пор, пока система не вернется в состояние устойчивого ценового равновесия спроса и предложения. (Естественно, в реальных системах, и в экологических, и в экономических, могут действовать внешние факторы, отклоняющие систему от равновесного состояния, — например, сезонный отстрел лис и/или зайцев или государственное ценовое регулирование и/или квотирование потребления. Такое вмешательство приводит к смещению равновесия, аналогом которого в механике будет, например, деформация или наклон чаши.)

Неустойчивое равновесие

Не всякое равновесие, однако, является устойчивым. Представьте себе шар, балансирующий на лезвии ножа. Направленная строго вниз сила земного притяжения в этом случае, очевидно, также полностью уравновешена направленной вверх силой реакции опоры. Но стоит отклонить центр шара в сторону от точки покоя, приходящейся на линию лезвия, хоть на долю миллиметра (а для этого достаточно мизерного силового воздействия), как равновесие будет мгновенно нарушено и сила земного притяжения начнет увлекать шар все дальше от него.

Примером неустойчивого природного равновесия служит тепловой баланс Земли при смене периодов глобального потепления новыми ледниковыми периодами и наоборот (см. циклы миланковича). Среднегодовая температура поверхности нашей планеты определяется энергетическим балансом между суммарным солнечным излучением, достигающим поверхности, и суммарным тепловым излучением Земли в космическое пространство. Неустойчивым этот тепловой баланс становится следующим образом. В какую-то зиму выпадает больше снега, чем обычно. На следующее лето тепла не хватает, чтобы растопить излишки снега, и лето оказывается также холоднее обычного вследствие того, что из-за переизбытка снега поверхность Земли отражает обратно в космос большую долю солнечных лучей, чем прежде. Из-за этого следующая зима оказывается еще более снежной и холодной, чем предыдущая, а следующим за ней летом на поверхности остается еще



Три типа равновесия на примере шара: (в чаше) безразличное равновесие: силы уравновешены в любой точке системы; (на лезвии ножа) неустойчивое равновесие: малейшее смещение приводит к его нарушению; (на кухонной доске) устойчивое равновесие: шар стремится вернуться в исходное положение

больше снега и льда, отражающего солнечную энергию в космос... Нетрудно увидеть, что чем больше такая глобальная климатическая система отклоняется от исходной точки теплового равновесия, тем быстрее нарастают процессы, уводящие климат еще дальше от нее. В конечном итоге на поверхности Земли в приполярных областях за долгие годы глобального похолодания образуются многокилометровые напластования ледников, которые неумолимо продвигаются в направлении все более низких широт, принося с собой на планету очередной ледниковый период. Так что трудно себе представить более шаткое равновесие, чем глобально-климатическое.

Особого упоминания заслуживает разновидность неустойчивого равновесия, называемая *метастабильным*, или *квазиустойчивым равновесием*. Представьте себе шар в узкой и неглубокой канавке — например, на повернутом острием вверх лезвии фигурного конька. Незначительное — на миллиметр-другой — отклонение от точки равновесия приведет к возникновению сил, которые вернут шар в равновесное состояние в центре канавки. Однако уже чуть большей силы хватит для того, чтобы вывести шар за пределы зоны метастабильного равновесия, и он свалится с лезвия конька. Метастабильные системы, как правило, обладают свойством пребывать какое-то время в состоянии равновесия, после чего «срываются» из него в результате какой-либо флуктуации внешних воздействий и «сваливаются» в необратимый процесс, характерный для нестабильных систем.

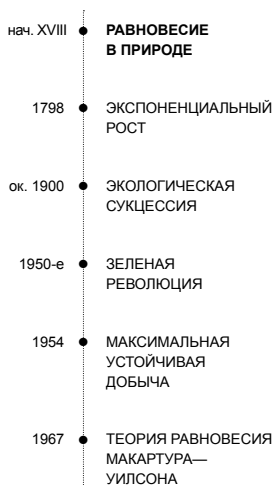
Типичный пример квазиустойчивого равновесия наблюдается в атомах рабочего вещества некоторых типов лазерных установок. Электроны в атомах рабочего тела лазера занимают метастабильные атомные орбиты и остаются на них до пролета первого же светового кванта, который «сбивает» их с метастабильной орбиты на более низкую стабильную, испуская при этом новый квант света, когерентный пролетающему, который в свою очередь сбивает с метастабильной орбиты электрон следующего атома и т.д. В результате запускается лавинообразная реакция излучения когерентных фотонов, образующих лазерный луч, которая, собственно, и лежит в основе действия любого лазера.

Безразличное равновесие

Промежуточный случай между устойчивым и неустойчивым равновесием — так называемое безразличное равновесие, при котором любая точка системы является точкой равновесия и отклонение системы от исходной точки покоя ничего не изменяет в раскладе сил внутри нее. Представьте себе шар на абсолютно гладком горизонтальном столе — куда бы вы его ни сместили, он останется в состоянии равновесия.

Равновесие в природе

Ученые уже не верят, что предоставленные самим себе экосистемы могут достичь постоянного устойчивого состояния высокой урожайности



Миф о равновесии в природе давно укрепился в сознании людей. Согласно этому мифу, природные системы, если человек не вмешивается в их развитие, неизбежно приходят в устойчивое, неизменное и взаимосвязанное состояние, в котором все хорошо отрегулировано. Существует немало популярных (но не научных) статей по экологии, эксплуатирующих эту тему: авторы изображают природу хрупкой и ранимой, постоянно подвергающейся опасности уничтожения от рук человека, чья деятельность может в любой момент нарушить это непрочное равновесие.

Например, бытует теория, что в умеренном поясе северного полушария после таких природных катаклизмов, как лесной пожар, постепенное возобновление растительности происходит по строго определенному закону экологической сукцессии. Сначала появляются сорняки, затем пионерные виды (сосна и др.) и, наконец, широколиственные деревья, такие как дуб или клен. Считается, что сукцессия в конечном счете должна привести к тому, что экологи называют *климаксовым лесом*, — к устойчивой экосистеме с максимально возможным содержанием органического вещества, максимальным запасом жизненно необходимых химических элементов и максимальным биологическим разнообразием. Но легко убедиться, что развитие лесов происходит не так. Основная часть вещества накапливается на ранних стадиях роста деревьев. Способность откладывать про запас химические элементы на этом этапе также максимальна. В то время как зрелый лес, скорее, теряет вещество по мере старения и умирания.

Кроме того, с течением времени под действием геологических и прочих факторов меняется и окружающая среда. Пожары, наводнения, колебания количества атмосферных осадков оказывают влияние на среду, в которой произрастает лес. И растения, конечно же, не могут не реагировать на эти изменения. Получается, что экосистема все время пытается попасть в движущуюся мишень. Так называемое равновесие в природе на самом деле зависит от окружающей среды, а среда эта постоянно подвержена изменениям. Скорее, природа находится в состоянии непрерывного движения — все время куда-то стремится, но никогда не достигает конечной цели. Вмешательство человека — всего лишь еще один способ изменить окружающую среду и, таким образом, повлиять на направление развития экосистемы.

Радиоактивный распад

*Число
распадающихся
в заданный
промежуток
времени ядер
в образце
радиоактивного
материала
пропорционально
общему числу ядер
соответствующего
радиоактивного
элемента в этом
образце*



Большинство атомных ядер нестабильно. Рано или поздно они самопроизвольно (или, как говорят физики, *спонтанно*) распадаются на более мелкие ядра и элементарные частицы, которые принято называть *продуктами распада*, или *дочерними элементами*. Распадающиеся частицы принято именовать *исходными материалами*, или *родителями*. У всех нам хорошо знакомых химических веществ (железо, кислород, кальций и т. п.) имеется хотя бы один стабильный изотоп. (*Изотопами* называются разновидности химического элемента с одним и тем же числом протонов в ядре — это число протонов соответствует порядковому номеру элемента, — но разным числом нейтронов.) Тот факт, что эти вещества нам хорошо известны, свидетельствует об их стабильности — значит, они живут достаточно долго, чтобы в значительных количествах накапливаться в природных условиях, не распадаясь на составляющие. Но у каждого из природных элементов имеются и нестабильные изотопы — их ядра можно получить в процессе ядерных реакций, но долго они не живут, поскольку быстро распадаются.

Распад ядер радиоактивных элементов или изотопов может происходить тремя основными путями, и соответствующие реакции ядерного распада названы тремя первыми буквами греческого алфавита. При *альфа-распаде* выделяется атом гелия, состоящий из двух протонов и двух нейтронов, — его принято называть альфа-частицей. Поскольку альфа-распад влечет за собой понижение числа положительно заряженных протонов в атоме на два, ядро, испустившее альфа-частицу, превращается в ядро элемента, отстоящую на две позиции ниже от нее в ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МЕНДЕЛЕЕВА. При *бета-распаде* ядро испускает электрон, а элемент продвигается на одну позицию *вперед* по периодической таблице (при этом, по существу, нейтрон превращается в протон с излучением этого самого электрона). Наконец, *гамма-распад* — это распад ядер с излучением фотонов высоких энергий, которые принято называть гамма-лучами. При этом ядро теряет энергию, но химический элемент не видоизменяется.

Однако сам по себе факт нестабильности того или иного изотопа химического элемента отнюдь не означает, что, собрав воедино некоторое число ядер этого изотопа, вы получите картину их одномоментного распада. В реальности распад ядра радиоактивного элемента чем-то напоминает процесс жарки кукурузы при изготовлении попкорна: зерна (нуклоны) отпадают от «початка» (ядра) по одному в совершенно непредсказуемом порядке, пока не отвалятся все. Закон, описывающий реакцию радиоактивного распада, собственно, только констатирует этот факт: за фиксированный отрезок времени радиоактивное ядро испускает число нуклонов, пропорциональное числу нуклонов, остающихся в его составе. То есть чем больше зерен-нуклонов все еще остается в «недожаренном» початке-ядре, тем больше их выделится за фиксированный интервал времени «жарки». При переводе этой мета-

форы на язык математических формул мы получим уравнение, описывающее радиоактивный распад:

$$dN = \lambda N dt,$$

где dN — число нуклонов, испускаемых ядром с общим числом нуклонов N за время dt , а λ — экспериментально определяемая константа радиоактивности исследуемого вещества. Вышеприведенная эмпирическая формула представляет собой линейное дифференциальное уравнение, решением которого является следующая функция, описывающая число нуклонов, остающихся в составе ядра на момент времени t :

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 — число нуклонов в ядре на начальный момент наблюдения.

Константа радиоактивности, таким образом, определяет, насколько быстро распадается ядро. Однако физики-экспериментаторы обычно измеряют не ее, а так называемое *время полураспада* ядра (то есть срок, за который исследуемое ядро испускает половину содержащихся в нем нуклонов). У различных изотопов различных радиоактивных веществ время полураспада варьируется (в полном соответствии с теоретическими предсказаниями) от миллиардных долей секунды до миллиардов лет. То есть некоторые ядра живут практически вечно, а некоторые распадаются буквально моментально (тут важно помнить, что по истечении времени полураспада остается половина совокупной массы исходного вещества, по истечении двух сроков полураспада — четверть его массы, по истечении трех сроков полураспада — одна восьмая и т.д.).

Что касается возникновения радиоактивных элементов, то рождаются они по-разному. В частности, ионосфера (верхний разреженный слой атмосферы) Земли подвергается постоянной бомбардировке космическими лучами, состоящими из частиц с высокими энергиями (см. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ). Под их воздействием долгоживущие атомы и расщепляются на неустойчивые изотопы: в частности, из стабильного азота-14 в земной атмосфере постоянно образуется неустойчивый изотоп углерода-14 с 6 протонами и 8 нейтронами в ядре (см. РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ДАТИРОВАНИЕ).

Но вышеописанный случай скорее экзотика. Гораздо чаще радиоактивные элементы образуются в *цепи реакций* ядерного деления. Так называют череду событий, в ходе которых исходное («материнское») ядро распадается на два «дочерних» (также радиоактивных), те, в свою очередь, — на четыре ядра-«внучки» и т.д. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут получены стабильные изотопы. В качестве примера возьмем изотоп урана-238 (92 протона + 146 нейтронов) со временем полураспада около 4,5 млрд лет. Этот период, кстати, приблизительно равен возрасту нашей планеты, что означает, что примерно половина

урана-238 из состава первичной материи формирования Земли по-прежнему находится в совокупности элементов земной природы. Уран-238 превращается в торий-234 (90 протонов + 144 нейтрона), время полураспада которого равно 24 суткам. Торий-234 превращается в палладий-234 (91 протон + 143 нейтрона) со временем полураспада 6 часов — и т.д. После десяти с лишним этапов распада получается, наконец, стабильный изотоп свинца-206.

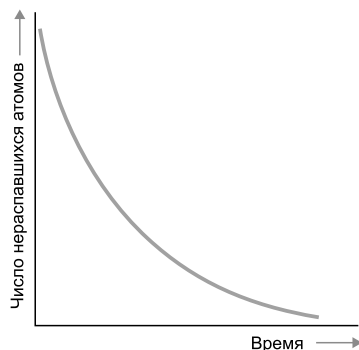
О радиоактивном распаде можно говорить много, но особо отметить нужно несколько моментов. Во-первых, даже если мы возьмем в качестве исходного материала чистый образец какого-то одного радиоактивного изотопа, он будет распадаться на разные составляющие и вскоре мы неизбежно получим целый «букет» различных радиоактивных веществ с различными ядерными массами. Во-вторых, естественные цепочки реакций атомного распада успокаивают нас в том смысле, что радиоактивность — явление природное, существовала она задолго до человека и не нужно брать грех на душу и обвинять одну только человеческую цивилизацию в том, что на Земле имеется радиационный фон. Уран-238 существовал на Земле с самого ее зарождения, распадался, распадается — и будет распадаться, а атомные электростанции ускоряют этот процесс фактически на доли процента; так что никакого особо пагубного влияния дополнительно к тому, что предусмотрено природой, они на нас с вами не оказывают.

Наконец, неизбежность радиоактивного атомного распада сопряжена как с потенциальными проблемами, так и с потенциальными возможностями для человечества. В частности, в цепи реакций распада ядер урана-238 образуется радон-222 — благородный газ без цвета, запаха и вкуса, не вступающий ни в какие химические реакции, поскольку он не способен образовывать химические связи. Это *инертный газ*, и он буквально сочится из недр нашей планеты. Обычно он не оказывает на нас никакого действия — просто растворяется в воздухе и остается там в незначительной концентрации, пока не распадется на еще более легкие элементы. Однако если этот безвредный радон будет долго находиться в непроветриваемом помещении, то со временем там начнут накапливаться продукты его распада, а они для здоровья человека вредны (при вдыхании). Вот так мы получаем так называемую «радоновую проблему».

С другой стороны, радиоактивные свойства химических элементов приносят людям и значительную пользу, если подойти к ним с умом. Радиоактивный фосфор, в частности, теперь вводится в виде инъекций для получения радиографической картины костных переломов. Степень его радиоактивности минимальна и не причиняет вреда здоровью пациента. Поступая в костные ткани организма вместе с обычным фосфором, он излучает достаточно лучей, чтобы зафиксировать их на светочувствительной аппаратуре и получить снимки сломанной кости буквально изнутри. Хирурги, соответственно, получают возможность оперировать сложный

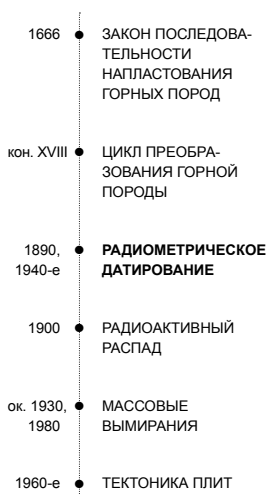
перелом не вслепую и наугад, а заранее изучив структуру перелома по таким снимкам. Вообще же применениям *радиографии* в науке, технике и медицине несть числа. И все они работают по одному принципу: химические свойства атома (по сути, свойства внешней электронной оболочки) позволяют отнести вещество к определенной химической группе; затем, используя химические свойства этого вещества, атом доставляется «в нужное место», после чего, используя свойство ядер этого элемента к распаду в строгом соответствии с установленными законами физики «графику», регистрируются продукты распада.

График интенсивности радиоактивного распада образца вещества в зависимости от времени. Наблюдается экспоненциальное затухание — явление, обратное ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМУ РОСТУ



Радиометрическое датирование

Возраст предмета можно определить, если он содержит продукты радиоактивного распада

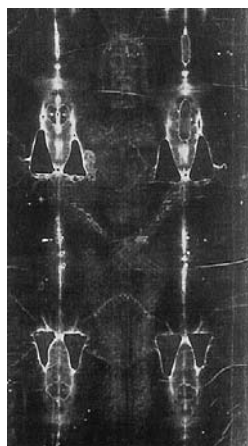


Ученым необходимо знать точный возраст объекта исследования. Археолога, например, интересует время изготовления найденного глиняного горшка, а палеонтолог хочет определить возраст какой-нибудь окаменелости. При стандартном методе определения возраста (этот процесс называется датированием) исследуют содержащиеся в объекте радиоактивные изотопы (см. РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД). Этот метод применим к объектам, содержащим изотопы с известным периодом полураспада. В таком случае, определив, сколько этого изотопа присутствовало в предмете в момент его изготовления (или в организме в момент гибели), и сравнив это количество с количеством, не подвергшимся радиоактивному распаду, можно определить, сколько периодов полураспада изотопа прошло со времени изготовления предмета, и, следовательно, узнать возраст данного предмета. Например, если сейчас от исходного количества изотопов осталась лишь половина, значит, возраст предмета равен одному периоду полураспада.

Трудность состоит в вычислении исходного количества изотопа (периоды полураспадов измерить несложно). Когда метод радиометрического датирования, разработанный в середине XX века в Чикагском университете, был впервые применен на практике, в качестве изотопа использовался углерод-14. На этом примере можно понять, как вообще устроено радиометрическое датирование. Углерод-14 — это изотоп углерода, в ядре которого находится 6 протонов и 8 нейтронов. Этот изотоп немного тяжелее нормального углерода (углерода-12, в ядре которого 6 нейтронов) и участвует в таких же химических реакциях, что и углерод-12. Углерод-14 образуется высоко в атмосфере при столкновении космических лучей с ядрами азота. Когда он достигает поверхности, его поглощают растения, а затем — животные, поедающие эти растения. Таким образом углерод-14 попадает в ткани растений и животных. В живых организмах содержатся миллионы атомов углерода, и примерно каждый миллионный — это атом углерода-14.

Этот изотоп нестабилен, период его полураспада — 5700 лет. Пока организм жив, любой распавшийся атом углерода-14 замещается таким же атомом углерода-14 из окружающей среды. Однако после смерти живого существа круговорот углерода завершается (см. КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА В ПРИРОДЕ) и начинается неотвратимый распад изотопа. Через 5700 лет в куске дерева останется только половина того количества углерода-14, какое было в дереве перед его гибелью. Если это дерево было спилено для изготовления мебели, измерение содержания углерода-14 позволит оценить возраст мебели. В большинстве случаев датирование органических материалов — папирусных свитков, частично сгоревшей древесины из древних кострищ, кожаных изделий — проводится таким методом.

Для углерода-14 исходное количество изотопа можно определить напрямую. Существуют виды деревьев, например, остистая сосна, чей возраст достигает нескольких тысяч лет. Сравнивая



Туринская плащаница, в которую якобы было обернуто тело Христа и на которой запечатлелся его образ. Проведенный в 1988 году радиоуглеродный анализ показал, что ткань было изготовлена не ранее 1260 года

образцы годовичных колец у живых и погибших деревьев, ученые могут создать «летопись» колец, которая начинается около 10 тысяч лет назад (этот метод называется *дендрохронологией*). Подсчет колец позволяет точно определить, когда то или иное кольцо появилось на дереве. Измерив оставшийся в этом слое уровень углерода-14, мы можем понять, сколько углерода-14 было в окружающей среде, когда появилось это кольцо.

Датирование с помощью анализа углерода-14 (известное как *радиоуглеродное датирование*) широко используется для объектов, чей возраст не превышает нескольких десятков тысяч лет; сюда относится большинство археологических находок. Предел современных методов — около 50 тысяч лет. В более древних объектах, таких как горные породы и метеориты, остается слишком мало углерода-14. Для определения их возраста необходимо найти другие «часы».

И такие «часы» есть. Это прежде всего *калий-аргоновый метод* (или просто *аргоновый метод*) радиометрического датирования. Калий — широко распространенный элемент, который входит в состав многих минералов, а при распаде изотопа калия-40 с периодом полураспада 1,25 миллиарда лет образуется аргон-40 (аргон — благородный газ, проявляющий крайне низкую химическую активность). (Аргон остается запертым в горной породе, как в ловушке, потому что его атомы слишком велики и не могут выскочить сквозь кристаллическую решетку минерала.) Содержание калия в минерале определяется структурой этого минерала, а доля калия-40 в каждом минерале — своя. При калий-аргоновом методе исследуемый образец измельчается и определяется содержание аргона-40. Каждое ядро аргона-40 образуется при распаде одного ядра калия-40, поэтому можно определить число распадов (и, следовательно, число периодов полураспада), прошедших со времени образования минерала. Помимо калий-аргонового, широко используются подобные методы, основанные на распаде урана-238 до свинца-206 (период полураспада урана-238 — 4,5 миллиарда лет) и рубидия-87 до стронция-87 (период полураспада рубидия-87 — 49 миллиардов лет). Именно благодаря использованию этих методов при датировании метеоритов и лунных пород ученым удалось оценить возраст Солнечной системы.

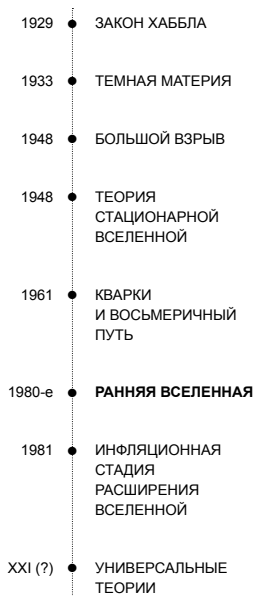
При определении возраста горных пород путем радиометрического датирования необходимо учитывать два фактора. Во-первых, если порода расплавляется, радиометрические часы сбрасываются на ноль — например, накопившийся аргон-40 исчезает из расплавленного минерала. А радиометрический анализ показывает время, прошедшее с момента последнего перехода горной породы из жидкого состояния в твердое. (Одна и та же порода после первоначального образования может несколько раз расплавиться, а потом затвердеть.)

И во-вторых, радиометрический метод неприменим к осадочным породам, состоящим из частиц и кусочков различных

пород (см. цикл преобразования горной породы). Радиометрическое датирование позволит определить время кристаллизации каждой отдельной частицы, но не время их объединения в породу. Поскольку окаменелости встречаются только в осадочных породах, для определения их возраста требуется особая осторожность. Обычно пласт осадочных пород неизвестного возраста, содержащий окаменелости, залегает между слоями лавы или вулканического пепла, возраст которых можно определить. Следовательно, возраст этих окаменелостей находится в интервале между возрастными выше- и нижележащих слоев (см. закон последовательности напластования горных пород).

Ранняя Вселенная

На самой ранней стадии эволюции Вселенной относительно долгие периоды расширения и охлаждения перемежались короткими периодами фундаментальной перестройки материи



Со времени открытия закона Хаббла в научной космологии возобладали точка зрения, согласно которой Вселенная возникла в виде горячего сгустка сверхплотной материи и с тех пор расширяется и остывает. Но лишь с начала 1980-х годов космологи по-настоящему задумались над тем, как именно развивались события на самой ранней стадии расширения Вселенной. Сегодня мы имеем уже достаточно полную хронологическую картину ранней истории Вселенной, начиная с невообразимо малых долей секунды после Большого взрыва, объясняющую происхождение элементарных частиц и химических элементов. Давайте прокрутим события в обратной хронологии, начиная с 1 миллиарда лет после Большого взрыва (все сроки весьма условны) и вплоть до самого взрыва.

1 миллиард лет

Началось формирование галактик. Впервые в истории Вселенная стала отдаленно напоминать то, что мы наблюдаем сегодня. Уже следующее поколение сверхмощных телескопов позволит нам рассмотреть галактики, удаленные настолько, что они предстанут перед нами на стадии непосредственно после их рождения.

300 000 лет

Примерно через 300 000 лет после Большого взрыва Вселенная остыла достаточно для того, чтобы электроны начали прочно удерживаться ядрами и появились стабильные атомы, не распадающиеся сразу же после соударения со следующим ядром. Постепенно формирование атомов из моря свободных ядер и электронов привело к образованию всего многообразия наблюдаемых нами сегодня во Вселенной химических элементов.

До образования первых атомов Вселенная состояла из непрозрачной и плотной ядерно-электронной *плазмы*. Любые сгустки такой плазмы, едва начав образовываться под воздействием сил гравитационного притяжения, тут же разрушались под воздействием энергии поглощаемого ими излучения. После формирования атомов пространство Вселенной стало прозрачным, а вещество — достаточно разреженным для образования устойчивых сгустков материи под воздействием сил гравитационного притяжения. Увы, уже слишком разреженным для начала формирования галактик, и этот парадокс, получивший название *галактическая проблема*, явился самым весомым аргументом против теории Большого взрыва. Проблема эта, однако же, устраняется, если ввести в сценарий формирования Вселенной *темную материю*. Тогда можно считать, что первичные ядра галактик образовались именно из этой невидимой темной материи (свойства которой принципиально отличаются от свойств обычной материи) еще до формиро-

вания атомов, а образовавшиеся позже атомы «прилепились» к уже готовым протогалактикам, состоящим из темного вещества.

3 минуты

В первые три минуты существования Вселенной, стоило двум элементарным частицам — протону и нейтрону, например, — образовать ядро, как оно тут же разбивалось при следующем столкновении. Начиная с четвертой минуты Вселенная остыла до такой степени, что энергий столкновения стало недостаточно для разрыва внутриядерных связей и стали образовываться стабильные ядра. Итак, в первые три минуты Вселенная представляла собой раскаленное море элементарных частиц, а по прошествии трех минут в нем стало появляться все больше островков-ядер.

В процессе соударений с новыми элементарными частицами ядра постепенно утяжелялись за счет прикрепления к ним каждый раз протона или нейтрона. Однако на этой стадии сформировались ядра лишь самых легких химических элементов, поскольку вскоре Вселенная расширилась уже настолько, что столкновения стали огромной редкостью. То, что теория Большого взрыва верно предсказывает соотношение ядер этих легких элементов, сформировавшихся за время короткого «окна» первичного нуклеосинтеза, является надежным (и очень красивым) подтверждением правильности этой теории.

10^{-5} секунды

В этот момент — примерно через одну сотысячную долю секунды после запуска механизма рождения Вселенной — кварки слились в элементарные частицы (см. кварки и восьмичный путь). До этого Вселенная представляла собой компактное море из кварков и лептонов; с этого момента она превратилась в остывающий океан элементарных частиц.

10^{-10} секунды

Эта отметка знаменует новую серию этапных превращений — началось великое объединение фундаментальных сил (см. универсальные теории). Именно в это мгновение произошло объединение электромагнитного и слабого взаимодействий. До этого момента во Вселенной действовало три силы; теперь их стало четыре. Энергии, присутствующие во Вселенной в этот момент, соответствуют максимальным энергиям, которые могут быть развиты в современных земных ускорителях. Поэтому все, что было изложено мною выше, в принципе поддается экспериментальной проверке; все дальнейшее — чистые гипотезы.

10⁻³⁵ секунды

При этих температурах объединились сильное и электрослабое взаимодействия. До этой доли мгновения во Вселенной действовало две силы, после него их стало три. В тот же миг началось скачкообразное расширение, которое называется *инфляционным* (см. инфляционная стадия расширения Вселенной), продолжавшееся до отметки 10⁻³² секунды. Одновременно из Вселенной исчезли античастицы.

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА И СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ описывают поведение материи при невероятно высоких энергиях, существовавших во Вселенной через 10⁻³⁵ секунды после ее зарождения. И эти теории проверены экспериментально, но при более низких энергиях. Все теории ранней Вселенной не идут дальше этого момента.

10⁻⁴³ секунды

Теоретики предполагают, что в этот миг произошло объединение гравитации с другими силами. До этого во Вселенной действовала единая и неделимая сила. Именно механизм перехода от одной к двум фундаментальным силам взаимодействия и пытаются описать универсальные теории. Что было до этого мгновения? Об этом мы можем только догадываться. Как и составителям средневековых географических карт, нам остается только написать: «Осторожно, там чудовища!»

Распределенное движение

Движение физического тела в одном измерении не зависит от его движения в двух других измерениях

1537	●	РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1687	●	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Задумываясь, какое именно событие все-таки знаменовало зарождение современной науки, я нередко останавливаю свой выбор на одном малоизвестном событии, имевшем место в 1537 году. Миланский герцог тогда закупил новейшие пушки — последнее слово военной техники того времени — и озадачился рядом вопросов по поводу того, как лучше всего использовать эти новые игрушки. На помощь он, естественно, призвал своего придворного главного инженера — математика по имени Никколо Тарталья (Niccolò Tartaglia, ок. 1500–57) и задал ему простой, казалось бы, вопрос: под каким углом к горизонту стрелять, чтобы ядра улетали как можно дальше?

И тут произошло то, что знаменовало собой типичную победу охватывавшего Европу нового духа естествоиспытаний. Тарталья не отправился в библиотеку ознакомляться с советами античных философов и не стал запираяться в своем кабинете с намерением тщательно обдумать поставленный вопрос. Вместо этого он выкатил пушку в чистое поле под Миланом и стал из нее стрелять под различными углами, пока не получил нужный результат: дальше всего ядра улетают при выстреле под углом в 45° к горизонту. При этом до открытия законов механики Ньютона, из которых это можно вывести теоретически, оставалось полтора столетия, и Тарталья просто воспользовался методом проб и ошибок, золотым правилом эмпирической инженерии.

А ведь фактически проблема траектории полета пущенного снаряда веками интересовала мыслителей за многие столетия до Тартальи. Ее с древности принято было называть «задачей метательного снаряда», и формулировалась она следующим образом: как ведет себя тело, брошенное в воздух под углом к горизонту? Аристотель и другие древнегреческие философы учили, что движение бывает двух видов: «свободное», или «естественное» (то есть то движение, которое предмет совершает, если его предоставить самому себе) и «вынужденное», или «насильственное» (то есть движение в результате воздействия на тело извне). Размышляя относительно траектории полета копья (никак в этой области от военной тематики не уйти), Аристотель посчитал, что первую половину пути копье совершает вынужденное движение, поскольку его метнули. Затем, в верхней точке траектории запас силы броска иссякает, и вынужденное движение сменяется свободным. Поскольку, по Аристотелю, любое тело естественным образом стремится к центру Земли (а для него центр Земли был синонимом центра Вселенной), как только естественное движение возобладает над вынужденным, предмет незамедлительно начинает падать на Землю, причем отвесно.

По Аристотелю, следовательно, траектория полета брошенного под углом к горизонту предмета представляла собой прямоугольный треугольник: сначала тело по прямой набирает высоту на стадии принудительного движения, а затем отвесно падает на стадии естественного. (Не забывайте, как абсурдно это ни прозвучит сегодня, что выйти на улицу и просто понаблюдать за траекторией полета метательного снаряда абсолютно противоречило самому духу древнегреческой

натурфилософии.) Фактически основные споры во времена античности велись вокруг того, в какой именно момент принудительное движение сменяется естественным, могут ли эти два типа движения сочетаться и т. п. Такого рода умозрительный анализ способствовал, конечно, оттачиванию ментальных философских категорий, но с точки зрения практика, такого как Тарталья, был по большому счету бесполезен. Вот он и отправился в чистое поле под Миланом!

Как и по многим другим вопросам движения материальных тел, решением проблемы метательного снаряда мы обязаны Галилею. Именно он открыл уравнения равноускоренного движения и, в частности, уравнение свободного падения. Его опыты показали, что за время t тело, отпущенное из состояния покоя, проходит по направлению к поверхности Земли расстояние d , равное:

$$d = \frac{1}{2}gt^2,$$

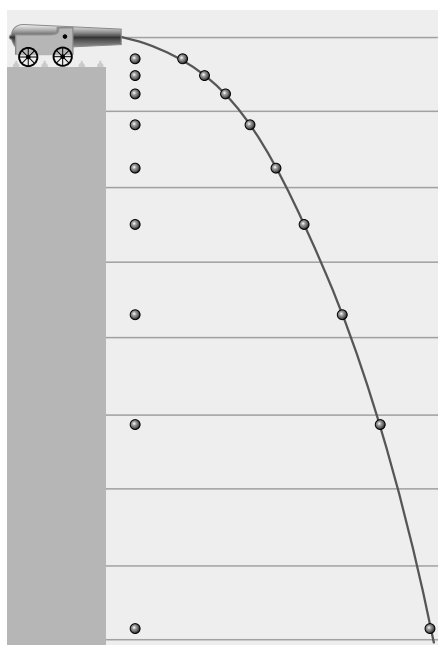
где g — ускорение свободного падения, равняющееся около 9,8 метра или 32 фута в секунду за секунду.

Таким образом, свободно падающее тело преодолеет около 4,9 м за первую секунду, 19,6 м за две секунды, 44,1 м за три секунды и т.д. Эта простая формула лежит в основе традиционного способа оценки высоты, например, обрыва: достаточно просто сбросить вниз камень, засечь его время в полете, а затем рассчитать высоту по указанной формуле. Еще на эту тему есть старый студенческий анекдот. Профессор попросил студентов измерить высоту физического факультета при помощи барометра. Все студенты (кроме одного), как и ожидал профессор, стали измерять атмосферное давление на крыше факультета и на уровне его фундамента, а последний студент просто сбросил барометр с крыши и засек время его падения. Дальше в анекдоте имеется несколько версий относительно того, какую оценку поставил профессор студенту за столь дорогостоящий (хотя и совершенно законный) подход к лабораторной работе.

Решив проблему свободного падения, Галилей перешел к решению следующего элемента головоломки, а именно к проблеме пущенного снаряда. Здесь у него и возникла идея распределенного движения. По сути, он осознал, что движение снаряда можно разделить на два независимых компонента. По вертикали снаряд летит сначала вверх, а затем вниз, как если бы его просто подбросили строго вверх. По горизонтали же снаряд просто движется с постоянной скоростью, которая ему была придана в начале траектории, поскольку в этом направлении никакие силы на него не воздействуют (за исключением силы сопротивления воздуха, конечно, которой на начальном этапе можно пренебречь). Проще говоря, движение свободно летящего тела по вертикали и по горизонтали никак не связаны одно с другим. Тем самым сложная задача расчета траектории полета снаряда сводится к двум простым (и не зависящим друг от друга) задачам, каждая из которых по отдельности легко решается.

Давайте возьмем в качестве иллюстрации простой пример. Для полной простоты представим, что ядро из пушки, стоящей над

Траектория полета ядра представляет собой совокупность двух независимых траекторий движения: равномерного движения по горизонтали со скоростью, приданной ядру пушкой, и равноускоренного движения по вертикали под воздействием земного притяжения



обрывом, вылетело строго горизонтально. Через секунду ядро будет ниже жерла пушки на 4,9 м, через две секунды — на 19,6 м и т.д. При этом, пока ядро не достигнет поверхности земли, по горизонтали оно будет двигаться с той же скоростью, с какой вылетело из ствола. Если, например, начальная скорость ядра по горизонтали равнялась 100 м/с, то через секунду ядро окажется на удалении 100 м от пушки по горизонтали и на 4,9 м ниже жерла ее ствола.

Немногом сложнее и техника расчета траектории полета снаряда, пущенного с горизонтальной поверхности под углом к горизонту. По вертикали ядро будет двигаться так, будто его подбросили строго вверх. Оно будет набирать высоту, но все медленнее из-за земного притяжения, пока не достигнет верхней точки траектории, где на какое-то мгновение его вертикальная скорость станет равной нулю. Затем снаряд устремится к земле в точности так же, как если бы его просто отпустили с достигнутой им максимальной высоты. И вот при помощи такого анализа Галилей пришел к выводу, что пущенное под углом к земле тело движется по кривой, которая называется *парабола*, — вот вам и Аристотель со своим треугольником!

Одно из следствий распределенного характера движения может

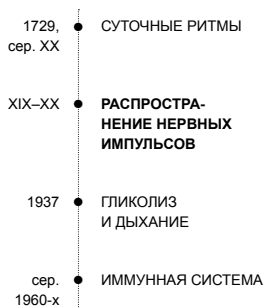
показаться несколько парадоксальным и противоречащим нашим интуитивным представлениям, поэтому остановимся на нем особо. Если в нашем примере одновременно выстрелить из пушки над обрывом по горизонтали и бросить второе ядро из состояния покоя отвесно вниз, согласно принципу распределения движения оба ядра упадут на поверхность земли одновременно, поскольку характер их движения по вертикали не отличается, и это несмотря на то, что одно ядро пролетит за это время гораздо большее расстояние, чем другое. (Тут самое время вспомнить, что ядро, выпущенное из пушки по горизонтали, летит не только дальше, но и быстрее.)

Итак, задачу пущенного снаряда Галилей решил успешно, однако ведь он так и не дал ответа на вопрос античных времен относительно соотношения между «вынужденным» и «естественным» движением. Пусть мы теперь можем доподлинно описать траекторию полета снаряда, но мы так и не получили даже намека на ответ на вопрос, до каких

пор он летит под внешним воздействием и с какого момента — «сам по себе». А все дело в том, что и вопроса такого не стоит, поскольку сами категории «естественно» и «принудительно» всего-навсего ложные понятия применительно к миру физики, поскольку апеллируют они к человеческому рассудку и не имеют никакого отношения к физической реальности. Что касается средневековых дискуссий на этот счет, то они всего лишь иллюстрируют, какие кулбиты мысли возможны, если изначально неправильно сформулировать задачу.

Распространение нервных импульсов

Нервные импульсы распространяются при перемещении ионов через мембрану нервной клетки и передаются из одной нервной клетки в другую с помощью нейромедиаторов



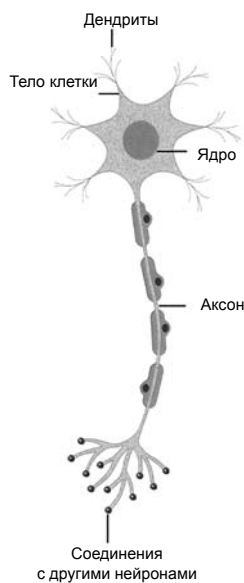
В результате эволюции нервной системы человека и других животных возникли сложные информационные сети, процессы в которых основаны на химических реакциях. Важнейшим элементом нервной системы являются специализированные клетки *нейроны*. Нейроны состоят из компактного тела клетки, содержащего ядро и другие органеллы. От этого тела отходит несколько разветвленных отростков. Большинство таких отростков, называемых *дендритами*, служат точками контакта для приема сигналов от других нейронов. Один отросток, как правило самый длинный, называется *аксоном* и передает сигналы на другие нейроны. Конец аксона может многократно ветвиться, и каждая из этих более мелких ветвей способна соединиться со следующим нейроном.

Во внешнем слое аксона находится сложная структура, образованная множеством молекул, выступающих в роли каналов, по которым могут поступать ионы — как внутрь, так и наружу клетки. Один конец этих молекул, отклоняясь, присоединяется к атому-мишени. После этого энергия других частей клетки используется на то, чтобы вытолкнуть этот атом за пределы клетки, тогда как процесс, действующий в обратном направлении, вводит внутрь клетки другую молекулу. Наибольшее значение имеет молекулярный насос, который выводит из клетки ионы натрия и вводит в нее ионы калия (натрий-калиевый насос).

Когда клетка находится в покое и не проводит нервных импульсов, натрий-калиевый насос перемещает ионы калия внутрь клетки и выводит ионы натрия наружу (представьте себе клетку, содержащую пресную воду и окруженную соленой водой). Из-за такого дисбаланса разность потенциалов на мембране аксона достигает 70 милливольт (приблизительно 5% от напряжения обычной батарейки AA).

Однако при изменении состояния клетки и стимуляции аксона электрическим импульсом равновесие на мембране нарушается, и натрий-калиевый насос на короткое время начинает работать в обратном направлении. Положительно заряженные ионы натрия проникают внутрь аксона, а ионы калия откачиваются наружу. На мгновение внутренняя среда аксона приобретает положительный заряд. При этом каналы натрий-калиевого насоса деформируются, блокируя дальнейший приток натрия, а ионы калия продолжают выходить наружу и исходная разность потенциалов восстанавливается. Тем временем ионы натрия распространяются внутри аксона, изменяя мембрану в нижней части аксона. При этом состояние расположенных ниже насосов меняется, способствуя дальнейшему распространению импульса. Резкое изменение напряжения, вызванное стремительными перемещениями ионов натрия и калия, называют *потенциалом действия*. При прохождении потенциала действия через определенную точку аксона насосы включаются и восстанавливают состояние покоя.

Потенциал действия распространяется довольно медленно — не более доли дюйма за секунду. Для того чтобы увеличить скорость передачи импульса (поскольку, в конце концов, не годится, чтобы сигнал, посланный мозгом, достигал руки лишь через минуту), аксоны окружены оболочкой из миелина, препятствующей притоку и оттоку калия и натрия. Миелиновая оболочка не



*Структура нейрона.
Нейроны — важнейшие
элементы нервной сис-
темы. Эти удлинённые
клетки передают нервные
импульсы*

непрерывна — через определенные интервалы в ней есть разрывы, и нервный импульс перескакивает из одного «окна» в другое, за счет этого скорость передачи импульса возрастает.

Когда импульс достигает конца основной части тела аксона, его необходимо передать либо следующему нижележащему нейрону, либо, если речь идет о нейронах головного мозга, по многочисленным ответвлениям многим другим нейронам. Для такой передачи используется абсолютно иной процесс, нежели для передачи импульса вдоль аксона. Каждый нейрон отделен от своего соседа небольшой щелью, называемой *синапсом*. Потенциал действия не может перескочить через эту щель, поэтому нужно найти какой-то другой способ для передачи импульса следующему нейрону. В конце каждого отростка имеются крошечные мешочки, называемые (*пресинаптическими*) *пузырьками*, в каждом из которых находятся особые соединения — *нейромедиаторы*. При поступлении потенциала действия из этих пузырьков высвобождаются молекулы нейромедиаторов, пересекающие синапс и присоединяющиеся к специфичным молекулярным рецепторам на мембране нижележащих нейронов. При присоединении нейромедиатора равновесие на мембране нейрона нарушается. Сейчас мы рассмотрим, возникает ли при таком нарушении равновесия новый потенциал действия (нейрофизиологи продолжают искать ответ на этот важный вопрос до сих пор).

После того как нейромедиаторы передадут нервный импульс от одного нейрона на следующий, они могут просто диффундировать, или подвергнуться химическому расщеплению, или вернуться обратно в свои пузырьки (этот процесс нескладно называется *обратным захватом*). В конце XX века было сделано поразительное научное открытие — оказывается, лекарства, влияющие на выброс и обратный захват нейромедиаторов, могут коренным образом изменять психическое состояние человека. Прозак (Prozac®) и сходные с ним антидепрессанты блокируют обратный захват нейромедиатора серотонина. Складывается впечатление, что болезнь Паркинсона взаимосвязана с дефицитом нейромедиатора дофамина в головном мозге. Исследователи, изучающие пограничные состояния в психиатрии, пытаются понять, как эти соединения влияют на человеческий рассудок.

По-прежнему нет ответа на фундаментальный вопрос о том, что же заставляет нейрон инициировать потенциал действия — выражаясь профессиональным языком нейрофизиологов, неясен механизм «запуска» нейрона. В этом отношении особенно интересны нейроны головного мозга, которые могут принимать нейромедиаторы, посланные тысячей соседей. Об обработке и интеграции этих импульсов почти ничего не известно, хотя над этой проблемой работают многие исследовательские группы. Нам известно лишь, что в нейроне осуществляется процесс интеграции поступающих импульсов и выносится решение, следует или нет инициировать потенциал действия и передавать импульс дальше. Этот фундаментальный процесс управляет функционированием всего головного мозга. Неудивительно, что эта величайшая загадка природы остается, по крайней мере сегодня, загадкой и для науки!

Репродуктивные стратегии

Есть две противоположные репродуктивные стратегии — иметь многочисленное потомство при минимуме заботы о нем или же иметь небольшое число потомков, но с последующими серьезными «инвестициями»

Всем организмам приходится расходовать энергию и ресурсы на размножение. Как утверждает теория эволюции, природа берет на вооружение те репродуктивные стратегии, которые позволяют произвести наиболее преуспевающее (приспособленное) потомство — остающееся в живых до тех пор, пока оно само не оставит потомков. В действительности в природе существуют две противоположные стратегии — стратегия *r* и стратегия *K*, и выбор в пользу одной из них зависит от условий окружающей среды.

В среде обитания с постоянными условиями (или по крайней мере предсказуемыми для каждого времени года), для которой характерны лишь незначительные колебания биологической среды, размер популяций, как правило, более или менее постоянный. В такой среде успех размножения определяется, главным образом, конкуренцией между взрослыми особями, поэтому наиболее перспективной оказывается стратегия сосредоточения ресурсов в нескольких потомках и сохранения их до того момента, когда они смогут вступить в игру. Такая стратегия, наиболее полно представленная у приматов, затрачивающих немало времени и усилий на воспитание детенышей, называется стратегией *K*. (Название связано с тем, что, как было сказано выше, в этом случае размер популяции близок к *потенциальной емкости* экосистемы, обозначаемой символом *K*.)

Диаметрально противоположная стратегия реализуется в среде с непредсказуемыми условиями, или среде, в которой время от времени происходят неблагоприятные события, например крупные шторма или наводнения. В такой среде периодически наблюдается массовое вымирание с последующим быстрым ростом численности популяции, в отсутствие конкуренции. В периоды роста численности популяции между собой конкурируют в основном молодые организмы, поэтому наилучшей оказывается стратегия многочисленного потомства, готового занять освободившуюся нишу. Такая стратегия оправдывает себя даже во время периодических стихийных бедствий, поскольку летальный исход обычно связан не с конкурентными преимуществами, а с более или менее случайными событиями. Таким образом, забота о потомстве не дает никакого преимущества, поскольку выживание детенышей в реальности не зависит от вложенных в воспитание родительских усилий. В соответствии с этой так называемой *r*-стратегией организмы производят крайне многочисленное потомство. И хотя лишь очень немногие представители этого потомства смогут выжить в нормальных обстоятельствах, оно быстро возьмет верх в условиях массового вымирания в других популяциях после природных катаклизмов. Примером видов, реализующих *r*-стратегию (*r* — символ, обозначающий скорость размножения), могут служить одуванчики, которые запросто «бросают на ветер» сотни семян и быстро захватывают территории с нарушенным грунтом. В неустойчивой окружающей среде популяция начинается с низкого уровня с последующим экспоненциальным ростом численности. Для вида, реализующего *r*-стратегию, гораздо важнее скорость размножения, нежели потенциальная емкость экосистемы.

Родственный отбор

Живые организмы могут действовать на благо родственным особям, поскольку такие действия способствуют передаче общих генов следующему поколению



Проблема альтруизма традиционно вызывала много вопросов в теории эволюции. Например, обезьяна, обнаружившая приближающегося леопарда, может поднять крик, чтобы предупредить родичей, хотя при этом повышается риск для нее самой. Наиболее бесхитростный взгляд на естественный отбор заключается в том, что гены, побуждающие обезьяну подавать крики тревоги, со временем должны исчезнуть из популяции как снижающие приспособленность отдельной особи. Тем не менее альтруистическое поведение наблюдается у всех видов животных (включая человека). Почему так происходит?

Авторы теории родственного отбора предприняли попытку объяснить этот и другие загадочные аспекты поведения животных. Основная идея заключается в следующем: родственные индивидуумы имеют определенный набор общих генов. Так, у вас (как и у ваших братьев и сестер) половина генов унаследована от одного родителя, половина — от другого. Для эволюционной теории важно не выживание отдельных индивидуумов, а передача генов следующему поколению. Если у обезьяны, которая подняла крик при виде леопарда, в группе имеется, скажем, трое родных братьев или сестер, то с точки зрения статистики можно сказать, что в этой ситуации пожертвовавшая собой особь может передать следующему поколению больше генов, чем оставшаяся в живых. Как остроумно заметил эволюционный биолог Дж.Б.С. Холдейн (J. B. S. Haldane), «я бы положил свою жизнь за двух родных братьев или восьмерых кузенов».

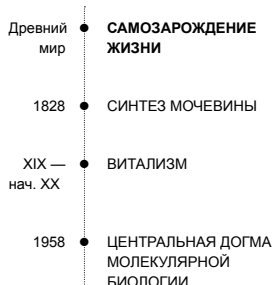
Например, особенность репродукции пчел такова, что каждая пчелиная самка получает все отцовские и половину материнских генов. Это означает, что у рабочих пчел 75% генов будут общими (у млекопитающих, имеющих такую же степень родства, 50% общих генов). Поэтому, помогая сестре стать пчелиной маткой, рабочая пчела передаст следующему поколению больше генов, чем могла бы, имея она собственных дочерей.

Родственный отбор также объясняет гомосексуальность, встречающуюся у многих видов животных, включая человека. Поскольку, по определению, гомосексуальное поведение исключает передачу генов следующим поколениям, можно было бы ожидать его исчезновения еще в незапамятные времена. Одно из предложенных объяснений сохранения гомосексуальности было довольно точно названо теорией «помощника в гнезде». Согласно этой теории, если особь не производит потомства, но ее действия способствуют выживанию родственных особей, она сможет передать больше генов следующему поколению.

Явление родственного отбора до некоторой степени опровергает наши представления об эволюции. Вместо того чтобы руководствоваться приспособленностью индивидуумов, как делал Дарвин, нам предлагают руководствоваться приспособленностью генов. Такая точка зрения приводит к концепции «эгоистичного гена». Суть этой концепции в том, что для эволюции имеет значение передача генов следующим поколениям и что выживают те, чье поведение обеспечивает преимущество генам, хотя для самого индивидуума такое поведение может быть очень вредным. Или, как сказал один остролов, «журица лишь способ получить из одного яйца другое».

Самозарождение жизни

Живые организмы самопроизвольно возникают из неорганических веществ



С самых давних времен люди полагали, что живые организмы появились из более простых веществ. Оставьте, например, кучу зерна под дождем, и она вскоре породит мышей; оставьте на улице мясо, и скоро по нему будут ползать личинки мух. В XVII веке Франческо Реди оставлял мясо на улице в разных горшках — открытых, плотно закрытых, покрытых сеткой, — и доказал, что личинки никогда не появятся в мясе, закрытом от мух.

И хотя эксперимент Реди обрушил представление о том, что сложные организмы могут зарождаться самопроизвольно, открытие микроорганизмов в XIX веке привело ко второму рождению понятия самозарождения жизни. Даже разлагающиеся материалы, укрытые от мух, по всей видимости, производили на свет организмы, видимые под микроскопом. К 1860 году споры вокруг самозарождения жизни стали настолько жаркими, что Французская академия предложила премию любому, кто помог бы разрешить этот вопрос. Французский ученый Луи Пастер (см. МИКРОБНАЯ ТЕОРИЯ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ) выполнил ряд тщательно подготовленных экспериментов, которые помогли окончательно решить проблему, и получил премию академии в 1864 году.

Пастер брал колбы с длинными узкими искривленными горлышками и наполнял их жидкой питательной средой. Среда доводилась до кипения, чтобы в ней были убиты все микробы, а стеклянное горлышко играло роль ловушки для спор грибов и других микроорганизмов, которые могли загрязнить жидкость. Пастер показал, что микробы появились только в колбах, горлышки которых были в последующем разбиты — то есть если в среду попали организмы, содержащиеся в воздухе.

По иронии судьбы в 1870-х годах возникли новые дебаты, в центре которых было предположительное самозарождение плесневых грибов в процессе брожения вина. Пастер еще раз показал, проведя убедительные эксперименты (в процессе которых он в стерильных условиях брал мякоть изнутри ягод винограда и изолировал ее от воздуха), что споры дрожжей переносятся воздухом и не зарождаются самопроизвольно в ткани винограда.

Сегодня результат долгих дебатов о самозарождении жизни обобщен в лозунге биологов: «Жизнь происходит из жизни».

ФРАНЧЕСКО РЕДИ (Francesco Redi, 1626–97) — итальянский врач, биолог, лингвист и поэт. Родился в Ареццо. Получив образование в области философии и медицины в Пизе, вернулся в Ареццо, где стал главным медиком

при тосканском дворе и главным фармацевтом герцогства. Исследовал действие змеиного яда; доказал, что яд гадюки безвреден, если его проглотить. Был также специалистом по насекомым и паразитам.

Симбиоз

Известны
три формы
симбиоза—мутуализм,
комменсализм
и паразитизм



Симбиоз (от греч. *symbiosis* — «совместная жизнь») — это близкое сообщество живых организмов, принадлежащих к разным видам. Такое сообщество может принимать различные формы в зависимости от природы отношений между двумя видами и от того, полезны эти отношения или вредны. Отношения, полезные для обоих видов, называются *мутуализмом*. Если отношения полезны для одной стороны и безразличны для второй, они называются *комменсализмом*. Отношения, вредные для одной стороны и полезные для другой, называются *паразитизмом*.

Природе известны многочисленные примеры симбиотических отношений, от которых выигрывают оба партнера. Например, для круговорота азота в природе чрезвычайно важен симбиоз между бобовыми растениями и почвенными бактериями *Rhizobium*. Эти бактерии — их еще называют азотфиксирующими — поселяются на корнях растений и обладают способностью «фиксировать» азот, то есть расщеплять прочные связи между атомами атмосферного свободного азота, обеспечивая возможность включения азота в доступные для растения соединения, например аммиак. В данном случае взаимная выгода очевидна: корни являются местообитанием бактерий, а бактерии снабжают растение необходимыми питательными веществами.

Имеются также многочисленные примеры симбиоза, выгодного для одного вида и не приносящего другому виду ни пользы, ни вреда. Например, кишечник человека населяет множество видов бактерий, присутствие которых безвредно для человека. Аналогично растения, называемые бромелиадами (к которым относится, например, ананас), обитают на ветвях деревьев, но получают питательные вещества из воздуха. Эти растения используют дерево для опоры, не лишая его питательных веществ.

Не менее распространен и паразитизм. Растения омелы питаются за счет деревьев, к которым прикрепляются: омела высасывает питательные вещества из дерева-хозяина, ничем не компенсируя наносимый ему ущерб. Паразитами следует считать бактерии и вирусы, вызывающие различные заболевания, а также организмы, подобные гельминтам. Значительная доля ресурсов современной медицины и общественного здравоохранения расходуется на то, чтобы оградить людей от такого рода паразитов.

Особенно интересна, если говорить о мутуализме, эволюция современных сложных клеток. В современном мире встречаются два типа клеток: *прокариоты* («доядерные клетки») — примитивные клетки, ДНК которых свободно распределена по всей клетке, и *эукариоты* («истинно ядерные клетки»), ДНК которых хранится в специальной клеточной структуре — ядре. (Роль ДНК в живых системах обсуждается в главе ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДОГМА МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ.) Все многоклеточные организмы, включая человека, состоят из эукариотических клеток.

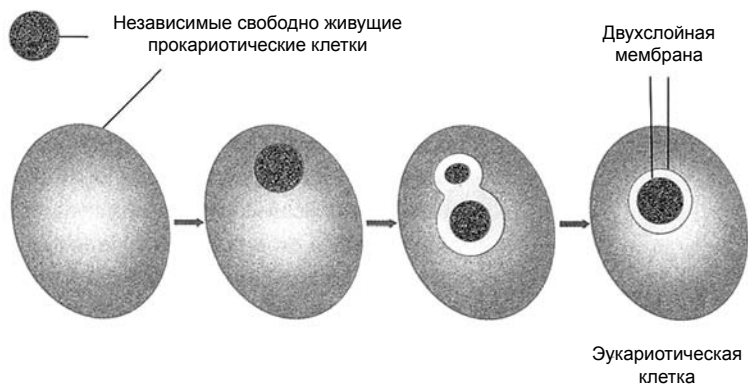
Как это ни странно, существуют ископаемые одноклеточные организмы, возраст которых составляет не менее 3,5 миллиарда

лет. Хотя в клетках нет твердых частиц, которые могут превратиться в окаменелость в традиционном смысле слова (см. теория эволюции), эти клетки могли задержаться между слоями ила и наносов на дне реки или океана. При превращении ила в породу (см. цикл преобразования горной породы) остается отпечаток клетки, подобный изображению листа. Эти микроскопические отпечатки можно исследовать, и они расскажут, какой была жизнь на Земле до формирования скелетов. Эти ископаемые свидетельства говорят нам о том, что около миллиарда лет назад клетки претерпели существенное изменение. Именно тогда стали появляться эукариотические клетки.

Помимо ядра в эукариотических клетках имеется множество изолированных внутренних структур, называемых *органеллами*. Митохондрии, органеллы одного типа, генерируют энергию и поэтому считаются силовыми станциями клетки. Митохондрии, как и ядро, окружены двухслойной мембраной и содержат ДНК. На этом основании предложена теория возникновения эукариотических клеток в результате симбиоза. Одна из клеток поглотила другую, а после оказалось, что вместе они справляются лучше, чем по отдельности. Такова *эндосимбиотическая* теория эволюции.

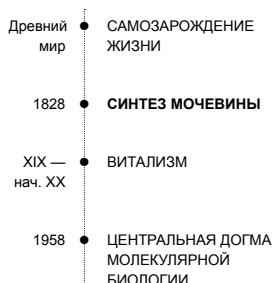
Эта теория легко объясняет существование двухслойной мембраны. Внутренний слой ведет происхождение от мембраны поглощенной клетки, а наружный является частью мембраны поглотившей клетки, обернувшейся вокруг клетки-пришельца. Также хорошо понятно наличие митохондриальной ДНК — это не что иное, как остатки ДНК клетки-пришельца. Итак, многие (возможно, все) органеллы эукариотической клетки в начале своего существования были отдельными организмами и около миллиарда лет назад объединили свои усилия для создания клеток нового типа. Следовательно, наши собственные тела — иллюстрация одного из древнейших партнерских отношений в природе.

Первые эукариотические клетки могли сформироваться в результате захвата крупными прокариотическими клетками более мелких. Такая теория объясняет наличие двухслойной мембраны вокруг ядер эукариотических клеток



Синтез мочевины

Молекулы живых организмов могут образовываться из неорганических веществ



В начале XIX века химики уже выяснили, что многие вещества состоят из молекул, а молекулы, в свою очередь, состоят из атомов (см. АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА). Некоторые ученые утверждали, что органические молекулы, найденные в живых организмах, коренным образом отличаются от неорганических молекул неживой природы. Причиной этого было убеждение, что живые существа — это совершенно особая вещь (см. ВИТАЛИЗМ). Затем обнаружилось, что органические молекулы часто бывают больше и сложнее неорганических, с которыми обычно работали химики. Это укрепило их во мнении, что у живой и неживой материи разный химический состав.

В 1828 году Фридрих Вёлер раз и навсегда решил этот вопрос, когда синтезировал из обычных «лабораторных» химикатов мочевины — органическое вещество, которое содержится в почках и моче животных. Он рассказывал: «Сколько я ни пытался соединить циановую кислоту и аммиак, всякий раз получалось бесцветное кристаллическое твердое вещество, не похожее по свойствам ни на циановую кислоту, ни на аммиак». Тщательные исследования показали, что «бесцветное кристаллическое твердое вещество» было идентично мочеvine, выделенной из тканей животных. С помощью этого эксперимента Вёлер доказал, что органические молекулы могут образовываться теми же способами и из тех же атомов, что и неорганические молекулы. Так был уничтожен еще один искусственный барьер между живой и неживой природой.

ФРИДРИХ ВЁЛЕР (Friedrich Wöhler, 1800–82) — немецкий химик. Родился в городе Эшерсхайме близ Франкфурта, в семье ветеринарного врача, который лечил лошадей, принадлежащих правителям города Гессе в Германии. В 1823 году Вёлер получил ученую степень по медицине в Гейдельбергском университете, но затем занялся химией. Провел год в Швеции, сотрудничая с химиком Йенсом Берцелиусом (Jöns Berzelius, 1779–1848), с которым они навсегда остались друзьями. В 1836 году Вёлер получил должность профессора химии в Гёттингенском университете, где и проработал всю жизнь.

С юности Вёлер был страстным коллекционером минералов и много занимался синтезом и извлечением различных минеральных веществ. Некоторое время он изучал органические соединения, но потом решил, что это слишком сложно, и вернулся к неорганической химии. Благодаря Вёлеру Гёттинген превратился в ведущий европейский центр исследований в области химии. Многие выпускники Гёттингенского университета стали преподавателями в различных университетах Европы и Северной Америки. Германия доминировала в области исследовательской химии до 1930-х годов.

Система классификации Линнея

Все живые существа можно классифицировать с помощью иерархической системы, в основе которой лежат категории рода и вида

ОК 1730 • СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ЛИННЕЯ

Карл Линней, шведский физиолог, был профессором медицины в университете города Упсала. Он заведовал большим ботаническим садом, который был нужен университету для проведения научных исследований. Люди присылали ему растения и семена со всего света для выращивания в ботаническом саду. Именно благодаря интенсивному изучению этой огромной коллекции растений Карл Линней сумел решить задачу систематизации всех живых существ — сегодня ее назвали бы задачей *таксономии* (систематики). Можно сказать, что он придумал категории для популярной в Америке викторины «Двадцать вопросов», в которой первым делом спрашивают, относится ли предмет к животным, растениям или минералам. В системе Линнея действительно все относится либо к животным, либо к растениям, либо к неживой природе (минералам).

Чтобы легче понять принцип систематизации, представьте, что вы хотите классифицировать все дома в мире. Можно начать с того, что дома в Европе, например, больше похожи друг на друга, чем на дома в Северной Америке, поэтому на первом, самом грубом уровне классификации необходимо указать континент, где расположено здание. На уровне каждого континента можно пойти дальше, отметив, что дома в одной стране (например, во Франции) больше похожи друг на друга, чем на дома в другой стране (например, в Норвегии). Таким образом, вторым уровнем классификации будет страна. Можно продолжать в том же роде, рассматривая последовательно уровень страны, уровень города и уровень улицы. Номер дома на конкретной улице будет той конечной ячейкой, куда можно поместить искомый объект. Значит, каждый дом будет полностью классифицирован, если для него будут указаны континент, страна, город, улица и номер дома.

Линней заметил, что подобным образом можно классифицировать живые существа в соответствии с их характеристиками. Человек, например, больше похож на белку, чем на гремучую змею, и больше похож на гремучую змею, чем на сосну. Прodelав те же рассуждения, что и в случае домов, можно построить систему классификации, в которой каждое живое существо получит свое уникальное место.

Именно так и сделали последователи Карла Линнея. На начальном уровне все живые существа делятся на пять *царств* — растения, животные, грибы и два царства одноклеточных организмов (безъядерных и содержащих в ядре ДНК). Далее каждое царство делится на *типы*. Например, в нервную систему человека входит длинный спинной мозг, образующийся из хорды. Это относит нас к типу хордовых. У большинства животных, обладающих спинным мозгом, он расположен внутри позвоночника. Эта большая группа хордовых называется *подтипом* позвоночных. Человек относится к этому подтипу. Наличие позвоночника — критерий, по которому позвоночные животные отличаются от беспозвоночных, то есть не имеющих позвоночного хребта (к ним относятся, например, крабы).

Следующая категория классификации — *класс*. Человек является представителем класса млекопитающих — теплокровных животных с шерстью, живородящих и выкармливающих своих детенышей молоком. Этот уровень различает человека и таких животных, как пресмыкающиеся и птицы. Следующая категория — *отряд*. Мы относимся к отряду приматов — животных с бинокулярным зрением и руками и ногами, приспособленными для хватания. Классификация человека как относящегося к приматам отличает нас от других млекопитающих — таких, например, как собаки и жирафы.

Следующие две категории классификации — *семейство* и *род*. Мы относимся к семейству гоминид и роду *Homo*. Впрочем, это разграничение мало что значит для нас, поскольку других представителей нашего семейства и нашего рода больше нет (хотя в прошлом они существовали). У большинства животных каждый род содержит несколько представителей. Например, белый медведь — это *Ursus maritimus*, а медведь гризли — *Ursus horribilis*. Оба эти медведя относятся к одному роду (*Ursus*), но к разным видам — они не скрещиваются.

Последняя категория в классификации Линнея — *вид* — обычно определяется как популяция особей, которые могут скрещиваться между собой. Человек относится к виду *sapiens*.

При описании животных принято указывать род и вид. Поэтому человек классифицируется как *Homo sapiens* («Человек разумный»). Это не означает, что другие категории классификации не важны — они просто подразумеваются, когда говорят о роде и виде. Главный вклад Линнея в науку состоит в том, что он применил и ввел в употребление так называемую *бинарную номенклатуру*, согласно которой каждый объект классификации обозначается двумя латинскими названиями — родовым и видовым.

Классифицируя таким способом живую природу, система Линнея определяет каждому организму свое собственное уникальное место в мире живых существ. Но успех зависит в первую очередь от того, насколько правильно систематик выделит важные физические характеристики, и здесь возможны неверные суждения и даже ошибки — Линней, к примеру, отнес бегемота к отряду грызунов! В настоящее время при систематизации все больше учитывается генетический код отдельных организмов или история их эволюции — генеалогическое древо (этот подход называется *кладистикой*).



КАРЛ ЛИННЕЙ (Carolus Linnaeus, 1707–78) — шведский ботаник и врач. Родился в Росхульте, изучал медицину в Лундском университете, а с 1728 года — в Упсальском университете. Впоследствии начал заниматься систематизацией растений, а затем — животных и минералов. Осознал родовое сходство между различными группами, классифицировав китов как млекопитающих и поместив человека и приматов в один

класс. В 1741 году Линней стал профессором Упсальского университета. Исследование коллекции растений университетского ботанического сада привело его к созданию бинарной классификации растений. После смерти Линнея эта коллекция и тематическая библиотека были куплены английским натуралистом Джеймсом Смитом, а позже приобретены лондонским Линнеевским обществом.

Скрытый принцип необратимости времени

В природе действует до сих пор не открытый закон, делающий ход времени однонаправленным и необратимым и не допускающий возможности существования «машины времени»

1980-е • Скрытый принцип необратимости времени

Возможность путешествий во времени издавна волновала человеческие умы. С одной стороны, согласно теории относительности, время представляет собой всего лишь одно из четырех измерений, а значит, двигаться назад во времени (а не вперед, как в реальности происходит), казалось бы, должно быть для нас таким же обычным делом, как двигаться налево, вместо того чтобы повернуть направо. С другой стороны, стоит лишь задуматься о том, к чему привели бы отправка информации, физических тел или (самое интересное) людей в прошлое, как немедленно возникает множество логических парадоксов.

Возьмем хотя бы *парадокс деда*. При помощи машины времени вы отправляетесь в прошлое и устраиваете свадьбу вашего деда с вашей бабушкой (в самой кровавой версии парадокса — попросту убиваете его). В этом случае вы, за отсутствием деда, просто не сможете затем родиться, найти себе машину времени и вернуться в прошлое с целью не допустить свадьбы ваших деда и бабушки. Но тогда ваши дед и бабушка благополучно поженились — и вы появитесь на свет, сядете в машину времени и т.д. (Имеется и совсем уже парадоксальный сценарий, при котором вы, расстроив в прошлом женитьбу вашего деда на вашей бабушке, сами женитесь на собственной бабушке и становитесь собственным дедом. — *Прим. переводчика.*) Таким образом, возможность изменить прошлое приводит к массе логических противоречий.

Однако общая теория относительности предсказывает, что пути во времени становятся практически неотличимыми по своим свойствам от путей в пространстве вблизи сверхмассивного и сверхплотного цилиндра, вращающегося со скоростью, близкой к скорости света; такой объект и мог бы сыграть роль машины времени. Конечно, практическая возможность раскрутить до субсветовой скорости цилиндр с галактической массой и плотностью, близкой к плотности черной дыры, представляется сомнительной и уж во всяком случае нереальной с точки зрения земных технологий. Так что построить машину времени в обозримом будущем едва ли удастся.

Именно парадоксальная природа возможности путешествия во времени подтолкнула, по всей вероятности, астрофизика Стивена Хокинга к тому, чтобы сформулировать гипотезу о принципиальной необратимости времени. Во избежание парадоксов в природе, согласно этой гипотезе, должен существовать некий закон, запрещающий перемещение во времени из настоящего в прошлое. И наилучший аргумент в пользу существования такого закона выдвинут самим же Хокингом: «Если путешествия во времени возможны, то где в таком случае сами путешественники?»



СТИВЕН УИЛЬЯМ ХОКИНГ (Stephen William Hawking, p. 1942) — английский физик-теоретик. Родился в Оксфорде, окончил местный университет. Докторскую степень получил в Кембридже. Еще будучи аспирантом Кембриджского университета, тяжело заболел: у Хокинга была выявлена редкая невропатология, вскоре приведшая ученого практически к полному параличу. Ученый много лет прикован к инвалидной коляске и вынужден общаться

с внешним миром исключительно при помощи компьютера, оснащенного синтезатором речи. Это, однако, не помешало ему стать одним из ведущих астрофизиков и космологов современности. Хокинг применил идеи квантовой механики и теории относительности к черным дырам и космологии. Свои идеи Хокинг популярно изложил в вышедшей в 1988 году и ставшей бестселлером «Краткой истории времени» (*A Brief History of Time*).

Сложные адаптивные системы

У сложных адаптивных систем могут возникать неожиданные свойства.

В настоящее время появление таких свойств очень трудно предсказать

Изучение сложности — одно из важнейших направлений современной науки. *Сложная система* определяется как система, имеющая много независимых элементов, каждый из которых может взаимодействовать с остальными. Например, куча песка может рассматриваться как сложная система, поскольку нажатие на одну песчинку увеличивает силы давления на все другие песчинки в куче, а эти песчинки, в свою очередь, отвечают на это легкой деформацией, вызывающей силы противодействия. Фондовая биржа — другой пример сложной системы, где покупатели и продавцы меняют свое поведение при изменении поведения других покупателей и продавцов. Такая система, как фондовая биржа, где поведение элементов меняется в результате действий других элементов, называется сложной адаптивной, или самоприспосабливающейся, системой.

До появления высокоскоростных электронных вычислительных машин было невозможно изучать сложные системы. Эти системы просто слишком велики, слишком сложны для того, чтобы с ними можно было работать с помощью обычной математики. Наиболее важным результатом компьютерных исследований сложных адаптивных систем стало понятие — *неожиданное свойство*. Возьмем в качестве примера простую кучу песка. Если вы будете добавлять песчинки к куче, то рано или поздно неожиданно появится новый тип поведения. Когда вы добавите миллионную песчинку, произойдет сход лавины — такое поведение принципиально отличается от явления передачи давления, которое имело место ранее. Другими словами, с этой миллионной песчинкой мы достигаем точки, где понятие «больше» превращается в «иное».

Важной чертой неожиданных свойств является то, что они не появляются постепенно. Иначе говоря, одна песчинка не приведет к образованию миллионной части лавины, которую можно было бы затем сложить с другими такими же частями, чтобы получить лавину от кучи, состоящей из миллиона песчинок. Вы не увидите вовсе никаких лавин до тех пор, пока не дойдете до этой миллионной песчинки, и только тогда внезапно образуется лавина.

Я думаю, можно было бы выдвинуть очень интересное предположение о том, что свойства ума, такие как сознание и самоанализ, — неожиданные свойства множества нейронов, нечто подобное лавинам, которые являются неожиданным свойством множества песчинок. Если это действительно так, то эволюция нервных систем подходит к точке, когда «больше» превращается в «иное» (см. НЕРВНЫЕ СИГНАЛЫ).

Одна из великих задач, стоящих перед наукой сегодня, — выработать способность предсказывать появление неожиданных свойств на основании свойств отдельных элементов системы. Мы не можем этого в настоящее время, и некоторые ученые полагают, что не сможем никогда. Я думаю, что сегодня еще слишком рано отказываться от попытки решить эту проблему.

Соотношение де Бройля

*Длина волны
квантовой
частицы обратно
пропорциональна
ее импульсу*

1924	•	СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	•	УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1927	•	ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	•	ОПЫТ ДЭВИССОНА— ДЖЕРМЕРА

Один из фактов субатомного мира заключается в том, что его объекты — такие как электроны или фотоны — совсем не похожи на привычные объекты макромира. Они ведут себя и не как частицы, и не как волны, а как совершенно особые образования, проявляющие и волновые, и корпускулярные свойства в зависимости от обстоятельств (см. принцип дополнительности). Одно дело — это заявить, и совсем другое — связать воедино волновые и корпускулярные аспекты поведения квантовых частиц, описав их точным уравнением. Именно это и было сделано в соотношении де Бройля.

Луи де Бройль опубликовал выведенное им соотношение в качестве составной части своей докторской диссертации в 1924 году. Казавшееся сначала сумасшедшей идеей, соотношение де Бройля в корне перевернуло представления физиков-теоретиков о микромире и сыграло важнейшую роль в становлении квантовой механики. В дальнейшем карьера де Бройля сложилась весьма прозаично: до выхода на пенсию он работал профессором физики в Париже и никогда более не поднимался до головокружительных высот революционных прозрений.

Теперь кратко опишем физический смысл соотношения де Бройля: одна из физических характеристик любой частицы — ее *скорость*. При этом физики по ряду теоретических и практических соображений предпочитают говорить не о скорости частицы как таковой, а о ее *импульсе* (или *количестве движения*), который равен произведению скорости частицы на ее массу. Волна описывается совсем другими фундаментальными характеристиками — длиной (расстоянием между двумя соседними пиками амплитуды одного знака) или частотой (величина, обратно пропорциональная длине волны, то есть число пиков, проходящих через фиксированную точку за единицу времени). Де Бройлю же удалось сформулировать соотношение, связывающее импульс квантовой частицы p с длиной волны λ , которая ее описывает:

$$p = h/\lambda \quad \text{или} \quad \lambda = h/p,$$

где h — постоянная Планка.

Это соотношение гласит буквально следующее: при желании можно рассматривать квантовый объект как частицу, обладающую количеством движения p ; с другой стороны, ее можно рассматривать и как волну, длина которой равна λ и определяется предложенным уравнением. Иными словами, волновые и корпускулярные свойства квантовой частицы фундаментальным образом взаимосвязаны.

Соотношение де Бройля позволило объяснить одну из величайших загадок зарождающейся квантовой механики. Когда Нильс Бор предложил свою модель атома (см. атом Бора), она включала концепцию *разрешенных орбит* электронов вокруг ядра, по которым они могли сколь угодно долго вращаться без потери энергии. С помощью соотношения де Бройля мы можем

Маркиз Луи де Бройль — ученый, объяснивший корпускулярно-волновой дуализм, — с орденом Почетного легиона, которым он был награжден в 1961 году за выдающиеся заслуги перед родиной

ЛУИ ВИКТОР ПЬЕР РАЙМОН ДЕ БРОЙЛЬ

(Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, 1892–1987) — французский физик, уроженец г. Дьеп (Dieppe). На научном поприще, где доминирующую роль традиционно играют амбициозные выходцы из среднего и рабочего класса, де Бройль был редким представителем настоящей французской аристократии «голубых кровей», вторым сыном в дворянской семье, потомком старинного нормандского рода, веками дававшего Франции видных политических и военных деятелей. В 1909 году поступил в Сорбонну, где после года изучения истории решил переключиться на физику. За теоретическое предсказание волновой природы электрона (вывод соотношения де Бройля) в докторской диссертации 1924 года был удостоен Нобелевской премии по физике за 1929 год. Позже стал профессором теоретической физики Института им. Анри Пуанкаре в Париже. В 1960 году, после смерти старшего брата Мориса де Бройля (Maurice de Broglie, 1875–1960), также видного физика, одного из основоположников рентгеновской спектроскопии, унаследовал титул маркиза.



проиллюстрировать это понятие. Если считать электрон частицей, то, чтобы электрон оставался на своей орбите, у него должна быть одна и та же скорость (или, вернее, импульс) на любом расстоянии от ядра.

Если же считать электрон волной, то, чтобы он вписался в орбиту задан-

ного радиуса, надо, чтобы длина окружности этой орбиты была равна целому числу длины его волны. Иными словами, окружность орбиты электрона может равняться только одной, двум, трем (и так далее) длинам его волн. В случае нецелого числа длин волны электрон просто не попадет на нужную орбиту.

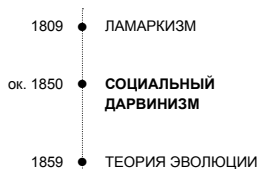
Главный же физический смысл соотношения де Бройля в том, что мы всегда можем определить разрешенные импульсы (в корпускулярном представлении) или длины волн (в волновом представлении) электронов на орбитах. Для большинства орбит, однако, соотношение де Бройля показывает, что электрон (рассматриваемый как частица) с конкретным импульсом не может иметь соответствующую длину волны (в волновом представлении) такую, что он впишется в эту орбиту. И наоборот, электрон, рассматриваемый как волна определенной длины, далеко не всегда будет иметь соответствующий импульс, который позволит электрону оставаться на орбите (в корпускулярном представлении). Иными словами, для большинства орбит с конкретным радиусом либо волновое, либо корпускулярное описание покажет, что электрон не может находиться на этом расстоянии от ядра.

Однако существует небольшое количество орбит, на которых волновое и корпускулярное представление об электроне совпадают. Для этих орбит импульс, необходимый для того, чтобы электрон продолжал движение по орбите (корпускулярное описание), в точности соответствует длине волны, необходимой, чтобы электрон вписался в окружность (волновое описание). Именно эти орбиты и оказываются *разрешенными* в модели атома Бора, поскольку только на них корпускулярные и волновые свойства электронов не вступают в противоречие.

Мне нравится еще одна интерпретация этого принципа — философская: модель атома Бора допускает только такие состояния и орбиты электронов, при которых не важно, какую из двух ментальных категорий человек применяет для их описания. То есть, иными словами, реальный микромир устроен так, что ему нет дела до того, в каких категориях мы пытаемся его осмыслить!

Социальный дарвинизм

Социальное неравенство — результат действия дарвиновского естественного отбора



Появление в XIX веке теории эволюции Дарвина привело к перевороту во многих областях научной мысли. Британский философ и социолог Герберт Спенсер (Herbert Spencer, 1820–1903) был одним из самых восторженных последователей идей Дарвина. Между прочим, именно ему принадлежит фраза «выживают наиболее приспособленные». Он был первым, кто попытался применить законы эволюции к человеческому обществу.

Люди, менее искушенные, чем Спенсер, развили эту идею в теорию «социального дарвинизма». Сторонники этой теории утверждали, что эволюция человеческого общества происходит точно так же, как эволюция в природе, — путем необузданной конкуренции и выживания наиболее приспособленных. Исходя из этого, жесточайшая конкуренция в капиталистическом обществе конца XIX века и порожденное ею колоссальное социальное неравенство воспринимались как «естественное» состояние этого общества — весомый аргумент против таких идей, как социальная реформа и профессиональные союзы.

На самом деле социальный дарвинизм основывался на элементарном непонимании принципов естественного отбора. В природе действительно выживают «наиболее приспособленные» (или, по крайней мере, гены «наиболее приспособленных»), но в дарвиновском естественном отборе есть только один критерий *приспособленности*. По Дарвину, выживает тот — это и есть наиболее приспособленный индивид, — кто передает большинство своих генов следующему поколению. С точки зрения дарвиновской теории не имеет никакого значения, сколько денег накопил индивид или сколько власти он сконцентрировал в своих руках. Важно лишь то, скольким потомкам достались его гены.

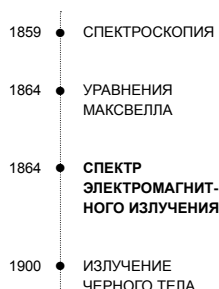
Когда я рассказываю своим студентам о социальном дарвинизме, я всегда привожу в качестве примера историю железнодорожного магната Лиланда Стэнфорда (Leland Stanford, 1824–93). Он начинал клерком в бакалейной лавке, а в итоге стал одним из самых влиятельных людей Америки. Это он забил «золотой костыль» в Промонтори-Пойнт, штат Юта, при завершении строительства первой железной дороги через всю Северную Америку. Стэнфорд основал знаменитый университет, носящий теперь его имя в память о его единственном сыне, умершем подростком (если присмотреться к университетскому гербу, можно заметить, что на нем написано «Университет Лиланда Стэнфорда-младшего»).

С социальной точки зрения Лиланд Стэнфорд достиг необычайных высот — это был человек, изменивший лицо мира, в котором жил. Однако, если исходить из дарвиновских критериев успеха, он потерпел фиаско, так и не передав ни одного гена следующим поколениям. Одного этого примера достаточно, чтобы показать полную научную несостоятельность доктрины социального дарвинизма. Против этой теории могут быть выдвинуты и другие аргументы (например, что «есть» и «должно быть» — не одно и то же), но, мне кажется, они излишни.

И в заключение — честная реклама. Я горжусь тем, что окончил физический факультет Стэнфордского университета, и чрезвычайно благодарен Лиланду Стэнфорду за то, что он вложил свое громадное состояние в создание этого замечательного учебного заведения.

Спектр электро-магнитного излучения

Имеется целый ряд типов электромагнитного излучения, начиная с радиоволн и заканчивая гамма-лучами. Электромагнитные лучи всех типов распространяются в вакууме со скоростью света и отличаются друг от друга только длинами волн

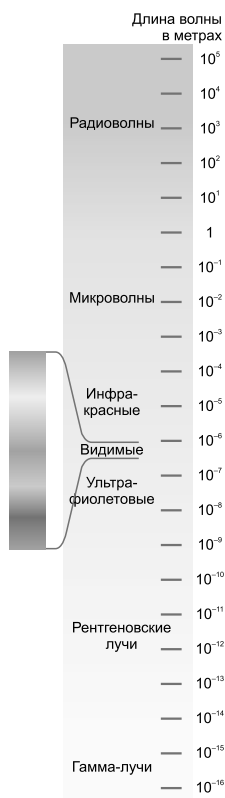


После появления уравнений Максвелла стало ясно, что они предсказывают существование неизвестного науке природного явления — поперечных *электромагнитных волн*, представляющих собой распространяющиеся в пространстве со скоростью света колебания взаимосвязанных электрического и магнитного полей. Сам Джеймс Кларк Максвелл первым и указал научному сообществу на это следствие из выведенной им системы уравнений. В этом преломлении скорость распространения электромагнитных волн в вакууме оказалась столь важной и фундаментальной вселенской константой, что ее обозначили отдельной буквой *c* в отличие от всех прочих скоростей, которые принято обозначать буквой *v*.

Сделав это открытие, Максвелл сразу же определил, что видимый свет является «всего лишь» разновидностью электромагнитных волн. К тому времени были известны длины световых волн видимой части спектра — от 400 нм (фиолетовые лучи) до 800 нм (красные лучи). (Нанометр — единица длины, равная одной миллиардной метра, которая в основном используется в атомной физике и физике лучей; $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$.) Всем цветам радуги соответствуют различные длины волн, лежащие в этих весьма узких пределах. Однако в уравнениях Максвелла не содержалось никаких ограничений на возможный диапазон длин электромагнитных волн. Когда стало ясно, что должны существовать электромагнитные волны самой разной длины, фактически сразу же было выдвинуто сравнение по поводу того, что человеческий глаз различает столь узкую полосу их длин и частот: человека уподобили слушателю симфонического концерта, слух которого способен улавливать только скрипичную партию, не различая всех остальных звуков.

Вскоре после предсказания Максвеллом существования электромагнитных волн других диапазонов спектра последовала серия открытий, подтвердивших его правоту. Первыми в 1888 году были открыты радиоволны — сделал это немецкий физик Генрих Герц (Heinrich Hertz, 1857–1894). Единственная разница между радиоволнами и светом состоит в том, что длина радиоволн может колебаться в диапазоне от нескольких дециметров до тысяч километров. Согласно теории Максвелла, причиной возникновения электромагнитных волн является ускоренное движение электрических зарядов. Колебания электронов под воздействием переменного электрического напряжения в антенне радиопередатчика создают электромагнитные волны, распространяющиеся в земной атмосфере. Все другие типы электромагнитных волн также возникают в результате различных видов ускоренного движения электрических зарядов.

Подобно световым волнам, радиоволны могут практически без потерь распространяться на большие расстояния в земной атмосфере, и это делает их полезнейшими носителями закодированной информации. Уже в начале 1894 года — всего через пять с небольшим лет после открытия радиоволн — итальянский инженер-физик Гульельмо Маркони (Guglielmo Marconi, 1874–1937) сконструировал



Электромагнитные волны образуют сплошной спектр длин волн и энергий (частот), подразделяемый на условные диапазоны — от радиоволн до гамма-лучей

первый работающий беспроводный телеграф — прообраз современного радио, — за что в 1909 году был удостоен Нобелевской премии.

После того как было впервые экспериментально подтверждено предсказываемое уравнениями Максвелла существование электромагнитных волн за пределами видимого спектра, остальные ниши спектра заполнились весьма быстро. Сегодня открыты электромагнитные волны всех без исключения диапазонов, и практически все они находят широкое и полезное применение в науке и технике. Частоты волн и энергии соответствующих им квантов электромагнитного излучения (см. постоянная планка) возрастают с уменьшением длины волны. Совокупность всех электромагнитных волн образует так называемый сплошной спектр электромагнитного излучения. Он подразделяется на следующие диапазоны (в порядке увеличения частоты и уменьшения длины волн):

Радиоволны

Как уже отмечалось, радиоволны могут значительно различаться по длине — от нескольких сантиметров до сотен и даже тысяч километров, что сопоставимо с радиусом земного шара (около 6400 км). Волны всех радиодиапазонов широко используются в технике — дециметровые и ультракороткие метровые волны применяются для телевидения и радиовещания в диапазоне ультракоротких волн с частотной модуляцией (УКВ/FM), обеспечивая высокое качество приема сигнала в пределах зоны прямого распространения волн. Радиоволны метрового и километрового диапазона применяются для радиовещания и радиосвязи на больших расстояниях с использованием амплитудной модуляции (АМ), которая, хотя и в ущерб качеству сигнала, обеспечивает его передачу на сколь угодно большие расстояния в пределах Земли благодаря отражению волн от ионосферы планеты. Впрочем, сегодня этот вид связи отходит в прошлое благодаря развитию спутниковой связи. Волны дециметрового диапазона не могут огибать земной горизонт подобно метровым волнам, что ограничивает зону приема областью прямого распространения, которая, в зависимости от высоты антенны и мощности передатчика, составляет от нескольких до нескольких десятков километров. И тут на помощь приходят спутниковые ретрансляторы, берущие на себя ту роль отражателей радиоволн, которую в отношении метровых волн играет ионосфера.

Микроволны

Микроволны и радиоволны диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) имеют длину от 300 мм до 1 мм. Сантиметровые волны, подобно дециметровым и метровым радиоволнам, практически не поглощаются атмосферой и поэтому широко используются в спутни-

ковой и сотовой связи и других телекоммуникационных системах. Размер типовой спутниковой тарелки как раз равен нескольким длинам таких волн.

Более короткие СВЧ-волны также находят множество применений в промышленности и в быту. Достаточно упомянуть про микроволновые печи, которыми сегодня оснащены и промышленные хлебопекарни, и домашние кухни. Действие микроволновой печи основано на быстром вращении электронов в устройстве, которое называется *клизотрон*. В результате электроны излучают электромагнитные СВЧ-волны определенной частоты, при которой они легко поглощаются молекулами воды. Когда вы помещаете еду в микроволновую печь, молекулы воды, содержащиеся в еде, поглощают энергию микроволн, движутся быстрее и таким образом разогревают еду. Иными словами, в отличие от обычной духовки или печи, где еда разогревается снаружи, микроволновая печь разогревает ее *изнутри*.

Инфракрасные лучи

Эта часть электромагнитного спектра включает излучение с длиной волны от 1 миллиметра до восьми тысяч атомных диаметров (около 800 нм). Лучи этой части спектра человек ощущает непосредственно кожей — как тепло. Если вы протягиваете руку в направлении огня или раскаленного предмета и чувствуете жар, исходящий от него, вы воспринимаете как жар именно инфракрасное излучение. У некоторых животных (например, у норных гадюк) есть даже органы чувств, позволяющие им определять местонахождение тепловкровной жертвы по инфракрасному излучению ее тела.

Поскольку большинство объектов на поверхности Земли излучает энергию в инфракрасном диапазоне волн, детекторы инфракрасного излучения играют немаловажную роль в современных технологиях обнаружения. Инфракрасные окуляры приборов ночного видения позволяют людям «видеть в темноте», и с их помощью можно обнаружить не только людей, но и технику, и сооружения, нагревшиеся за день и отдающие ночью свое тепло в окружающую среду в виде инфракрасных лучей. Детекторы инфракрасных лучей широко используются спасательными службами, например для обнаружения живых людей под завалами после землетрясений или иных стихийных бедствий и техногенных катастроф.

Видимый свет

Как уже говорилось, длины электромагнитных волн видимого светового диапазона колеблются в пределах от восьми до четырех тысяч атомных диаметров (800–400 нм). Человеческий глаз представляет собой идеальный инструмент для регистрации и анализа электромагнитных волн этого диапазона. Это обусловлено двумя

причинами. Во-первых, как отмечалось, волны видимой части спектра практически беспрепятственно распространяются в прозрачной для них атмосфере. Во-вторых, температура поверхности Солнца (около 5000°C) такова, что пик энергии солнечных лучей приходится именно на видимую часть спектра. Таким образом, наш главный источник энергии излучает огромное количество энергии именно в видимом световом диапазоне, а окружающая нас среда в значительной мере прозрачна для этого излучения. Неудивительно поэтому, что человеческий глаз в процессе эволюции сформировался таким образом, чтобы улавливать и распознавать именно эту часть спектра электромагнитных волн.

Хочу еще раз подчеркнуть, что ничего особенного с физической точки зрения в диапазоне видимых электромагнитных лучей нет. Он представляет собой всего лишь узкую полоску в широком спектре излучаемых волн (см. рисунок). Для нас он столь важен лишь постольку, поскольку человеческий мозг оснащен инструментом для выявления и анализа электромагнитных волн именно этой части спектра.

Ультрафиолетовые лучи

К ультрафиолетовым лучам относят электромагнитное излучение с длиной волны от нескольких тысяч до нескольких атомных диаметров (400–10 нм). В этой части спектра излучение начинает оказывать влияние на жизнедеятельность живых организмов. *Мягкие* ультрафиолетовые лучи в солнечном спектре (с длинами волн, приближающимися к видимой части спектра), например, вызывают в умеренных дозах загар, а в избыточных — тяжелые ожоги. *Жесткий* (коротковолновой) ультрафиолет губителен для биологических клеток и поэтому используется, в частности, в медицине для стерилизации хирургических инструментов и медицинского оборудования, убивая все микроорганизмы на их поверхности.

Все живое на Земле защищено от губительного влияния жесткого ультрафиолетового излучения *озоновым слоем* земной атмосферы, поглощающим большую часть жестких ультрафиолетовых лучей в спектре солнечной радиации (см. *озоновая дыра*). Если бы не этот естественный щит, жизнь на Земле едва ли бы вышла на сушу из вод Мирового океана. Однако, несмотря на защитный озоновый слой, какая-то часть жестких ультрафиолетовых лучей достигает поверхности Земли и способна вызвать рак кожи, особенно у людей, от рождения склонных к бледности и плохо загорающих на солнце.

Рентгеновские лучи

Излучение в диапазоне длин волн от нескольких атомных диаметров до нескольких сот диаметров атомного ядра называется рентгеновским. Рентгеновские лучи проникают сквозь мягкие ткани организма и поэтому незаменимы в медицинской диагнос-

тике. Как и в случае с радиоволнами, временной разрыв между их открытием в 1895 году и началом практического применения, ознаменовавшимся получением в одной из парижских больниц первого рентгеновского снимка, составил считанные годы. (Интересно отметить, что парижские газеты того времени настолько увлеклись идеей, что рентгеновские лучи могут проникать сквозь одежду, что практически ничего не сообщали об уникальных возможностях их применения в медицине.)

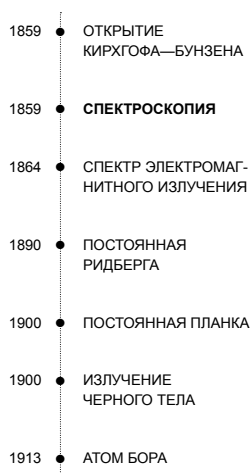
Гамма-лучи

Самые короткие по длине волны и самые высокие по частоте и энергии лучи в электромагнитном спектре — это γ -лучи (гамма-лучи). Они состоят из фотонов сверхвысоких энергий и используются сегодня в онкологии для лечения раковых опухолей (а точнее, для умерщвления раковых клеток). Однако их влияние на живые клетки столь губительно, что при этом приходится соблюдать крайнюю осторожность, чтобы не причинить вреда окружающим здоровым тканям и органам.

В заключение важно еще раз подчеркнуть, что, хотя все описанные типы электромагнитного излучения проявляют себя внешне по-разному, по своей сути они являются близнецами. Все электромагнитные волны в любой части спектра представляют собой распространяющиеся в вакууме или среде поперечные колебания электрического и магнитного полей, все они распространяются в вакууме со скоростью света c и отличаются друг от друга лишь длиной волны и, как следствие, энергией, которую они переносят. Остается только добавить, что названные мною границы диапазонов носят достаточно условный характер (и в других книгах вам, вполне вероятно, попадутся несколько иные значения граничных длин волн). В частности, микроволновые излучения с большими длинами волн нередко и справедливо относятся к сверхвысокочастотному диапазону радиоволн. Отсутствуют четкие границы и между жестким ультрафиолетовым и мягким рентгеновским, а также между жестким рентгеновским и мягким гамма-излучением.

Спектроскопия

Наличие атомов химических элементов в веществе можно выявить по присутствию характерных линий в спектре излучения или поглощения



Согласно простейшей модели строения атома БОРА, электроны можно представить расположенными на четко определенных («разрешенных») орбитах вокруг ядра атома. При этом они могут дискретно переходить с орбиты на орбиту, излучая или поглощая порции энергии, и это явление называется *квантовым скачком*. Если электрон переходит на более низкую орбиту, он теряет квант энергии и излучает квант света — фотон, который характеризуется строго определенной длиной волны, зависящей от потери энергии при квантовом скачке. Излучаемые таким образом фотоны мы воспринимаем как свечение совершенно определенного цвета — раскаленная медная проволока, например, светится синим (см. ПРОБА НА ОКРАШИВАНИЕ ПЛАМЕНИ). Для перехода на более высокую орбиту электрону, наоборот, требуется дополнительная энергия, и обычно он поглощает ее также в виде фотонов с определенной длиной волны (см. ОТКРЫТИЕ КИРХГОФА—БУНЗЕНА).

Такое взаимодействие между светом и атомами вещества легло в основу важной отрасли экспериментально-прикладной науки, которая называется *спектроскопия*, или *спектральный анализ*. Поскольку ядра атомов различных элементов содержат различное число протонов, электроны в этих атомах располагаются на отличающихся друг от друга разрешенных орбитах (или, если придерживаться современной, более сложной картины строения атома, — *орбиталях*, определяющих вероятность нахождения электрона в определенной области, а не его точное местонахождение). Это означает, что в атомах различных химических элементов энергии квантовых скачков между разрешенными орбиталями отличаются и они будут излучать свет с различными длинами волн. Так, в видимом спектре излучения натрия наблюдаются лишь две близко расположенные линии в желтой части спектра (вот почему уличные натриевые лампы дневного света можно узнать по характерному желтоватому свечению), а у ртути спектральные линии приходятся на сине-голубую область (соответственно, если лампа уличного освещения светится голубоватым светом, значит, это ртутная лампа).

Простой, казалось бы, факт, что мы можем судить об атомном составе вещества по длине волн излучаемого им света, дал начало целой отрасли экспериментальных и прикладных исследований — спектроскопии. Набор линий в спектре каждого химического элемента уникален. Далее, если атом ионизирован, этот набор спектральных линий смещается и образует новую характерную серию в спектре. Таким образом, обнаружив серию спектральных линий (или набор излучаемых частот, что, по сути, то же самое) излучаемого тела или вещества (например, при накаливании неизвестного материала неизвестного нам химического состава в пламени горелки Бунзена), мы можем с уверенностью судить о присутствии или отсутствии соответствующих химических элементов в составе исследуемого материала.

Это основа так называемой *эмиссионной спектроскопии*. Сравнивая интенсивность излучения спектральных линий, характерных для различных элементов, мы можем рассчитать их количественное соотношение в веществе и определить его химический состав. Благодаря этому нам даже не надо исследовать вещество в химической лаборатории и мы можем судить о химическом составе светящихся объектов, например звезд и галактик, находящихся на колоссальном удалении от них.

Сходным образом работает и *абсорбционная спектроскопия*. В этом случае через изучаемое вещество пропускается белый свет (представляющий из себя сплошной спектр световых частот) и выявляются *линии поглощения*, соответствующие частотам и длинам волн квантовых переходов электронов на более высокие орбитали. Соответственно, рассматривая спектральную картину такого света, пропущенного через вещество, мы увидим темные линии поглощения и можем судить о составе вещества. Абсорбционная спектроскопия широко применяется в астрофизике для исследования химического состава планет, туманностей, газопылевых облаков и других космических объектов, не обладающих собственным свечением, по темным линиям в спектре белых звезд-источников, находящихся за ними.

Стандартная модель

Вся материя состоит из кварков, лептонов и частиц—переносчиков взаимодействий



Стандартной моделью сегодня принято называть теорию, наилучшим образом отражающую наши представления об исходном материале, из которого изначально построена Вселенная. Она же описывает, как именно материя образуется из этих базовых компонентов, и силы и механизмы взаимодействия между ними (см. также кварки и восьмеричный путь, универсальные теории и элементарные частицы).

Со структурной точки зрения элементарные частицы, из которых состоят атомные ядра (*нуклоны*), и вообще все тяжелые частицы — *адроны (барионы и мезоны)* — состоят из еще более простых частиц, которые принято называть фундаментальными. В этой роли по-настоящему фундаментальных первичных элементов материи выступают *кварки*, электрический заряд которых равен $2/3$ или $-1/3$ единичного положительного заряда протона. Самые распространенные и легкие кварки называют *верхним и нижним* и обозначают, соответственно, *u* (от английского *up* — «верх») и *d* (*down* — «низ»). Иногда их же называют *протонным* и *нейтронным* кварком по причине того, что протон состоит из комбинации *uud*, а нейтрон — *udd*. Верхний кварк имеет заряд $2/3$; нижний — отрицательный заряд $-1/3$. Поскольку протон состоит из двух верхних и одного нижнего, а нейтрон — из одного верхнего и двух нижних кварков, вы можете самостоятельно убедиться, что суммарный заряд протона и нейтрона получается строго равным 1 и 0, и удостовериться, что в этом стандартная модель адекватно описывает реальность. Две другие пары кварков входят в состав более экзотических частиц. Кварки из второй пары называют *очарованными* — *c* (от *charmed*) и *странными* — *s* (от *strange*). Третью пару составляют *истинные* — *t* (*truth*) и *красивые* — *b* (*beauty*) кварки. Практически все частицы, предсказываемые стандартной моделью и состоящие из различных комбинаций кварков, уже открыты экспериментально.

Другой строительный набор состоит из кирпичиков, называемых *лептонами*. Самый распространенный из лептонов — давно нам знакомый *электрон*, входящий в структуру атомов, но не участвующий в ядерных взаимодействиях, ограничиваясь межатомами. Помимо него (и парной ему античастицы под названием *позитрон*) к лептонам относятся более тяжелые частицы — *мюон* и *тау-лептон* с их античастицами. Кроме того, каждому лептону сопоставлена своя незаряженная частица с нулевой (или практически нулевой) массой покоя; такие частицы называются, соответственно, электронное, мюонное или таонное *нейтрино*.

Итак, лептоны, подобно кваркам, также образуют три «семейные пары». Такая симметрия не ускользнула от наблюдательных глаз теоретиков, однако убедительного объяснения ей до сих пор не предложено. Как бы то ни было, кварки и лептоны представляют собой основной строительный материал Вселенной.

Чтобы понять обратную сторону медали — характер сил взаимодействия между кварками и лептонами, — нужно понять, как

современные физики-теоретики интерпретируют само понятие силы. В этом нам поможет аналогия. Представьте себе двух лодочников, гребущих на встречных курсах по реке Кем в Кембридже. Один гребец от щедрости душевной решил угостить коллегу шампанским и, когда они проплывали друг мимо друга, кинул ему полную бутылку шампанского. В результате действия закона сохранения импульса, когда первый гребец кинул бутылку, курс его лодки отклонился от прямолинейного в противоположную сторону, а когда второй гребец поймал бутылку, ее импульс передался ему, и вторая лодка также отклонилась от прямолинейного курса, но уже в противоположную сторону. Таким образом, в результате обмена шампанским обе лодки изменили направление. Согласно законам механики Ньютона, это означает, что между лодками произошло силовое взаимодействие. Но ведь лодки не вступали между собой в прямое соприкосновение! Здесь мы и видим наглядно, и понимаем интуитивно, что сила взаимодействия между лодками была передана носителем импульса — бутылкой шампанского. Физики назвали бы ее *переносчиком взаимодействия*.

В точности так же и силовые взаимодействия между частицами происходят посредством обмена частицами — переносчиками этих взаимодействий. Фактически различие между фундаментальными силами взаимодействия между частицами мы и проводим лишь постольку, поскольку в роли переносчиков этих взаимодействий выступают разные частицы. Таких взаимодействий четыре: *сильное* (именно оно удерживает кварки внутри частиц), *электромагнитное*, *слабое* (именно оно приводит к некоторым формам радиоактивного распада) и *гравитационное*. Переносчиками сильного цветового взаимодействия являются *глюоны*, не обладающие ни массой, ни электрическим зарядом. Этот тип взаимодействия описывается квантовой хромодинамикой. Электромагнитное взаимодействие происходит посредством обмена квантами электромагнитного излучения, которые называются *фотонами* и также лишены массы. Слабое взаимодействие, напротив, передается массивными *векторными* или *калибровочными бозонами*, которые «весят» в 80–90 раз больше протона, — в лабораторных условиях их впервые удалось обнаружить лишь в начале 1980-х годов. Наконец, гравитационное взаимодействие передается посредством обмена не обладающими собственной массой *гравитонами* — этих посредников пока что экспериментально обнаружить не удалось.

В рамках стандартной модели первые три типа фундаментальных взаимодействий удалось объединить, и они более не рассматриваются по отдельности, а считаются тремя различными проявлениями силы единой природы. Возвращаясь к аналогии, предположим, что другая пара гребцов, проплывая друг мимо друга по реке Кем, обменялась не бутылкой шампанского, а всего лишь стаканчиком мороженого. От этого лодки также отклонятся от курса в противоположные стороны, но значительно слабее. Стороннему

наблюдателю может показаться, что в этих двух случаях между лодками действовали разные силы: в первом случае произошел обмен жидкостью (бутылку я предлагаю во внимание не принимать, поскольку большинству из нас интересно ее содержимое), а во втором — твердым телом (мороженым). А теперь представьте, что в Кембридже в тот день стояла редкостная для северных мест летняя жара и мороженое в полете растаяло. То есть достаточно некоторого повышения температуры, чтобы понять, что фактически взаимодействие не зависит от того, жидкое или твердое тело выступает в роли его переносчика. Единственная причина, по которой нам представлялось, что между лодками действуют различные силы, состояла во внешнем отличии переносчика-мороженого, вызванном недостаточной для его плавления температурой. Поднимите температуру — и силы взаимодействия предстанут наглядно едиными.

Силы, действующие во Вселенной, также сплавляются воедино при высоких энергиях (температурах) взаимодействия, после чего различить их невозможно. Первыми *объединяются* (именно так это принято называть) слабое ядерное и электромагнитное взаимодействия. В результате мы получаем так называемое *электрослабое взаимодействие*, наблюдаемое даже лабораторно при энергиях, развиваемых современными ускорителями элементарных частиц. В ранней Вселенной энергии были столь высоки, что в первые 10^{-10} секунды после Большого взрыва не было грани между слабыми ядерными и электромагнитными силами. Лишь после того, как средняя температура Вселенной понизилась до 10^{14} К, все четыре наблюдаемые сегодня силовые взаимодействия разделились и приняли современный вид. Пока температура была выше этой отметки, действовали лишь три фундаментальные силы: сильного, объединенного электрослабого и гравитационного взаимодействий.

Объединение электрослабого и сильного ядерного взаимодействия происходит при температурах порядка 10^{27} К. В лабораторных условиях такие энергии сегодня недостижимы. Самый мощный современный ускоритель — строящийся в настоящее время на границе Франции и Швейцарии Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider) — сможет разгонять частицы до энергий, которые составляют всего 0,000000001% от необходимой для объединения электрослабого и сильного ядерного взаимодействий. Так что, вероятно, экспериментального подтверждения этого объединения ждать нам придется долго. Таких энергий нет и в современной Вселенной, однако в первые 10^{-35} с ее существования температура Вселенной была выше 10^{27} К и во Вселенной действовало всего две силы — *электросильного* и гравитационного взаимодействия. Теории, описывающие эти процессы, называют «теориями Великого объединения» (ТВО). Напрямую проверить ТВО нельзя, но они дают определенные прогнозы и относительно процессов, протекающих при более низких энергиях. На сегодняшний день все

предсказания ТВО для относительно низких температур и энергий подтверждаются экспериментально.

Итак, стандартная модель в обобщенном виде представляет собой теорию строения Вселенной, в которой материя состоит из кварков и лептонов, а сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия между ними описываются теориями великого объединения. Такая модель, очевидно, не полна, поскольку не включает гравитацию. Предположительно, более полная теория со временем все-таки будет разработана (см. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕОРИИ), а на сегодня стандартная модель — это лучшее из того, что мы имеем.

Стволовые клетки

Некоторые клетки плода и взрослого организма сохраняют способность давать начало специализированным клеткам различного типа



Человеческий организм начинает развиваться из одной клетки (см. КЛЕТОЧНАЯ ТЕОРИЯ) — одной оплодотворенной клетки, называемой *зиготой*. ДНК, содержащаяся в этой клетке, будет воспроизведена во всех клетках взрослого организма. Но по мере созревания особи в клеточной ДНК происходят изменения. Вначале «включены» все гены, находящиеся внутри зиготы: генетики скажут, что все гены могут *экспрессироваться* — другими словами, они могут работать. Однако по мере взросления особи клетки приобретают специализацию, для этого требуется выключить те или иные гены, отменив, таким образом, их экспрессию. Например, в каждой клетке вашего тела находятся гены, ответственные за выработку инсулина, однако инсулин синтезируют только клетки поджелудочной железы. В остальных клетках организма (например, клетках кожи, нервных клетках головного мозга) ген инсулина отключен.

То же самое происходит во всех клетках вашего организма — при развитии человека, которым управляют еще непознанные нами процессы, специализированные клетки возникают вследствие отключения всех за небольшим исключением генов клеточной ДНК, и специализация определяется участками ДНК, которые остались включенными. После того как «щелкнет выключатель», судьба клеток определена навечно — мышечные клетки при делении будут производить только мышечные клетки, кожные клетки — только клетки кожи и т.д. Такая особенность развития имеет грандиозные последствия для здоровья человека: мышечные клетки, погибшие при сердечном приступе, не могут быть замещены другими клетками; ничем нельзя заменить и клетки мозга, синтезирующие допамин, если они будут уничтожены болезнью Паркинсона; перерезанные клетки спинного мозга также не восстанавливаются. Очень многие людские страдания вызваны неспособностью организма замещать специализированные клетки.

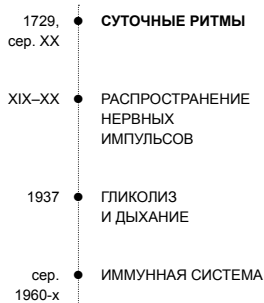
После того как зигота начнет делиться, формируя эмбрион, клетки некоторое время сохраняют способность развиваться в ткань любого типа. Клетки, которые могут развиваться в любую клетку организма, называются *эмбриональными стволовыми клетками*. В конце 1990-х годов ученые научились выделять такие клетки и сколь угодно долго поддерживать их в культуре. Это достижение открывает поразительные перспективы перед человечеством, поскольку теперь мы можем создавать в лаборатории новые клетки, а возможно, и новые органы.

Ученые могут использовать технологии стволовых клеток совместно с технологиями клонирования для того, чтобы выделять ДНК из клетки взрослого организма, помещать ее в яйцеклетку человека и получать при этом эмбриональные стволовые клетки, содержащие ДНК взрослой особи. Это позволит выращивать органы для замены ими поврежденных, не беспокоясь об отторжении имплантированной ткани организмом-реципиентом.

Недавно обнаружено, что некоторые клетки взрослого организма, по-видимому, хотя бы отчасти обладают способностью порождать стволовые клетки, характерные для эмбриона. Если такое действительно возможно, удастся устранить одно из этических препятствий на пути к использованию эмбриональных стволовых клеток — нам не придется разрушать эмбрион человека, чтобы получить эти клетки.

Суточные ритмы

В живых организмах установлены внутренние часы



Поведение практически всего живого, от водоросли до человека, привязано к временным циклам, которые обычно соотносятся с продолжительностью дня. Например, листья многих растений раскрываются на рассвете и складываются на закате, и любому, кто совершал дальний авиаперелет, известно о феномене «смещения времени», когда человек плохо себя чувствует, резко оказавшись в другом часовом поясе. В середине XX века ученые спорили, является ли такое поведение реакцией на внешние раздражители или формируется под влиянием внутреннего механизма. Сегодня мы знаем, что оно обусловлено внутренними механизмами, получившими название «биологических часов».

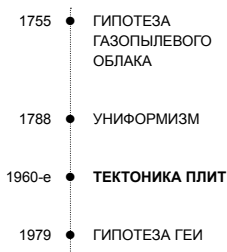
Исследования, которые позволяют узнать, как именно работают эти биологические часы в организме человека и других животных, пока еще не закончены, но то, что такие часы существуют, уже не вызывает сомнения. В частности, эксперименты на плодовой мушке показали, что, изменяя всего один ген, можно получить мушек, лишенных внутренних часов, мушек, страдающих бессонницей, и мушек, у которых продолжительность циклов сна и бодрствования отлична от 24 часов.

Хорошо известно, что у человека упадок жизненных сил приходится на 3–4 часа утра (один поэт назвал это «кромешной полночью души»), и действительно, смерть в эти часы наступает чаще, чем в любое другое время суток. Все физиологические функции, от дыхания до сердцебиения, подчиняются этим циклам. Плохое самочувствие при перелете через несколько часовых поясов возникает из-за нарушения этих циклов, так как организм пытается синхронизировать внутренние часы со светлым временем суток на новом месте. Но время реакции, необходимое для восстановления равновесия, неодинаково для всех наших физиологических и психических функций, поэтому мы чувствуем себя неважно в течение нескольких дней, пока не будет восстановлена синхронизация.

Опытные путешественники хорошо знакомы с влиянием дальних перелетов на суточные ритмы. При пересечении нескольких часовых поясов нарушается синхронизация всех суточных ритмов человека. И это нарушение биоритмов сохраняется до тех пор, пока в новом часовом поясе циклы не придут в соответствие со светлым временем суток. Обычно на это требуется несколько дней. Путешественники часто берут с собой препарат мелатонин, чтобы быстрее перевести цикл сна в новый режим, поскольку мелатонин вызывает засыпание в любом цикле.

Тектоника плит

Земная поверхность состоит из нескольких сцепленных между собой больших плит, которые медленно движутся друг относительно друга



Твердые планеты в своем развитии проходят период нагревания, основную энергию для которого дают падающие на поверхность планеты обломки космических тел (см. гипотеза газопылевого облака). При столкновении этих объектов с планетой почти вся кинетическая энергия падающего объекта мгновенно преобразуется в тепловую, поскольку его скорость движения, составляющая несколько десятков километров в секунду, в момент удара резко падает до нуля. Всем внутренним планетам Солнечной системы — Меркурию, Венере, Земле, Марсу — этого тепла хватало если не для того, чтобы полностью или частично расплавиться, то хотя бы для того, чтобы размягчиться и сделаться пластичными и текучими. В этот период вещества с наибольшей плотностью передвигались к центру планет, образуя ядро, а наименее плотные, наоборот, поднимались на поверхность, образуя земную кору. Примерно так же расслаивается соус для салата, если его надолго оставить на столе. Этот процесс, называемый *дифференциацией магмы*, объясняет внутреннее строение Земли.

У самых маленьких внутренних планет, Меркурия и Марса (а также у Луны), это тепло в конце концов выходило на поверхность и рассеивалось в космосе. Затем планеты затвердевали и (как в случае с Меркурием) в последующие несколько миллиардов лет проявляли низкую геологическую активность. История Земли была совсем другой. Поскольку Земля — самая крупная из внутренних планет, в ней сохранился и самый большой запас тепла. А чем крупнее планета, тем меньше у нее отношение площади поверхности к объему и тем меньше она теряет тепла. Следовательно, Земля остывала медленнее, чем другие внутренние планеты. (То же самое можно сказать и о Венере, размер которой немного меньше Земли.)

Кроме того, с начала формирования Земли в ней происходил распад радиоактивных элементов, что увеличивало запас тепла в ее недрах. Следовательно, Землю можно рассматривать как шарообразную печь. Внутри нее непрерывно образуется тепло, переносится к поверхности и излучается в космос. Перенос тепла вызывает ответное перемещение *мантии* — оболочки Земли, расположенной между ядром и земной корой на глубине от нескольких десятков до 2900 км (см. теплообмен). Горячее вещество из глубины мантии поднимается, охлаждается, а затем вновь погружается, замещаясь новым горячим веществом. Это классический пример конвективной ячейки.

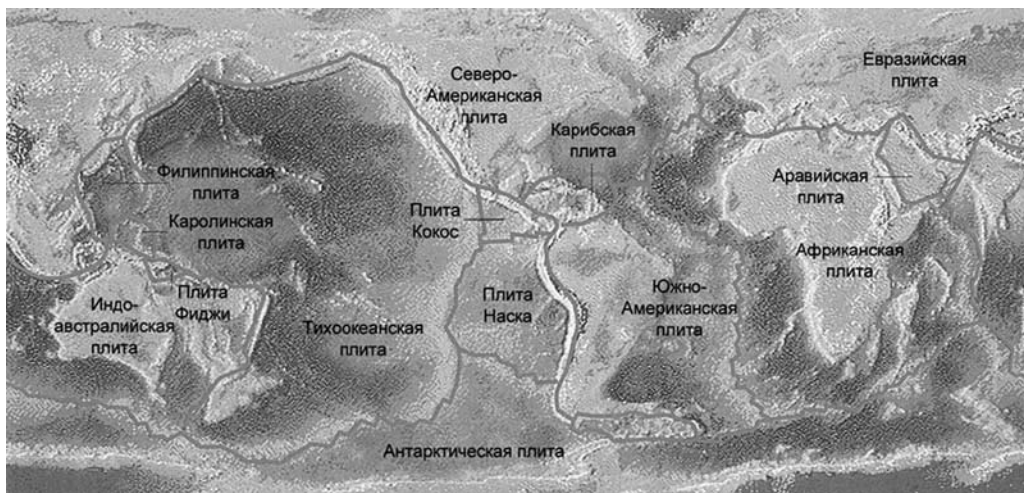
Можно сказать, что порода мантии бурлит так же, как вода в чайнике: и в том, и в другом случае тепло переносится в процессе конвекции. Некоторые геологи считают, что для завершения полного конвективного цикла породам мантии требуется несколько сотен миллионов лет — по человеческим меркам очень большое время. Известно, что многие вещества с течением времени медленно деформируются, хотя на протяжении человеческой жизни они выглядят абсолютно твердыми и неподвижными. Например,

в средневековых соборах старинные оконные стекла внизу толще, чем наверху, потому что в течение многих веков стекло стекало вниз под действием силы тяжести. Если за несколько столетий это происходит с твердым стеклом, то нетрудно представить себе, что то же самое может произойти с твердыми горными породами за сотни миллионов лет.

Наверху конвективных ячеек земной мантии плавают породы, составляющие твердую поверхность Земли, — так называемые *тектонические плиты*. Эти плиты состоят из базальта, самой распространенной излившейся магматической горной породы. Толщина этих плит примерно 10–120 км, и они перемещаются по поверхности частично расплавленной мантии. Материки, состоящие из относительно легких пород, таких как гранит, образуют самый верхний слой плит. В большинстве случаев толщина плит под материками больше, чем под океанами. Со временем процессы, происходящие внутри Земли, сдвигают плиты, вызывая их столкновение и растрескивание, вплоть до образования новых плит или исчезновения старых. Именно благодаря этому медленному, но непрерывному перемещению плит поверхность нашей планеты все время находится в динамике, постоянно изменяясь.

Важно понимать, что понятия «плита» и «материк» — не одно и то же. Например, Северо-Американская тектоническая плита простирается от середины Атлантического океана до западного побережья Северо-Американского континента. Часть плиты покрыта водой, часть — сушей. Анатолийская плита, на которой расположены Турция и Ближний Восток, полностью покрыта сушей, в то время как Тихоокеанская плита расположена полностью под Тихим океаном. То есть границы плит и береговые линии материков не обязательно совпадают. Кстати, слово «тектоника» происходит от греческого слова *tekton* («строитель») — тот же корень есть и в слове «архитектор» — и подразумевает процесс строительства или сборки.

На карте рельефа Земли, включающей океанское дно, видны основные плиты, составляющие земную поверхность (более мелкие плиты для простоты не обозначены). В местах срединно-океанических хребтов плиты расходятся, а в местах основных горных хребтов сталкиваются



Тектоника плит заметнее всего там, где плиты соприкасаются друг с другом. Принято выделять три типа границ между плитами.

Дивергентные границы

В середине Атлантического океана поднимается к поверхности раскаленная магма, образовавшаяся в глубине мантии. Она прорывается сквозь поверхность и растекается, постепенно заполняя собой трещину между раздвигающимися плитами. Из-за этого морское дно расширяется и Европа и Северная Америка расходятся в стороны со скоростью несколько сантиметров в год. (Это движение смогли измерить с помощью радиотелескопов, расположенных на двух континентах, сравнив время прихода радиосигнала от далеких квазаров.)

Если дивергентная граница расположена под океаном, в результате расхождения плит возникает срединно-океанический хребет — горная цепь, образованная за счет скопления вещества в том месте, где оно выходит на поверхность. Срединно-Атлантический хребет, простирающийся от Исландии до Фолклендов, — это самая длинная горная цепь на Земле. Если же дивергентная граница находится под материком, она буквально разрывает его. Примером такого процесса, происходящего в наши дни, служит Великая долина разломов, простирающаяся от Иордании на юг в Восточную Африку.

Конвергентные границы

Если на дивергентных границах образуется новая кора, значит, где-то в другом месте кора должна разрушаться, иначе Земля увеличивалась бы в размерах. При столкновении двух плит одна из них пододвигается под другую (это явление называется *субдукцией*, или пододвиганием). При этом плита, оказавшаяся внизу, погружается в мантию. Что происходит на поверхности над зоной субдукции, зависит от местонахождения границ плиты: под материком, на границе материка или под океаном.

Если зона субдукции расположена под океанической корой, то в результате пододвигания образуется глубокая срединно-океаническая впадина (желоб). Примером этого может служить самое глубокое место в Мировом океане — Марианская впадина около Филиппин. Вещество нижней плиты попадает в глубь магмы и расплавляется там, а потом может опять подняться к поверхности, образуя гряду вулканов — как, например, цепь вулканов на востоке Карибского моря и на западном берегу Соединенных Штатов.

Если обе плиты на конвергентной границе находятся под материками, результат будет совсем другим. Материковая кора состоит из легких веществ, и обе плиты фактически плавают над зоной субдукции. Поскольку одна плита пододвигается под другую, два

материка сталкиваются и их границы сминаются, образуя материковый горный хребет. Так сформировались Гималаи, когда Индийская плита около 50 миллионов лет назад столкнулась с Евразийской. В результате такого же процесса сформировались и Альпы, когда Италия соединилась с Европой. А Уральские горы, старую горную цепь, можно назвать «сварочным швом», образовавшимся при объединении европейского и азиатского массивов.

Если материк покоится только на одной из плит, на нем будут образовываться складки и смятия по мере его наплзания на зону субдукции. Примером этого служат Анды на Западном побережье Южной Америки. Они сформировались после того, как Южно-Американская плита наплыла на погрузившуюся под нее плиту Наска в Тихом океане.

Трансформные границы

Иногда бывает так, что две плиты не расходятся и не пододвигаются друг под друга, а просто трутся краями. Самый известный пример такой границы — разлом Сан-Андреас в Калифорнии, где движутся бок о бок Тихоокеанская и Северо-Американская плиты. В случае трансформной границы плиты сталкиваются на время, а затем расходятся, высвобождая много энергии и вызывая сильные землетрясения.

В заключение я хотел бы подчеркнуть, что, хотя тектоника плит включает в себя понятие о движении материков, это не то же самое, что гипотеза дрейфа материков, предложенная в начале XX века. Эта гипотеза была отвергнута (справедливо, по мнению автора) геологами из-за некоторых экспериментальных и теоретических неувязок. И тот факт, что наша современная теория включает в себя один аспект из гипотезы дрейфа материков — перемещение материков, — не означает, что ученые отвергли тектонику плит в начале прошлого века только для того, чтобы принять ее позже. Теория, которая принята сейчас, коренным образом отличается от прежней.



АЛЬФРЕД ЛОТАР ВЕГЕНЕР
(Alfred Lothar Wegener, 1880–1930) — немецкий метеоролог и геолог. Родился в Берлине, где и получил в 1905 году степень доктора астрономии. Перед Первой мировой войной Вегенер читал лекции по астрономии и метеорологии в Марбургском университете; после войны стал профессором метеорологии и

геофизики на специально созданной для него кафедре в университете города Грац в Австрии. Для доказательства своей теории дрейфа материков Вегенер организовал несколько экспедиций, чтобы провести измерения, показавшие, что Гренландия и Европа расходятся. Погиб в Гренландии, во время своей четвертой экспедиции.

Темная материя

Большая часть материи, составляющей Вселенную, надежно скрыта от наших глаз



Составляя у себя в голове наглядное представление о строении галактики, мы, вероятно, видим перед собой спирали из звезд, вращающиеся в черной космической пустоте. Имея очень мощный телескоп, мы бы могли и реально рассмотреть отдельные звезды, составляющие рукава спиральных галактик, поскольку они излучают достаточное количество света и других волн. Смогли бы мы «рассмотреть» и темные области внутри галактик — облака межзвездной пыли и газа, поглощающие, а не испускающие свет.

Однако в течение XX столетия астрофизики постепенно пришли к заключению, что в видимых и ставших привычными образах галактик содержится не более 10% от реально содержащейся во Вселенной материи. Примерно на 90% Вселенная состоит из материи, форма которой остается для нас тайной, поскольку наблюдать ее мы не можем, и по совокупности вся эта темная материя получила название *темной материи*. (Иногда еще говорят о недостающей массе, однако этот термин нельзя назвать удачным, поскольку в такой терминологии ее лучше было бы, вероятно, назвать избыточной.) Впервые тайные откровения подобного рода в далеком 1933 году озвучил швейцарский астроном Фриц Цвики (Fritz Zwicky, 1898–1974). Именно он указал, что скопление галактик в созвездии Волосы Вероники, судя по всему, удерживается вместе гораздо более сильным гравитационным полем, чем это можно было бы предположить, исходя из видимой массы вещества, содержащегося в этом галактическом скоплении, а значит, большая часть материи, содержащаяся в этой области Вселенной, остается незримой для нас.

В 1970-е годы Вера Рубин, научная сотрудница Института Карнеги (Вашингтон), изучала динамику галактик, характеризующихся высокой скоростью вращения вокруг их центра, — прежде всего поведение вещества на их периферии. По всем параметрам на периферию быстро вращающихся галактик должны были — по принципу центрифуги — выбрасываться значительные массы самого легкого межзвездного газа, а именно водорода, атомы которого теоретически должны были бы окутывать галактику паутиной микроскопических спутников. Рассмотрим в качестве примера нашу Солнечную систему. Ее основная масса сосредоточена в центре (на Солнце); чем дальше планета удалена от центра, тем дольше период ее обращения вокруг него. Юпитеру, например, требуется одиннадцать земных лет, чтобы совершить полный годичный оборот вокруг Солнца, поскольку он находится на значительно более удаленной от Солнца орбите и за один годичный цикл проделывает не только более долгий путь, но и движется по нему медленнее (см. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА). Аналогичным образом, если бы все вещество спиральной галактики было сконцентрировано в ее рукавах, где мы наблюдаем видимые звезды, то и атомы распыленного водорода, подчиняясь третьему закону Кеплера, двигались бы все медленнее по мере удаления от центра галактической массы. Рубин, однако же, удалось экспериментально выяснить, что на любом удалении

от центра галактики водород движется с неизменной скоростью. Можно подумать, будто он «приклеен» к гигантской вращающейся сфере, состоящей из некоей невидимой материи.

Теперь-то мы знаем, что темная материя незримо присутствует не только в пределах галактик, но и во всей Вселенной, включая межгалактическое пространство. О чем мы, однако, так и не имеем никакого представления, так это о ее *природе*. Какая-то ее часть может оказаться обычными небесными телами, не испускающими собственного излучения, например, массивными планетами типа Юпитера. Их существование подтверждается результатами наблюдения за светимостью звезд ближайших галактик, где иногда отмечаются «провалы», которые можно отнести на счет их частичного затмения при прохождении крупных планет на пути лучей по дороге к нам. Практически можно считать подтвержденным и существование межзвездных затмевающих тел, не обладающих собственной энергией излучения в наблюдаемом диапазоне, — они получили название «массивные компактные гало-объекты».

Однако подавляющее большинство ученых сходится на том, что масса невидимой материи Вселенной далеко не ограничивается скрытой от нас массой обычных небесных тел и распыленного вещества, а склонны добавлять к ней и совокупную массу все еще не открытых видов элементарных частиц. Их принято называть *массивными частицами слабого взаимодействия (МЧСВ)*. Они никак не проявляют себя во взаимодействии со световым и прочим электромагнитным излучением. Их поиск сегодня — это своего рода возобновление, казалось бы, давно утратившего актуальность поиска «светоносного эфира» (см. опыт майкельсона — морли). Идея состоит в том, что если наша Галактика действительно со всех сторон облачена сферической оболочкой МЧСВ, Земля в силу своего движения должна постоянно находиться под воздействием «ветра скрытых частиц», пронизывающих ее аналогично тому, как даже в самую безветренную погоду автомобиль обдувается встречными воздушными потоками. Рано или поздно одна из частиц такого «темного ветра» вступит во взаимодействие с одним из земных атомов и возбудит колебания, необходимые для ее регистрации сверхчувствительным прибором, в котором он покоится. Лаборатории, проводящие подобные эксперименты, уже сообщают о том, что получены первые намеки на подтверждение реального существования шестимесячного полупериода колебания частоты регистрации сигналов об аномальных событиях подобного ряда, а именно этого и следовало ожидать, поскольку полгода Земля движется по околосолнечной орбите навстречу ветру скрытых частиц, а в следующие полгода ветер дует «вдогонку» и частицы залетают на Землю реже.

МЧСВ представляют собой пример того, что принято называть *холодной темной материей*, поскольку они тяжелые и медленные. Предполагается, что они играли важную роль на стадии формирования галактик ранней Вселенной. Некоторые ученые

считают также, что по крайней мере часть темной материи пребывает в состоянии быстрых слабовзаимодействующих частиц, таких как нейтрино, представляющих собой пример *горячей темной материи*. Главная проблема тут в том, что до формирования атомов, то есть на протяжении примерно первых 300 000 лет после Большого взрыва, Вселенная пребывала в протоплазменном состоянии. Любое ядро привычной нам материи распадалось, не успев сформироваться, под мощнейшими энергиями бомбардировки со стороны перегретых частиц раскаленной сверхплотной непрозрачной плазмы. После того как Вселенная расширилась до некоторой степени прозрачности разделяющего вещества пространства, начали наконец формироваться легкие атомные ядра. Но, увы, к этому моменту Вселенная расширилась уже настолько, что силы гравитационного притяжения *не могли* противодействовать кинетической энергии разлета осколков Большого взрыва и все вещество по идее должно было бы разлететься, не дав сформироваться устойчивым галактикам, которые мы наблюдаем. В этом состоял так называемый *галактический парадокс*, ставивший под сомнение саму теорию Большого взрыва.

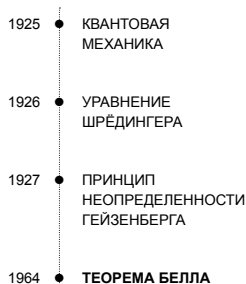
Однако, если во всем пространстве объемного большого взрыва обычная материя была перемешана со скрытыми частицами темной материи, после взрыва темная материя, будучи перемешанной с явной, как раз и могла послужить тем самым сдерживающим элементом. По причине наличия огромного числа скрытых тяжелых частиц она первой стянулась под воздействием сил гравитационного притяжения в будущие ядра галактик, оказавшиеся стабильными по причине отсутствия взаимодействия между МЧСВ и мощным центростремительным энергетическим излучением взрыва. Таким образом, к моменту формирования ядер атомов темная материя успела оформиться в галактики и скопления галактик, а уже на них начали собираться под воздействием гравитационного поля высвобождающиеся элементы обычной материи. В рамках такой модели обычная материя стянулась к сгусткам темной материи подобно сухим листьям, затягиваемым в водовороты на темной поверхности быстрой реки. Есть о чем задуматься, не правда ли? Не только мы, но и вся наша галактика, и весь зримый материальный мир могут оказаться всего лишь пеной на поверхности странной вселенской игры в прятки.

ВЕРА КУПЕР РУБИН (Vera Cooper Rubin, р. 1928) — американский астроном. Родилась в Филадельфии. Образование и докторскую степень получила в университете г. Джорджтаун (штат Вашингтон, США). С 1954 года работает в Институте Карнеги, Вашингтон, занимаясь изучением строения галактик, прежде всего спиральных и, осо-

бенно строением и движением их рукавов. Именно она открыла, что скорость вращения протяженных газовых облаков в рукавах спиральных галактик не убывает по мере удаления от центра, а, напротив, возрастает, и это дает нам первое убедительное подтверждение существования темной материи в отдельно взятых галактиках.

Теорема Белла

Можно экспериментально определить, имеются ли в квантовой механике неучтенные скрытые параметры



«Бог не играет в кости со Вселенной». Этими словами Альберт Эйнштейн бросил вызов коллегам, разрабатывавшим новую теорию — квантовую механику. По его мнению, принцип неопределенности Гейзенберга и уравнение Шрёдингера внесли в микромир нездоровую неопределенность. Он был уверен, что Создатель не мог допустить, чтобы мир электронов так радикально отличался от привычного мира ньютоновских бильярдных шаров. Фактически на протяжении долгих лет Эйнштейн играл роль адвоката дьявола в отношении квантовой механики, выдвигая хитроумные парадоксы, призванные завести создателей новой теории в тупик. Тем самым, однако, он делал доброе дело, серьезно озадачивая теоретиков противоположного лагеря своими парадоксами и заставляя глубоко задумываться над тем, как их разрешить, что всегда бывает полезно, когда разрабатывается новая область знаний.

Есть странная ирония судьбы в том, что Эйнштейн вошел в историю как принципиальный оппонент квантовой механики, хотя первоначально сам стоял у ее истоков. В частности, Нобелевскую премию по физике за 1921 год он получил вовсе не за теорию относительности, а за объяснение фотоэлектрического эффекта на основе новых квантовых представлений, буквально захлестнувших научный мир в начале XX века.

Больше всего Эйнштейн протестовал против необходимости описывать явления микромира в терминах вероятностей и волновых функций (см. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА), а не с привычной позиции координат и скоростей частиц. Вот что он имел в виду под «игрой в кости». Он признавал, что описание движения электронов через их скорости и координаты противоречит принципу неопределенности. Но, утверждал Эйнштейн, должны существовать еще какие-то переменные или параметры, с учетом которых квантовомеханическая картина микромира вернется на путь целостности и детерминизма. То есть, настаивал он, нам только кажется, будто Бог играет с нами в кости, потому что мы не все понимаем. Тем самым он первым сформулировал *гипотезу скрытой переменной* в уравнениях квантовой механики. Она состоит в том, что на самом деле электроны имеют фиксированные координаты и скорость, подобно ньютоновским бильярдным шарам, а принцип неопределенности и вероятностный подход к их определению в рамках квантовой механики — результат неполноты самой теории, из-за чего она и не позволяет их доподлинно определить.

Теорию скрытой переменной можно наглядно представить примерно так: физическим обоснованием принципа неопределенности служит то, что измерить характеристики квантового объекта, например электрона, можно лишь через его взаимодействие с другим квантовым объектом; при этом состояние измеряемого объекта изменится. Но, возможно, есть какой-то иной способ измерения с использованием неизвестных нам пока что инструментов. Эти инструменты (назовем их «субэлектронами»), возможно,

будут взаимодействовать с квантовыми объектами, не изменяя их свойств, и принцип неопределенности будет неприменим к таким измерениям. Хотя никаких фактических данных в пользу гипотез такого рода не имелось, они призрачно маячили на обочине главного пути развития квантовой механики — в основном, я полагаю, по причине психологического дискомфорта, испытываемого многими учеными из-за необходимости отказа от устоявшихся ньютоновских представлений об устройстве Вселенной.

И вот в 1964 году Джон Белл получил новый и неожиданный для многих теоретический результат. Он доказал, что можно провести определенный эксперимент (подробности чуть позже), результаты которого позволят определить, действительно ли квантово-механические объекты описываются волновыми функциями распределения вероятностей, как они есть, или же имеется скрытый параметр, позволяющий точно описать их положение и импульс, как у ньютоновского шарика. Теорема Белла, как ее теперь называют, показывает, что как при наличии в квантово-механической теории скрытого параметра, влияющего на *любую* физическую характеристику квантовой частицы, так и при отсутствии такового можно провести серийный эксперимент, статистические результаты которого подтвердят или опровергнут наличие скрытых параметров в квантово-механической теории. Условно говоря, в одном случае статистическое соотношение составит не более 2:3, а в другом — не менее 3:4.

(Тут я хочу в скобках заметить, что в том году, когда Белл доказал свою теорему, я был студентом-старшекурсником в Стэнфорде. Рыжебородого, с сильным ирландским акцентом Белла было трудно не заметить. Помню, я стоял в коридоре научного корпуса Стэнфордского линейного ускорителя, и тут он вышел из своего кабинета в состоянии крайнего возбуждения и во всеуслышание заявил, что только что обнаружил по-настоящему важную и интересную вещь. И, хотя доказательств на этот счет у меня нет никаких, мне очень хотелось бы надеяться, что я в тот день стал невольным свидетелем его открытия.)

Однако опыт, предлагаемый Беллом, оказался простым только на бумаге и поначалу казался практически невыполнимым. Эксперимент должен был выглядеть так: под внешним воздействием атом должен был синхронно испустить две частицы, например два фотона, причем в противоположных направлениях. После этого нужно было уловить эти частицы и инструментально определить направление спина каждой и сделать это тысячекратно, чтобы накопить достаточную статистику для подтверждения или опровержения существования скрытого параметра по теореме Белла (выражаясь языком математической статистики, нужно было рассчитывать *коэффициенты корреляции*).

Самым неприятным сюрпризом для всех после публикации теоремы Белла как раз и стала необходимость проведения колоссальной серии опытов, которые в ту пору казались практически невыполнимыми, для получения статистически достоверной картины. Однако

не прошло и десятилетия, как ученые-экспериментаторы не только разработали и построили необходимое оборудование, но и накопили достаточный массив данных для статистической обработки. Не вдаваясь в технические подробности, скажу лишь, что тогда, в середине шестидесятых, трудоемкость этой задачи казалась столь чудовищной, что вероятность ее реализации представлялась равной тому, как если бы кто-то задумал посадить за пишущие машинки миллион дрессированных обезьян из пословицы в надежде отыскать среди плодов их коллективного труда творение, равное Шекспиру.

Когда в начале 1970-х годов результаты экспериментов были обобщены, все стало предельно ясно. Волновая функция распределения вероятностей совершенно безошибочно описывает движение частиц от источника к датчику. Следовательно, уравнения волновой квантовой механики не содержат скрытых переменных. Это единственный известный случай в истории науки, когда блестящий теоретик доказал *возможность* экспериментальной проверки гипотезы и дал обоснование *метода* такой проверки, блестящие экспериментаторы титаническими усилиями провели сложный, дорогостоящий и затяжной эксперимент, который в итоге лишь подтвердил и без того господствующую теорию и даже не внес в нее ничего нового, в результате чего все почувствовали себя жестоко обманутыми в ожиданиях!

Однако не все труды пропали даром. Совсем недавно ученые и инженеры, к немалому собственному удивлению, нашли теореме Белла весьма достойное практическое применение. Две частицы, испускаемые источником на установке Белла, являются *когерентными* (имеют одинаковую волновую фазу), поскольку испускаются синхронно. И это их свойство теперь собираются использовать в криптографии для шифровки особо секретных сообщений, направляемых по двум отдельным каналам. При перехвате и попытке дешифровки сообщения по одному из каналов когерентность мгновенно нарушается (опять же в силу принципа неопределенности), и сообщение неизбежно и мгновенно самоуничтожается в момент нарушения связи между частицами.

А Эйнштейн, похоже, был не прав: Бог все-таки играет в кости со Вселенной. Возможно, Эйнштейну все-таки следовало прислушаться к совету своего старого друга и коллеги Нильса Бора, который, в очередной раз услышав старый припев про «игру в кости», воскликнул: «Альберт, перестань же ты наконец указывать Богу, что ему делать!»



ДЖОН СТУАРТ БЕЛЛ (John Stewart Bell, 1928–91) — физик из Северной Ирландии. Родился в Белфасте, в бедной семье. В 1949 году окончил Белфастский Королевский университет, после чего недолгое время работал там же в должности ассистента физической лаборатории. После нескольких лет работы в Институте атомной энергии в г. Хар-

велл (Harwell) в 1960 году Белл был приглашен в Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве и проработал там оставшуюся часть жизни. Жена ученого Мэри Белл также была физиком и сотрудником ЦЕРНа. Принесшую ему известность теорему Белл сформулировал во время краткосрочной стажировки в США.

Теорема Гаусса

Поток напряженности электрического поля, проходящий через замкнутую поверхность, пропорционален суммарному электрическому заряду, содержащемуся внутри этой поверхности

- 1747 • ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА
- 1785 • ЗАКОН КУЛОНА
- 1813 • ТЕОРЕМА ГАУССА

В науке часто бывает, что один и тот же закон можно сформулировать по-разному. По большому счету, от формулировки закона ничего не меняется с точки зрения его действия, однако новая формулировка помогает теоретикам несколько иначе интерпретировать закон и испытать его применительно к новым природным явлениям. Именно такой случай мы и наблюдаем с теоремой Гаусса, которая по существу является обобщением закона Кулона, который, в свою очередь, явился обобщением всего, что ученые знали об электростатических зарядах на момент, когда он был сформулирован.

Вообще говоря, в математике, физике и астрономии найдется немного областей, развитию которых не поспособствовал замечательный гений Карла Фридриха Гаусса. В 1831 году он вместе со своим молодым коллегой Вильгельмом Вебером (Wilhelm Weber, 1804–1891) занялся изучением электричества и магнетизма и вскоре сформулировал и доказал теорему, названную его именем. Чтобы понять, в чем заключается ее смысл, представьте себе изолированный точечный электрический заряд q . А теперь представьте, что он окружен замкнутой поверхностью. Форма поверхности в теореме не важна — это может быть пусть даже сдутый воздушный шарик. В каждой точке окружающей заряд поверхности, однако, наблюдается электрическое поле, образованное зарядом, а произведение напряженности этого электрического поля на сколь угодно малую единицу площади окружающей заряд поверхности, через которую проходят силовые линии поля, называется *поток напряженности электрического поля*, и можно рассчитать поток напряженности, приходящийся на каждый элемент поверхности. Теорема Гаусса как раз и гласит, что суммарный поток напряженности электрического поля, проходящий через окружающую заряд поверхность, пропорционален величине заряда.

Связь между законом Кулона и теоремой Гаусса станет очевидной на простом примере. Предположим, что заряд q окружен сферой радиуса r . На удалении r от заряда напряженность электрического поля, которая определяется силой притяжения или отталкивания единичного заряда, помещенного в соответствующую точку, составит, согласно закону Кулона:

$$E = kq/r^2$$

И то же самое значение мы получим для любой точки сферы заданного радиуса. Следовательно, суммарный поток напряженности электрического поля будет равен значению напряженности поля на удалении r от заряда, помноженному на площадь сферы (которая, как известно, равняется $4\pi r^2$). Иными словами, суммарный поток будет равен:

$$4\pi r^2 \times kq/r^2 = 4\pi kq$$

Это и есть теорема Гаусса.

Интересное следствие из нее получается, если применить эту теорему к сплошному металлу. Представьте себе цельнометаллический предмет и воображаемую замкнутую поверхность внутри него. Полный электрический заряд внутри такой поверхности будет нулевым, поскольку внутри окажется равное число положительных

и отрицательных зарядов — протонов атомных ядер и электронов соответственно. Следовательно, поток напряженности электрического поля, проходящий через такую замкнутую поверхность, также будет равен нулю. Поскольку это верно для любой замкнутой поверхности внутри металла, это означает, что *внутри* металла не существует и не может существовать электрического поля.

Это свойство металлов часто используется экспериментаторами и инженерами-связистами для защиты высокочувствительных приборов от наведенных извне электрических помех. Обычно прибор просто окружается защитным медным экраном. Согласно теореме Гаусса, внешние электрические поля просто не в состоянии проникнуть внутрь такой оболочки и создать помехи работе прибора.

Другое интересное следствие теоремы Гаусса заключается в том, что если в дороге вас застала гроза, самое безопасное для вас — не выходить из машины, поскольку там вы окружены цельнометаллическим экраном. Даже если в ваш автомобиль ударит молния, внутри вам ничего не будет угрожать, поскольку весь разряд пройдет по корпусу и уйдет в землю. Резина, скорее всего, сгорит, зато сами вы останетесь в целости и сохранности.

КАРЛ ФРИДРИХ ГАУСС (Karl Friedrich Gauss, 1777–1855) — немецкий математик из числа великих, не уступающий по рангу Ньютону или Архимеду. Родился в Брауншвейге (Braunschweig), в семье крестьян. Гениальные способности в математике проявил уже в раннем детстве, и пораженный его удивительным талантом учитель начальной школы убедил родителей Карла не определять мальчика в ремесленное училище, а дать ему возможность продолжить образование. В возрасте четырнадцати лет Гаусс буквально потряс своими обширными познаниями графа Брауншвейгского, и тот выделил юноше именную стипендию. Большинство своих важнейших математических открытий Гаусс сделал еще до присвоения ему ученой степени доктора наук Гёттингенским университетом в 1799 году, а спустя два года он опубликовал свой самый фундаментальный труд «Трактат о математике» (*Disquisitiones Mathematicae*), который посвятил своему влиятельному покровителю.

Речь в трактате шла о теории чисел — разделе математики, занимающемся, в частности, натуральными числами и соотношениями между ними, такими как великая теорема Ферма. Занятий математикой Гаусс не оставлял и впоследствии, сформулировав ряд принципов теории вероятностей и математической статистики, включая распределение случайных величин вокруг среднего значения, получившее название *распределения Гаусса*.

В 1801 году, после открытия первого астероида Цереры, Гаусс обратился к астрономии. Для расчета параметров его орбиты он разработал *метод наименьших квадратов*, позволяющий полностью рассчитать орбиту астероида по результатам всего трех измерений его положения на около-солнечной орбите. Пять лет спустя ученый был назначен директором Гёттингенской обсерватории и оставался на этом посту до конца жизни. Кроме того, Гаусс первым всерьез занялся изучением земного магнетизма, и не случайно единица напряженности магнитного поля названа гауссом в его честь.



Теорема Гёделя о неполноте

Всякая система математических аксиом начиная с определенного уровня сложности либо внутренне противоречива, либо неполна

1931 • ТЕОРЕМА ГЁДЕЛЯ
О НЕПОЛНОТЕ

В 1900 году в Париже прошла Всемирная конференция математиков, на которой Давид Гильберт (David Hilbert, 1862–1943) изложил в виде тезисов сформулированные им 23 наиважнейшие, по его мнению, задачи, которые предстояло решить ученым-теоретикам наступающего XX века. Под вторым номером в его списке значилась одна из тех простых задач, ответ на которые кажется очевидным, пока не копнешь немножечко глубже. Говоря современным языком, это был вопрос: самодостаточна ли математика? Вторая задача Гильберта сводилась к необходимости строго доказать, что система аксиом — базовых утверждений, принимаемых в математике за основу без доказательств, — совершенна и полна, то есть позволяет математически описать все сущее. Надо было доказать, что можно задать такую систему аксиом, что они будут, во-первых, взаимно непротиворечивы, а во-вторых, из них можно вывести заключение относительно истинности или ложности любого утверждения.

Возьмем пример из школьной геометрии. В стандартной *Евклидовой планиметрии* (геометрии на плоскости) можно безоговорочно доказать, что утверждение «сумма углов треугольника равна 180° » истинно, а утверждение «сумма углов треугольника равна 137° » ложно. Если говорить по существу, то в Евклидовой геометрии любое утверждение либо ложно, либо истинно, и третьего не дано. И в начале XX века математики наивно полагали, что такая же ситуация должна наблюдаться в любой логически непротиворечивой системе.

И тут в 1931 году какой-то венский очкарик — математик Курт Гёдель — взял и опубликовал короткую статью, попросту опрокинувшую весь мир так называемой математической логики. После долгих и сложных математико-теоретических преамбул он установил буквально следующее. Возьмем любое утверждение типа: «Предположение № 247 в данной системе аксиом логически недоказуемо» и назовем его «утверждение А». Так вот, Гёдель попросту доказал следующее удивительное свойство *любой* системы аксиом:

«Если можно доказать утверждение А,
то можно доказать и утверждение не-А».

Иными словами, если можно доказать справедливость утверждения «предположение 247 *недоказуемо*», то можно доказать и справедливость утверждения «предположение 247 *доказуемо*». То есть, возвращаясь к формулировке второй задачи Гильберта, если система аксиом полна (то есть любое утверждение в ней может быть доказано), то она противоречива.

Единственным выходом из такой ситуации остается принятие неполной системы аксиом. То есть приходится мириться с тем, что в контексте любой логической системы у нас останутся утверждения «типа А», которые являются заведомо истинными или ложными, — и мы можем судить об их истинности лишь *вне* рамок

принятой нами аксиоматики. Если же таких утверждений не имеется, значит, наша аксиоматика противоречива и в ее рамках неизбежно будут присутствовать формулировки, которые можно одновременно и доказать, и опровергнуть.

Итак, формулировка *первой*, или *слабой*, *теоремы Гёделя о неполноте*: «Любая формальная система аксиом содержит неразрешенные предположения». Но на этом Гёдель не остановился, сформулировав и доказав *вторую*, или *сильную теорему Гёделя о неполноте*: «Логическая полнота (или неполнота) любой системы аксиом не может быть доказана в рамках этой системы. Для ее доказательства или опровержения требуются дополнительные аксиомы (усиление системы)».

Спокойнее было бы думать, что теоремы Гёделя носят отвлекающий характер и касаются не нас, а лишь областей возвышенной математической логики, однако фактически оказалось, что они напрямую связаны с устройством человеческого мозга. Английский математик и физик Роджер Пенроуз (Roger Penrose, p. 1931) показал, что теоремы Гёделя можно использовать для доказательства наличия принципиальных различий между человеческим мозгом и компьютером. Смысл его рассуждения прост. Компьютер действует строго логически и не способен определить, истинно или ложно утверждение А, если оно выходит за рамки аксиоматики, а такие утверждения, согласно теореме Гёделя, неизбежно имеются. Человек же, столкнувшись с таким логически недоказуемым и неопровержимым утверждением А, всегда способен определить его истинность или ложность — исходя из повседневного опыта. По крайней мере, в этом человеческий мозг превосходит компьютер, скованный чистыми логическими схемами. Человеческий мозг способен понять всю глубину истины, заключенной в теоремах Гёделя, а компьютерный — никогда. Следовательно, человеческий мозг представляет собой что угодно, но не просто компьютер. Он способен *принимать решения*, и тест Тьюринга пройдет успешно.

Интересно, догадывался ли Гильберт, как далеко заведут нас его вопросы?

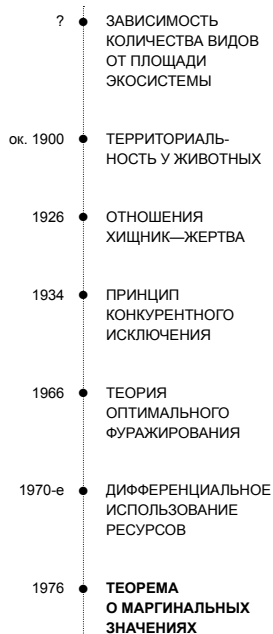


КУРТ ГЁДЕЛЬ (Kurt Gödel, 1906–78) — австрийский, затем американский математик. Родился в г. Брюнн (Brünn, ныне Брно, Чехия). Окончил Венский университет, где и остался преподавателем кафедры математики (с 1930 года — профессором). В 1931 году опубликовал теорему, получившую впоследствии его имя. Будучи человеком сугубо аполитичным, крайне тяжело пережил убийство своего друга и сотрудника по кафедре студентом-нацистом и впал в глубокую депрессию, рецидивы

которой преследовали его до конца жизни. В 1930-е годы эмигрировал в США, но вернулся в родную Австрию и женился. В 1940 году, в разгар войны, вынужденно бежал в Америку транзитом через СССР и Японию. Некоторое время проработал в Принстонском институте перспективных исследований. К сожалению, психика ученого не выдержала, и он умер в психиатрической клинике от голода, отказываясь принимать пищу, поскольку был убежден, что его намереваются отравить.

Теорема о маргинальных значениях

*Животное
будет добывать
пропитание на
данном участке
до тех пор,
пока скорость
потребления энергии
не достигнет своего
максимума*



Многое в поведении животных можно описать с помощью математических методов (см., например, теория оптимального фуражирования). Один из таких аспектов поведения можно выразить простым вопросом: как долго животному имеет смысл добывать корм на одном участке и когда ему уже пора перейти в другое место? Какая стратегия позволяет максимально увеличить его общее энергопотребление?

Это типичная задача для *теории игр* — раздела математики, в котором для выработки стратегий, позволяющих максимально повысить шансы выигрыша в игре, используется метод вероятностного рассуждения. Эта теория применима и к обычным азартным играм вроде покера, и к таким «играм», как военная стратегия, расположение торговых представительств и размещение рекламы. Эти же методы применяются и для изучения стратегии фуражирования.

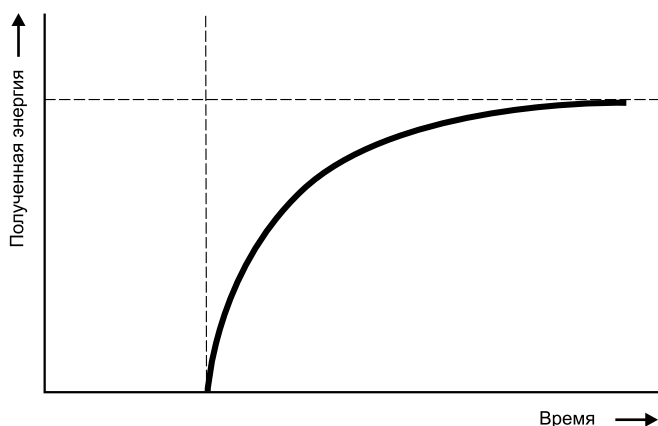
Когда животное приходит на новый участок, оно начинает потреблять ресурсы, которые оно там нашло. Представьте лошадь, которая зашла на лужайку с высокой травой, или лисицу, которая оказалась в местности, изобилующей грызунами. Приступив к потреблению этих ресурсов, животное начинает получать энергию. Вначале количество получаемой энергии будет резко расти, поскольку потребление энергии животным подскакивает от нуля (во время поиска энергоресурсов) до того количества, которое оно получает на этом новом участке. Однако по мере того, как животное потребляет эти ресурсы, общее количество полученной энергии достигает определенного стабильного уровня. Когда все ресурсы будут исчерпаны, энергопотребление вновь упадет до нуля и общая энергия, получаемая на данном участке, будет оставаться на постоянном уровне. Вопрос заключается в следующем: когда наступает наилучший момент для животного, чтобы двинуться дальше, оставив некоторое количество неиспользованных ресурсов, и идти вперед, чтобы найти новую ресурсную базу? Ответ на этот вопрос дает теорема о маргинальных значениях, предложенная в 1966 году американским экологом Эриком Л. Чарновым (Eric L. Charnov, р. 1947).

Теорема учитывает время, затраченное на переход от одной ресурсной базы к другой, — назовем его *временем перемещения*. Время, в течение которого животное остается в определенной ресурсной области, назовем *временем пребывания*. Оптимальная стратегия — та, которая позволяет максимально увеличить общее потребление энергии с течением времени. Если животное получает энергию E за данное время пребывания, то общая скорость энергопотребления за все время t (включающее время перемещения *плюс* время пребывания) будет равна E , деленному на t .

Давайте начнем с предположения, что ресурсы на всех участках одинаковые — например, что все лужайки с травой одинаково

зеленые. Математическая теория игр утверждает, что животное максимально увеличит общее получение энергии во времени, если оно будет покидать каждый участок, как только скорость получения энергии в ней достигнет максимума. Иными словами, время идти дальше наступает именно тогда, когда все идет наилучшим образом. Если животное останется на месте, это позволит ему действительно получить больше энергии от известного источника, но общее количество энергии, которое оно приобретет, будет меньшим, чем оно получило бы, если бы ушло на другой участок немедленно.

Что же происходит в реальной ситуации, когда участки раз-



Животное, нашедшее новый пищевой ресурс, вначале получает большое количество энергии, но по мере того, как ресурс истощается, лучшей стратегией для животного будет идти вперед в поисках нового ресурса. Вертикальная пунктирная линия — начало потребления животным пищевого ресурса, горизонтальная пунктирная линия — максимальный уровень энергопотребления

личаются по количеству ресурсов? Теорема утверждает, что лучшая стратегия для животного — покидать каждую область, независимо от ее богатства, как только скорость получения энергии упадет до максимума, который может дать средний участок. Таким образом, оптимальный момент для оставления участка наступает тогда, когда маргинальное (предельное) значение ско-

рости получения энергии достигает этой средней скорости потребления (отсюда и название теоремы).

Теорема прогнозирует, что потребители питательных веществ будут проводить меньше времени на лужайках, где меньше пищи. Далее следует, что эти потребители будут уходить с таких лужаек быстрее, если лужайки расположены близко друг к другу, чем когда они находятся далеко друг от друга. Потребители также будут покидать такие лужайки быстрее, если они расположены в местности, изобилующей кормами, чем если этот участок небогат кормом.

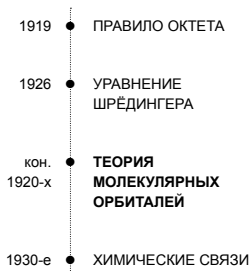
По поводу такого подхода к объяснению поведения животных необходимо сделать одно замечание. Никто не предполагает, конечно, что животное садится с калькулятором и высчитывает скорость своего энергопотребления. Если рассуждать с позиций теории эволюции, то теорема о маргинальных значениях говорит нам, что если животное случайно найдет оптимальную стратегию, то оно будет иметь больше шансов передать свои гены следующему поколению. В конце концов через какое-то время животные придут к своей оптимальной стратегии, даже ни разу не задумавшись о ней.

В этом смысле эволюция во многом похожа на «невидимую руку» в теории экономических рынков шотландского экономиста

Адама Смита, бытовавшую в XVIII веке. Действуя за сценой, она способствует такому поведению, которое приносит максимальную выгоду. Классический «экономический человек», согласно этой теории, действует абсолютно рациональным образом с полным знанием рынка и не имеет никакого сходства с реальным человеком, чье поведение будет предпочтительным и в итоге — преобладающим. Аналогичным образом животные, которые не перемещаются из одной области в другую в соответствии с теоремой о маргинальных значениях, будут в среднем менее удачливыми, чем те, которые перемещаются. В конечном счете всегда побеждает стремление к действию.

Теория молекулярных орбиталей

Связывание атомов в молекулах определяется тем, как перекрываются их волновые функции



Атомы объединяются в молекулы благодаря химическим связям. Причем участвуют в образовании этих связей электроны, находящиеся во внешнем слое этих атомов. Существует несколько теорий, описывающих процесс связывания. Одна из них — *теория валентных связей*, в соответствии с которой связи между атомами образуются, когда атомы обмениваются электронными парами из перекрывающихся орбиталей. Другая — теория молекулярных орбиталей.

Такого рода приблизительные теории полезны, поскольку мы получаем простой, интуитивно понятный способ представления физических процессов. С другой стороны, современные компьютеры дают нам возможность с высокой точностью вычислить энергии связи, однако такие вычисления ничуть не приближают нас к пониманию того, что же происходит, когда атомы соединяются. Роль теорий как раз в том и состоит, чтобы дать нам это понимание.

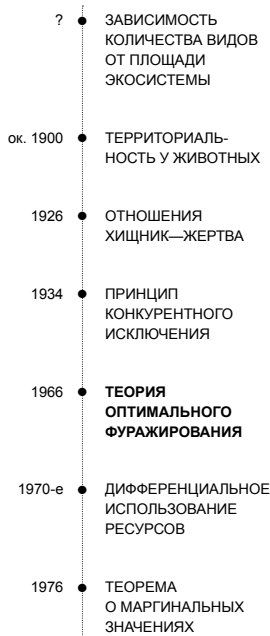
В основе теории молекулярных орбиталей лежит представление о том, что электронная орбиталь в атоме описывается *волновой функцией* (см. УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА). Теория объясняет, как при протекании химической реакции атомные орбитали преобразуются в молекулярные. Подобно большинству известных нам типов волн, волновые функции электронов в орбиталях претерпевают ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ. Оказывается, орбитали в молекулах можно, с хорошим приближением, представить как результат интерференции волновых функций атомов.

Например, рассмотрим, что происходит при взаимодействии двух атомных орбиталей соседних атомов. Если в области перекрывания орбиталей волновые функции претерпевают конструктивную интерференцию, электроны большую часть времени проводят между ядрами, притягивая атомы друг к другу. С другой стороны, если интерференция в области перекрывания деструктивная, электронная плотность между ядрами равна нулю и между атомами возникает результирующая сила отталкивания. Таким образом, две атомные орбитали объединяются с образованием двух молекулярных орбиталей: одна стремится связать атомы (связывающая молекулярная орбиталь), а другая — оттолкнуть их (разрыхляющая молекулярная орбиталь). И их взаимодействие определяет, будет ли образована стабильная молекула.

Чтобы понять, как работает эта модель, попробуем разобраться, почему водород образует молекулу из двух атомов, а гелий — из одного. В образовании связи между двумя атомами водорода участвуют по одному электрону от каждого атома, а на низшей (связывающей) молекулярной орбитали как раз есть место для двух электронов. Электроны основное время находятся между ядрами, значит, атомы притягиваются и молекула водорода может образоваться. У гелия же в образовании связи между двумя атомами участвуют четыре электрона, поэтому заняты как связывающая, так и разрыхляющая атомные орбитали. Численные вычисления показывают, что в этом случае будет преобладать эффект отталкивания, и даже если молекулы гелия образуются, они будут крайне нестабильны. Поэтому молекула газа гелия состоит из одного атома.

Теория оптимального фуражирования

Выбор хищником жертвы зависит от того, сколько времени занимает поиск добычи, и от того, сколько времени требуется, чтобы поймать и употребить ее в пищу



Иногда чистая математика переплетается с явлениями реального мира довольно неожиданным образом. Теория оптимального фуражирования, которую разработали Роберт Макартур (см. ТЕОРИЯ РАВНОВЕСИЯ МАКАРТУРА—УИЛСОНА) и Эрик Пианка в 1966 году, — типичный тому пример. Многие животные на самом деле могут употреблять в пищу гораздо больше разнообразных видов добычи, чем они реально употребляют. Тогда каковы принципы, которыми руководствуются животные при выборе добычи? С такого рода проблемами имеет дело раздел математики под названием *теория игр*.

Для начала надо сказать, что каждый тип добычи может обеспечить хищника определенным количеством энергии — назовем ее E . Чтобы получить эту энергию, хищник должен потратить какое-то время на выполнение двух задач: он должен сначала найти добычу, а затем поймать и съесть ее — экологи называют это *временем обработки* добычи. Скорость потребления энергии хищником будет равна энергии E , деленной на сумму времени поиска и обработки добычи. Согласно теории оптимального фуражирования, поведение животных будет развиваться в направлении выработки такой стратегии, которая обеспечит самую высокую скорость потребления энергии.

Из этого положения вытекает несколько выводов. В частности, если на поиск и обработку нового вида добычи животное затрачивает больше энергии, чем на поиск и обработку добычи, уже существующей в его рационе, животное ограничит разнообразие своей диеты. Вот почему животные имеют узкий рацион питания.

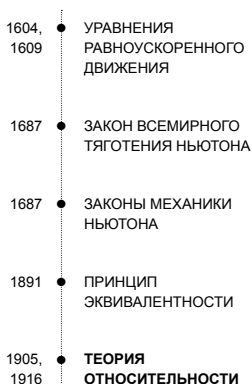
Теория также предсказывает, как будут вести себя животные в определенных ситуациях. Например, время поиска может быть долгим, а время обработки коротким — представьте себе птицу, скачущую вокруг дерева в поисках насекомых, или медведя, бредущего по лесу и переворачивающего стволы деревьев в поисках муравьев. Как только добыча найдена, на ее потребление уйдет совсем небольшая часть общего затраченного времени — основное время ушло на поиск. Животные в такой ситуации становятся универсалами, употребляя в пищу самую разнообразную добычу.

Если же, наоборот, время поиска мало, а время обработки велико, можно ожидать различные типы поведения. Например, лев на равнинах африканского национального парка Серенгети живет в пределах прямой видимости антилопных стад, так что его время поиска добычи практически равно нулю, однако поимка антилопы может потребовать значительных затрат времени и энергии. В этом случае выбор добычи будет узким. Лев будет нападать на старых, хромых или совсем молодых животных, чтобы свести к минимуму время обработки.

Животные могут быть вынуждены отказаться от своей стратегии оптимального фуражирования. Для тех, кто не находится наверху пищевой цепи, существует постоянная угроза со стороны хищников. Перед лицом этой угрозы животное скорее перейдет на менее энергетическую пищу в безопасном месте, нежели будет следовать тому, что в отсутствие хищников было бы для него стратегией оптимального фуражирования. В противном случае оно может закончить свою жизнь в качестве E в чьем-то еще уравнении.

Теория относительности

Законы природы не зависят от систем отсчета



Говорят, что прозрение пришло к Альберту Эйнштейну в одно мгновение. Ученый якобы ехал на трамвае по Берну (Швейцария), взглянул на уличные часы и внезапно осознал, что если бы трамвай сейчас разогнался до скорости света, то в его восприятии эти часы остановились бы — и времени бы вокруг не стало. Это и привело его к формулировке одного из центральных постулатов относительности — что различные наблюдатели по-разному воспринимают действительность, включая столь фундаментальные величины, как расстояние и время.

Говоря научным языком, в тот день Эйнштейн осознал, что описание любого физического события или явления зависит от *системы отсчета*, в которой находится наблюдатель (см. ЭФФЕКТ КОРИОЛИСА). Если пассажирка трамвая, например, уронит очки, то для нее они упадут вертикально вниз, а для пешехода, стоящего на улице, очки будут падать по параболе, поскольку трамвай движется, в то время как очки падают. У каждого своя система отсчета.

Но хотя описания событий при переходе из одной системы отсчета в другую меняются, есть и универсальные вещи, остающиеся неизменными. Если вместо описания падения очков задаться вопросом о законе природы, вызывающем их падение, то ответ на него будет один и тот же и для наблюдателя в неподвижной системе координат, и для наблюдателя в движущейся системе координат. Закон распределенного движения в равной мере действует и на улице, и в трамвае. Иными словами, в то время как описание событий зависит от наблюдателя, законы природы от него не зависят, то есть, как принято говорить на научном языке, являются *инвариантными*. В этом и заключается *принцип относительности*.

Как любую гипотезу, принцип относительности нужно было проверить путем соотнесения его с реальными природными явлениями. Из принципа относительности Эйнштейн вывел две отдельные (хотя и родственные) теории. *Специальная, или частная, теория относительности* исходит из положения, что законы природы одни и те же для всех систем отсчета, движущихся с постоянной скоростью. *Общая теория относительности* распространяет этот принцип на любые системы отсчета, включая те, что движутся с ускорением. Специальная теория относительности была опубликована в 1905 году, а более сложная с точки зрения математического аппарата общая теория относительности была завершена Эйнштейном к 1916 году.

Специальная теория относительности

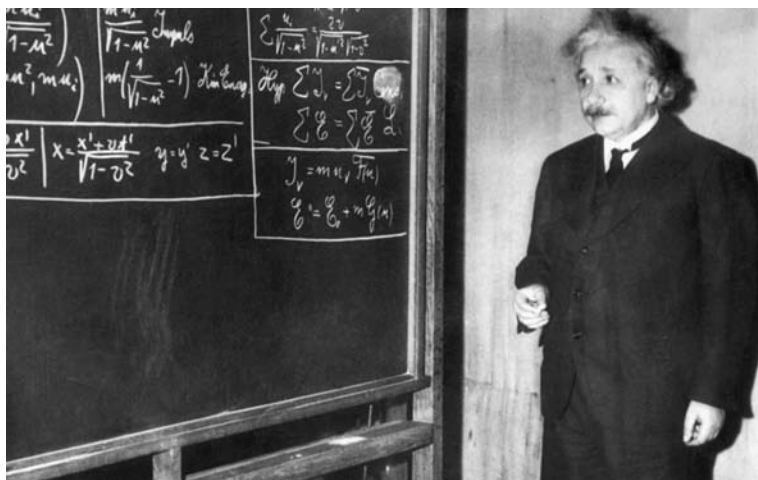
Большинство парадоксальных и противоречащих интуитивным представлениям о мире эффектов, возникающих при движении со скоростью, близкой к скорости света, предсказывается именно специальной теорией относительности. Самый известный из них — эффект замедления хода часов, или *эффект замедления времени*. Часы, движущиеся относительно наблюдателя, идут для него медленнее, чем точно такие же часы у него в руках.

Время в системе координат, движущейся со скоростями, близкими к скорости света, относительно наблюдателя растягивается, а

пространственная протяженность (длина) объектов вдоль оси направления движения — напротив, сжимается. Этот эффект, известный как *сокращение Лоренца—Фицджеральда*, был описан в 1889 году ирландским физиком Джорджем Фицджеральдом (George Fitzgerald, 1851–1901) и дополнен в 1892 году нидерландцем Хендриком Лоренцем (Hendrick Lorentz, 1853–1928). Сокращение Лоренца—Фицджеральда объясняет, почему опыт Майкельсона—Морли по определению скорости движения Земли в космическом пространстве посредством замеров «эфирного ветра» дал отрицательный результат. Позже Эйнштейн включил эти уравнения в специальную теорию относительности и дополнил их аналогичной формулой преобразования для массы, согласно которой масса тела также увеличивается по мере приближения скорости тела к скорости света. Так, при скорости 260 000 км/с (87% от скорости света) масса объекта, с точки зрения наблюдателя, находящегося в покоящейся системе отсчета, удвоится.

Со времени Эйнштейна все эти предсказания, сколь бы противоречащими здравому смыслу они ни казались, находят полное и прямое экспериментальное подтверждение. В одном из самых показательных опытов ученые Мичиганского университета поместили сверхточные атомные часы на борт авиалайнера, совершавшего регулярные трансатлантические рейсы, и после каждого его возвращения в аэропорт приписки сверяли их показания с контрольными часами. Выяснилось, что часы на самолете постепенно отставали от контрольных все больше и больше (если так можно выразиться, когда речь идет о долях секунды). Последние полвека ученые исследуют элементарные частицы на огромных аппаратных комплексах, которые называются ускорителями. В них пучки заряженных субатомных частиц (таких как протоны и электроны) разгоняются до скоростей, близких к скорости света, затем ими обстреливаются различные ядерные мишени. В таких опытах на ускорителях приходится учитывать увеличение массы разгоняемых частиц — иначе результаты эксперимента попросту не будут поддаваться разумной интерпретации. И в этом смысле специ-

Альберт Эйнштейн у доски с формулами специальной теории относительности. Теория относительности и КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА — две революционные теоретические концепции, приведшие в XX веке к настоящему перевороту в физике..



альная теория относительности давно перешла из разряда гипотетических теорий в область инструментов прикладной инженерии, где используется наравне с законами механики Ньютона.

Возвращаясь к законам Ньютона, я хотел бы особо отметить, что специальная теория относительности, хотя она внешне и противоречит законам классической ньютоновской механики, на самом деле практически в точности воспроизводит все обычные уравнения законов Ньютона, если ее применить для описания тел, движущихся со скоростью значительно меньшей, чем скорость света. То есть специальная теория относительности не отменяет ньютоновской физики, а расширяет и дополняет ее (подробнее эта мысль рассматривается во введении).

Принцип относительности помогает также понять, почему именно скорость света, а не какая-нибудь другая играет столь важную роль в этой модели строения мира — этот вопрос задают многие из тех, кто впервые столкнулся с теорией относительности. Скорость света выделяется и играет особую роль универсальной константы, потому что она определена естественнонаучным законом (см. уравнения Максвелла). В силу принципа относительности скорость света в вакууме одинакова в любой системе отсчета. Это, казалось бы, противоречит здравому смыслу, поскольку получается, что свет от движущегося источника (с какой бы скоростью он ни двигался) и от неподвижного доходит до наблюдателя одновременно. Однако это так.

Благодаря своей особой роли в законах природы скорость света занимает центральное место и в общей теории относительности.

Общая теория относительности

Общая теория относительности применяется уже ко всем системам отсчета (а не только к движущимися с постоянной скоростью друг относительно друга) и выглядит математически гораздо сложнее, чем специальная (чем и объясняется разрыв в одиннадцать лет между их публикацией). Она включает в себя как частный случай специальную теорию относительности (и, следовательно, законы Ньютона). При этом общая теория относительности идет значительно дальше всех своих предшественниц. В частности, она дает новую интерпретацию гравитации.

Общая теория относительности делает мир четырехмерным: к трем пространственным измерениям добавляется время. Все четыре измерения неразрывны, поэтому речь идет уже не о пространственном расстоянии между двумя объектами, как это имеет место в трехмерном мире, а о пространственно-временных интервалах между событиями, которые объединяет их удаленность друг от друга — как по времени, так и в пространстве. То есть пространство и время рассматриваются как четырехмерный пространственно-временной континуум или, попросту *пространство-время*. В этом континууме наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, могут расходиться даже во мнении о том, произошли ли два события одновременно или одно

предшествовало другому. К счастью для нашего бедного разума, до нарушения причинно-следственных связей дело не доходит — то есть существования систем координат, в которых два события происходят не одновременно и в разной последовательности, даже общая теория относительности не допускает.

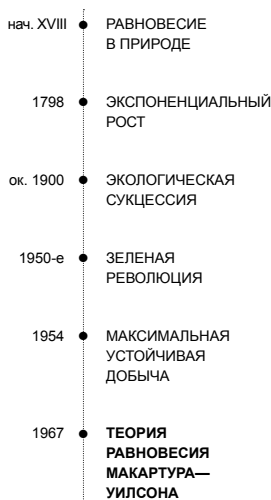
ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА говорит нам, что между любыми двумя телами во Вселенной существует сила взаимного притяжения. С этой точки зрения Земля вращается вокруг Солнца, поскольку между ними действуют силы взаимного притяжения. Общая теория относительности, однако, заставляет нас взглянуть на это явление иначе. Согласно этой теории, гравитация — это следствие деформации («искривления») упругой ткани пространства-времени под воздействием массы (при этом чем тяжелее тело, например Солнце, тем сильнее пространство-время «прогибается» под ним и тем, соответственно, сильнее его гравитационное поле). Представьте себе туго натянутое полотно (своего рода батут), на которое помещен массивный шар. Полотно деформируется под тяжестью шара, и вокруг него образуется впадина в форме воронки. Согласно общей теории относительности, Земля обращается вокруг Солнца подобно маленькому шарик, пущенному кататься вокруг конуса воронки, образованной в результате «продавливания» пространства-времени тяжелым шаром — Солнцем. А то, что нам кажется силой тяжести, на самом деле является по сути чисто внешним проявлением искривления пространства-времени, а вовсе не силой в ньютоновском понимании. На сегодняшний день лучшего объяснения природы гравитации, чем дает нам общая теория относительности, не найдено.

Проверить общую теорию относительности трудно, поскольку в обычных лабораторных условиях ее результаты практически полностью совпадают с тем, что предсказывает закон всемирного тяготения Ньютона. Тем не менее несколько важных экспериментов были проведены, и их результаты позволяют считать теорию подтвержденной. Кроме того, общая теория относительности помогает объяснить явления, которые мы наблюдаем в космосе, — например, незначительные отклонения Меркурия от стационарной орбиты, необъяснимые с точки зрения классической механики Ньютона, или искривление электромагнитного излучения далеких звезд при его прохождении в непосредственной близости от Солнца.

На самом деле результаты, которые предсказывает общая теория относительности, заметно отличаются от результатов, предсказанных законами Ньютона, только при наличии сверхсильных гравитационных полей. Это значит, что для полноценной проверки общей теории относительности нужны либо сверхточные измерения массивных объектов, либо ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, к которым никакие наши привычные интуитивные представления неприменимы. Так что разработка новых экспериментальных методов проверки теории относительности остается одной из важнейших задач экспериментальной физики.

Теория равновесия Макартура— Уилсона

*Число видов в
изолированной
экосистеме будет
постоянным, когда
скорость вымирания
видов будет равна
скорости заселения
новыми видами*



В природе существует немало изолированных экосистем, дающих уникальную возможность для наблюдения за появлением и исчезновением видов. Большинство таких экосистем — это острова, окруженные водой, но существуют также и другие виды «островов». Например, высокие плоскогорья или плато, окруженные пустыней или тропическими дождевыми лесами, напоминающие острова в небе, во всех отношениях так же изолированы, как и далекий атолл в Тихом океане.

Теория Макартура—Уилсона (иногда еще говорят «закон») названа в честь экологов Роберта Макартура и Эдварда О. Уилсона, сформулировавших ее в своей книге *Теория островной биогеографии*, вышедшей в свет в 1967 году. Книга посвящена определению количества видов, которые в конечном счете будут населять такую экосистему. Например, эти виды могут быть занесены на остров с ближайшего материка штормом или могут пересечь океан вместе с плавающим мусором. Представим себе, что изначально остров совершенно пуст — на нем вообще нет никакой жизни. Первое время каждый новый организм, попадающий на остров, с большой вероятностью будет пополнять общее количество видов, обитающих на острове. Однако все чаще вновь прибывшие будут обнаруживать на острове других представителей своего вида, а значит, разнообразие островных видов будет увеличиваться все медленнее. Если построить график, показывающий зависимость скорости заселения (т.е. числа новых видов, прибывших за данный период времени) от числа видов, уже заселивших остров, мы увидим, что скорость заселения высока тогда, когда число обитателей острова мало, и низка, когда их число велико.

Как только виды прибывают на остров, они начинают вымирать. (Здесь термин «вымирание» означает, что они просто перестают жить на этом острове, а не то, что они исчезли с лица Земли.) Когда число проживающих на острове видов невелико, число вымирающих видов также должно быть небольшим. Однако по мере увеличения числа видов, живущих на острове, число вымерших видов также будет расти — как вследствие возросшей конкуренции, так и просто потому, что чем больше видов, тем больше вероятность различных сбоев. Построив график зависимости числа вымерших видов от числа видов, обитающих на острове, мы получим кривую, возрастающую при увеличении числа островных видов.

Теперь представьте эти две кривые — одна начинается сверху и затем опускается вниз, другая начинается внизу и далее поднимается. В какой-то точке эти две кривые пересекутся. Это — *точка равновесия Макартура—Уилсона*. Если популяция находится в этой точке и какой-то вид вымирает по той или иной причине, всегда найдется новый вид-иммигрант, который займет его место — ниши долго не пустуют. Но если новый вид прибывает на остров после того, как равновесие установилось, то какой-то из видов (вновь прибывший или другой) будет обречен на вымирание из-за усилившейся конкуренции. Таким образом, точка рав-

новесия — это биологическое разнообразие, «естественное» для данной конкретной экосистемы. Согласно теории, с течением времени количество видов в изолированной системе будет оставаться примерно на том же уровне. Исследования островных экосистем (Макартур и Уилсон проводили свои первые наблюдения во Флоридском заливе) подтверждают это предположение.

Важно понимать, что равновесие Макартура—Уилсона — это динамическая, меняющаяся ситуация, совсем не то же самое, что статическое равновесие в природе. И хотя количество видов с течением времени может оставаться постоянным, конкретные виды, представленные в популяции, в каждый момент будут разными, поскольку вымирание и заселение все время меняют состав действующих лиц.

Теория помогает сделать и другие прогнозы. Например, если скорость заселения снижается, количество островных видов, находящихся в равновесии, тоже должно уменьшиться. Так, если мы возьмем группу островов, то те из них, что расположены дальше от материка (то есть те, где предположительно существует больше препятствий для заселения), должны иметь более низкое разнообразие форм жизни, чем те, что находятся ближе к матерiku. Этот прогноз также подтверждается наблюдениями.

РОБЕРТ ХЕЛМЕР МАКАРТУР

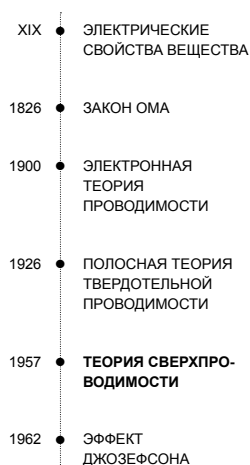
(Robert Helmer MacArthur, 1930–72) — американский эколог. Родился в Принстоне, штат Нью-Джерси, в семье профессора генетики. Получил степень доктора в Йельском университете в 1958 году, преподавал в Пенсильванском университете, затем стал профессором биологии в Принстоне в 1968 году. Макартур объединил идеи экологии, генетики и биогеографии и совместно с Эдвардом О. Уилсоном заложил основы математического изучения популяций, разработав прогностические модели для экосистем (см. также теория оптимального фуражирования).

ЭДВАРД ОСБОРН УИЛСОН (Edward

Osborne Wilson, p. 1929) — американский энтомолог и этолог. Родился в Бирмингеме, штат Алабама. В 1949 году окончил Алабамский университет, в 1955 году получил степень доктора в Гарварде, где девятью годами позже стал профессором. Его первая научная работа была посвящена сообществам насекомых и островным популяциям. Его книга «Социобиология», изданная в 1972 году, принесла ему международную известность, причем довольно скандальную, поскольку в этой книге он утверждал, что и в сообществе животных, и в человеческом обществе действуют одни и те же врожденные рефлексy.

Теория сверхпрово- димости

Сверхпроводимость как явление возникает в результате образования куперовских пар электронов, ведущих себя подобно единой частице



Сверхпроводимость — вещь странная и в некоторой мере даже противоречащая здравому смыслу. Когда электрический ток течет по обычному проводу, то в результате наличия у провода электрического сопротивления ток совершает некую работу, направленную на преодоление этого сопротивления со стороны атомов, вследствие чего выделяется тепло. При этом каждое соударение электрона — носителя тока — с атомом тормозит электрон, а сам атом-тормоз при этом разогревается — вот почему спираль электрической плитки становится такой красной и горячей. Все дело в том, что спираль обладает электрическим *сопротивлением* и вследствие этого при протекании по ней электрического тока, выделяет тепловую энергию (см. закон Ома).

В 1911 году нидерландский физик-экспериментатор Хейке Камерлинг Оннес (Heike Kammerlingh Onnes, 1853–1926) сделал удивительное открытие. Погрузив провод в жидкий гелий, температура которого составляла не более 4° выше абсолютного нуля (который, напомним, составляет -273° по шкале Цельсия или -460° по шкале Фаренгейта), он выяснил, что при сверхнизких температурах электрическое сопротивление падает практически до нуля. Почему такое происходит, он, собственно, не мог даже и догадываться, но факт оказался налицо. При сверхнизких температурах электроны практически не испытывали сопротивления со стороны атомов кристаллической решетки металла и обеспечивали *сверхпроводимость*.

Но почему все так происходит? Это оставалось тайной вплоть до 1957 года, когда еще три физика-экспериментатора — Джон Бардин (John Bardeen, 1908–1991), Леон Купер (Leon Cooper, р. 1930) и Джон Роберт Шриффер (John Robert Schrieffer, р. 1931) придумали объяснение этому эффекту. Теория сверхпроводимости теперь так и называется в их честь «теорией БКШ» — по первым буквам фамилий этих физиков.

А суть ее заключается в том, что при сверхнизких температурах тяжелые атомы металлов практически не колеблются в силу их низкого теплового движения и их можно считать фактически стационарными. Поскольку любой металл только потому и обладает присущими металлу электропроводящими свойствами, что отпускает электроны внешнего слоя в «свободное плавание» (см. химические связи), мы имеем, что имеем: ионизированные, положительно заряженные ядра кристаллической решетки и отрицательно заряженные электроны, свободно «плавающие» между ними. И вот проводник попадает под действие разности электрических потенциалов. Электроны — волей или неволей — движутся, будучи свободными, между положительно заряженными ядрами. Всякий раз, однако, они вяло взаимодействуют с ядрами (и между собой), но тут же «убегают». Однако в то самое время, пока электроны «проскакивают» между двумя положительно заряженными ядрами, они как бы «отвлекают» их на себя. В результате, после того как между двумя ядрами «проскочил» электрон, они на

недолгое время сближаются. Затем два ядра, конечно же, плавно расходятся, но дело сделано — возник положительный потенциал, и к нему притягиваются все новые отрицательно заряженные электроны. Тут самое важное — понять: благодаря тому, что один электрон «проскакивает» между атомами, он тем самым создает благоприятные энергетические условия для продвижения еще одного электрона. В результате электроны перемещаются внутри атомно-кристаллической структуры парами — по-другому они просто не могут, поскольку это им энергетически невыгодно. Чтобы лучше понять этот эффект, можно привлечь аналогию из мира спорта. Велосипедисты на треке нередко используют тактику «драфтинга» (а именно «висят на хвосте» у соперника) и тем самым снижают сопротивление воздуха. То же самое делают и электроны, образуя *куперовские пары*.

Тут важно понять, что при сверхнизких температурах *все* электроны образуют куперовские пары. Теперь представьте себе, что каждая такая пара представляет собой связку наподобие вермишели, на каждом конце которой находится заряд-электрон. Теперь представьте себе, что перед вами целая миска подобной «вермишели»: она вся состоит из переплетенных между собой куперовских пар. Иными словами, электроны в сверхпроводящем металле попарно взаимодействуют между собой, и на это уходит вся их энергия. Соответственно, у электронов просто не остается энергии на взаимодействие с ядрами атомов кристаллической решетки. В итоге доходит до того, что электроны замедляются настолько, что им больше нечего терять (энергетически), а окружающие их ядра «остывают» настолько, что они более не способны «тормозить» свободные электроны. В результате электроны начинают перемещаться между атомами металла, практически не теряя энергии в результате соударения с атомами, и электрическое сопротивление сверхпроводника устремляется к нулю. За открытие и объяснение эффекта сверхпроводимости Бардин, Купер и Шриффер в 1972 году получили Нобелевскую премию.

С тех пор прошло немало лет, и сверхпроводимость из ряда явлений уникальных и лабораторно-курьезных превратилась в общепризнанный факт и источник многомиллиардных доходов предприятий электронной индустрии. А дело все в том, что любой электрический ток возбуждает вокруг себя магнитное поле (см. закон электромагнитной индукции Фарадея). Поскольку сверхпроводники долгое время проводят ток практически без потерь, если поддерживать их при сверхнизких температурах, они представляют собой идеальный материал для изготовления электромагнитов. И, если вы когда-нибудь подвергались медико-диагностической процедуре, которая называется электронной томографией и проводится на сканере, использующем принцип ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), то вы, сами того, возможно, не подозревая, находились в считанных сантиметрах от сверхпроводящих электромагнитов. Именно они создают поле, позволяющее

врачам получать высокоточные образы тканей человеческого тела в разрезе без необходимости прибегать к скальпелю.

Современные сверхпроводники сохраняют свои уникальные свойства при нагревании вплоть до температур порядка 20°K (двадцать градусов выше абсолютного нуля). Долгое время это считалось температурным пределом сверхпроводимости. Однако в 1986 году сотрудники швейцарской лаборатории компьютерной фирмы IBM Георг Беднорц (Georg Bednorz, р. 1950) и Александр Мюллер (Alexander Mueller, р. 1927) открыли сплав, сверхпроводящие свойства которого сохраняются и при 30°K . Сегодня же науке известны материалы, остающиеся сверхпроводниками даже при 160°K (то есть чуть ниже -100°C). При этом общепринятой теории, которая объясняла бы этот класс *высокотемпературной сверхпроводимости*, до сих пор не создано, но совершенно ясно, что в рамках теории БКШ ее объяснить невозможно. Практического применения высокотемпературные сверхпроводники на сегодняшний день не находят по причине их крайней дороговизны и хрупкости, однако разработки в этом направлении продолжаются.



ДЖОН БАРДИН (John Bardeen, 1908–1991) — американский физик, один из немногих дважды лауреатов Нобелевской премии. Родился в Мэдисоне, штат Висконсин, в семье профессора-патологоанатома. Образование получил в Мэдисонском и Принстонском университетах. В перерыве между учебой в первом и втором несколько лет проработал в нефтяной компании Gulf Oil в качестве сейсмолога-разведчика нефтяных залежей. В годы Второй мировой

войны служил в навигационной лаборатории ВМФ США в Вашингтоне, по окончании войны работал в радиолaborатории телефонной компании Bell, где стал соавтором изобретения транзистора, за что в 1956 году был удостоен своей первой Нобелевской премии по физике. После этого Бардин стал профессором Университета штата Иллинойс, где занялся разработкой теории БКШ, за которую вместе с соавторами в 1972 году получил Нобелевскую премию во второй раз.

Теория стационарной Вселенной

Вселенная расширяется, однако материя постоянно образуется вновь в межгалактическом пространстве, поэтому у Вселенной нет начала и не будет конца



После открытия закона Хаббла большинство астрономов приняли теорию большого взрыва — концепцию, согласно которой Вселенная образовалась в прошлом из некоей точки. Однако в 1940-е годы группа астрофизиков под руководством Фреда Хойла предложила альтернативную теорию.

Главная идея этой теории заключается в следующем: по мере того как галактики удаляются друг от друга при хаббловском расширении, в увеличивающемся пространстве между ними образуется новая материя. Вновь образованная материя со временем самоорганизуется в галактики, которые, в свою очередь, будут удаляться друг от друга, высвобождая пространство для образования новой материи. Таким образом, наблюдаемое расширение было согласовано с понятием «стационарной» Вселенной, сохраняющей свою общую плотность и не имеющей единственной точки образования (наличие которой предполагает теория Большого взрыва). Но при этом требовалось принять без доказательств новую концепцию процесса образования вещества.

Некоторые астрономы поддерживали теорию стационарной Вселенной вплоть до середины 1960-х годов. Основным достоинством этой теории была ее философская сторона. Утверждалось, что теория согласуется с принципом Коперника о том, что наш мир не уникален, и не выделяет какой-то момент времени как главный.

Вскоре начали появляться доводы против теории. Во-первых, в точных лабораторных экспериментах не удалось воспроизвести образование вещества. Во-вторых, что важнее, новые открытия в космологии — такие как космический микроволновый фон (см. Большой взрыв) — показали, что многие явления во Вселенной можно объяснить исходя из сценария Большого взрыва, но не из теории стационарной Вселенной. Например, когда мощные телескопы смогли заглянуть во Вселенную поглубже и таким образом проникнуть в ее прошлое, стало ясно, что все наиболее удаленные галактики представляют собой молодые, еще не сформировавшиеся системы. Это как раз то, что и ожидалось от Вселенной, возникшей в результате Большого взрыва, но никак не согласовывалось с картиной стационарности. В конце концов большинство защитников теории стационарной Вселенной, сраженные этим контраргументом, просто сдались.

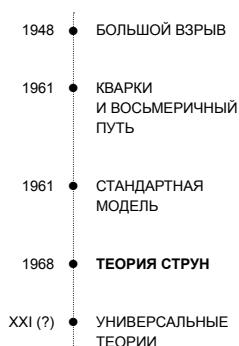
Однако до наших дней дошло одно наследие этой теории — сам термин «Большой взрыв». Изначально его предложил Хойл — чтобы посмеяться над своими оппонентами, и, наверное, он был очень удивлен, когда те с восторгом приняли этот термин.

ФРЕД ХОЙЛ (Fred Hoyle, 1915–2001) — английский космолог и астрофизик. Родился в Бингли (Йоркшир). Окончил Кембриджский университет в 1936 году, а в 1958 году стал почетным профессором астрономии этого университета. Самым большим достижением Хойла стало объяснение того, как

образуются химические элементы в недрах звезд (см. эволюция звезд). Он не боялся выдвигать гипотезы, которые многие считали фантастичными: например, о том, что появление прежде неизвестных болезней вызвано бактериями, которые попали на Землю с частицами межзвездной пыли.

Теория струн

В конечном счете все элементарные частицы можно представить в виде микроскопических многомерных струн, в которых возбуждены вибрации различных гармоник



Сколько же всего измерений?

Нам, простым людям, всегда хватало и трех измерений. С незапамятных времен мы привыкли описывать физический мир в столь скромных рамках (саблезубый тигр в 40 метрах спереди, 11 метрах правее и 4 метрах выше меня — булжжик к бою!). Теория относительности приучила большинство из нас к тому, что время есть четвертое измерение (саблезубый тигр не просто здесь — он здесь и сейчас угрожает нам!). И вот начиная с середины XX века теоретики повели разговоры, что на самом деле измерений еще

Внимание, пристегните покрепче ремни — и я попробую описать вам одну из самых странных теорий из числа серьезно обсуждаемых сегодня научных кругах, которая способна дать наконец окончательную разгадку устройства Вселенной. Теория эта выглядит настолько дико, что, вполне возможно, она правильна!

Различные версии теории струн сегодня рассматриваются в качестве главных претендентов на звание всеобъемлющей универсальной теории, объясняющей природу всего сущего. А это своего рода Священный Грааль физиков-теоретиков, занимающихся теорией элементарных частиц и космологии. Универсальная теория (она же *теория всего сущего*) содержит всего несколько уравнений, которые объединяют в себе всю совокупность человеческих знаний о характере взаимодействий и свойствах фундаментальных элементов материи, из которых построена Вселенная. Сегодня теорию струн удалось объединить с концепцией *суперсимметрии*, в результате чего родилась *теория суперструн*, и на сегодняшний день это максимум того, что удалось добиться в плане объединения теории всех четырех основных взаимодействий (действующих в природе сил). Сама по себе теория суперсимметрии уже построена на основе априорной современной концепции, согласно которой любое дистанционное (полевое) взаимодействие обусловлено обменом частицами-носителями взаимодействия соответствующего рода между взаимодействующими частицами (см. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ). Для наглядности взаимодействующие частицы можно считать «кирпичиками» мироздания, а частицы-носители — цементом.

В рамках стандартной модели в роли кирпичиков выступают кварки, а в роли носителей взаимодействия — *калибровочные бозоны*, которыми эти кварки обмениваются между собой. Теория же суперсимметрии идет еще дальше и утверждает, что и сами кварки и лептоны не фундаментальны: все они состоят из еще более тяжелых и не открытых экспериментально структур (кирпичиков) материи, скрепленных еще более прочным «цементом» сверхэнергетичных частиц-носителей взаимодействий, нежели кварки в составе адронов и бозонов. Естественно, в лабораторных условиях ни одно из предсказаний теории суперсимметрии до сих пор не проверено, однако гипотетические скрытые компоненты материального мира уже имеют названия — например, *сэлектрон* (суперсимметричный напарник электрона), *скварк* и т.д. Существование этих частиц, однако, теориями такого рода предсказывается однозначно.

Картину Вселенной, предлагаемую этими теориями, однако, достаточно легко представить себе наглядно. В масштабах порядка 10^{-35} м, то есть на 20 порядков меньше диаметра того же протона, в состав которого входят три связанных кварка, структура материи отличается от привычной нам даже на уровне элементарных частиц. На столь малых расстояниях (и при столь высоких энергиях взаимодействий, что это и представить немыслимо) материя

больше — не то 10, не то 11, не то вообще 26. Конечно, без объяснений, почему мы, нормальные люди, их не наблюдаем, тут обойтись не могло. И тогда возникла концепция «компактификации» — слипания, или схлопывания, измерений. Представим садовый поливочный шланг. Вблизи он воспринимается как нормальный трехмерный объект. Стоит, однако, отойти от шланга на достаточное расстояние — и он представится нам одномерным линейным объектом: его толщину мы попросту перестанем воспринимать. Именно о таком эффекте и принято говорить как о компактификации измерения: в данном случае «компактифицированной» оказалась толщина шланга — слишком мала шкала масштаба измерения. Именно так, по утверждениям теоретиков, исчезают из поля нашего экспериментального восприятия реально существующие дополнительные измерения, необходимые для адекватного объяснения свойств материи на субатомном уровне: они компактифицируются, начиная с шкалы масштабов порядка 10^{-35} м, и современные методы наблюдения и измерительные приборы просто не в состоянии обнаружить структур столь малого масштаба. Возможно, все именно так и есть, а возможно, все обстоит совершенно по-другому. Пока нет таких приборов и методов наблюдения, все вышеприведенные доводы и контрдоводы так и остаются на уровне досужих спекуляций.

превращается в серию полевых стоячих волн, подобных тем, что возбуждаются в струнах музыкальных инструментов. Подобно гитарной струне, в такой струне могут возбуждаться, помимо основного тона, множество *обертонов* или *гармоник*. Каждой гармонике соответствует собственное энергетическое состояние. Согласно *принципу относительности* (см. теория относительности), энергия и масса эквивалентны, а значит, чем выше частота гармонической волновой вибрации струны, тем выше его энергия, и тем выше масса наблюдаемой частицы.

Однако, если стоячую волну в гитарной струне представить себе наглядно достаточно просто, стоячие волны, предлагаемые теорией суперструн, наглядному представлению поддаются с трудом — дело в том, что колебания суперструн происходят в пространстве, имеющем 11 измерений. Мы привыкли к четырехмерному пространству, которое содержит три пространственных и одно временное измерение (влево-вправо, вверх-вниз, вперед-назад, прошлое-будущее). В пространстве суперструн все обстоит гораздо сложнее (см. вставку). Физики-теоретики обходят скользкую проблему «лишних» пространственных измерений, утверждая, что они «скрадываются» (или, научным языком выражаясь, «компактифицируются») и потому не наблюдаются при обычных энергиях.

Совсем уже недавно теория струн получила дальнейшее развитие в виде *теории многомерных мембран* — по сути это те же струны, но плоские. Как походя пошутил кто-то из ее авторов, мембраны отличаются от струн примерно тем же, чем лапша отличается от вермишели.

Вот, пожалуй, и все, что можно вкратце рассказать об одной из теорий, не без основания претендующих на сегодняшний день на звание универсальной теории Великого объединения всех силовых взаимодействий. Увы, и эта теория небезгрешна. Прежде всего она до сих пор не приведена к строгому математическому виду по причине недостаточности математического аппарата для ее приведения в строгое внутреннее соответствие. Прошло уже 20 лет, как эта теория появилась на свет, а непротиворечиво согласовать одни ее аспекты и версии с другими так никому и не удалось. Еще неприятнее то, что никто из теоретиков, предлагающих теорию струн (и тем более суперструн) до сих пор не предложил ни одного опыта, на котором эти теории можно было бы проверить лабораторно. Увы, боюсь, что до тех пор, пока они этого не сделают, вся их работа так и останется причудливой игрой фантазии и упражнениями в постижении эзотерических знаний за пределами основного русла естествознания.

Теория сцепления-натяжения

Транспорт воды в растениях зависит главным образом от водородных связей, образующихся между молекулами воды



Растения очень нуждаются в воде. В отличие от животных, сохраняющих большую часть проглоченной воды, растения испаряют через листья почти 90% влаги, поступившей через корни. Этот процесс называется *транспирацией* и происходит вследствие того, что устьица листьев большую часть времени остаются открытыми, чтобы углекислый газ из атмосферы мог проникать в растение и принимать участие в фотосинтезе. Из-за такой огромной потребности в воде британский эколог Джон Харпер (John Harper) назвал растение «фитилем, который соединяет хранилище почвенных вод с атмосферой». Через корни вода поступает в растения из почвы под влиянием осмотического давления, но как вода может подниматься к самым вершинам высоких деревьев — это долгое время оставалось неясным. Теория сцепления-натяжения призвана ответить на этот вопрос.

Выяснилось, что свойства молекул воды играют важную роль в процессе транспорта. Каждый атом водорода в молекуле воды образует крепкую водородную связь (см. химические связи) с атомами кислорода соседних молекул. Возникает большая сила сцепления, которая и удерживает молекулы воды вместе. (Эта же сила создает поверхностное натяжение.) Вода просачивается по одной молекуле из клеток в устьица листьев, и по мере того как одна молекула покидает клетку, другая молекула проникает в нее. Поскольку все молекулы воды связаны друг с другом водородными связями, это движение создает давление, или тягу, молекул по всему «трубопроводу» растения сверху донизу. Можно представить, что все молекулы воды связаны друг с другом: одна на входе в лист, другая чуть ниже, и так вдоль по всему растению, все ближе к почвенной воде — воде, которая в итоге всосется через корни.

Важно понять, чем этот процесс отличается от всасывания через трубочку при питье. В последнем случае создается частичный вакуум в соломинке, что позволяет атмосферному давлению протолкнуть жидкость вверх. Такой процесс может поднять воду только на 10 метров, а многие деревья гораздо выше. Теория сцепления-натяжения объясняет, как заставить воду подняться на большую высоту, не прибегая к обычному всасыванию.

Теория эволюции

Жизнь на Земле возникла благодаря физическим и химическим реакциям и развивалась в процессе естественного отбора



Прежде чем приступить к обсуждению эволюции, едва ли не самой важной концепцией науки о жизни, мне хотелось бы напомнить вам одну мысль, высказанную во введении. Слово «теория» в научном понимании не обязательно подразумевает отсутствие уверенности в рассматриваемых представлениях. Вопреки обычаям и исторически сложившемуся значению этого слова, многие теории (включая теорию относительности) на самом деле относятся к наиболее широко признанным составляющим научного мировоззрения.

В настоящее время реальность эволюции уже не подвергается сомнению никто из серьезных ученых, хотя существует несколько конкурирующих теорий, каждая из которых предлагает свой вариант развития событий. В этом отношении эволюция аналогична гравитации. Существует несколько теорий гравитации — закон всемирного тяготения ньютона, общая теория относительности и, в один прекрасный день, возможно, универсальная теория. Однако существует *факт* тяготения — если вы уроните любой предмет, он упадет. Подобно этому существует факт эволюции, несмотря на то что споры ученых по частным вопросам теории продолжаются.

Если обсуждать историю жизни на Земле, то следует рассмотреть две стадии, на каждой из которых события были обусловлены двумя разными принципами. На первой стадии процессы химической эволюции на древнейшей Земле привели к образованию первой живой клетки из неорганических материалов. На второй стадии потомки этой живой клетки развивались в разных направлениях, порождая многообразие жизни на планете, которое мы наблюдаем сегодня. На этой стадии развитие определял принцип естественного отбора.

Химическая эволюция

Человеческая мысль лишь сравнительно недавно обогатилась представлением о том, что мы можем понять процесс организации неживых материалов, в результате которого образуются простые живые системы. Важной вехой на пути к этому представлению был поставленный в 1953 году эксперимент миллера—юри, впервые показавший возможность возникновения основных биологических молекул в результате самых обычных химических реакций. С тех пор ученые предложили много других путей, по которым могла идти химическая эволюция. Некоторые из этих идей перечислены ниже, но важно помнить, что до сих пор нет единого мнения о том, какой из этих путей может быть верным. Одно мы знаем точно: что один из этих процессов или другой процесс, до которого еще никто не додумался, привел к возникновению первой живой клетки на планете (если только жизнь не возникла в другом месте — представление о *панспермии* обсуждается в главе кислоты и основания).

Первичный бульон. В результате процессов, воспроизведенных в эксперименте Миллера—Юри, в атмосфере образовались молекулы, упавшие с дождем в океан. Здесь (или, возможно, в водоеме, образованном приливом) неизвестный пока процесс привел к организации этих молекул, породивших первую клетку.

Первичное нефтяное пятно. Процессы Миллера—Юри могут давать начало *липидам*, молекулы которых спонтанно образуют маленькие сферы (вы часто видите такие каплевидные образования на поверхности супа). В каждой сфере собрано случайное число молекул. Один из миллионов пузырьков на поверхности океана мог содержать правильный набор молекул с точки зрения энергии и материалов и мог поделиться пополам. Такой могла бы быть первая клетка.

Мир РНК. Одна из проблем эволюционной теории связана с развитием системы кодирования, основанной на использовании молекул РНК (см. также ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДОГМА МОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ). Проблема в том, что белки закодированы на ДНК, но для того чтобы прочесть записанный ДНК код, нужна активность белков. Недавно ученые открыли, что РНК, которая в настоящее время участвует в преобразовании записанного на ДНК кода в белки, может также выполнять одну из функций белков в живых системах. Похоже, что образование молекул РНК было важнейшим событием в развитии жизни на Земле.

Океанический путь. В условиях огромного давления, господствующего на дне океана, химические соединения и химические процессы могут быть совсем не такими, как на поверхности. Ученые изучают химизм этой среды, который, возможно, мог способствовать развитию жизни. Если ответ на этот вопрос будет положительным, то жизнь могла зародиться на дне океана и позднее мигрировать на сушу.

Автокаталитические комплексы. Эта концепция ведет начало от теории сложных саморегулирующихся систем. Согласно этому предположению, химизм жизни не развивался ступенчато, а возник на стадии первичного бульона.

Глиняный мир. Первой моделью жизни могли быть не химические реакции, а статические электрические заряды на поверхности глины, покрывающей океанское дно. По этой схеме сборка сложных молекул жизни происходила не в результате случайных комбинаций, а благодаря электронам на поверхности глины, удерживающим небольшие молекулы вместе во время их сборки в более крупные молекулы.

Как вы видите, в идеях о способах развития жизни из неорганических материалов недостатка нет. Однако до конца 1990-х годов происхождение жизни не являлось приоритетной областью науки, никто особенно не стремился разобраться с этими теориями. В 1997 году НАСА включила исследования происхождения жизни в список своих основных задач. Я надеюсь, что уже вскоре ученые смогут создать в своих лабораториях простые организмы,

похожие на тех которые могли существовать на нашей планете 4 миллиарда лет назад.

Естественный отбор

После появления на планете первого способного к воспроизведению живого организма жизнь «переключила скорость» и дальнейшие изменения направлял естественный отбор. Большинство людей, используя термин «эволюция», подразумевают именно естественный отбор. Представление о естественном отборе ввел английский натуралист Чарлз Дарвин, опубликовавший в 1859 году свой монументальный труд *О происхождении видов путем естественного отбора или сохранения благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь*. Идея естественного отбора, к которой независимо от Дарвина пришел Алфред Рассел Уоллес (Alfred Russel Wallace, 1823–1913), основана на двух положениях: представители любого вида в чем-то различаются между собой, и всегда существует конкуренция за ресурсы. Первый из этих постулатов очевиден для каждого, кто наблюдал за любой популяцией (включая популяцию людей). Некоторые представители крупнее, другие быстрее бегают, окраска третьих позволяет им оставаться незаметными на фоне среды обитания. Второй постулат отражает прискорбный факт из жизни мира природы — рождается значительно больше организмов, чем выживает, и таким образом происходит постоянная конкуренция за ресурсы.

Вместе эти постулаты приводят к интересному выводу. Если некоторые особи обладают особенностью, позволяющей им успешней конкурировать в условиях определенной среды — например, развитая мускулатура хищников позволяет им успешнее охотиться, — то для них увеличиваются шансы дожить до взрослого состояния и оставить потомство. И их потомство, вероятно, унаследует эту особенность. Пользуясь современной терминологией, мы скажем, что особи с высокой вероятностью передадут потомству гены, отвечающие за быстрый бег. С другой стороны, для плохих бегунов вероятность выжить и оставить потомство ниже, поэтому их гены могут и не перейти к следующему поколению. Поэтому в поколении «детей» особей с «быстрыми» генами будет больше, чем в поколении «родителей», а в поколении «внуков» — еще больше. Таким образом признак, повышающий вероятность выживания, в конце концов распространится по всей популяции.

Этот процесс Дарвин и Уоллес называли естественным отбором. Дарвин находил в нем сходство с искусственным отбором. Люди используют искусственный отбор для того, чтобы выводить растения и животных, которые обладали бы желаемыми признаками, отбирая для этого половозрелые особи и только их допуская до скрещивания. Если люди могут делать это, рассуждал Дарвин, то почему не может природа? Для возникновения разнообразия видов,

которое мы наблюдаем на планете сегодня, более чем достаточно улучшенной выживаемости особей с адаптивными признаками в последовательных поколениях и на протяжении длительного периода времени.

Дарвин, сторонник доктрины униформизма, понимал, что образование новых видов должно происходить постепенно — различия между двумя популяциями должны усиливаться все больше и больше до тех пор, пока скрещивание между ними не окажется невозможным. Позднее ученые обратили внимание на то, что эта закономерность не всегда соблюдается. Вместо этого вид в течение длительного времени остается неизменным, затем внезапно меняется — этот процесс называется *перемежающимся равновесием*. Действительно, изучая ископаемых, мы видим оба варианта *видообразования*, что не кажется странным с высоты современных представлений о генетике. Теперь нам понятна основа первого из двух перечисленных постулатов: на ДНК различных особей записаны различные версии одного и того же гена. Изменение ДНК может иметь совершенно разные последствия: от полного отсутствия эффекта (если изменение затрагивает участок ДНК, не используемый организмом) до громадного эффекта (если изменится ген, кодирующий ключевой белок). После того как ген изменится, что может сказаться постепенно или немедленно, действие естественного отбора будет направлено либо на то, чтобы распространить этот ген во всей популяции (если изменение полезное), либо на то, чтобы уничтожить его (если изменение вредное). Другими словами, скорость изменения зависит от генов, но когда такое изменение уже произошло, именно естественный отбор определяет направление изменений в популяции.

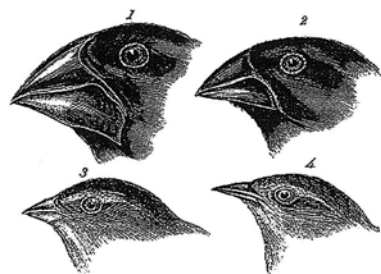
Как любая научная теория, теория эволюция должна была получить подтверждение в жизни. Имеются три крупных класса наблюдений, подтверждающих эту теорию.

Ископаемые свидетельства

После гибели растения или животного останки обычно рассредоточиваются в окружающей среде. Но иногда некоторые из них могут погрузиться в почву, например в ил при наводнении, и оказаться недоступными для разложения. Со временем, по мере того как ил будет превращаться в горную породу (см. цикл преобразования горной породы), медленные химические процессы приведут к замещению кальция в скелете или других твердых частях тела минеральными веществами, содержащимися в окружающей породе. (В редких случаях условия оказываются такими, что могут сохраниться и более мягкие структуры, например, кожа или перья.) В конце концов этот процесс завершится образованием идеального отпечатка оригинальной части тела в камне — окаменелости. Все обнаруженные окаменелости вместе называют ископаемыми свидетельствами.

Дарвиновские вьюрки

Разнообразие вьюрков на Галапагосских островах — один из ярких примеров естественного отбора в действии. Дарвиновская теория эволюции была основана строго на наблюдениях за природой. Путешествуя в качестве натуралиста на корабле «Бигль», Дарвин побывал на Галапагосских островах, одном из самых отдаленных ареалов на Земле.



1. *Geospiza magnirostris*.
3. *Geospiza parvula*.

2. *Geospiza fortis*.
4. *Gerthidea olivacea*.

Вьюрки Галапагосского архипелага

Вьюрки составляют около 40% от всех видов птиц, обитающих на этих островах. По-видимому, они ведут происхождение от одного вида вьюрков, залетевшего на острова много лет назад. Дарвин заметил, что в результате эволюции вьюрки заняли абсолютно различные экологи-

ческие ниши. Предком галапагосских вьюрков была птица, обитавшая на земле и питавшаяся семенами. Современные потомки этого вьюрка включают птиц, живущих на земле и на деревьях, питающихся семенами, кактусами и насекомыми. Предполагают, что такое разнообразие среди близкородственных птиц подсказало Дарвину идею естественного отбора. Вот почему дарвиновские вьюрки стали одним из символов в истории науки.

Березовая пяденица

Согласно теории эволюции, характеристики популяции изменяются в ответ на изменения среды, причем предпочтение отдается характеристикам, которые повышают шансы живого организма оставить потомство. Одно из лучших исследований естественного отбора в действии проведено на бабочке березовой пяденицы (*Biston betularia*). Эти бабочки, обитающие в Англии, чаще всего селятся на деревьях, покрытых лишайником. В этой части Англии произрастает светлый лишайник, и бабочки, сливающиеся по цвету с лишайником, менее заметны для хищников.

В XIX веке в Центральной Англии стремительно развивалась

промышленность, и большая часть ареала березовой пяденицы была сильно загрязнена дымом и сажей. Стволы деревьев почернели, что сильно изменило среду обитания пяденицы. Популяция пяденицы стала изменяться, причем в загрязненных районах в более выгодном положении оказывались бабочки с темной окраской. В конце концов вся популяция стала черной. Это изменение происходило в точности так, как предсказывала теория эволюции — в изменившейся среде обитания немногочисленные темные бабочки приобрели невероятное конкурентное преимущество, и постепенно их гены стали доминировать.

Объяснение изменений в популяции березовой пяденицы, как любую другую научную гипотезу, следовало подтвердить экспериментально. Таким экспериментатором стал энтомолог-любитель Генри Бернард Дэвид Кеттлвелл (Henry Bernard David Kettlewell, 1907–79), который провел свои исследования в 1950-е годы. Он поместил нижние стороны бабочек березовой пяденицы, невидимые для хищников. Затем он выпустил одну группу помеченных светлых и темных бабочек недалеко от Бирмингема, в самом сильно загрязненном районе, а вторую группу — в сельском Дорсете, относительно незагрязненном районе в юго-западной Англии. После этого Кеттлвелл посещал эти местности по ночам и, включая свет для привлечения бабочек, вновь собирал их. Он обнаружил, что в Бирмингеме, ему удалось собрать 40% темных бабочек и 20% светлых, а в Дорсете — 6% темных и 12% светлых. В загрязненном районе Бирмингема выживанию бабочек явно благоприятствовала темная окраска, а в чистом районе Дорсета — светлая.

На этом история с березовой пяденицей не закончилась. В 1960-х годах в Англии началась борьба с загрязнением воздуха, и скопления сажи в промышленных районах начали сокращаться. В ответ на это в популяции березовой пяденицы началось изменение окраски с темной на светлую, что опять же можно было прогнозировать на основании положений теории Дарвина.

Возраст ископаемых составляет приблизительно 3,5 миллиарда лет — столько лет отпечаткам, найденным в бывших отложениях тины на древних австралийских скалах. Они рассказывают увлекательную историю о постепенном усложнении и расширении многообразия, которое привело к огромному разнообразию жизненных форм, населяющих сегодня Землю. Большую часть прошлой жизни была относительно простой, представленной одноклеточными организмами. Приблизительно 800 миллионов лет назад начали появляться многоклеточные жизненные формы. Поскольку их тело было мягким (вспомните медузу), от них почти не осталось отпечатков, и лишь несколько десятилетий назад ученые убедились в том, что они жили в ту эпоху, на основании оставленных в осадочных отложениях отпечатков. Приблизительно 550 миллионов лет назад появились твердые покровы и скелеты, и именно с этого момента появляются настоящие ископаемые. Рыбы — первые позвоночные животные — появились около 300 миллионов лет назад, динозавры начали вымирать приблизительно 65 миллионов лет назад (см. МАССОВЫЕ ВЫМИРАНИЯ), и 4 миллиона лет назад в Африке появились ископаемые люди. Обо всех этих событиях можно прочитать в Летописи ископаемых.

Биохимические свидетельства

У всех живых организмов на нашей планете одинаковый генетический код — мы все не более чем набор различной информации, записанной универсальным языком ДНК. Тогда можно ожидать, что если жизнь развивалась по описанному выше сценарию, то у современных живых организмов степень совпадения последовательностей ДНК должна быть различной в зависимости от того, насколько давно жил их общий предок. Например, у человека и шимпанзе одинаковых последовательностей ДНК должно быть больше, чем у человека и рыбы, поскольку общий предок человека и шимпанзе жил 8 миллионов лет назад, а общий предок человека и рыбы — сотни миллионов лет назад. Действительно, анализируя ДНК живых организмов, мы находим подтверждения этого предположения: чем дальше друг от друга на эволюционном дереве находятся два организма, тем меньше сходства обнаруживается в их ДНК. И это вполне понятно, поскольку чем больше прошло времени, тем больше накопилось у них различий.

Использование анализа ДНК для того, чтобы открыть наши глаза на наше эволюционное прошлое, иногда называют молекулярными часами. Это убедительнейшее доказательство теории эволюции. ДНК человека ближе к ДНК шимпанзе, чем к ДНК рыбы. Могло бы оказаться совсем наоборот, но не случилось. На языке философии науки этот факт показывает, что теория эволюции *опровергаема* — можно представить себе исход, который

указывал бы на ложность этой теории. Таким образом, эволюция не является так называемым креационистским учением, как бы основанным на библейской Книге бытия, поскольку нет таких наблюдений или экспериментов, которые могли бы осязаемо убедить креационистов в том, что их учение ложно.

Несовершенство замысла

Хотя несовершенство замысла как таковое не является доводом в пользу эволюции, оно совершенно согласуется с картиной жизни, предложенной Дарвином, и противоречит представлению о том, что живые существа были созданы, уже имея особое предназначение в жизни. Дело в том, что для того чтобы передать гены следующему поколению, организму нужно быть не совершенным, а всего лишь настолько хорошим, чтобы успешно противостоять врагам. Следовательно, каждая ступень на эволюционной лестнице должна быть пристроена к предыдущей, и характеристики, которые могли быть благоприятствующими на одной из стадии, будут «заморожены» и сохранятся даже после того, как появятся более подходящие варианты.

Инженеры называют эту особенность QWERTY-эффектом (QWERTY — последовательность букв верхнем ряду почти всех современных клавиатур). Когда проектировали первые клавиатуры, основная цель заключалась в том, чтобы снизить скорость печати и не допустить зажимания клавиш механических пишущих машинок. Такая конструкция клавиатуры сохранилась до сих пор, несмотря на возможность использования производительных клавиатур.

Подобно этому особенности строения «закрепляются» на ранних стадиях эволюции и сохраняются в прежнем виде, несмотря на то, что любой современный студент-технарь справился бы с этой задачей лучше. Вот несколько примеров.

Глаз человека устроен так, что падающий свет превращается в нервные импульсы перед сетчаткой, хотя по такой схеме в глаз попадает не весь падающий свет.

Зеленый цвет листьев растений означает, что они отражают часть падающего на них света. Любому инженеру известно, что приемник солнечной энергии должен быть черного цвета.

В глубоких подземных пещерах обитают змеи, у которых глазницы находятся *под кожей*. Это имеет смысл, если предки этих змей жили на поверхности и нуждались в глазах, но лишено смысла для животных, созданных для подземной жизни.

В туловище китов есть маленькие кости задних конечностей. Сегодня эти кости абсолютно бесполезны, но их происхождение понятно, если предки китов когда-то жили на суше.

Неизвестно, какую функцию выполняет аппендикс у человека, хотя у некоторых травоядных животных аппендикс участвует в переваривании травы.

Эти свидетельства дополняют друг друга и настолько грандиозны, что не только давно убедили серьезных ученых в справедливости эволюционной теории Дарвина, но и являются стержнем любых разъяснений, касающихся функционирования живых систем на нашей планете.



ЧАРЛЗ РОБЕРТ ДАРВИН (Charles Robert Darwin, 1809–82) — английский натуралист, создатель теории эволюции путем естественного отбора. Дарвин полностью изменил представления о природе. Он родился в Шрюсбери, в известной в городе семье. Отец Дарвина был преуспевающим врачом, а мать происходила из семьи Веджвуд, известной своими гончарными изделиями. Дарвин был малозаметным учеником, поскольку считал школьное образование скучным и сухим. Директор школы был недоволен тем, что Дарвин тратит время на химические эксперименты, а отец, в очередной раз обрушивая на сына град упреков, заявил: «Тебя интересует лишь охота, собаки и ловля крыс, и ты навлечешь позор на себя и всю свою семью».

Дарвина отправили в Эдинбург изучать медицину, но для него было мучением присутствовать на операциях (которые тогда проводились без анестезии). Затем он учился в Кембридже, готовясь стать священником. Там он познакомился с людьми, которые привили ему интерес к геологии и естествознанию, а позднее договорились о том, что его возьмут на парусное судно «Бигль» (в качестве неоплачиваемого натуралиста), которое отправлялось в пятилетнее поисково-разведочное плавание вокруг Южной Америки и Австралии. Именно в этом плавании Дарвин вел наблюдения за выюлками,

которые привели его к созданию теории эволюции.

После возвращения в Англию Дарвин женился на двоюродной сестре, но вскоре заболел. Это заболевание, вызванное укусами насекомых в Аргентине, современные ученые называют американским трипаносомозом. Оказавшись на пенсии, Дарвин обнаружил, что у него в изобилии свободного времени для того, чтобы отразить свои наблюдения, и полно образцов, собранных им и другими участниками экспедиции. Он начал сомневаться в общепринятой точке зрения о неизменности растительных и животных видов и постепенно стал склоняться к тому, что система, согласно которой виды эволюционируют в течение времени в ответ на изменения среды, значительно лучше могла объяснить мир природы. Труд «О происхождении видов» был опубликован в 1859 году и немедленно вызвал бурю. Некоторые посчитали основным положением теории Дарвина критикой христианского учения (это мнение сохраняется и сегодня), и споры по поводу дарвинизма не утихали большую часть второй половины XIX века.

Сегодня представление о развитии жизни в процессе эволюции, которую направляют силы естественного отбора, является обобщающей идеей, связывающей все науки о жизни — от экологии до молекулярной биологии.

Тепловое расширение

Изменение линейных размеров тела при нагревании пропорционально изменению температуры

ок. 1800

ТЕПЛОВОЕ
РАСШИРЕНИЕ

подавляющее большинство веществ при нагревании расширяется. Это легко объяснить с позиции механической теории теплоты, поскольку при нагревании молекулы или атомы вещества начинают двигаться быстрее. В твердых телах атомы начинают с большей амплитудой колебаться вокруг своего среднего положения в кристаллической решетке и им требуется больше свободного пространства. В результате тело расширяется. Так же и жидкости и газы, по большей части, расширяются с повышением температуры по причине увеличения скорости теплового движения свободных молекул (см. закон Бойля—Мариотта, закон Шарля, уравнение состояния идеального газа).

Основной закон теплового расширения гласит, что тело с линейным размером L в соответствующем измерении при увеличении его температуры на ΔT расширяется на величину ΔL , равную:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T,$$

где α — так называемый *коэффициент линейного теплового расширения*. Аналогичные формулы имеются для расчета изменения площади и объема тела. В приведенном простейшем случае, когда коэффициент теплового расширения не зависит ни от температуры, ни от направления расширения, вещество будет равномерно расширяться по всем направлениям в строгом соответствии с вышеприведенной формулой.

Для инженеров тепловое расширение — жизненно важное явление. Проектируя стальной мост через реку в городе с континентальным климатом, нельзя не учитывать возможного перепада температур в пределах от -40°C до $+40^\circ\text{C}$ в течение года. Такие перепады вызовут изменение общей длины моста вплоть до нескольких метров, и, чтобы мост не вздыбливался летом и не испытывал мощных нагрузок на разрыв зимой, проектировщики составляют мост из отдельных секций, соединяя их специальными *термическими буферными сочленениями*, которые представляют собой входящие в зацепление, но не соединенные жестко ряды зубьев, которые плотно смыкаются в жару и достаточно широко расходятся в стужу. На длинном мосту может насчитываться довольно много таких буферов.

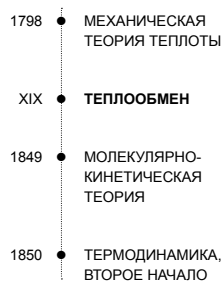
Однако не все материалы, особенно это касается кристаллических твердых тел, расширяются равномерно по всем направлениям. И далеко не все материалы расширяются одинаково при разных температурах. Самый яркий пример последнего рода — вода. При охлаждении вода сначала сжимается, как и большинство веществ. Однако начиная с $+4^\circ\text{C}$ и до точки замерзания 0°C вода начинает расширяться при охлаждении и сжиматься при нагревании (с точки зрения приведенной выше формулы можно сказать, что в интервале температур от 0°C до $+4^\circ\text{C}$ коэффициент теплового расширения воды α принимает отрицательное значение). Именно благодаря этому редкому эффекту земные моря

и океаны не промерзают до дна даже в самые сильные морозы: вода холоднее $+4^{\circ}\text{C}$ становится менее плотной, чем более теплая, и всплывает к поверхности, вытесняя ко дну воду с температурой выше $+4^{\circ}\text{C}$.

То, что лед имеет удельную плотность ниже плотности воды, — еще одно (хотя и не связанное с предыдущим) аномальное свойство воды, которому мы обязаны существованием жизни на нашей планете. Если бы не этот эффект, лед шел бы ко дну рек, озер и океанов, и они опять же вымерзли бы до дна, убив все живое.

Теплообмен

Теплота может передаваться посредством теплопроводности, конвекции или излучения



ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ гласит, что теплота всегда передается от более горячего тела более холодному, однако о механизме теплопередачи там не говорится ни слова. Однако характер переноса теплоты крайне важен с инженерно-физической точки зрения, и неудивительно, что механизмы теплообмена стали важным предметом исследований в первой половине девятнадцатого столетия. Как уже упомянуто в аннотации, было открыто три способа теплообмена, и за каждым из них стоит уникальный физический процесс.

Теплопроводность

Положите загнутой конец железной кочерги в горящий камин — и уже через пару минут вы не сможете притронуться к ее свободному концу, хотя он находится на значительном удалении от пламени. А происходит это в результате того, что любой металл обладает высокой *теплопроводностью*, и жар огня от разогретого конца кочерги очень быстро распространяется по всей ее длине.

А обусловлена высокая теплопроводность металла следующим: атомы металла организованы в трехмерную кристаллическую решетку и постоянно вибрируют около своего среднестатистического положения. Атомы погруженного в огонь конца кочерги под воздействием соударения с быстро движущимися молекулами углей и раскаленного газового пламени быстро разогреваются и начинают вибрировать значительно интенсивнее. Очень скоро температура прогреваемого конца кочерги практически сравнивается с температурой пламени, о чем можно судить по тому, что металл разогревается докрасна.

Одновременно сами термически возбужденные атомы, соударяясь с соседними атомами, передают последним энергию теплового движения, и те, в свою очередь, также очень быстро разогреваются до температуры, близкой к температуре горения. При этом, отдав свою тепловую энергию соседям, атомы погруженного в пламя конца кочерги практически тут же компенсируют ее за счет непрерывного поступления тепловой энергии, выделяющейся при горении.

Таким образом, посредством цепочки межатомных взаимодействий теплота быстро распространяется вверх по ручке кочерги, постоянно пополняясь за счет энергии сгорания дров, пока не достигнет рукояти, которую вы держите в ладони, и тогда вы, почувствовав, как она нагрелась, вынуждены будете выпустить кочергу во избежание ожога.

Таким образом, теплопроводность представляет собой механизм теплового обмена посредством соударения между отдельными атомами или молекулами теплопроводящего вещества. То есть тепловое движение распространяется по веществу, однако сами атомы или молекулы остаются жестко закрепленными внутри его структуры, и переноса вещества, как такового, мы не наблюдаем.

Уравнение, описывающее механизм теплопроводности, выглядит следующим образом:

$$Q = A \times \Delta T / R,$$

где Q — количество передаваемой тепловой энергии, A — площадь сечения теплопроводящего тела, ΔT — разность температур между двумя точками, а R — *тепловое сопротивление* материала, характеризующее, насколько он тормозит теплопередачу. В вышеприведенном примере с кочергой, одним концом опущенной в камин, ΔT равняется разнице между температурой пламени на одном конце и комнатной температурой воздуха на другом, A — площади сечения железного прута, из которого сделана кочерга, а R определяется свойствами металла. В целом же приведенная формула подсказывает, что чем больше разность температур и чем больше площадь поперечного сечения, тем большее количество теплоты будет передаваться. В то же время при фиксированных значениях разности температур и площади поперечного сечения количество передаваемой теплоты будет обратно пропорционально тепловому сопротивлению, то есть чем оно выше, тем медленнее будет нагреваться рукоять. Поэтому материалы с высокими значениями R (например, асбест, стекловолокно или пух) являются хорошими *теплоизоляторами*.

Конвекция

Теперь представьте себе кастрюлю с водой на плите. Сначала вода ведет себя неподвижно, и теплота от нижних слоев к верхним передается посредством теплопроводности. По мере нагревания, однако, характер теплопередачи меняется, поскольку запускается процесс, который принято называть *конвекцией*.

Нагреваясь вблизи дна, вода расширяется. Соответственно, удельный вес придонной разогретой воды оказывается легче, чем вес равного объема воды в поверхностных слоях. Это приводит всю водную систему внутри кастрюли в нестабильное состояние, которое компенсируется за счет того, что горячая вода начинает всплывать к поверхности, а на ее место опускается более прохладная вода.

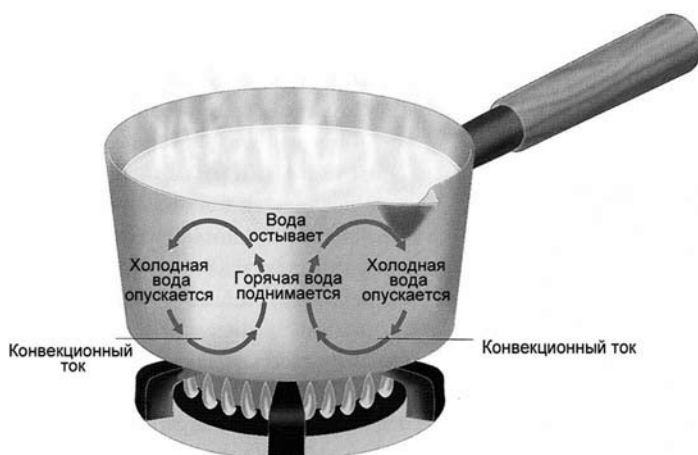
Однако процесс этот одним актом не ограничивается, поскольку, обменявшись местами, горячая и прохладная вода очень скоро обмениваются и ролями в силу того, что опустившаяся ко дну вода быстро разогревается и расширяется, а всплывшая горячая — быстро остывает и уплотняется за счет излучения (см. ниже). В результате ситуация нестабильности повторяется и слои воды снова меняются местами.

Нетрудно увидеть, что такая ситуация по сути приводит к постоянной нестабильности воды в кастрюле и начинается непрерывная циркуляция водной массы: разогретая вода со дна всплывает, вытесняя ко дну остывающую воду с поверхности. В результате

мы наблюдаем циркулярные потоки, которые принято называть *конвекционными токами* (см. рисунок). Присмотритесь внимательно к поверхности воды в кастрюле при ее закипании — и вы увидите конвекцию в действии: прозрачные области — это вода, поднимающаяся со дна, а пузыристые — это места, откуда вода только что пошла ко дну, оставив на поверхности накипь.

Конвекционные токи — весьма распространенный в природе способ теплообмена. Конвекция происходит в недрах Солнца, в слое между ядром и короной, именно она доставляет к поверхности светила тепловую энергию, вырабатываемую в ходе реакции термоядерного синтеза (см. эволюция звезд). Непрерывная конвекция происходит в земной мантии, в результате чего мы наблюдаем движение тектонических плит. Конвекционные атмосферные потоки определяющим образом сказываются на климате нашей планеты, перенося тепло из экваториальных широт в приполярные вместе с воздушными и океаническими массами. Даже на уровне отдельно взятого крупного города конвекция приводит к значительным перемещениям атмосферных слоев: перегретый асфальт в центре города в этом случае играет роль конфорки под днищем кастрюли, если вернуться к исходному примеру. Фактически благодаря конвекции в городах устанавливается особый микроклимат.

Обобщая, подчеркнем, что конвекция по сути представляет собой теплообмен посредством переноса вещества. Накопив теплоту в одном месте, вещество-носитель переносит его в более холодное и там отдает окружающей среде. В этом коренное отличие конвекции от теплопроводности, когда вещество — проводник тепла само остается на месте.



*Пример конвекции.
В закипающей воде циркулируют конвекционные токи*

Излучение

В отличие от двух предыдущих видов теплообмена при лучевом переносе тепла вещество — будь оно в твердом, жидком или газообразном состоянии — не задействовано вовсе. В этом случае теплообмен осуществляется в силу того, что любая материя, имеющая температуру выше абсолютного нуля, излучает энергию в окружающую среду (см. закон Стефана—Больцмана). Тип излучения зависит от температуры тела. Это нетрудно понять на повседневном опыте: металл в кузнице сначала раскаляется докрасна, потом до желто-оранжевого цвета и наконец практически добела. Это свидетельствует о повышении температуры вещества, потому что чем выше температура, тем короче длина излучаемых волн. Относительно холодные тела излучают в инфракрасном диапазоне волн, и мы их излучения не видим, а только осязаем как тепловое. Самые горячие тела испускают также невидимое излучение в микроволновом диапазоне.

Возможно, самым знаменитым примером открытия невидимого излучения стало открытие реликтового микроволнового фона космического излучения, ставшее одним из основных подтверждений правильности гипотезы большого взрыва. По сути, этот фон излучается всей Вселенной в ее совокупности, поскольку она расширяется и постепенно остывает, теряя свою изначально колоссальную среднюю температуру.

Термодинамика, второе начало

Невозможна самопроизвольная передача теплоты от холодного тела к теплоту

Никакой двигатель не может преобразовывать теплоту в работу со стопроцентной эффективностью

В замкнутой системе энтропия не может убывать

1798	•	МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1824	•	ЦИКЛ И ТЕОРЕМА КАРНО
1842	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ПЕРВОЕ НАЧАЛО
1850	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ВТОРОЕ НАЧАЛО
1867	•	ДЕМОН МАКСВЕЛЛА
1905	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ТРЕТЬЕ НАЧАЛО

Природным процессам свойственна направленность и необратимость, однако в большинстве законов, описанных в этой книге, это не находит отражения — по крайней мере явного. Разбить яйца и сделать яичницу не сложно, воссоздать же сырые яйца из готовой яичницы — невозможно. Запах из открытого флакона духов наполняет комнату — однако обратно во флакон его не соберешь. И причина такой необратимости процессов, происходящих во Вселенной, кроется во втором начале термодинамики, который при всей его кажущейся простоте является одним из самых трудных и часто неверно понимаемых законов классической физики.

Прежде всего у этого закона имеется как минимум три равноправные формулировки, предложенные в разные годы физиками разных поколений. Может показаться, что между ними нет ничего общего, однако все они логически эквивалентны между собой. Из любой формулировки второго начала математически выводятся две другие.

Начнем с первой формулировки, принадлежащей немецкому физiku Рудольфу Клаузиусу (см. УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА—КЛАУЗИУСА). Вот простая и наглядная иллюстрация этой формулировки: берем из холодильника кубик льда и кладем его в раковину. По прошествии некоторого времени кубик льда растает, потому что теплота от более теплого тела (воздуха) передается более холодному (кубику льда). С точки зрения закона сохранения энергии нет причин для того, чтобы тепловая энергия передавалась именно в таком направлении: даже если бы лед становился все холоднее, а воздух все теплее, закон сохранения энергии все равно бы выполнялся. Тот факт, что этого не происходит, как раз и свидетельствует об уже упоминавшейся направленности физических процессов.

Почему именно так взаимодействуют лед и воздух, мы можем легко объяснить, рассматривая это взаимодействие на молекулярном уровне. Из молекулярно-кинетической теории мы знаем, что температура отражает скорость движения молекул тела — чем быстрее они движутся, тем выше температура тела. Значит, молекулы воздуха движутся быстрее молекул воды в кубике льда. При соударении молекулы воздуха с молекулой воды на поверхности льда, как подсказывает нам опыт, быстрые молекулы в среднем замедляются, а медленные ускоряются. Таким образом, молекулы воды начинают двигаться все быстрее, или, что то же самое, температура льда повышается. Именно это мы имеем в виду, когда говорим, что тепло передается от воздуха ко льду. И в рамках этой модели первая формулировка второго начала термодинамики логически вытекает из поведения молекул.

При перемещении какого-либо тела на какое-либо расстояние под действием определенной силы совершается работа, и различные формы энергии как раз и выражают способность системы произвести определенную работу. Поскольку теплота, отражающая кинетическую энергию молекул, представляет собой одну из форм энергии, она тоже может быть преобразована в работу. Но опять

мы имеем дело с направленным процессом. Перевести работу в теплоту можно со стопроцентной эффективностью — вы делаете это каждый раз, когда нажимаете на педаль тормоза в своем автомобиле: вся кинетическая энергия движения вашего автомобиля плюс затраченная вами энергия силы нажатия на педаль через работу вашей ноги и гидравлической системы тормозов полностью превращается в теплоту, выделяющуюся в процессе трения колодок о тормозные диски. Вторая формулировка второго начала термодинамики утверждает, что обратный процесс невозможен. Сколько ни пытайтесь всю тепловую энергию превратить в работу — тепловые потери в окружающую среду неизбежны.

Проиллюстрировать вторую формулировку в действии несложно. Представьте себе цилиндр двигателя внутреннего сгорания вашего автомобиля. В него впрыскивается высокооктановая топливная смесь, которая сжимается поршнем до высокого давления, после чего она воспламеняется в малом зазоре между головкой блока цилиндров и плотно пригнанным к стенкам цилиндра свободно ходящим поршнем. При взрывном сгорании смеси выделяется значительное количество теплоты в виде раскаленных и расширяющихся продуктов сгорания, давление которых толкает поршень вниз. В идеальном мире мы могли бы достичь КПД использования выделившейся тепловой энергии на уровне 100%, полностью переведа ее в механическую работу поршня.

В реальном мире никто и никогда не соберет такого идеального двигателя по двум причинам. Во-первых, стенки цилиндра неизбежно нагреваются в результате горения рабочей смеси, часть теплоты теряется вхолостую и отводится через систему охлаждения в окружающую среду. Во-вторых, часть работы неизбежно уходит на преодоление силы трения, в результате чего опять же нагреваются стенки цилиндров — еще одна тепловая потеря (даже при самом хорошем моторном масле). В-третьих, цилиндру нужно вернуться к исходной точке сжатия, а это также работа по преодолению трения с выделением теплоты, затраченная вхолостую. В итоге мы имеем то, что имеем, а именно: самые совершенные тепловые двигатели работают с КПД не более 50%.

Такая трактовка второго начала термодинамики заложена в принципе Карно, который назван так в честь французского военного инженера Сади Карно. Она сформулирована раньше других и оказала огромное влияние на развитие инженерной техники на многие поколения вперед, хотя и носит прикладной характер. Огромное значение она приобретает с точки зрения современной энергетики — важнейшей отрасли любой национальной экономики. Сегодня, сталкиваясь с дефицитом топливных ресурсов, человечество тем не менее вынуждено мириться с тем, что КПД, например, ТЭЦ, работающих на угле или мазуте, не превышает 30–35% — то есть две трети топлива сжигается впустую, точнее, расходуется на подогрев атмосферы — и это перед лицом угрозы глобального потепления. Вот почему современные ТЭЦ легко узнать по колоссальным

башням-градирням — именно в них остужается вода, охлаждающая турбины электрогенераторов, и избытки тепловой энергии выбрасываются в окружающую среду. И столь низкая эффективность использования ресурсов — не вина, а беда современных инженеров-конструкторов: они и без того выжимают близко к максимуму того, что позволяет цикл Карно. Те же, кто заявляет, что нашел решение, позволяющее резко сократить тепловые потери энергии (например, сконструировал вечный двигатель), утверждают тем самым, что они перехитрили второе начало термодинамики. С тем же успехом они могли бы утверждать, что знают, как сделать так, чтобы кубик льда в раковине не таял при комнатной температуре, а, наоборот, еще больше охлаждался, нагревая при этом воздух.

Третья формулировка второго начала термодинамики, приписываемая обычно австрийскому физику Людвигу Больцману (см. постоянная Больцмана), пожалуй, наиболее известна. *Энтропия* — это показатель неупорядоченности системы. Чем выше энтропия, тем хаотичнее движение материальных частиц, составляющих систему. Больцману удалось разработать формулу для прямого математического описания степени упорядоченности системы. Давайте посмотрим, как она работает, на примере воды. В жидком состоянии вода представляет собой довольно неупорядоченную структуру, поскольку молекулы свободно перемещаются друг относительно друга, и пространственная ориентация у них может быть произвольной. Другое дело лед — в нем молекулы воды упорядочены, будучи включенными в кристаллическую решетку. Формулировка второго начала термодинамики Больцмана, условно говоря, гласит, что лед, растаяв и превратившись в воду (процесс, сопровождающийся снижением степени упорядоченности и повышением энтропии), сам по себе никогда из воды не возродится. И снова мы видим пример необратимого природного физического явления.

Тут важно понимать, что речь не идет о том, что в этой формулировке второе начало термодинамики провозглашает, что энтропия не может снижаться нигде и никогда. В конце концов, растопленный лед можно поместить обратно в морозильную камеру и снова заморозить. Смысл в том, что энтропия не может уменьшаться в *замкнутых системах* — то есть в системах, не получающих внешней энергетической подпитки. Работающий холодильник не является изолированной замкнутой системой, поскольку он подключен к сети электропитания и получает энергию извне — в конечном счете от электростанций, ее производящих. В данном случае замкнутой системой будет холодильник, плюс проводка, плюс местная трансформаторная подстанция, плюс единая сеть энергоснабжения, плюс электростанция. И поскольку рост энтропии в результате беспорядочного испарения из градирен электростанции многократно превышает снижение энтропии за счет кристаллизации льда в вашем холодильнике, второе начало термодинамики ни в коей мере не нарушается.

А это, я полагаю, приводит еще к одной формулировке второго начала: *Холодильник не работает, если он не включен в розетку.*

Термодинамика, первое начало

Теплота представляет собой особую форму энергии и должна учитываться в законе сохранения и превращения энергии

1798	•	МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1824	•	ЦИКЛ И ТЕОРЕМА КАРНО
1842	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ПЕРВОЕ НАЧАЛО
1850	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ВТОРОЕ НАЧАЛО
1905	•	ТЕРМОДИНАМИКА, ТРЕТЬЕ НАЧАЛО

В физике работой называется перемещение массы на определенное расстояние под воздействием силы. Чтобы поднять эту книгу, например, вам нужно приложить силу, направленную вверх, чтобы преодолеть направленную вниз силу гравитационного притяжения на всем отрезке пути, на который вы поднимаете книгу, и тем самым вы совершаете работу. Для совершения работы тело, которое ее совершает, должно обладать запасом энергии, необходимым для совершения этой работы. То есть энергия — это способность совершить работу. С научной точки зрения энергия обладает тремя важнейшими свойствами: во-первых, она может проявляться в различных формах; во-вторых, различные виды энергии могут переходить друг в друга; в-третьих, при любых физических процессах совокупная энергия в замкнутой системе сохраняется.

Энергия движения

Движущееся тело способно оказывать силовое воздействие на другие тела на отрезке своего пути, и вы такие явления, бесспорно, наблюдали. Представьте себе стрелу, летящую к мишени. Врезаясь в мишень, стрела оказывает силовое воздействие на ее волокна и раздвигает их. Следовательно, движущееся тело способно совершить работу, и значит, по определению, оно обладает энергией. Энергия движения такого рода называется *кинетической энергией* (от греческого *kinezis* — «движение»). Согласно МЕХАНИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТЕПЛОТЫ, теплота — это проявление движения молекул вещества, и значит, ее можно считать особым видом кинетической энергии.

Энергия положения

Если вы поднимете эту книгу вверх, она сможет затем совершать работу уже в силу своего нового положения в гравитационном поле Земли. Чтобы убедиться в этом, отпустите книгу — и она упадет. Падая, книга разгонится до определенной скорости и, следовательно, приобретет некоторую кинетическую энергию. Упав на пол или на стол, она окажет силовое воздействие на поверхность и едва заметно деформирует ее, одновременно слегка деформировавшись и сама. То есть, находясь на изначальной высоте, книга уже обладала определенным запасом энергии — мы называем ее *потенциальной энергией*. Будучи поднятой на определенную высоту, книга не совершает никакой работы, однако имеет возможность ее совершить — если книгу уронят. Если быть точным, энергию книги надо назвать *потенциальной энергией гравитационного поля*, поскольку книга обладает этой энергией благодаря тому, что она находится в гравитационном поле. Именно поле реально производит работу при падении книги. Если вы поднимете книгу в космическом корабле, находящемся в межзвездном пространстве, где нет гравитационного поля, она вообще не упадет, поскольку не будет обла-

дать потенциальной энергией гравитационного поля*. И резинка рогатки, и тетива лука, будучи натянутыми, приобретают потенциальную энергию силы упругости, которая может совершать работу, если их отпустить.

Точно так же электрически заряженная частица, помещенная в электрическое поле, обладает *электрической потенциальной энергией*. Мы видим это в атоме (см. атомная теория строения вещества): энергия электрона зависит от удаленности его орбиты от положительно заряженного ядра. Электрическая потенциальная энергия особого рода участвует в химических взаимодействиях между атомами. Электроны в каждом атоме обладают определенной электрической потенциальной энергией, зависящей от их места в атоме. После объединения атомов в молекулы эти же электроны будут обладать уже другой энергией, обусловленной их новым положением. Обычно суммарная энергия до и после химического взаимодействия не одинакова. Энергию, обеспечивающую возможность такого изменения электронной конфигурации атомов, мы называем *химической потенциальной энергией*.

Имеется множество видов потенциальной энергии, связанных с магнитными и электрическими полями, с различными свойствами веществ и т.д. Потенциальная энергия присутствует в любой системе, где может быть совершена работа, которая до сих пор не совершена.

Энергия массы

В рамках теории относительности Эйнштейн открыл совершенно неожиданную для всех форму энергии. Оказывается, масса может преобразовываться в энергию, и это получило отражение в формуле $E = mc^2$, где c — скорость света в вакууме (3×10^8 м/с). Из этой формулы следует, что мизерная масса может быть преобразована в колоссальную энергию — и это действительно происходит при ядерном распаде урана в атомных реакторах. Из этой же формулы следует, что для искусственного получения даже самых малых масс материи требуются колоссальные затраты энергии. И действительно, на современных ускорителях элементарных частиц протоны разгоняются почти до скорости света, и лишь тогда в результате обстрела ими мишени часть кинетической энергии протонов преобразуется в новые элементарные частицы.

Превращение и сохранение энергии

Различные виды энергии взаимозаменяемы — энергия может переходить из одного вида в другой. Например, когда лучник выпускает стрелу, потенциальная энергия упругого натяжения тетивы преобразуется в кинетическую энергию летящей стрелы, а при попадании стрелы в мишень — в тепловую энергию рассеяния. Все виды энергии, за исключением тепловой, могут полно-

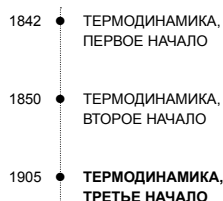
* На первый взгляд, это противоречит нашим интуитивным представлениям. Объяснение же таково. В открытом космосе, где нет значительных гравитационных полей, потенциальная энергия, очевидно, должна быть равна нулю. Поскольку при падении тела в направлении звезды или планеты потенциальная энергия теряется, ее значение должно стать *отрицательным*. Потенциальная энергия книги массой 1 кг в гравитационном поле у поверхности Земли составит около -6×10^7 Джоулей, а если книгу поднять на высоту 1000 км, ее потенциальная энергия возрастет до -5×10^7 Джоулей. (Примечание автора)

стью преобразовываться друг в друга (тепловая энергия, согласно ВТОРОМУ НАЧАЛУ ТЕРМОДИНАМИКИ, может преобразовываться в работу лишь частично).

Преобразование одного вида энергии в другой носит отнюдь не случайный характер, поскольку в замкнутых системах выполняется *закон сохранения энергии*. Это значит, что в замкнутой изолированной системе совокупное количество энергии со временем не меняется, хотя энергия может принимать различную форму. Предположим, вы располагаете фиксированной суммой денежных средств, распределенных по различным банковским счетам и депозитам: часть ваших денег хранится на текущем сберегательном счете, часть вложена в акции и облигации и т.д. С вашими деньгами вы можете поступить по-разному: можно их все перечислить на единственный счет, можно распределить их по всем счетам равномерно или же положить на разные счета разное количество денег. Однако, что бы вы ни делали, ваш совокупный капитал останется неизменным. (Для простоты мы не учитываем начисление процентов по вкладам и ценным бумагам.) Точно так же, принимая различные формы и перераспределяясь, энергия ниоткуда не поступает и никуда не исчезает. В этом и заключается *закон сохранения энергии*, который гласит: полная энергия замкнутой системы остается постоянной.

Термодинамика, третье начало

Невозможно за конечное время довести температуру тела до абсолютного нуля



Энергия нулевой точки

Бильярдный шар, катящийся по столу, рано или поздно остановится, израсходовав свою кинетическую энергию на преодоление силы трения, при этом энергия движения шара перейдет в тепло — так утверждает первое начало термодинамики. На квантовую частицу (например, на электрон в атоме) это не распространяется в силу принципа неопределенности Гейзенберга. Этот принцип гласит, что невозможно точно и одновременно установить пространственные координаты и скорость квантовой частицы. (См. с. 416)

Абсолютный ноль — это одна из концепций с интригующим названием и обманчиво простым определением. До наступления эры квантовой механики определение абсолютного нуля действительно было предельно простым. Молекулярно-кинетическая теория выявила статистическую связь между движениями атомов и молекул и температурой, и природу температуры стало возможно представить наглядно: чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура, и наоборот. При такой картине нетрудно догадаться, что имеется нижний предел температуры, по достижении которого атомы и молекулы перестают двигаться окончательно. Значение абсолютного нуля оказалось равным 273°C .

В рамках квантовой механики значение абсолютного нуля не изменилось, однако в корне изменилось наше представление о том, как ведут себя атомы. Если бы атомы просто остановились как вкопанные, мы бы в таком случае могли одновременно измерить их скорость и местоположение с абсолютной точностью, а это нарушение принципа неопределенности Гейзенберга. Поэтому даже при абсолютном нуле атом должен представляться нам слегка расплывчатым, если использовать волновое представление о нем, или слегка колеблющимся, если использовать корпускулярную концепцию. Поэтому нам следует говорить, что при абсолютном нуле атом не прекращает всякое движение, а лишь приходит в такое колебательное состояние, при котором он более не способен отдавать энергию вовне (такая остаточная энергия атома называется *энергией нулевой точки*). Конечный же итог с макроскопической точки зрения остается неизменным: имеется минимальное значение возможной температуры вещества, и оно равно все тем же -273°C .

На самом деле существование энергии нулевой точки хорошо иллюстрирует весьма интересный момент в квантовой теории. При стремлении температуры к абсолютному нулю волновая природа материи (см. УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА) становится все очевиднее и важнее, а квантово-механические эффекты начинают преобладать над эффектами классической механики, при которых атом ведет себя подобно бильярдному шару.

Так получилось, что -273°C — единственная температура, фигурирующая в фундаментальных физических законах. Она же используется и в определении температурной шкалы Кельвина, которая в основном используется в точных науках. За ноль в ней принимается абсолютный ноль, а единичное деление шкалы принимается равным 1° по привычной шкале Цельсия. Таким образом, по шкале Кельвина абсолютный ноль равен 0, точка замерзания воды приходится на 273, а комнатная температура составляет около 300.

Третье начало термодинамики просто констатирует, что абсолютный ноль недостижим — и в этом он похож на скорость света: материальное тело может сколь угодно близко подойти к нему, но достичь — никогда. Дело в том, что чем ближе система подходит к

Если бы электрон полностью остановился, мы бы могли зафиксировать и его положение, и его нулевую скорость, а это невозможно. Таким образом, квантовые частицы в отличие от классических всегда находятся в некоем вибрирующем движении, делающем их образ слегка размытым: они всегда где-то около своей центральной точки и скорость их также постоянно колеблется. А это значит, что у квантовой частицы всегда имеется какая-то остаточная энергия. Эта остаточная энергия нулевой точки, или *нулевого уровня возбуждения*, предсказываемая квантовой механикой, — явление весьма неожиданное и специфическое. Пожалуй, это единственный случай, когда энергия материальной частицы не может ни отдаваться вовне, ни изменяться. По сути это минимальная энергия квантовой частицы, при которой не нарушаются законы квантовой механики. Расчет квантовой энергии нулевой точки обычно дает хорошее приближение энергии покоя частицы — например, электрона на нижней орбите в модели атома Бора, не требуя при этом громоздких вычислений, которые необходимы при более точных расчетах.

абсолютному нулю температуры, тем больше работы нужно затратить на ее дальнейшее охлаждение. На самом деле в лабораторных условиях ученым удавалось получать температуры предельно близкие к нулевой. Сегодня температуры, отстоящие от абсолютного нуля на миллиардные доли градуса, можно получить практически в любой криогенной лаборатории.

Способов понижения температуры материального тела имеется достаточно много. Можно испарять жидкость с его поверхности, и она будет отнимать теплоту у тела — именно поэтому люди потеют в жару. Можно резко расширять газ, находившийся под высоким давлением, — вот почему охлаждается аэрозольный баллончик, когда вы долго выпускаете из него содержимое. Подобными методами ученые доводят температуру до уровня нескольких градусов выше абсолютного нуля. Однако, чтобы получить по-настоящему сверхнизкие температуры, приходится надолго подвешивать незначительное количество атомов вещества в сильных электростатических и магнитных полях. После этого подвешенные атомы обрабатываются лазерным лучом определенной длины волны, который сначала заставляет атомы испустить остатки энергии возбужденных электронов в виде световых квантов, а затем — разогнать атомы врозь, как бы распыскать их из аэрозольного баллончика. Именно так сегодня получают температуры порядка нескольких нанокельвинов ($1\text{ нК} = 10^{-9}\text{ К}$). Однако, как далеко ни пошло бы развитие нашей техники, третье начало термодинамики говорит нам, что мы не только не перейдем барьера абсолютного нуля, но даже не достигнем его.

Один физик с хорошим чувством юмора дал собственные формулировки трех начал термодинамики:

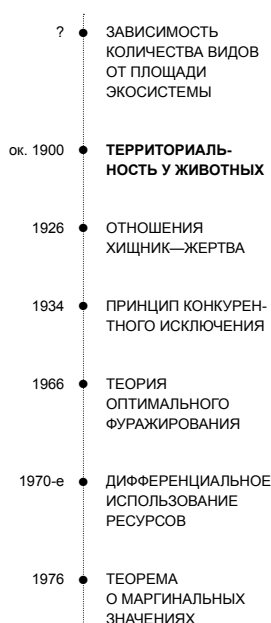
Первое начало термодинамики: Вам не выиграть.

Второе начало термодинамики: Вам не сыграть вничью.

Третье начало термодинамики: Вам даже сыграть не дадут.

Территориальность у животных

Многие животные (или группы животных) защищают территорию от других представителей своего вида



Мысль о том, что животные защищают территорию, которую они используют для выведения потомства, поиска пищи или спаривания, была впервые высказана малоизвестным английским птицеводом по имени Генри Элиот Говард (Henry Eliot Howard). Изучив множество различных видов птиц, он заметил, что самцы некоторых видов, обосновавшись в каком-то месте, изгоняли с этих участков других самцов этого вида, когда они туда забредали. Он также заметил, что эти участки привлекали самок этого вида и что там происходило спаривание и гнездование. Со времени этого открытия явление *территориальности* было отмечено у многих видов. Пара, закрепившая за собой *территорию* (Говард ввел этот термин в словарь поведения животных в 1920-е годы), имеет больше шансов найти себе достаточное количество пищи и может спокойно делать все необходимое для выведения потомства.

Территориальность у разных видов проявляется по-разному. Одни используют территорию для спаривания, выведения потомства, а также добывания пищи, другие — для спаривания и выведения потомства, добывание же пищи ведется на территории сообщества, третьи — только для спаривания. Выражение *stamping ground* (от англ. *stamp* — «бить копытом») — «пристанище» (например, говорят *I'm glad to be back in my old stamping ground* — «Я счастлив вернуться в свое пристанище») — произошло от поведения копытных, таких как олени или некоторые виды антилоп. Самцы этих животных во время сезона спаривания, заняв территорию, бьют копытом, сообщая об этом самкам.

Границы территорий могут быть незаметны для нас, людей, но они четко распознаются животными, которые их устанавливают. В норме самцы защищают свои границы от вторжений других самцов, хотя территориальные стычки редко переходят в борьбу не на жизнь, а на смерть. Похоже, это правило действует для всех — от птиц до рыб: как только границы установлены, самцам на чужую территорию хода нет.

Тест Тьюринга

Если компьютер может работать так, что человек не в состоянии определить, с кем он общается — с другим человеком или с машиной, считается, что он прошел тест Тьюринга

1950 • ТЕСТ ТЬЮРИНГА

Разумные, подобные человеку машины на протяжении многих десятилетий были одной из основных тем научно-фантастических произведений (см. три закона робототехники). С момента зарождения современной вычислительной техники умы людей занимал вопрос: можно ли построить машину, которая могла бы в чем-то заменить человека. Попыткой создать твердую эмпирическую почву для решения этого вопроса и стал тест, разработанный Аланом Тьюрингом.

Первый вариант теста, опубликованный в 1950 году, был несколько запутанным. Современная версия теста Тьюринга представляет собой следующее задание. Группа экспертов общается с неизвестным существом. Они не видят своего собеседника и могут общаться с ним только через какую-то изолирующую систему — например, клавиатуру. Им разрешается задавать собеседнику любые вопросы, вести разговор на любые темы. Если в конце эксперимента они не смогут сказать, общались ли они с человеком или с машиной, и если на самом деле они разговаривали с машиной, можно считать, что эта машина прошла тест Тьюринга.

Нет нужды говорить, что сегодня ни одна машина не может даже близко подойти к тому, чтобы пройти тест Тьюринга, хотя некоторые из них весьма неплохо работают в очень ограниченной области. Предположим тем не менее, что в один прекрасный день машина все-таки сможет пройти этот тест. Будет ли это означать, что она разумна и обладает интеллектом?

Джон Р. Сирл (John R. Searle, p. 1932), преподаватель философии Калифорнийского университета в Беркли, разработал воображаемую систему, которая показывает, что ответ на этот вопрос отрицательный. Эта система под названием «Китайская комната» работает следующим образом. Вы сидите в комнате. В стене этой комнаты есть две щели. Через первую щель вам передают вопросы, написанные по-китайски. (Предполагается, что вы, как и Джон Сирл, не знаете китайского. Если это не так, выберите какой-нибудь другой язык, неизвестный вам.) Затем вы просматриваете книги с инструкциями типа: «Если вы получили такой-то набор символов, напишите на листке бумаги такой-то (отличный от исходного) набор символов и передайте его обратно через другую щель».

Ясно, что если книги с инструкциями достаточно полны, «машина», состоящая из вас и комнаты, сможет пройти тест Тьюринга. При этом очевидно, что вам совсем не обязательно понимать, что вы делаете. По мнению Сирла, это показывает, что, даже если машина прошла тест Тьюринга, это еще не значит, что она разумна и обладает интеллектом.



АЛАН МАТИСОН ТЬЮРИНГ (Alan Mathison Turing, 1912–54) — английский математик. Родился в Лондоне, учился в Кембридже (Великобритания) и Принстоне (США). Был пионером в области теории вычислительной математики, ввел понятие *машины Тьюринга* — идеальной цифровой вычислительной машины. Во время Второй мировой

войны работал криптографом в Блетчли-Парке — секретном учреждении правительства Великобритании, созданном для раскрытия кода немецкой военной шифровальной машины «Энигма». После войны, будучи снят со своей научной должности и подвергаясь преследованиям из-за гомосексуальных наклонностей, покончил с собой.

Точка Кюри

Ферромагнитные свойства вещества проявляются лишь при температурах ниже точки Кюри



подавляющее большинство атомов обладает собственным магнитным полем. Практически любой атом можно представить в виде крошечного магнетика с северным и южным полюсами. Этот магнитный эффект объясняется тем, что электроны при движении по орбитам вокруг атомного ядра создают микроскопические электрические токи, которые и порождают магнитные поля (см. ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА). Сложив магнитные поля, индуцируемые всеми электронами атома, мы получим суммарное магнитное поле атома.

В большинстве веществ магнитные поля атомов ориентированы хаотично, в результате чего они взаимно гасятся. Однако в некоторых веществах и материалах (прежде всего в сплавах, содержащих железо, никель или кобальт) атомы упорядочиваются так, что их магнитные поля направлены в одну сторону и усиливают друг друга. В результате кусочек такого вещества оказывается окружен магнитным полем. Из таких веществ, называемых *ферромагнетиками*, поскольку обычно они содержат железо, и получают *постоянные магниты*.

Чтобы понять, как образуются ферромагнетики, представим себе кусок раскаленного железа. Из-за высокой температуры атомы в нем движутся очень быстро и хаотично, не оставляя возможности для упорядочения атомных магнитных полей в одном направлении. Однако по мере понижения температуры тепловое движение ослабевает и начинают преобладать другие эффекты. В железе (и некоторых других металлах) на атомном уровне действует сила, стремящаяся объединить магнитные диполи соседних атомов друг с другом.

Эта сила межатомного взаимодействия, получившая название *обменной силы*, была впервые описана Вернером Гейзенбергом (см. ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА). Она обусловлена тем, что два соседних атома могут обмениваться внешними электронами и эти электроны начинают принадлежать одновременно обоим атомам. Обменная сила прочно связывает атомы в кристаллической решетке металла и делает их магнитные поля параллельными и направленными в одну сторону. В результате упорядоченные магнитные поля соседних атомов взаимно усиливаются, а не гасятся. И такой эффект может наблюдаться в объеме вещества порядка 1 мм^3 , в котором содержится до 10^{16} атомов. Атомы такого *магнитного домена* (см. ниже) выстроены таким образом, что мы имеем чистое магнитное поле.

При высоких температурах действию этой силы мешает тепловое движение атомов, при низких же температурах атомные магнитные поля могут усиливать друг друга. Температура, при которой происходит этот переход, называется *точкой Кюри* металла — в честь открывшего ее французского физика Пьера Кюри.

В реальности структура ферромагнетиков гораздо сложнее, чем описано выше. Обычно отдельные домены включают всего несколько тысяч атомов, магнитные поля которых однонаправленны, однако поля различных доменов направлены беспорядочно и по совокупности материал не намагничен. Поэтому обычный

кусок железа магнитных свойств не проявляет. Однако при определенных условиях упорядочиваются и магнитные поля доменов, из которых состоит ферромагнетик (например, при остывании раскаленного железа в сильном магнитном поле). И тогда мы получаем постоянный магнит. Наличие точки Кюри объясняет также, почему при сильном нагревании постоянного магнита в какой-то момент происходит его полное *размагничивание*.

МАРИЯ СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ

(Marie Skłodowska Curie, 1867–1934) — польский, затем французский химик. Родилась в Варшаве в интеллигентской семье. Училась в школе, помогала матери содержать пансион, прислуживая в нем в качестве горничной. После окончания школы какое-то время работала гувернанткой в состоятельных семьях, чтобы заработать средства на получение медицинского образования для своей сестры. На этот период приходится расстроенная родителями женой помолвка Склодовской с юношей из семьи, где она прислуживала (родители сочли такой брак их сына недостойным их социального положения и упустили блестящую возможность улучшить свой фамильный генофонд). После получения ее сестрой медицинского образования в Париже туда же отправилась учиться и сама Склодовская.

Блестящие результаты вступительных экзаменов по физике и математике привлекли к молодой полячке пристальное внимание ведущих французских ученых. Результатом стала ее помолвка в 1894 году с Пьером Кюри и брак с ним, заключенный в следующем году. В те годы исследования явления радиоактивности только начинались и работы в этой области были непочатый край. Пьер и Мария Кюри занялись извлечением радиоактивных образцов из руд, добываемых в Богемии, и их исследованием. В результате супругам удалось открыть сразу несколько новых радиоактивных элементов (см. РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД), один из которых был назван кюрием в их честь, а еще один — полонием в честь родины Марии. За эти исследования супруги Кюри были совместно с Анри Беккерелем (Henri Becquerel, 1852–1908), открывшим рентгеновские лучи, удостоены Нобелевской премии по физике за 1903 год. Именно Мария Кюри первой ввела в употребление термин «радиоактивность» — по названию первого открытого Кюри радиоактивного элемента радия.

После трагической гибели Пьера в 1906 году Мария Кюри отказалась от предложенной Сорбоннским университетом пенсии и продолжила исследования. Ей удалось доказать, что в результате радиоактивного распада происходит трансмутация химических элементов, и тем самым положить начало новой отрасли естественных наук — радиохимии. За эту работу Мария Кюри была удостоена Нобелевской премии по химии за 1911 год и стала первым ученым — дважды лауреатом самой престижной премии за достижения в естественных науках. (В том же году Парижская академия наук отклонила ее кандидатуру и не приняла Марию Кюри в свои ряды. Видимо, двух Нобелевских премий господам академикам показалось недостаточно для преодоления своей склонности к дискриминации по национальному и гендерному признаку.)

В годы Первой мировой войны Мария Кюри занималась активными прикладными медицинскими исследованиями, работая на фронте с портативной рентгеновской установкой. В 1921 году в Америке была открыта подписка на сбор средств на покупку для Марии Кюри 1 грамма чистого радия, который был ей необходим для дальнейших исследований. В ходе ее триумфальной поездки по Америке с публичными лекциями ключик от шкатулки с драгоценным радиоактивным металлом был вручен Кюри самим президентом США Уорреном Хардингом (Warren Harding).

Последние годы жизни Мария Кюри были заполнены важными международными инициативами в области науки и медицины. В начале 1930-х годов здоровье Марии Кюри резко ухудшилось — сказались огромные дозы радиоактивного облучения, полученные ею в процессе многолетних экспериментов, и в 1934 году она скончалась во французском альпийском санатории.

ПЬЕР КЮРИ (Pierre Curie, 1859–1906 — французский физик. Родился в Париже в семье видного врача. Получил домашнее образование. Первоначально изучал фармакологию в Сорбонне, однако очень скоро увлекся естественными экспериментами с кристаллами, которые проводил его брат Жак, и со временем стал директором Школы физики и химии (École de Physique et Chimie). В 1895 году женился на Марии Склодовской и в том же году защитил докторскую диссертацию

по магнитным свойствам парамагнетиков (см. закон Кюри). Вместе с супругой в тяжелейших рабочих условиях проводил в Школе опыты по изучению свойств радиоактивных веществ. В 1904 году получил назначение на пост профессора физики и директора лаборатории (вскоре преобразованной в Институт радия) Сорбонны. В апреле 1906 года Пьер Кюри погиб в результате нелепого несчастного случая, попав под колеса извозчика. Он даже не успел завершить оборудование своей новой лаборатории.

Три закона робототехники

Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред

Робот обязан выполнять команды человека, если они не противоречат первому закону

Робот обязан делать все необходимое для обеспечения своей безопасности, при условии, что это не противоречит первому или второму закону

Под «законами» я здесь понимаю нечто иное, чем в других статьях, составляющих эту книгу. Законы робототехники — вымысел, плод богатого воображения покойного Айзека Азимова, воплощенный в его классической серии научно-фантастических рассказов о роботах*. В рассказах Азимова эти три закона заложены в «позитронный мозг» каждого робота, и их интерпретация часто тесно связана с сюжетом рассказа.

Последние несколько лет я много беседовал с исследователями мозга, искусственного интеллекта и природы сознания. Меня поразило то, как часто в наших беседах затрагивались эти вымышленные законы. Я думаю, дело в том, что, хотя человечество пока не научилось строить роботов, выполняющих придуманные Азимовым законы, все согласны, что именно эти принципы должны определять поведение умных машин.

Поэтому мне кажется, что чем более совершенные механизмы, имитирующие действия и поступки людей, мы научимся создавать, тем большую роль будут играть в нашей жизни три закона, выдуманные Азимовым.

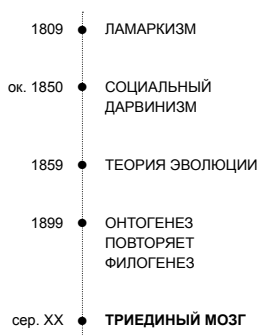
АЙЗЕК АЗИМОВ (Isaac Asimov, 1920–92) — американский фантаст и популяризатор науки. Он родился в местечке Петровичи под Смоленском (сейчас оно находится в Белоруссии) и эмигрировал с семьей в Америку в трехлетнем возрасте. В 1941 году он получил степень магистра, окончив химический факультет Колумбийского университета, а в 1948 году, после работы над военными проектами, получил докторскую степень. В следующем году он стал профессором

биохимии Бостонского университета. Некоторое время Азимов совмещал работу в университете с трудом писателя-фантаста, однако второе занятие со временем стало основным. Наиболее известные научно-фантастические работы Азимова входят в серию романов о будущем «Основание» (Foundation), посвященных Галактической империи. Азимов был необычайно плодовитым писателем — из-под его пера вышли почти 500 книг на самые разные темы.

* В этих рассказах текст законов робототехники цитируется по 56-му изданию «Справочника по робототехнике» (Handbook of Robotics), вышедшего в 2058 году. Азимов утверждал, что эта формулировка законов предложена его редактором Джоном Кэмпбеллом (John W. Campbell).

Триединый мозг

Мозг развивался путем наращивания эволюционных слоев — вначале «рептильный слой», затем «слой млекопитающих» и наконец «человеческий»



В середине XX века в умах бытовало довольно своеобразное представление об устройстве мозга. Считалось, что человеческий мозг развивался путем нарастания слоев — подобно кольцам на древесном срезе. Расположенные в самом основании мозга мозжечок и ствол должны были отвечать за основные функции, такие как равновесие и регуляция деятельности внутренних органов. Полагали, что это — «рептильная» часть мозга, наследство наших далеких предков. Находящийся выше средний мозг — средоточие чувства голода, полового возбуждения и т. п. Считалось, что это «слой млекопитающих». А над ним расположена кора головного мозга — область мыслей и высших психических функций, которые и отличают людей от прочих живых существ. Эта схема, известная под названием «триединый мозг», приобрела популярность благодаря Карлу Сагану (Carl Sagan, 1934–96) и его книге «Драконы Эдема» (1977).

В пользу теории триединого мозга говорит многое. Она проста, привлекательна и логична. К сожалению, это представление абсолютно неверно.

Во-первых, мозг человека хоть и отличается от мозга других животных, но не *так*, как считал Саган. Рыбий мозг отличается от человеческого по форме, но все части у них практически и те же. Мозг рыбы и мозг человека разнятся примерно как два автомобиля — существуют явные различия, но у обоих автомобилей есть колеса, двигатель, тормоза и т. п. Тот факт, что человек обладает большей интеллектуальной мощностью, объясняется большими размерами коры у человека, но не тем, что у рыбы ее вовсе нет.

Во-вторых, работа мозга — это очень сложный процесс, который невозможно втиснуть в рамки такой простой модели. Сегодня мы знаем, что мозг состоит из многочисленных узкоспециализированных скоплений клеток и что его функционирование зависит от взаимосвязей этих центров друг с другом. Это понятие нередко передается выражением «общность ума».

На примере зрения рассмотрим, как группы нейронов взаимодействуют друг с другом. Первичная обработка входящего света происходит в сетчатке глаза. Сигналы от светочувствительных клеток направляются к специализированным нейронам (см. РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕРВНЫХ ИМПУЛЬСОВ). Одни нейроны приходят в возбуждение, когда к ним поступает сигнал о светлом пятне на темном фоне; другие — когда воспринимают темное пятно на светлом фоне. Сигнал, идущий к мозгу, — это последовательность импульсов, которые представляют зрительный образ в виде последовательности темных и светлых пятен. (На самом деле в сетчатке происходит два вида обработки — одни клетки чувствительны к цвету, другие — к малым различиям в интенсивности света.)

Некоторые нейроны сетчатки связаны (говоря техническим языком, *спроецированы на*) с определенным участком теменной области мозга, функция которой — быстрое формирование смутной картины поля зрения и осуществление произвольной реакции,

если в поле зрения что-то происходит. Именно поэтому люди, находящиеся в комнате, автоматически поворачивают головы к двери, когда она открывается. Большинство сигналов от нейронов передаются к зрительной коре в затылочной области мозга. Там сигналы от разных частей сетчатки вновь собираются вместе (посредством процесса, который мы еще до конца не понимаем) в зрительный образ. Каждый нейрон в зрительной коре связан со многими нейронами в сетчатке. Эти корковые нейроны имеют узкую специализацию. Некоторые из них возбуждаются, только если в поле зрения появится горизонтальная линия, другие — только при появлении вертикальной линии и т.д. У этих нейронов есть проекция на другие отделы мозга, поскольку процесс воссоздания образа выходит на все более высокие уровни. Мы знаем, что в мозгу существуют специализированные нейроны, которые, например, будут возбуждаться только при виде звездочки; другие будут возбуждаться только при виде окружности с полоской внутри и т.п. Представление о том, как с помощью этих специализированных нейронов строится зрительный образ, ученые называют *проблемой связывания*. То есть нам важно понять, каким образом сигналы от нейронов связываются вместе для получения единого образа.

Этот вид специализации нейронов можно объяснить с точки зрения теории эволюции. Например, способность некоторых нервных импульсов от сетчатки напрямую запускать рефлекс, заставляющий нас подробнее оценить движение внешних объектов, давала очевидное преимущество организмам, живущим в недружелюбной окружающей среде. Быстрый взгляд помогал остаться в живых, если это движение исходило от приближающегося хищника.

Наличие такой специализации — еще и причина того, что многие ученые (включая автора) непоколебимо уверены, что мозг — не компьютер. Просто вычислительные машины работают совсем не так, как мозг, и каждая из них подходит для решения определенных задач (см. тест тьюринга). К примеру, даже небольшой компьютер превзойдет любого человека по способности считать и запоминать, но ни один ныне существующий компьютер не способен говорить, как пятилетний ребенок. Компьютер являет собой орудие труда (такое же, как молоток), помогающее людям в достижении их целей, и ничего более.

Ударные волны

Если объект движется быстрее, чем волны, которые он порождает в среде, он возбуждает расходящийся шлейф ударных волн

1887 • УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Любой объект, двигаясь в материальной среде, возбуждает в ней расходящиеся волны. Самолет, например, воздействует на молекулы воздуха в атмосфере. Из каждой точки пространства, где только что пролетел самолет, начинает во все стороны с равной скоростью расходиться акустическая волна в строгом соответствии с законами распространения волн в воздушной среде. Таким образом, каждая точка траектории движения объекта в среде (в данном случае самолета) становится отдельным источником волны со сферическим фронтом.

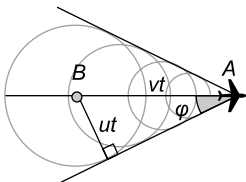
При движении самолета на дозвуковых скоростях эти акустические волны распространяются как обычные концентрические круги по воде, и мы слышим привычный гул пролетающего самолета. Если же самолет летит на сверхзвуковой скорости, источник каждой следующей волны оказывается удален по траектории движения самолета на расстояние, превышающее то, которое к этому моменту успел покрыть фронт предыдущей акустической волны. Таким образом, волны уже не расходятся концентрическими кругами, их фронты пересекаются и взаимно усиливаются в результате резонанса, имеющего место на линии, направленной под острым углом назад по отношению к траектории движения. И так происходит непрерывно в процессе всего полета на сверхзвуковой скорости, в результате чего самолет оставляет за собой расходящийся шлейф резонансных волн вдоль конической поверхности, в вершине которой находится самолет. Сила звука в этом коническом фронте значительно превышает обычный шум, издаваемый самолетом в воздухе, а сам этот фронт называется ударной волной. Ударные волны, распространяясь в среде, оказывают резкое, а иногда и разрушительное воздействие на материальные объекты, встречающиеся на их пути. При пролете неподалеку сверхзвукового самолета, когда конический фронт ударной волны дойдет до вас, вы услышите и почувствуете резкий, мощный хлопок, похожий на взрыв, — *звуковой удар*. Не бойтесь, это не взрыв, а результат резонансного наложения акустических волн: за долю мгновения вы слышите весь суммарный шум, изданный самолетом за достаточно длительный промежуток времени.

Конус фронта ударной волны называется *конусом Маха*. Угол φ между образующими конуса Маха и его осью (см. рисунок) определяется формулой:

$$\sin \varphi = u/v,$$

где u — скорость звука в среде, v — скорость объекта. Отношение скорости движущегося объекта к скорости звука в среде называется *числом Маха*: $M = v/u$. (Соответственно, $\sin \varphi = 1/M$.) Нетрудно видеть, что у самолета, летящего со скоростью звука, $M = 1$, а при сверхзвуковых скоростях число Маха больше 1.

Ударные волны возникают не только в акустике. Например, если элементарная частица движется в среде со скоростью, превы-



Конус Маха, образованный самолетом, летящим со сверхзвуковой скоростью

шающей скоростью распространения света в этой среде, возникает ударная световая волна (см. ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРЕНКОВА). По этому излучению физики сегодня выявляют элементарные частицы и определяют скорость их движения.

ЭРНСТ МАХ (Ernst Mach, 1838–1916) — австрийский физик. Родился в Моравии, в Турасе (ныне Туржани, Чехия), образование получил от отца, уделявшего повышенное внимание развитию у сына как теоретических знаний, так и практических навыков. Докторскую степень получил в Венском университете в 1860 году, где начиная с 1895 года и до конца жизни был профессором истории науки. Основное признание

Мах заслужил именно за свои труды в области философии и истории науки, однако немаловажен и его вклад в психологию и физику. Помимо исследования ударных волн ученый сформулировал один из важнейших постулатов теоретической механики, получивший название «принцип Маха» и гласящий, что инерция объекта происходит от его гравитационного взаимодействия с совокупной массой остальной Вселенной.

Универсальные теории

Все силы в природе — это различные проявления единой объединенной силы



В природе действуют четыре фундаментальные силы, и все физические явления происходят в результате взаимодействий между физическими объектами, которые обусловлены одной или несколькими из этих сил. Четыре вида взаимодействий в порядке убывания их силы это:

- *сильное взаимодействие*, удерживающее кварки в составе адронов и нуклоны в составе атомного ядра;
- *электромагнитное взаимодействие* между электрическими зарядами и магнитами;
- *слабое взаимодействие*, которым обусловлены некоторые типы реакций радиоактивного распада;
- *гравитационное взаимодействие*.

В классической механике Ньютона любая сила — это всего лишь сила притяжения или отталкивания, вызывающая изменение характера движения физического тела. В современных квантовых теориях, однако, понятие силы (трактующее теперь как взаимодействие между элементарными частицами) интерпретируется несколько иначе. Силовое взаимодействие теперь считается результатом обмена *частицей-носителем* взаимодействия между двумя взаимодействующими частицами. При таком подходе электромагнитное взаимодействие между, например, двумя электронами обусловлено обменом фотоном между ними, и аналогичным образом обмен другими частицами-посредниками приводит к возникновению трех прочих видов взаимодействий. (Подробнее см. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ.)

Более того, характер взаимодействия обусловлен физическими свойствами частиц-носителей. В частности, закон всемирного тяготения Ньютона и закон Кулона имеют одинаковую математическую формулировку именно потому, что в обоих случаях переносчиками взаимодействия являются частицы, лишенные массы покоя. Слабые взаимодействия проявляются лишь на исключительно малых расстояниях (по сути, лишь внутри атомного ядра), поскольку их носители — калибровочные бозоны — являются очень тяжелыми частицами. Сильные взаимодействия также проявляются лишь на микроскопических расстояниях, но по иной причине: здесь все дело в «пленении кварков» внутри адронов и фермионов (см. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ).

Оптимистичные ярлыки «универсальная теория», «теория всего сущего», «теория великого объединения», «окончательная теория» сегодня используются в отношении любой теории, пытающейся объединить все четыре взаимодействия, рассматривая их в качестве различных проявлений некоей единой и великой силы. Если бы это удалось, картина устройства мира упростилась бы до предела. Вся материя состояла бы лишь из кварков и лептонов (см. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ), и между всеми этими частицами действовали бы силы единой природы. Уравнения, описывающие базовые взаимодействия между ними, были бы столь короткими и

ясными, что уместились бы на почтовой открытке, описывая при этом, по сути, основу всех без исключения процессов, наблюдаемых во Вселенной. По словам нобелевского лауреата, американского физика-теоретика Стивена Вайнберга (Steven Weinberg, 1933–1996) «это была бы глубинная теория, от которой во все стороны стрелами расходилась интерференционная картина устройства мироздания, и более глубоких теоретических основ в дальнейшем не потребовалось бы». Как видно из сплошных сослагательных наклонений в цитате, такой теории до сих пор не существует. Нам остается лишь очертить примерные контуры процесса, который может привести к разработке столь всеобъемлющей теории.

Путь от четырех взаимодействий к одному весьма справедливо называют *объединением*. Чтобы понять, как оно происходит, представьте себе две пары фигуристов на открытом катке при температуре воздуха несколько ниже 0°C (точка замерзания воды). Одна пара обменивается ведром этилового спирта, который при такой температуре не замерзает и находится в жидком состоянии, а вторая — ведром превратившейся в лед воды. Может показаться, что между ними действуют две силы разной природы — одна передается путем обмена жидкостью, другая — путем обмена твердым телом. Но стоит температуре подняться выше нуля, как вода во втором ведре растает и мы увидим, что на самом деле между фигуристами действовала одна и та же сила, ставшая следствием обмена жидкостью. Нам только казалось, что это были две разные силы.

Аналогичным образом все теории объединения исходят из того, что при достаточно высоких энергиях взаимодействия между частицами (когда они имеют скорость, близкую к предельной скорости света) «лед тает», грань между различными видами взаимодействий стирается, и все силы начинают действовать одинаково. При этом теории предсказывают, что происходит это не одновременно для всех четырех сил, а поэтапно, по мере увеличения энергий взаимодействия.

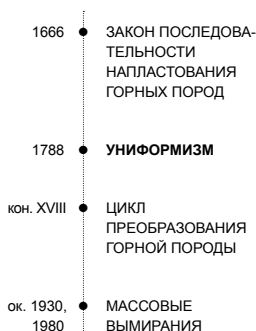
Самый нижний энергетический порог, при котором может произойти первое слияние сил разных типов, крайне высок, однако находится уже в пределах досягаемости самых современных ускорителей. Энергии частиц на ранней стадии большого взрыва были крайне высоки (см. также *ранняя Вселенная*). В первые 10^{-10} с они обеспечивали объединение слабых ядерных и электромагнитных сил в *электрослабое* взаимодействие. Лишь начиная с этого момента окончательно разделились все четыре известные нам силы. До этого момента существовали всего три фундаментальные силы: сильного, электрослабого и гравитационного взаимодействий.

Следующее объединение происходит при энергиях далеко за пределами достижимых в условиях земных лабораторий — они существовали во Вселенной в первые 10^{-35} с ее существования. Начиная с этих энергий, электрослабое взаимодействие объеди-

няется с сильным. Теории, описывающие процесс такого объединения, называются теориями большого объединения (ТБО). Проверить их на экспериментальных установках невозможно, но они хорошо прогнозируют течение целого ряда процессов, протекающих при более низких энергиях, и это служит косвенным подтверждением их истинности. Однако на уровне ТБО наши возможности в плане проверки универсальных теорий исчерпываются. Далее начинается область теорий суперобъединения (ТСО) или всеобщих теорий — и при одном упоминании о них в глазах у физиков-теоретиков загорается блеск. Непротиворечивая ТСО позволила бы объединить гравитацию с единым сильно-электрослабым взаимодействием, и строение Вселенной получило бы простейшее из возможных объяснений.

Униформизм

*Земля
сформировалась
в ходе процессов,
которые
продолжаются и по
сей день*



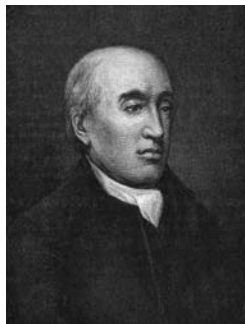
Одним из главных достижений конца XIX — начала XX в. стало открытие того, что писатель Джон Макфи назвал *глубиной веков*, — факта огромной древности нашей планеты. Пионером в этих исследованиях стал шотландский ученый Джеймс Геттон. Он показал, что в формировании Земли участвовали многие процессы — эрозия (разрушение пород и почвы под воздействием ветра и воды), осадконакопление (отложение осадочных пород) и поднятие (процесс образования гор). Геттон утверждал, что нынешний облик Земли можно объяснить воздействием этих процессов в течение длительного периода. Во времена, когда почти все поголовно считали, что прошлое планеты объясняется ее божественным созданием и такими событиями, как Всемирный потоп, эта идея была революционной. Вокруг нее быстро собрались сторонники, а Геттон и его последователи находили все новые и новые доказательства для ее подтверждения. Таким образом, Геттон первым сформулировал известный нам принцип униформизма.

Идеи Геттона влились в строгую и исчерпывающую теорию Чарлза Лайеля. Под девизом «Настоящее — ключ к познанию прошлого» он провозгласил основную идею униформизма: Земля сформировалась под влиянием постоянных геологических факторов, действующих и в современную эпоху. Для примера Лайель измерил на Сицилии толщину излившейся лавы, дабы показать, что гора Этна могла сформироваться в результате накопления этой застывшей лавы. Он также измерил эрозию, вызванную Ниагарским водопадом, и объявил, что настоящее местонахождение водопада можно объяснить постепенным разрушением горных пород под воздействием реки Ниагары.

Учение Лайеля легло в основу всех наук о Земле, опровергая господствующую в то время *теорию катастроф*, согласно которой Земля образовалась в результате единичных катастрофических событий наподобие Всемирного потопа. Униформизм со временем расширился до границ учения под названием *градуализм*, в котором считается, что процессы прошлого не только продолжаются в настоящем, но и протекают с той же скоростью. Это пристрастие к градуализму среди европейских ученых было так велико, что когда появились свидетельства существования в прошлом единичных катастрофических событий, это было воспринято с совершенно неоправданным скептицизмом и враждебностью. Например, гипотеза Альвареса, согласно которой массовое вымирание динозавров было вызвано столкновением Земли с астероидом, с трудом находила признание из-за этого предубеждения. (В действительности же такое единичное событие, как столкновение с астероидом, не противоречит униформизму в широком смысле слова — это просто еще одно природное явление.)

Как ни странно звучит, но теперь оказалось, что древнее пугало геологов — Всемирный потоп — на самом деле могло иметь историческую основу: разлив океанических бассейнов после последнего ледникового периода. Кажется, сейчас предубеждение

ученых против теории катастроф в значительной мере исчезло, и мы стремимся интерпретировать данные и рассматривать прошлое нашей планеты с точки зрения разрозненных единичных событий вопреки основам градуализма.



ДЖЕЙМС ГЕТТОН (Хаттон) (James Hutton, 1726–1797) — шотландский геолог. Родился в семье торговца в Эдинбурге. В те времена Эдинбург представлял собой одну из интеллектуальных столиц Европы, и Геттон встречался в обществе с такими людьми, как Адам Смит (основатель политической экономии) и Джеймс Уатт (изобретатель парового двигателя). Геттон получил степень доктора медицины в Эдинбургском университете, а также обучался в Париже и Лейдене, но никогда не занимался медицинской практикой. Позже он изучил право и успешно управлял промышленным предприятием. В 1754 году Геттон вступил во владение небольшой фермой и начал изучать сельское хозяйство и химию, что и привело его в конце концов к минералогии и геологии. Проведя многие горы в путешествиях и исследованиях, он опубликовал в 1788 году труд «Теория Земли», благодаря которому геология выросла в современную научную дисциплину.

ЧАРЛЗ ЛАЙЕЛЬ (Лайелл) (Charles Lyell, 1797–1875) — шотландский геолог. Родился в городе Киннорди в известной шотландской семье, отец его был ботаником. Лайель изучал право в Оксфордском университете; услышанные там лекции по геологии пробудили его интерес к этой науке. Некоторое время работал адвокатом, так как из-за напряженного чтения его беспокоили глаза, но затем отказался от адвокатской практики и полностью посвятил себя геологии. Лайель много путешествовал, наблюдая геологические формации, и его труд «Основы геологии», опубликованный в 1830 году, стал одной из самых значительных научных книг. Например, Чарлз Дарвин взял экземпляр этой книги с собой в путешествие на корабле «Бигль» и использовал ее при написании своего труда «Происхождение видов». Однако Лайель не торопился принять дарвиновскую теорию эволюции и сомневался, что она применима к человеку.

Уравнение Бернулли

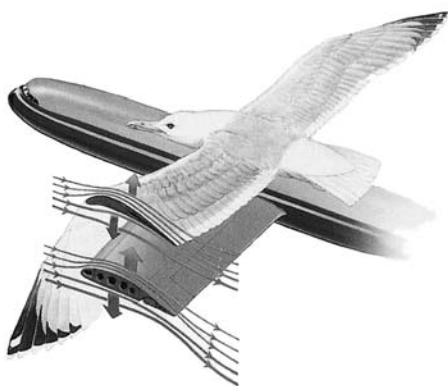
Чем выше скорость потока идеальной жидкости, тем ниже ее давление

- 1687 • ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
- 1738 • **УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ**
- 1842 • ТЕРМОДИНАМИКА, ПЕРВОЕ НАЧАЛО

Вам не приходило в голову, почему самолеты весом в сотни тонн, разогнавшись, отрываются от взлетно-посадочной полосы и устремляются ввысь? Если нет, то для начала, когда в следующий раз будете в аэропорту, внимательно приглядитесь к разрезу крыла самолета. Прежде всего обратите внимание, что крыло в разрезе представляет собой сочетание двух выпуклых линий, причем кривизна верхнего контура больше, чем кривизна нижнего, в результате чего площадь верхней поверхности крыла больше площади его нижней поверхности. Именно эта малозаметная для непосвященных деталь конструкции и позволяет самолету отрываться от поверхности земли.

А основополагающая идея здесь такова: воздушный поток разрезается надвое передней кромкой крыла, и часть его обтекает крыло вдоль верхней поверхности, а вторая часть — вдоль нижней. Чтобы двум потокам сомкнуться за задней кромкой крыла, не образуя вакуума, воздух, обтекающий верхнюю поверхность крыла, должен двигаться быстрее относительно самолета, чем воздух, обтекающий нижнюю поверхность, поскольку ему нужно преодолеть большее расстояние. И тут в действие вступает эффект, открытый Даниилом Бернулли, одним из представителей настоящей потомственной династии неутомимых научных гениев родом из Швейцарии. (В авторитетном «Словаре научных биографий», *Dictionary of Scientific Biography*, упомянуто не меньше восьми представителей фамилии Бернулли.) Отец Даниила — Иоганн Бернулли — был видным профессором математики в университете г. Гронинген. Позже Иоганн Бернулли переехал в Базель и возглавил кафедру греческого языка местного университета, однако после смерти брата вернулся в Гронинген, чтобы сменить его на посту заведующего кафедрой математики. Книга Даниила «Гидродинамика» (*Hydrodynamica*) была опубликована в 1738 году практически одновременно с книгой Иоганна Бернулли «Гидравлика» (*Hydraulica*), которая по взаимной договоренности между сыном и отцом была, однако, специально датирована 1732 годом, чтобы в случае чего в семье не возникло недоразумений относительно приоритетов в открытиях. Вот такая семья!

Эффект Бернулли — это то, благодаря чему птицы и самолеты могут летать. Разрез крыла у них практически одинаковый: за счет сложной формы крыла создается разница обтекающих его сверху и снизу воздушных потоков, что позволяет телу подниматься вверх



Объединив законы механики Ньютона с законом сохранения энергии (см. первое начало термодинамики) и условием неразрывности жидкости, Даниил Бернулли смог вывести уравнение, согласно которому давление со стороны текучей среды падает с увеличением скорости потока этой среды (понятие «текучая среда» включает жидкость или газ). В случае с самолетом воздух обтекает крыло самолета снизу медленнее, чем сверху. И благодаря этому эффекту обратной зависимости давления от скорости давление воздуха снизу, направленное вверх, оказывается больше давления сверху, направленного вниз. В результате по мере набора самолетом скорости возрастает направленная вверх разность давлений и на крылья самолета действует нарастающая по мере разгона *подъемная сила*. Как только она начинает превышать силу гравитационного притяжения самолета к земле, самолет в буквальном смысле взмывает в небо. Эта же сила удерживает самолет в горизонтальном полете: на крейсерской скорости и высоте подъемная сила уравнивает силу тяжести.

Если вы часто летаете самолетом, вы не могли не заметить и еще одного явления, напрямую связанного с эффектом Бернулли. Самолет в аэропорту вашего родного города в разные дни берет разгон по взлетно-посадочной полосе в противоположных направлениях и садится на нее также то в одном, то в другом направлении. Выбор направления не произволен: он зависит от направления ветра. При движении навстречу преобладающему ветру скорость воздушного потока, обтекающего крыло самолета, равна скорости самолета относительно земли *плюс* скорость самого ветра относительно земли. Поэтому при движении навстречу ветру, *скорость отрыва* от земли, при которой подъемная сила, описываемая уравнением Бернулли, начинает превышать силу тяжести, оказывается ниже и самолету требуется меньшая длина разбега или торможения после посадки. Тем самым снижается риск выхода за пределы взлетно-посадочной полосы и экономится горючее за счет того, что часть подъемной силы создается благодаря энергии встречного ветра.

С эффектом Бернулли вы можете встретиться также, когда сидите ненастным вечером дома у камина. Во время особенно сильных порывов ветра языки пламени взмывают вверх, в дымоход. А происходит следующее: когда скорость ветра у выходного отверстия трубы возрастает, давление в этом месте падает. Более высокое давление внутри дома буквально «выталкивает» пламя из камина в дымоход. Вы, наверное, замечали спиральные лопасти вокруг выходных отверстий заводских труб. Они установлены там с той же целью: направляя ветер вокруг и над отверстием трубы, они способствуют более эффективному выбросу отработанных газов.

Сам я использую эффект Бернулли весьма неожиданным образом. Для поддержания физической формы я у себя в Вашингтоне регулярно совершаю пробежки на роликовых коньках по специальной заасфальтированной дорожке, идущей вдоль реки

Потомак. На трек я выхожу неподалеку от Национального аэропорта и, еще паркуя свою машину, первым делом смотрю, в каком направлении взлетают или приземляются авиалайнеры. Если они садятся или взлетают в том направлении, куда я собираюсь прокатиться, значит, все в порядке и на обратном пути мне будет помогать попутный ветер. Если же они садятся мне навстречу, значит, дистанцию пробежки лучше сократить, поскольку на обратном пути ветер будет дуть мне в лицо, а я этого не люблю. Тем самым эффект Бернулли позволяет мне точно дозировать ежедневные физические нагрузки.

ДАНИИЛ БЕРНУЛЛИ (Daniel Bernoulli, 1700–82) — швейцарский математик, физик и физиолог. Родился в Гронингене (Нидерланды) в семье потомственных математиков и интеллектуалов. Первоначально получил медицинское образование и в 1725 году принял приглашение Петербургской академии наук и занял пост профессора кафедры физиологии. Обнаружив в этой области множество нерешенных задач из области теоретической физики и, в частности, динамики движения жидкости (крови) в сосудах, вернулся к математичес-

кому описанию физических процессов и в 1730 году возглавил кафедру чистой математики Петербургской академии. В 1733 году вернулся на родину в Базель, где возглавил кафедру анатомии и ботаники местного университета, а с 1750 года — кафедру экспериментальной физики, которой и руководил до своей смерти. В результате изучения гидродинамических зависимостей сформулировал так называемый *принцип Бернулли* и на столетие предвосхитил зарождение молекулярно-кинетической теории.

Уравнение Клапейрона—Клаузиуса

Теплота испарения возрастает по мере роста температуры и давления пара

- 1761 • ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ
- 1798 • МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
- 1834 • **УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА—КЛАУЗИУСА**
- 1849 • МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Как мы знаем из молекулярно-кинетической теории, атомы или молекулы в жидкостях и газах находятся в состоянии постоянного движения. Время от времени отдельные молекулы жидкости, движущиеся достаточно быстро, могут «срываться» с ее поверхности. Таким образом, над любой жидкостью какое-то количество молекул данного вещества будет находиться в виде пара. Давление этих молекул, если нет посторонних примесей, называется давлением пара этого вещества. Иногда можно почувствовать это присутствие пара над жидкостью — вспомните характерное ощущение влажности на берегу моря или океана.

Нам также известно, что для перевода вещества из жидкого в газообразное состояние (см. фазовые переходы) нужно затратить некоторую энергию. Эта энергия называется *теплотой испарения*, или *теплотой парообразования*. Уравнение Клапейрона—Клаузиуса как раз и описывает отношение между теплотой испарения H , давлением пара p и температурой T вещества:

$$\ln p = H/RT + \text{константа},$$

где $\ln p$ — натуральный логарифм, взятый от величины давления пара, а R — постоянная Ридберга. Температура T измеряется в кельвинах.

Первым эту зависимость в 1834 году вывел инженер-конструктор паровых машин Бенуа Клапейрон. Естественно, в силу его специальности, Клапейрона интересовала прежде всего теплота парообразования, и он использовал свое уравнение преимущественно в инженерно-прикладных целях. Для науки же уравнение теплоты фазового перехода было повторно открыто почти два десятилетия спустя Рудольфом Клаузиусом, автором формулировки второго начала термодинамики.

Чаще всего уравнение Клапейрона—Клаузиуса используется для простого расчета или измерения теплоты испарения различных веществ. Измеряя давление пара при различных температурах и нанося его на график, по одной оси которого откладывается значение $\ln p$, а по другой — величина $1/T$, ученые по полученной линейной зависимости (углу наклона прямой) определяют теплоту испарения вещества.

БЕНУА ПОЛЬ ЭМИЛЬ КЛАПЕЙРОН (Benoît Paul Émile Clapeyron, 1799–1864) — французский физик и инженер. Родился Париже. Окончил Политехническую школу и Школу минного дела. В 1820–1830 гг. работал в Институте инженеров путей сообщения в Петербурге. По возвращении во Францию стал профессором Школы мостов и дорог в Париже. Прославился как про-

ектировщик железных дорог, конструктор железнодорожных мостов и паровозов. Доказал «теорему о трех моментах», используемую для расчета несущих конструкций с тремя и более точками опоры. Однако самый большой вклад в науку Клапейрон внес благодаря изучению тепловых процессов, за что и был избран действительным членом Академии наук Франции.

РУДОЛЬФ ЮЛИУС ЭМАНУЭЛЬ КЛАУЗИУС (Rudolf Julius Emanuel Clausius, 1822–88) — немецкий физик. Родился в Кёслине (ныне Кошалин, Польша) в семье пастора. Учился в частной школе, директором которой был его отец. В 1848 году окончил Берлинский университет. По окончании университета предпочел физику и математику истории, которую первоначально изучал. Преподавал в Берлине и Цюрихе, занимал кафедру профессора физики университетов в Цюрихе, Вюрцбурге

и Бонне. С 1884 года — ректор Боннского университета. Главные работы Клаузиуса посвящены основам термодинамики и кинетической теории газов. К сожалению, тяжелые ранения, полученные во время службы добровольцем в качестве санитара во время Франко-прусской войны, помешали Клаузиусу в полной мере реализовать свой научный потенциал. Тем не менее, уже после войны и ранений, именно он сформулировал второе начало термодинамики в его современном виде.

Уравнение состояния идеального газа

Термодинамические характеристики идеального газа описываются одним простым уравнением

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1662	• ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА
1787	• ЗАКОН ШАРЛЯ
1798	• МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1827	• БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
1834	• УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
1849	• МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

* Эта формула была получена в 1874 году Д.И. Менделеевым путем объединения закона Авогадро и общего газового закона ($pV/T = \text{const}$), сформулированного в 1834 году Бенуа Полем Эмилем Клапейроном. Поэтому этот закон (в Европе, по крайней мере) принято называть законом Менделеева—Клапейрона. По существу, этот закон позволил ввести все ранее сделанные эмпирические заключения о характере поведения газов в рамки новой молекулярно-кинетической теории. — *Примечание переводчика*

Математическая запись универсального газового закона проста:

$$pV = nRT^*.$$

Она содержит основные характеристики поведения газов: p , V и T — соответственно давление, объем и абсолютная температура газа (в градусах Кельвина), R — *универсальная газовая постоянная*, общая для всех газов, а n — число, пропорциональное числу молекул или атомов газа (так называемое число *молей* газа — см. ЗАКОН АВОГАДРО).

Чтобы понять, как работает этот закон, давайте представим, что температура газа постоянна. В этом случае в правой части уравнения получается константа. Значит, произведение давления и объема при неизменной температуре оказывается неизменным. Повышение давления сопровождается уменьшением объема, и наоборот. Это не что иное, как ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА — одна из первых экспериментально полученных формул, описывающих поведение газов. С другой стороны, при постоянном давлении (например, внутри воздушного шарика, где давление газа равно атмосферному) повышение температуры сопровождается увеличением объема. А это — ЗАКОН ШАРЛЯ, другая экспериментальная формула поведения газов. ЗАКОН АВОГАДРО и ЗАКОН ДАЛЬТОНА также являются следствиями универсального газового закона.

Этот закон представляет собой то, что в физике принято называть *уравнением состояния вещества*, поскольку он описывает характер изменения свойств вещества при изменении внешних условий. Строго говоря, этот закон в точности выполняется только для *идеального газа*. Идеальный газ представляет собой упрощенную математическую модель реального газа: молекулы считаются движущимися хаотически, а соударения между молекулами и удары молекул о стенки сосуда — упругими, то есть не приводящими к потерям энергии в системе. Такая упрощенная модель очень удобна, поскольку позволяет обойти очень неприятную трудность — необходимость учитывать силы взаимодействия между молекулами газа. И это себя оправдывает, поскольку в природных условиях поведение большинства реальных газов практически не отличается от поведения идеального газа — отклонения в поведении практически всех природных газов, например атмосферного азота и кислорода, от поведения идеального газа не превышают 1%. Это позволяет ученым спокойно включать уравнение состояния идеального газа даже в весьма сложные теоретические расчеты. Например, астрономы при моделировании горячих звезд обычно считают вещество звезды идеальным газом и весьма точно прогнозируют давления и температуры внутри них. (Заметьте, что вещество внутри звезды ведет себя как идеальный газ, хотя его плотность несопоставимо выше плотности любого вещества в земных условиях. А дело в том, что вещество звезды состоит

из полностью ионизированных ядер водорода и гелия — то есть из частиц значительно меньшего диаметра, чем диаметр атомов земных газов.) В будущем, по мере совершенствования теоретических методов, возможно, будут выведены более точные уравнения для описания состояния реальных газов с учетом их характеристик на молекулярном уровне.

Уравнение Шрёдингера

Дуальная корпускулярно-волновая природа квантовых частиц описывается дифференциальным уравнением

1900	● ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА
1924	● СООТНОШЕНИЕ ДЕ БРОЙЛЯ
1925	● КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	● УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1927	● ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ
1927	● ОПЫТ ДЭВИССОНА—ДЖЕРМЕРА

Согласно фольклору, столь распространенному среди физиков, случилось это так: в 1926 году физик-теоретик по имени Эрвин Шрёдингер выступал на научном семинаре в Цюрихском университете. Он рассказывал о странных новых идеях, витающих в воздухе, о том, что объекты микромира часто ведут себя скорее как волны, нежели как частицы. Тут слова попросил пожилой преподаватель и сказал: «Шрёдингер, вы что, не видите, что все это чушь? Или мы тут все не знаем, что волны — они на то и волны, чтобы описываться волновыми уравнениями?» Шрёдингер воспринял это как личную обиду и задался целью разработать волновое уравнение для описания частиц в рамках квантовой механики — и с блеском справился с этой задачей.

Тут необходимо сделать пояснение. В нашем обыденном мире энергия переносится двумя способами: материей при движении с места на место (например, едущим локомотивом или ветром) — в такой передаче энергии участвуют частицы — или волнами (например, радиоволнами, которые передаются мощными передатчиками и ловятся антеннами наших телевизоров). То есть в макромире, где живем мы с вами, все носители энергии строго подразделяются на два типа — корпускулярные (состоящие из материальных частиц) или волновые. При этом любая волна описывается особым типом уравнений — *волновыми уравнениями*. Все без исключения волны — волны океана, сейсмические волны горных пород, радиоволны из далеких галактик — описываются однопипными волновыми уравнениями. Это пояснение нужно для того, чтобы было понятно, что, если мы хотим представить явления субатомного мира в терминах волн распределения вероятности (см. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА), эти волны также должны описываться соответствующим волновым уравнением.

Шрёдингер применил к понятию волн вероятности классическое дифференциальное уравнение волновой функции и получил знаменитое уравнение, носящее его имя. Подобно тому как обычное уравнение волновой функции описывает распространение, например, ряби по поверхности воды, уравнение Шрёдингера описывает распространение волны вероятности нахождения частицы в заданной точке пространства. Пики этой волны (точки максимальной вероятности) показывают, в каком месте пространства скорее всего окажется частица. Хотя уравнение Шрёдингера относится к области высшей математики, оно настолько важно для понимания современной физики, что я его все-таки здесь приведу — в самой простой форме (так называемое одномерное стационарное уравнение Шрёдингера). Вышеупомянутая волновая функция распределения вероятности, обозначаемая греческой буквой ψ («пси»), является решением следующего дифференциального уравнения (ничего страшного, если оно вам непонятно; главное —

примите на веру, что это уравнение свидетельствует о том, что вероятность ведет себя как волна):

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} (E - U) \psi = 0,$$

где x — расстояние, h — постоянная планка, а m , E и U — соответственно масса, полная энергия и потенциальная энергия частицы.

Картина квантовых событий, которую дает нам уравнение Шрёдингера, заключается в том, что электроны и другие элементарные частицы ведут себя подобно волнам на поверхности океана. С течением времени пик волны (соответствующий месту, в котором скорее всего будет находиться электрон) смещается в пространстве в соответствии с описывающим эту волну уравнением. То есть то, что мы традиционно считали частицей, в квантовом мире ведет себя во многом подобно волне.

Когда Шрёдингер впервые опубликовал свои результаты, в мире теоретической физики разразилась буря в стакане воды. Дело в том, что практически в то же время появилась работа современника Шрёдингера — Вернера Гейзенберга (см. принцип неопределенности Гейзенберга), в которой автор выдвинул концепцию «матричной механики», где те же задачи квантовой механики решались в другой, более сложной с математической точки зрения матричной форме. Переполюх был вызван тем, что ученые попросту испугались, не противоречат ли друг другу два в равной мере убедительных подхода к описанию микромира. Волнения были напрасны. Сам Шрёдингер в том же году доказал полную эквивалентность двух теорий — то есть из волнового уравнения следует матричное, и наоборот; результаты же получаются идентичными. Сегодня используется в основном версия Шрёдингера (иногда его теорию называют «волновой механикой»), так как его уравнение менее громоздкое и его легче преподавать.

Однако представить себе и принять, что нечто вроде электрона ведет себя как волна, не так-то просто. В повседневной жизни мы сталкиваемся либо с частицей, либо с волной. Мяч — это частица, звук — это волна, и все тут. В мире квантовой механики все не так однозначно. На самом деле — и эксперименты это вскоре показали — в квантовом мире сущности отличаются от привычных нам объектов и обладают другими свойствами. Свет, который мы привыкли считать волной, иногда ведет себя как частица (которая называется *фотон*), а частицы вроде электрона и протона могут вести себя как волны (см. принцип дополнительности).

Эту проблему обычно называют *двойственной*, или *дуальной*, *корпускулярно-волновой природой* квантовых частиц, причем свойственна она, судя по всему, всем объектам субатомного мира (см. теорема Белла). Мы должны понять, что в микромире наши обыденные интуитивные представления о том, какие формы может принимать материя и как она себя может вести, просто неприме-

нимы. Сам факт, что мы используем волновое уравнение для описания движения того, что привыкли считать частицами, — яркое тому доказательство. Как уже отмечалось во введении, в этом нет особого противоречия. Ведь у нас нет никаких веских оснований полагать, будто то, что мы наблюдаем в макром мире, должно с точностью воспроизводиться на уровне микромира. И тем не менее дуальная природа элементарных частиц остается одним из самых непонятных и тревожащих аспектов квантовой механики для многих людей, и не будет преувеличением сказать, что все беды начались с Эрвина Шрёдингера.



Эрвин Шрёдингер — один из основоположников квантовой механики. Его уравнение волновой функции стало образцом проявления нестандартного мышления при изучении проблем микромира

ЭРВИН ШРЁДИНГЕР (Erwin Schroedinger, 1887–1961) — австрийский физик-теоретик. Родился в Вене в семье богатого промышленника, питавшего интерес к наукам; получил хорошее домашнее образование. Учась в Венском университете, Шрёдингер до второго курса не посещал лекций по теоретической физике, однако докторскую диссертацию защитил именно по этой специальности. В годы Первой мировой войны служил офицером в артиллерийских войсках, но и тогда находил время для изучения новых статей Альберта Эйнштейна.

После войны, сменив должности в нескольких университетах, Шрёдингер обосновался в Цюрихе. Там он и разработал свою теорию волновой механики, которая и поныне является фундаментальной основой всей современной квантовой механики. В 1927 году занял должность завкафедрой теоретической физики Берлинского университета, сменив на этом посту Макса Планка. Будучи последовательным антифашистом, Шрёдингер в 1933 году эмигрировал в Великобританию, стал профессором Оксфордского университета и в том же году получил Нобелевскую премию по физике.

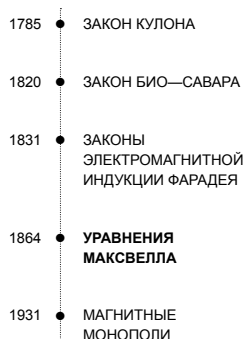
Тоска по родине, однако, заставила Шрёдингера в 1936 году вернуться в Австрию, в город Грац, где он приступил к работе в местном университете. После аншлюса Австрии в марте 1938 года Шрёдингер был уволен без

предупреждения и поспешно вернулся в Оксфорд, успев взять с собой лишь минимум личных вещей. За этим последовала цепочка буквально детективных событий. Эймон де Валера (Eamon de Valera), премьер-министр Ирландии, в свое время был профессором математики в Оксфорде. Желая заполучить великого ученого к себе на родину, де Валера распорядился о строительстве специально под него Института фундаментальных исследований в Дублине. Пока институт строился, Шрёдингер принял приглашение прочитать курс лекций в Генте (Бельгия). Когда в 1939 году разразилась Вторая мировая война и Бельгия была молниеносно оккупирована фашистскими войсками, Шрёдингер неожиданно для себя оказался застигнутым врасплох в стане врага. Тут-то ему на выручку и пришел де Валера, снабдив ученого письмом о благонадежности, по которому Шрёдингеру удалось выехать в Ирландию. В Дублине австриец оставался до 1956 года, после чего вернулся на родину, в Вену, чтобы возглавить специально созданную для него кафедру.

В 1944 году Шрёдингер опубликовал книгу «Что такое жизнь?», которая сформировала мировоззрение целого поколения ученых, вдохновив их видением физики будущего как науки, незапятнанной военным применением ее достижений. В этой же книге ученый предсказал существование генетического кода, скрытого в молекулах жизни.

Уравнения Максвелла

Все электромагнитные явления описываются системой из четырех уравнений



К середине XIX века ученые открыли целый ряд законов, описывающих электрические и магнитные явления и связи между ними. В частности, были известны:

- ЗАКОН КУЛОНА, описывающий силу взаимодействия между электрическими зарядами,
- ТЕОРЕМА ГАУССА, исключающая возможность существования в природе изолированных магнитных зарядов (магнитных монополей),
- ЗАКОН БИО—САВАРА, описывающий магнитные поля, возбуждаемые движущимися электрическими зарядами (см. также ЗАКОН АМПЕРА и ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА), и
- ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ, согласно которым изменение магнитного потока порождает электрическое поле и индуцирует ток в проводниках (см. также ПРАВИЛО ЛЕНЦА).

Эти четыре группы законов и были обобщены Джеймсом Клерком Максвеллом, которому удалось объединить их в стройную систему (получившую его имя), состоящую из четырех уравнений и исчерпывающим образом описывающую *все* измеримые характеристики электромагнитных полей и электрических токов, которая названа его именем. Прежде всего Максвеллу мы обязаны строгим математическим описанием всех известных законов электромагнетизма (Фарадей, например, вообще формулировал все открытые им законы исключительно в словесной форме). Во-вторых, в сформулированную им систему Максвелл внес немало принципиально новых идей, отсутствовавших в исходных законах. В-третьих, он придал всем электромагнитным явлениям строгое теоретическое обоснование. И, наконец, в-четвертых, на основе составленной им системы уравнений Максвелл сделал ряд важных предсказаний и открытий, включая предсказание существования СПЕКТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Давайте начнем со второго пункта. Согласно закону Био—Савара, электрический ток, проходящий по проводнику, возбуждает вокруг него магнитное поле. А что, если электрический ток протекает не по проводнику, а через плоский конденсатор? Фактически электроны не перескакивают с одной пластины на другую, однако ток все равно проходит через конденсатор, поскольку электроны одной пластины взаимодействуют с электронами другой пластины, находясь в непосредственной близости друг от друга и, в силу взаимного отталкивания, передают друг другу колебания (так называемые *осцилляции*) переменного тока, обеспечивая тем самым протекание тока через, казалось бы, очевидный разрыв в электрической цепи.

Максвелл понял, что закон Ампера в этой ситуации не объясняет прохождение тока. Он также понял, что, хотя заряды с пластины на пластину не переходят, электрическое поле (сила, которая возникла бы, если бы мы поместили между пластинами

воображаемый электрический заряд) увеличивается. Исходя из этого он постулировал, что в мире электромагнитных явлений изменяющееся электрическое поле может играть ту же роль в порождении магнитного поля, что и электрический ток. Максвелл ввел принципиально новое понятие *тока смещения*, добавив его в качестве отдельного слагаемого в обобщенный закон Ампера — первое уравнение Максвелла. И с тех пор наличие токов смещения раз за разом безоговорочно подтверждается экспериментальными данными.

Внеся столь важное дополнение в первое из четырех уравнений, Максвелл на основании составленной им системы уравнений чисто математически вывел фантастическое по тем временам предсказание: в природе должны существовать *электромагнитные волны*, формирующиеся в результате колебательного взаимодействия электрических и магнитных полей, и скорость их распространения должна быть пропорциональна силе между

ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ (James Clerk Maxwell, 1831–79) — шотландский физик, один из самых выдающихся теоретиков XIX столетия. Родился в Эдинбурге, происходит из старинного дворянского рода. Учился в Эдинбургском и Кембриджском университетах. Первую научную статью (о методе начертания идеального овала) опубликовал в возрасте 14 лет. Максвелл занимал должность профессора кафедры экспериментальной физики Кембриджского университета, когда в 48 лет безвременно скончался от рака.

Первым большим теоретическим исследованием Клерка Максвелла, как его часто именуют, стала работа по теории цвета и цветного зрения. Он первым показал, что вся гамма видимых цветов может быть получена путем смешения трех основных цветов — красного, желтого и синего; объяснил природу дальтонизма (дефекта зрения, приводящего к нарушению восприятия цветовой гаммы) врожденным или приобретенным дефектом рецепторов сетчатки глаза. Он первым изобрел реально работающий цветной фотоаппарат (с использованием тартановой ленты в качестве светочувствительного материала) и продемонстрировал его работу на собрании Лондонского королевского общества в 1861 году. Как бы между делом тщательно рассчитал возможную структуру колец Сатурна и доказал, что они не могут быть жидкими, как ранее считалось, а должны состоять из твердых частиц.

Максвелл внес важный вклад в развитие многих отраслей естество-

знания. Но, пожалуй, наиважнейшее его достижение состоит в развитии теории электромагнетизма и постановке ее на прочную математическую основу. Заниматься этим вопросом Максвелл начал в середине 1850-х годов. По иронии судьбы Максвелл твердо верил в существование светоносного эфира и все свои уравнения выводил исходя из того, что эфир существует и в нем возбуждаются электромагнитные волны, имеющие *как следствие* конечную скорость распространения. До результатов опыта Майкельсона—морли, опровергающих теорию существования эфира, Максвелл не дождался. (Как не дождал он и до безоговорочного признания своей теории. Окончательно волновая природа света и правильность уравнений Максвелла были подтверждены опытами Герца лишь в 1888 году, а до того времени большинство физиков, включая самого Герца, с недоверием относились к столь смелой теории. — *Примечание переводчика.*) К счастью для него и для нас, теорию Максвелла этот опыт не отменил, поскольку уравнения Максвелла выполняются независимо от наличия или отсутствия эфира.

Наконец, Максвелл внес огромный вклад в становление статистической механики, найдя распределение молекул газа по скоростям, ставшее краеугольным камнем молекулярно-кинетической теории. Наконец, сам же Максвелл и подметил несовершенство этой теории, сформулировав парадокс, позже получивший название демона Максвелла.

зарядами или между магнитами. Решив составленное им дифференциальное волновое уравнение, Максвелл с удивлением обнаружил, что скорость распространения электромагнитных колебаний совпадает со скоростью света, к тому времени уже определенной экспериментально. Это означало, что столь знакомое всем явление, как свет, представляет собой электромагнитные волны! Более того, Максвелл предсказал существование электромагнитных волн во всем известном спектре — от радиоволн до гамма-лучей. Таким образом, доскональное теоретическое исследование природы электричества и магнетизма привело к открытию, принесшему человечеству неисчислимые блага — от микроволновых печей до рентгеновских установок в стоматологических клиниках.

Уравнения равно- ускоренного движения

При постоянном ускорении скорость физического тела равномерно возрастает, начиная с нуля

Расстояние, пройденное равноускоренным телом начиная с нулевой скорости, пропорционально квадрату времени

1537	●	РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1687	●	ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ НЬЮТОНА
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Галилео Галилей относится к числу людей, прославившихся совсем не тем, за что им следовало бы пользоваться заслуженной славой. Все помнят, как этого итальянского естествоиспытателя в конце жизни подвергли суду инквизиции по подозрению в ереси и заставили отречься от убеждения, что Земля вращается вокруг Солнца. На самом же деле этот судебный процесс на развитие науки практически не повлиял — в отличие от ранее проделанных Галилеем опытов и сделанных им на основании этих опытов выводов, которые фактически предопределили дальнейшее развитие механики как раздела физической науки.

Движение физических тел изучалось с незапамятных времен, и основы кинематики были заложены задолго до рождения Галилея. Элементарные задачи описания движения сегодня изучают уже в начальной школе. Например, все знают, что если автомобиль равномерно движется со скоростью 20 км/ч, то за 1 час он проедет 20 км, за 2 часа — 40 км, за 3 часа — 60 км и т.д. И до тех пор, пока машина движется с постоянной скоростью (стрелка спидометра не отклоняется от заданного деления на его шкале), рассчитать пройденное расстояние труда не составляет — достаточно умножить скорость машины на время, которое она находится в пути. Этот факт известен настолько давно, что имя его первооткрывателя наглухо затерялось в тумане античных времен.

Сложности возникают, как только объект начинает двигаться с переменной скоростью. Трогаетесь вы, к примеру, от светофора — и стрелка спидометра ползет от нуля вверх, пока вы не отпустите педаль газа и не нажмете педаль тормоза. На самом деле стрелка спидометра на месте практически не стоит — она все время движется вверх или вниз. В начале каждой отдельно взятой секунды реальная скорость машины одна, а в конце секунды — уже другая, и пройденный ею за секунду путь точно рассчитать не так-то просто. Эта проблема — описание движения с ускорением — волновала естествоиспытателей задолго до Галилея.

Сам же Галилео Галилей подошел к ней новаторски и фактически задал направление всего дальнейшего развития современной методологии естествознания. Вместо того чтобы сидеть и умоузырительно решать вопрос о движении ускоряющихся тел, он придумал гениальные по своей простоте опыты, позволяющие экспериментально проследить, что в действительности происходит с ускоряющимися телами. Нам может показаться, что ничего особенно новаторского в таком подходе нет, однако до Галилея основным методом решения проблем «натурфилософии» — о чем говорит само название тогдашней естественной науки — было умоузырительное осмысление происходящего, а не его экспериментальная проверка. Сама идея проведения физических экспериментов была в то время по-настоящему радикальной. Чтобы понять идею опытов Галилея, представьте себе тело, падающее под воздействием силы земного притяжения. Выпустите какой-нибудь предмет из рук — и он упадет на пол; при этом в первое мгновение скорость его дви-

жения будет равна нулю, но он тут же начнет ускоряться — и будет продолжать ускоряться, пока не упадет на землю. Если мы сможем описать падение предмета на землю, мы затем сможем распространить это описание и на общий случай равноускоренного движения.

Сегодня измерить динамику падения предмета не сложно — можно с большой точностью зафиксировать время от начала падения до любой промежуточной точки. Однако во времена Галилея точных секундомеров не было, да и любые механические часы по современным стандартам были весьма примитивны и неточны. Поэтому ученый первым делом разработал экспериментальный аппарат, позволяющий обойти эту проблему. Во-первых, он «разбавил» силу тяжести, замедлив время падения до разумных с точки зрения имеющихся инструментов измерения пределов, а именно — заставил тела скатываться по наклонной плоскости, а не просто падать отвесно. Затем он придумал, как обойти неточность современных ему механических часов, натянув на пути скатывающегося по наклонной поверхности шара ряд струн, чтобы он задевал их по дороге и можно было хронометрировать его движение по извлекаемым звукам. Раз за разом спуская шар по наклонной под рядом струн, Галилей перемещал струны, пока не добился, чтобы шар на всем своем пути, задевая натянутые струны, извлекал звуки через равные промежутки времени.

В конце концов Галилею удалось накопить достаточный объем экспериментальной информации о равноускоренном движении. Тело, стартующее из состояния покоя, далее движется так, как это описано в самом начале данной статьи. В переводе на язык математических символов равноускоренное движение описывается следующими уравнениями:

$$v = at \quad \text{и} \quad d = \frac{1}{2} at^2,$$

где a — ускорение, v — скорость, d — расстояние, пройденное телом за время t . Чтобы прочувствовать смысл этих уравнений, достаточно пристально пронаблюдать за падением предметов. Скорость падения зримо возрастает со временем, прошедшим с начала падения. Это следует из первого уравнения. Очевидно и то, что в процессе падения на прохождение первой части пути у тела уходит больше времени, чем на оставшуюся часть пути. Именно это и описывает вторая формула, поскольку из нее следует, что чем дольше тело ускоряется, тем больший отрезок пути оно преодолевает за одно и то же время.

Галилей сделал и еще одно важное наблюдение о теле, находящемся в состоянии свободного падения под воздействием силы гравитационного притяжения, хотя и не смог подтвердить его непосредственными измерениями. Экстраполировав результаты, полученные им при наблюдении скатывающихся по наклонной плоскости предметов, он сумел определить ускорение свободного

Суд над Галилеем

Суд римско-католической инквизиции над Галилеем — такой же стойкий околонуточный миф, как и яблоко, якобы упавшее на голову Ньютону. И, как обычно и бывает в мифологии, к действительности эта история имеет мало отношения. Если верить этому мифу, Галилей привел суду неопровержимые доказательства правильности взглядов Николая Коперника на устройство Солнечной системы, согласно которым Земля вращается вокруг Солнца, а не наоборот, а затем был сломлен церковью, желавшей подавить эту теорию, и принужден публично отречься от своих взглядов. На самом же деле Коперник, будучи весьма изощренным церковным политиком, представил свою гелиоцентрическую теорию в таком виде, что она вполне удовлетворяла богословские авторитеты того времени (в частности, называя ее не иначе, чем гипотезой). Теория Коперника широко обсуждалась до Галилея и учеными, и даже самими ватиканскими богословами.

В 1616 году Галилей опубликовал книгу *«Звездный вестник»*, в которой обобщил телескопические наблюдения и привел сильные доводы в пользу системы Коперника. Причем написана книга была на итальянском, а не на латыни, что сделало ее доступной не только ученым, но и широкому кругу образованных читателей. В ответ на упреки, что книга якобы противоречит церковным канонам, Коллегия кардиналов вызвала Галилея на свое заседание. Далее начинаются неясности, вызванные противоречивостью дошедших до нас свидетельств участников этого заседания. Согласно официальной версии, Галилею было указано на недопустимость дальнейших публичных обсуждений идей Коперника в иной форме, кроме как с указанием на то, что это всего лишь гипотеза, пока не будут представлены неопровержимые доказательства ее правильности. Галилей же стоит на том, что подобного предупреждения не получал.

Как бы то ни было, в 1632 году Галилей опубликовал работу *«Диалог о двух главнейших системах мира»*,

где привел развернутые аргументы в пользу гелиоцентрической системы Коперника, вложив при этом официальные возражения Папы в уста персонажа по имени Симпличо (по-итальянски «простак». — *Прим. переводчика*). Вот тогда-то против Галилея и было впервые выдвинуто обвинение в «подозрении на ересь»; при этом нужно понимать, что в устах инквизиции это обвинение соотносится с обвинением в собственно «ереси» примерно так же, как в современном гражданском судопроизводстве обвинение в непреднамеренном убийстве соотносится с обвинением в преднамеренном убийстве приотягивающих обстоятельствах. От подозрения в ереси Галилей себя очистил, публично заявив, что сам не верит в то, что написал, после чего остаток жизни провел всего лишь под домашним арестом у себя во Флоренции (в 1992 году Римско-католическая церковь официально пересмотрела приговор суда на том основании, что судьи не сумели отделить вопросов веры от научных фактов).

Так что мы выносим из всей этой истории? По моему личному разумению, она описывает не более чем умышленное раскручивание маховика неповоротливой бюрократической машины человеком, намеренно стремящимся к конфронтации с ней. (Мне, например, представляется, что у Совета кардиналов имелись в то время дела и поважней, чем разбирательство с ученым по поводу абстрактной космологической теории.) Правда тут еще и в том, что доводы Галилея в пользу системы Коперника на проверку вовсе не являются такими уж убедительными. Более того, с точки зрения современной науки можно сказать, что Галилей пришел к верному заключению путем ошибочных рассуждений. Суда над ученым это, естественно, не оправдывает, однако все действие в этой связи предстает в ином, куда менее мифологическом, свете.

падения тела на поверхность Земли. Ускорение свободного падения принято обозначать g , и оно равняется (приблизительно):

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2 \text{ (метра в секунду за секунду).}$$

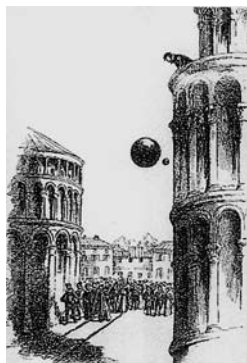
То есть, если уронить предмет из состояния покоя, за каждую секунду падения его скорость будет возрастать на 9,8 метра в секунду. На исходе первой секунды падения тело будет двигаться со скоростью 9,8 м/с, на исходе второй — со скоростью $2 \times 9,8 = 18,6$ м/с и так далее. Величина g определяет коэффициент ускорения падения тела, находящегося в непосредственной близости от земной поверхности, в связи с чем g принято называть *ускорением свободного падения*, или *гравитационным ускорением*.

Здесь следует сделать два важных замечания относительно полученных Галилеем результатов. Во-первых, ученый получил чисто экспериментальное значение величины g , ни на каких теоретических прогнозах не основывающееся. Значительно позже Исаак Ньютон в своих знаменитых работах показал, что величину g можно рассчитать теоретически, исходя из сочетания сформулированных им законов механики Ньютона и закона всемирного тяготения Ньютона. Именно первопроходческий труд Галилея и проложил дорогу последующим триумфальным открытиям Ньютона и формированию классической механики в ее общеизвестном виде.

Второй важнейший момент состоит в том, что ускорение свободного падения не зависит от массы падающего тела. По сути, сила притяжения пропорциональна массе тела, но это полностью компенсируется большей инерцией, присущей более массивному телу (его нежеланию двигаться, если хотите), а посему (если не учитывать сопротивление воздуха) все тела падают с одинаковым ускорением. Это практическое заключение вступало в полное противоречие с умозрительными предсказаниями древних и средневековых натурфилософов, которые были уверены, что всякой вещи свойственно стремиться к центру мироздания (коим им, естественно, представлялся центр Земли) и что чем массивнее предмет, тем с большей скоростью он к этому центру устремляется.

Свое видение Галилей, конечно же, подкрепил экспериментальными данными, но вот опыта, который ему традиционно приписывают, он, скорее всего, вовсе не проводил. Согласно околонульному фольклору, он сбрасывал предметы различной массы с «падающей» Пизанской башни, чтобы продемонстрировать, что они достигают поверхности Земли одновременно. В этом случае, однако, Галилея ждало бы разочарование, поскольку более тяжелые предметы неизбежно падали бы на землю раньше легких из-за разницы в удельном сопротивлении воздуха. Если бы сбрасываемые с башни предметы были одного размера, сила сопротивления воздуха, тормозящая их падение, была бы одинаковой для всех предметов. При этом из законов Ньютона следует, что более легкие предметы затормаживались бы воздухом интенсивнее тяжелых и падали на землю позднее тяжелых предметов. А это, естественно, противоречило бы предсказанию Галилея.

Художник запечатлел эксперимент, которого, возможно, и не было: Галилей бросает два шара разных размеров с «падающей» Пизанской башни





ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ (Galileo Galilei, 1564–1642) — итальянский ученый. Родился в Пизе. Галилея можно по праву назвать отцом современной экспериментальной науки. Его отец Винченцо Галилей был известным музыкантом и со временем переехал вместе с семьей во Флоренцию. Образование Галилео начал получать в Пизанском университете, где он числился на медицинском факультете, хотя большую часть времени уделял изучению математики. Его увлечение вылилось в то, что Галилей стал заведующим кафедрой математики этого университета.

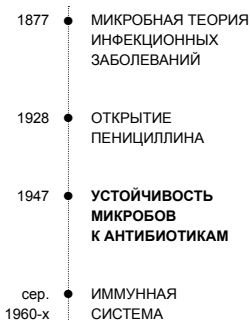
После смерти отца Галилей переехал в Падую и занял должность профессора математики в местном университете (причина переезда, судя по всему, была прозаичной: в университете Падуи платили лучше, чем в Пизанском). В Падуе и определились три главные темы исследований, которые всю жизнь потом занимали ученого. Во-первых, Галилей начал исследование тел в состоянии свободного падения — работу, которая со временем приведет к настоящему перевороту в механике. Во-вторых, он заинтересовался новыми астрономическими идеями Николая Коперника (см. принцип Коперника). Наконец, он изобрел инструмент под названием «пропорциональный компас», продажами которого в основном и обеспечивал себя материально (как и большинство изобретений Галилея, пропорциональный компас широко используется и в наши дни).

Зимой 1609–1610 года, используя телескоп собственной конструкции, построенный на новых идеях, зародившихся в умах голландских оптиков того времени, Галилей увлекся наблюдением за небесными телами. Не он первый, должно быть, занялся изучением траекторий планет, но именно он впервые широко опубликовал результаты своих наблюдений и выводы, которые из них следуют. Он наблюдал спутники Юпитера, горы на Луне, кольца Сатурна (хотя и составил неверное представление об их природе), фазы Венеры... Любого из этих открытий хватило бы, чтобы усомниться в древней теории Аристотеля, согласно которой Земля покоится в центре Вселенной, и поддержать новый взгляд на мир, предложенный Коперником. Его книга «Диалог о двух главнейших системах мира» — красноречивая защита Вселенной по Копернику. Именно взгляды Галилея на устройство мира, изложенные в этой книге, послужили основанием для его привлечения к суду по подозрению в ереси.

Уже после суда Галилей написал еще один фундаментальный труд «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки», где обобщаются его открытия в областях, которые сегодня принято называть материаловедением и кинематикой. Как и во всех других трудах ученого, в этой работе Галилей подчеркивает важность эксперимента как средства проверки теории.

Устойчивость микробов к антибиотикам

С течением времени популяция (но не отдельная особь) может приобрести устойчивость к воздействию химических веществ, таких как антибиотики и пестициды



Все мы слышали пугающие истории о микробах, нечувствительных к антибиотикам. И действительно, многим в процессе лечения приходилось заменять один антибиотик на другой из-за того, что первый оказался неэффективным. Такое появление лекарственной устойчивости у популяции микроорганизмов — не странная месть матери-природы человечеству, а закономерное следствие теории эволюции.

Существование различий между членами популяции составляет один из основополагающих принципов эволюции. Сегодня известно, что эти различия заложены в генах. Более того, жизнь любого организма (будь то бактерия или человек) по существу представляет собой серию химических превращений молекул. Действие антибиотика состоит в том, что он служит ингибитором, то есть тормозит или подавляет какую-либо химическую реакцию, жизненно важную для микроба. Например, пенициллин блокирует молекулы, участвующие в строительстве новых клеточных оболочек бактерий. Действие пенициллина можно упрощенно сравнить с жевательной резинкой, наклеенной на ключ, которая будет препятствовать открыванию замка. (Пенициллин не оказывает влияния на человека или животных, потому что наружные оболочки наших клеток коренным образом отличаются от клеток бактерий.)

У определенной популяции бактерий возможны различия в форме молекул, на которые направлено действие антибиотиков. Одни молекулы оказываются более чувствительными к «наклеиванию» лекарства, другие — менее. Чисто случайно у небольшого количества бактерий молекулы окажутся такой формы, которая менее чувствительна к отрицательному влиянию какого-то антибиотика (например, пенициллина). При воздействии лекарства на данную популяцию это небольшое количество устойчивых бактерий уцелеет. Через много поколений натуральный отбор приведет к преобладанию бактерий, в геноме которых закодированы менее чувствительные к лекарству молекулы. В конце концов появится популяция микробов, полностью невосприимчивых к данному антибиотику.

Необходимо еще раз отметить, что этот эффект проявляется через много поколений. Ни одна отдельно взятая бактерия не может приобрести иммунитет — форма молекулы определяется генами и обычно не меняется в течение жизни организма.

В 1952 году американские генетики Джошуа и Эстер Ледерберг провели классический эксперимент по изучению устойчивости микробов к антибиотикам. В чашках Петри на обычных питательных средах были выращены колонии бактерий, затем часть каждой колонии перенесли на другие чашки, где в питательную среду был добавлен пенициллин. Большинство колоний после этого пересева погибли, но одна из них выжила. Тогда ученые вновь вернулись к первичной колонии (от которой отсеивали уцелевшую) и снова перенесли ее на питательную среду с пеницил-

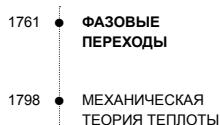
лином. Колония вновь выжила, доказав, что она обладает устойчивостью к пенициллину, хотя никогда не подвергалась его воздействию. Этот эксперимент подтвердил представление о случайном характере устойчивости в популяции и о том, что устойчивость обусловлена естественным отбором.

Подобные эффекты наблюдаются и у высших организмов: например, у насекомых в процессе эволюции выработалась устойчивость к пестицидам, а у растений — к гербицидам. Механизм приспособления здесь такой же, как и у бактерий, которые приобрели устойчивость к антибиотикам. Случайным образом у некоторых особей в популяции появляются какие-то химические изменения в их природе, что позволяет им противодействовать влиянию пестицидов или гербицидов. Например, это могут быть особые молекулы, которые захватывают молекулы пестицида или гербицида и не позволяют им действовать. Или у этих особей могут вырабатываться химические вещества, удаляющие пестициды или гербициды из клеток организма прежде, чем эти яды успеют сильно повредить клетки. В результате естественного отбора организмы с такими особенностями выживают в первую очередь, и в конце концов вся популяция приобретет эту полезную особенность.

Зная о работах в области естественного отбора, ученые должны были бы ожидать такого поведения исследуемых организмов. Тот факт, что они этого не сделали, говорит нам скорее о несовершенстве человеческой природы, нежели о недостаточном эффекте антибиотиков и других химикатов. Однако эта приобретенная лекарственная устойчивость микробов вовсе не зачеркивает всего положительного, что принесли нам антибиотики и другие химические вещества. Это просто значит, что войну с болезнью нельзя выиграть в одной битве. Здесь можно провести аналогию с гонкой вооружений, в которой одна сторона добивается временного преимущества, а другая учится наносить ответный удар. Затем первая сторона разрабатывает контрудар на этот ответный удар, а другая сторона — противостоит контр-контрудару... Гонка вооружений никогда не кончается — так же, я подозреваю, никогда не закончится и наша битва с эволюционным потенциалом микробов. Главное — быть далеко впереди, чтобы держать болезни под контролем. И этого будет достаточно для победы.

Фазовые переходы

Чтобы вещество перешло из твердого состояния в жидкое (плавление или таяние), из жидкого в газообразное (кипение или испарение) или из твердого в газообразное (возгонка или сублимация), требуется поступление энергии извне. При обратных процессах (таких, как конденсация или кристаллизация) вещество, напротив, отдает энергию



В обычных условиях любое вещество пребывает в одном из трех состояний — твердом, жидком или газообразном (см. АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА). Каждому из этих условий соответствует своя структура связей между молекулами и/или атомами, характеризующаяся определенной энергией связи между ними. Для изменения этой структуры нужен либо приток тепловой энергии извне (например, при плавлении твердого вещества), либо отток энергии вовне (например, при кристаллизации).

Взяв для начала твердое вещество, мы понимаем умозрительно, что в нем молекулы/атомы связаны в некую жесткую кристаллическую или аморфную структуру, — при незначительном нагреве они лишь начинают «трястись» вокруг своей фиксированной позиции (чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний). При дальнейшем нагревании вещества молекулы расшатываются все сильнее, пока наконец не срываются с «насиженного» места и не отправляются в «свободное плавание». Это и есть *плавление*, или *таяние*, твердого вещества в жидкость. Поступление же энергии, необходимой для таяния вещества, называют *теплотой плавления*.

График изменения температуры твердого вещества при переходе им точки плавления сам по себе весьма интересен. До точки плавления по мере нагревания атомы/молекулы раскачиваются вокруг своего фиксированного положения все сильнее, и поступление каждой дополнительной порции тепловой энергии приводит к повышению температуры твердого тела. Однако по достижении твердым веществом температуры плавления оно на какое-то время так и остается при этой температуре, несмотря на продолжающийся приток тепла, пока в нем не накопится достаточное количество тепловой энергии для разрыва жестких межмолекулярных связей. То есть в процессе *фазового перехода* вещества из твердого состояния в жидкое энергия поглощается им без повышения температуры, поскольку вся она уходит на разрыв межмолекулярных связей. Вот почему кубик льда в коктейле даже в самую жару остается ледяным по температуре, пока не растает весь. При этом, тая, кубик льда отбирает тепло у окружающего его коктейля (и тем самым охлаждает его до приятной температуры), а сам набирается энергии, которая требуется ему для разрыва межмолекулярных связей и окончательного саморазрушения.

Количество теплоты, необходимое для плавления или испарения единицы объема твердого вещества или жидкости, называется, соответственно, *скрытой теплотой плавления*, или *скрытой теплотой испарения*. И величины здесь фигурируют порой немалые. Например, для нагревания 1 кг воды от 0°C до 100°C требуется «всего» 420 000 джоулей (Дж) тепловой энергии, а для того, чтобы обратить этот килограмм воды в 1 кг пара с температурой, равной тем же 100°C, — целых 2 260 000 Дж энергии.

После того как твердая масса полностью превратилась в жидкость, дальнейшее поступление тепла повлечет вновь за собой повышение температуры вещества. В жидком состоянии молекулы вещества по-прежнему находятся в близком контакте, но жесткие межмолекулярные связи между ними разорваны и силы взаимодействия, удерживающие молекулы вместе, на несколько порядков слабее, чем в твердом теле, поэтому молекулы начинают достаточно свободно перемещаться друг относительно друга. Дальнейшее поступление тепловой энергии доводит жидкость до фазы *кипения*, и начинается активное *испарение* или *парообразование*.

И опять же, как было описано в случае таяния, или плавления, на какое-то время вся дополнительно поступающая энергия уходит на разрыв жидкостных связей между молекулами и высвобождение их в газообразное состояние (при неизменной температуре кипения). Энергия, затрачиваемая на разрыв этих, казалось бы, некрепких связей — т.н. *скрытая теплота парообразования*, — также требуется немалая (см. пример выше).

Все те же процессы при оттоке энергии (остужении) вещества происходят в обратном порядке. Сначала газ остывает с понижением температуры, и так происходит, пока он не достигнет *точки конденсации* — температуры, при которой начинается *сжижение*, — и она в точности равна температуре испарения (кипения) соответствующей жидкости. При конденсации, по мере того как силы взаимного притяжения между молекулами начинают брать верх над энергией теплового движения, газ начинает превращаться в жидкость — конденсироваться. При этом выделяется так называемая удельная *теплота конденсации* — она в точности равна скрытой удельной теплоте испарения, о которой уже говорилось. То есть сколько энергии вы потратили на испарение определенной массы жидкости, ровно столько энергии пар и отдаст в виде тепла при конденсации обратно в жидкость.

То, что количество теплоты, выделяемое при конденсации, весьма высоко, — факт легко проверяемый: достаточно поднести ладонь к носику кипящего чайника. Помимо жара от пара как такового ваша кожа пострадает еще и от теплоты, выделившейся в результате его конденсации в жидкую воду.

При дальнейшем остывании жидкости до *точки замерзания* (температура которой равна *точке таяния*) еще раз начнется процесс отдачи тепловой энергии вовне без понижения температуры самого вещества. Этот процесс называется *кристаллизацией*, и при нем выделяется ровно столько же тепловой энергии, сколько отбирается из окружающей среды при плавлении (переходе вещества из твердой фазы в жидкую).

Есть и еще один тип фазового перехода — из твердого состояния вещества непосредственно в газообразное (минуя жидкость). Такое фазовое превращение называется *возгонкой*, или *сублимацией*.

цией. Самый бытовой пример — вывешенное сушиться на мороз сырое белье. Вода в нем сначала кристаллизуется в лед, а затем — под воздействием прямых солнечных лучей — микроскопические кристаллики льда попросту испаряются, минуя жидкую фазу. Другой пример: на рок-концертах «сухой лед» (замороженная двуокись углерода CO_2) используется для устройства дымовой завесы — она испаряется прямо в воздух, окутывая выступающих музыкантов и также минуя жидкую фазу. Соответственно, на преобразование твердого вещества непосредственно в газ затрачивается *энергия сублимации.*

ФЛОГИСТОН

*В состав любого
горючего вещества
входит особая
субстанция —
флогистон*

1683 • ФЛОГИСТОН

Эта старая химическая теория была основана на идее о том, что есть нечто, входящее в состав любого горючего вещества и представляющее собой его горючую часть. Это нечто получило название «флогистон», что по-гречески значит «воспламеняемый». Суть идеи была такова: когда вещество горит, флогистон выделяется из него и улетучивается. Считалось, что дерево, например, это смесь золы и флогистона, и при сжигании дерева выделяется флогистон, а остается зола. Аналогичным образом полагали, что металлы — это смесь флогистона и веществ, называемых окалинами.

Однако в этой теории была одна существенная неувязка: если образовавшаяся после горения зола обычно легче, чем изначальный кусок дерева, то окарины (или, как бы мы сказали сегодня, оксиды металлов) обычно тяжелее первоначального куска металла. Теперь мы знаем, что из-за наличия в древесине диоксида углерода и воды основные продукты сгорания дерева — газы — уходят в атмосферу, тогда как при соединении металлов с кислородом (например, когда железо ржавеет) образуется оксид — твердое вещество, — который никуда не исчезает.

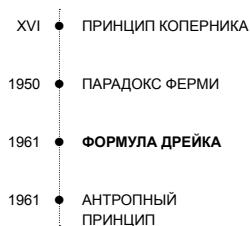
Последний гвоздь в гроб теории флогистона был вбит Антуаном Лавуазье. Он показал, что химическое соединение веществ с незадолго до того открытым элементом кислородом объясняет как увеличение, так и потерю их массы при химических реакциях горения.

АНТУАН ЛОРАН ЛАВУАЗЬЕ (Antoine-Laurent Lavoisier, 1743–94) — французский химик. Родился в Париже; получил всестороннее научное образование в Коллеже Мазарини (Collège Mazarin). Вложив средства в компанию по сбору налогов, он смог материально обеспечить создание лаборатории, в которой он заложил фундамент законов современной химии. Ввел в научную практику строгие методы проведения экспериментов, такие как тщательное взвешивание реагентов и продуктов реакции. Лавуазье не только опроверг теорию флогистона (хотя свет и тепло — «калории» — он продолжал считать химическими элементами), но также открыл состав

воды и установил, что органические вещества содержат углерод, водород и (во многих случаях) кислород. (См. также КИСЛОТЫ И ОСНОВАНИЯ.) Во время Французской революции Жан-Поль Марат (Jean-Paul Marat, 1743–93), человек крайних взглядов, обвинил его в том, что он создал препятствие для естественной циркуляции воздуха в Париже (Лавуазье руководил возведением городской стены). Как сборщик налогов Лавуазье был объявлен противником революции и закончил свой жизненный путь на гильотине. Его вдова вышла замуж за графа Рамфорда (Rumford), известного своим участием в обосновании механической теории теплоты.

Формула Дрейка

Число внеземных цивилизаций, желающих вступить в контакт с нашей, предсказуемо



Вообще-то говоря, не многие крупные научные открытия датированы строго — не только годом, но и месяцем, и числом. Однако как минимум одно из них можно датировать с точностью буквально до минут. В ночь с 1 на 2 ноября 1961 года несколько ученых — участников конференции, проходившей в Грин-Бэнке (Green Bank), штат Виржиния, США, засиделись в баре допоздна за обсуждением статьи, написанной физиками Филипом Моррисоном (Philip Morrison, р. 1915) и Джузеппе Коккони (Giuseppe Cocconi, р. 1914). Они спорили, могут ли земные ученые, едва начавшие строить серьезные по размерам радиотелескопы, реально обнаружить радиосигналы, посылаемые внеземными цивилизациями из далекого космоса. Если где-то в глубинах Вселенной действительно есть хоть одна внеземная цивилизация, стремящаяся к контакту с нами, она, вероятно, посылает нам радиосигналы, и нам лишь нужно их поймать, рассуждали они. Заодно была сформулирована задача на следующий день конференции: оценить вероятное число внеземных цивилизаций, готовых вступить в контакт с нами.

Вопрос был поставлен, и ответ на него уже на следующий день предложил американский радиоастроном Фрэнк Дрейк. Согласно его формуле, число внеземных цивилизаций N составляет:

$$N = RPN_eLCT,$$

где R — число ежегодно образующихся звезд во Вселенной; P — вероятность наличия у звезды планетной системы; N_e — вероятность того, что среди планет имеется планета земного типа, на которой возможно зарождение жизни; L — вероятность реального зарождения жизни на планете; C — вероятность того, что разумная жизнь пошла по техногенному пути развития, разработала средства связи и желает вступить в контакт, и, наконец, T — усредненное время, на протяжении которого желающая вступить в контакт цивилизация посылает радиосигналы в космос, чтобы связаться с нами. Смысл формулы Дрейка состоит, если хотите, не в том, чтобы все окончательно запутать, а в том, чтобы наглядно показать всю степень человеческого неведения относительно реального положения дел во Вселенной и хотя бы приблизительно раздробить одну чисто гадательную оценку общего числа цивилизаций в ней на несколько вероятностных оценок. По крайней мере, в таком виде все начинает выглядеть менее загадочно.

На момент конференции в Грин-Бэнке единственным более или менее известным числом в правой части формулы было число ежегодно образующихся звезд R . Что касается других чисел, то к планетам земного типа (N_e) даже в нашей Солнечной системе можно было отнести от одного (только Земля) до пяти (Венера, Земля, Марс и по одному из крупных спутников Юпитера и Сатурна) космических объектов планетарного типа. При оптимистичных прогнозах подобного рода получалось, что Галактика буквально кишит миллионами технологически развитых цивилизаций (N), а мы, по сути, юниоры в этой «галактической лиге». Эти сведения

незамедлительно заполнили средства массовой информации, а через них — и массовое сознание, и люди попросту перестали сомневаться, что существование внеземного разума есть непреложная истина.

Однако с 1961 года прошло уже не одно десятилетие, и чем дальше, тем больше мы убеждаемся в том, что нужно умерить оптимизм, изначально порожденной формулой Дрейка в массовом сознании землян, истосковавшихся по братьям по разуму. Сегодня мы знаем, например, в отличие от излишне оптимистичных участников *грин-бэнкской* группы, что существование жизни в пределах нашей Солнечной системы вне Земли крайне маловероятно (разве что она существует под толстым ледяным щитом в океане четвертого по величине спутника Сатурна, который по странной иронии называется Европа). И, хотя после 1961 года нами было открыто немало планетных систем вокруг ранее известных звезд, все они выглядят мало похожими на нашу Солнечную систему, поскольку планеты там по большей части обращаются по вытянутым эллиптическим орбитам с весьма значительным *эксцентриситетом*, а значит, годовой перепад температур на них выглядит неприемлемым с точки зрения развития белковой жизни. Фактически выяснилось, что условия, способствующие удержанию воды на поверхности планетарного тела в течение миллиардов лет без ее испарения и/или вымораживания, настолько жестки, что, кроме Земли, таких планет до сих пор не найдено — и это неудивительно, поскольку даже несколько процентов изменения радиуса земной орбиты приведут к тому, что наша планета станет непригодной для жизни.

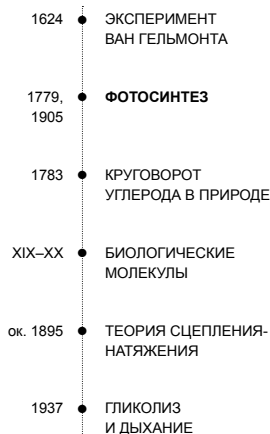
Так случилось, что в 1981 году я и мой коллега-астроном Роберт Руд (Robert Rood, р. 1942) наткнулись на формулу Дрейка и решили ее критически переосмыслить в свете современных научных знаний. Подставив все имеющиеся у нас на руках оценки величин в правой части формулы, мы получили значение N , приблизительно равное 0,003. То есть три из тысячи (или примерно одна из трехсот) звездных систем имеют в своем составе технологически развитую, желающую общаться с нами цивилизацию. Или, если хотите, это означает, что межзвездные сигналы со стороны внеземного разума появились в нашей Галактике лишь в последнюю 1/300 часть срока ее существования. В любом случае ставки на предмет их обнаружения у нас крайне плохи: 1:300. Естественно, за прошедшие двадцать с лишним лет ничего не изменилось и никаких признаков жизни внеземные цивилизации не подали. Их поиск продолжается уже не первое десятилетие, финансируется и за государственный счет, и частными фондами. Увы... Мы и поныне не нашли себе пресловутых внеземных братьев по разуму, не говоря уже о том, чтобы попытаться вступить с ними в контакт. Да и ладно. Зато у нас накопилась масса абсолютно достоверных данных относительно того, чего там *нет*.

ФРЭНК ДОНАЛЬД ДРЕЙК (Frank Donald Drake, р. 1930) — американский астроном. Родился в Чикаго, учился на факультете электроники Корнельского университета. Прослушав курс лекций прославленного астронома Отто Струве (1897–1963) о формировании планетных систем, на всю жизнь загорелся интересом к вопросам внеземной жизни и цивилизации. Отслужив в американских ВМС, последовательно работал в

Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO), Корнельском университете и Калифорнийском университете (г. Санта-Крус). При поддержке Струве Дрейк организовал строительство 28-метрового радиотелескопа на базе NRAO (проект «Озма») — первого в мире измерительно-регистрирующего прибора, специально созданного для попытки выявить внеземную жизнь (см. ПАРАДОКС ФЕРМИ).

ФОТОСИНТЕЗ

Растения превращают солнечный свет в запасенную химическую энергию в два этапа: сначала они улавливают энергию солнечного света, а затем используют ее для связывания углерода с образованием органических молекул



Зеленые растения — биологи называют их *автотрофами* — основа жизни на планете. С растений начинаются практически все пищевые цепи. Они превращают энергию, падающую на них в форме солнечного света, в энергию, запасенную в углеводах (см. БИОЛОГИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЫ), из которых важнее всего шести-углеродный сахар глюкоза. Этот процесс преобразования энергии называется фотосинтезом. Другие живые организмы получают доступ к этой энергии, поедая растения. Так создается пищевая цепь, поддерживающая планетарную экосистему.

Кроме того, воздух, которым мы дышим, благодаря фотосинтезу насыщается кислородом. Суммарное уравнение фотосинтеза выглядит так:



Растения поглощают углекислый газ, образовавшийся при дыхании, и выделяют кислород — продукт жизнедеятельности растений (см. ГЛИКОЛИЗ И ДЫХАНИЕ). К тому же фотосинтез играет важнейшую роль в КРУГОВОРОТЕ УГЛЕРОДА В ПРИРОДЕ.

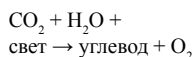
Кажется удивительным, что при всей важности фотосинтеза ученые так долго не приступали к его изучению. После ЭКСПЕРИМЕНТА ВАН ГЕЛЬМОНТА, поставленного в XVII веке, наступило затишье, и лишь в 1905 году английский физиолог растений Фредерик Блэкман (Frederick Blackman, 1866–1947) провел исследования и установил основные процессы фотосинтеза. Он показал, что фотосинтез начинается при слабом освещении, что скорость фотосинтеза возрастает с увеличением светового потока, но начиная с определенного уровня дальнейшее усиление освещения уже не приводит к повышению активности фотосинтеза. Блэкман показал, что повышение температуры при слабом освещении не влияет на скорость фотосинтеза, но при одновременном повышении температуры и освещения скорость фотосинтеза возрастает значительно больше, чем при одном лишь усилении освещения.

На основании этих экспериментов Блэкман заключил, что происходят два процесса: один из них в значительной степени зависит от уровня освещения, но не от температуры, тогда как второй сильно определяется температурой независимо от уровня света. Это озарение легло в основу современных представлений о фотосинтезе. Два процесса иногда называют «световой» и «темновой» реакцией, что не вполне корректно, поскольку оказалось, что, хотя реакции «темновой» фазы идут и в отсутствии света, для них необходимы продукты «световой» фазы.

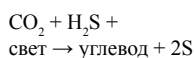
Фотосинтез начинается с того, что излучаемые солнцем фотоны попадают в особые пигментные молекулы, находящиеся в листе, — молекулы *хлорофилла*. Хлорофилл содержится в клетках листа, в мембранах клеточных органелл *хлоропластов* (именно они придают листу зеленую окраску). Процесс улавливания энергии состоит из двух этапов и осуществляется в отдельных кластерах молекул — эти кластеры принято называть *Фотосисте-*

Гипотеза Ван Ниль

Процесс фотосинтеза описывается следующей химической реакцией:



В начале XX века считалось, что кислород, выделяющийся в процессе фотосинтеза, образуется в результате расщепления углекислого газа. Эту точку зрения опроверг в 1930-е годы Корнелис Бернардус Ван Ниль (Van Niel, 1897–1986), в то время аспирант Стэнфордского университета в штате Калифорния. Он занимался изучением пурпурной серобактерии (на фото), которая нуждается для осуществления фотосинтеза в сероводороде (H_2S) и выделяет в качестве побочного продукта жизнедеятельности атомарную серу. Для таких бактерий уравнение фотосинтеза выглядит следующим образом:



Исходя из сходства этих двух процессов, Ван Ниль предположил, что при обычном фотосинтезе источником кислорода является не углекислый газ, а вода, поскольку у серобактерий, в метаболизме которых вместо кислорода участвует сера, фотосинтез возвращает эту серу, являющуюся побочным продуктом реакций фотосинтеза. Современное подробное объяснение фотосинтеза подтверждает эту догадку: первой стадией процесса фотосинтеза (осуществляемой в Фотосистеме II) является расщепление молекулы воды.

мой I и Фотосистемой II. Номера кластеров отражают порядок, в котором эти процессы были открыты, и это одна из забавных научных странностей, поскольку в листе сначала происходят реакции в Фотосистеме II, и лишь затем — в Фотосистеме I.

Когда фотон сталкивается с 250–400 молекулами Фотосистемы II, энергия скачкообразно возрастает и передается на молекулу хлорофилла. В этот момент происходят две химические реакции: молекула хлорофилла теряет два электрона (которые принимает другая молекула, называемая акцептором электронов) и расщепляется молекула воды. Электроны двух атомов водорода, входивших в молекулу воды, возмещают два потерянных хлорофиллом электрона.

После этого высокоэнергетический («быстрый») электрон перекидывают друг другу, как горячую картофелину, собранные в цепочку молекулярные переносчики. При этом часть энергии идет на образование молекулы аденозинтрифосфата (АТФ), одного из основных переносчиков энергии в клетке (см. биологические молекулы). Тем временем немного другая молекула хлорофилла Фотосистемы I поглощает энергию фотона и отдает электрон другой молекуле-акцептору. Этот электрон замещается в хлорофилле электроном, прибывшим по цепи переносчиков из Фотосистемы II. Энергия электрона из Фотосистемы I и ионы водорода, образовавшиеся ранее при расщеплении молекулы воды, идут на образование НАДФ-Н, другой молекулы-переносчика.

В результате процесса улавливания света энергия двух фотонов запасается в молекулах, используемых клеткой для осуществления реакций, и дополнительно образуется одна молекула кислорода. (Отмечу, что в результате еще одного, значительно менее эффективного процесса с участием одной лишь Фотосистемы I, также образуются молекулы АТФ.) После того как солнечная энергия поглощена и запасена, наступает очередь образования углеводов. Основной механизм синтеза углеводов в растениях был открыт Мелвином Калвином, проделавшим в 1940-е годы серию экспериментов, ставших уже классическими. Калвин и его сотрудники выращивали водоросль в присутствии углекислого газа, содержащего радиоактивный углерод-14. Им удалось установить химические реакции темновой фазы, прерывая фотосинтез на разных стадиях.

Цикл превращения солнечной энергии в углеводы — так называемый цикл Калвина — сходен с циклом Кребса (см. гликолиз и дыхание): он тоже состоит из серии химических реакций, которые начинаются с соединения входящей молекулы с молекулой-«помощником» с последующей инициацией других химических реакций. Эти реакции приводят к образованию конечного продукта и одновременно воспроизводят молекулу-«помощника», и цикл начинается вновь. В цикле Калвина роль такой молекулы-«помощника» выполняет пятиуглеродный сахар рибулозодифосфат (РДФ). Цикл Калвина начинается с того, что молекулы углекислого

газа соединяются с РДФ. За счет энергии солнечного света, запасенной в форме АТФ и НАДФ-Н, сначала происходят химические реакции связывания углерода с образованием углеводов, а затем — реакции воссоздания рибулозодифосфата. На шести витках цикла шесть атомов углерода включаются в молекулы предшественников глюкозы и других углеводов. Этот цикл химических реакций будет продолжаться до тех пор, пока поступает энергия. Благодаря этому циклу энергия солнечного света становится доступной живым организмам.

В большинстве растений осуществляется описанный выше цикл Калвина, в котором углекислый газ, непосредственно участвуя в реакциях, связывается с рибулозодифосфатом. Эти растения называются C_3 -растениями, поскольку комплекс «углекислый газ—рибулозодифосфат» расщепляется на две молекулы меньшего размера, каждая из которых состоит из трех атомов углерода. У некоторых растений (например, у кукурузы и сахарного тростника, а также у многих тропических трав, включая ползучий сорняк) цикл осуществляется по-другому. Дело в том, что углекислый газ в норме проникает через отверстия в поверхности листа, называемые *устьицами*. При высоких температурах устьица закрываются, защищая растение от чрезмерной потери влаги. В C_3 -растениях при закрытых устьицах прекращается и поступление углекислого газа, что приводит к замедлению фотосинтеза и изменению фотосинтетических реакций. В случае же кукурузы углекислый газ присоединяется к трехуглеродной молекуле на поверхности листа, затем переносится во внутренние участки листа, где углекислый газ высвобождается и начинается цикл Калвина. Благодаря этому довольно сложному процессу фотосинтез у кукурузы осуществляется даже в очень жаркую, сухую погоду. Растения, в которых происходит такой процесс, мы называем C_4 -растениями, поскольку углекислый газ в начале цикла транспортируется в составе четырехуглеродной молекулы. C_3 -растения — это в основном растения умеренного климата, а C_4 -растения в основном произрастают в тропиках.

МЕЛВИН КАЛВИН (Melvin Calvin, 1911–97) — американский биолог. Родился в г. Сент-Пол, штат Миннесота, в семье выходцев из России. В 1931 году получил степень бакалавра в области химии в Мичиганском колледже горного дела и технологии, а в 1935 году — степень доктора химии в университете штата Миннесота. Двумя годами позже Калвин начал работать в Калифорнийском университете в Беркли и в

1948 году стал профессором; за год до этого был назначен директором отдела биоорганики в Радиационной лаборатории Лоренса в Беркли, где использовал технологические достижения военных исследований времен Второй мировой войны, например новые методы хроматографии, для изучения темновой фазы фотосинтеза. В 1961 году Калвин был удостоен Нобелевской премии в области химии.

Фотоэлектрический эффект

Под воздействием фотонов металл может испускать электроны строго определенных энергий

ок. 420 до н.э.	•	АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1899	•	ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
1900	•	ПОСТОЯННАЯ ПЛАНКА
1913	•	АТОМ БОРА
1925	•	КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА
1926	•	ПОЛОСНАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Выбивание светом электронов с поверхности токопроводящих материалов — явление, широко используемое сегодня в повседневной жизни. Например, некоторые системы сигнализации работают за счет передачи видимых или инфракрасных световых лучей на *фотоэлектрический элемент*, из которого выбиваются электроны, обеспечивающие электропроводность цепи, в которую он включен. Если на пути светового луча появляется препятствие, свет на датчик поступать перестает, поток электронов прекращается, цепь разрывается — и срабатывает электронная сигнализация.

Это явление, получившее название фотоэлектрического эффекта, или кратко фотоэффекта, было открыто в конце XIX столетия и сразу поставило целый ряд фундаментальных вопросов, поскольку ничего из того, что было известно ученым о строении металлов или природе света, фотоэффекта не объясняло. Нельзя сказать, что классическая теория запрещала бы свету выбивать электроны из металла. Электромагнитные волны по идее могли «вымывать» электроны из металла подобно тому, как морские волны выносят на поверхность и постепенно прибывают к берегу легкие пробковые крошки. Однако проблема состояла в том, что столь простым объяснением в случае фотоэффекта ограничиться было невозможно. Во-первых, электроны появлялись практически мгновенно после начала облучения. Во-вторых, фотоэффект, как оказалось, возникал даже под воздействием самых слабых световых лучей, причем по мере повышения интенсивности облучения энергия высвобождаемых электронов не изменялась. И то и другое вступало в явное противоречие с классической картиной взаимодействия света с электронами.

Проблему в конце концов удалось решить в начале XX века Альберту Эйнштейну, причем сделанные им выводы дали мощный толчок развитию квантовой механики. Незадолго до этого Макс Планк показал, что излучение черного тела можно адекватно описать, приняв за допущение, что атомы излучают и поглощают свет фиксированными энергетическими порциями — *квантами*. Он полагал, что этот феномен каким-то образом обусловлен внутренним строением атомов, но отнюдь не природой света. Однако Эйнштейн воспринял идею Планка гораздо серьезнее и постулировал, что *сам свет* распространяется дискретными пучками энергии, которые он назвал *фотонами*. Иногда фотоны ведут себя подобно частицам, иногда — подобно волнам (см. принцип дополнительности). В частности, при взаимодействии с электроном фотон может вести себя как частица и буквально выбивать электрон из атома (это соударение фотона с атомом можно уподобить столкновению двух бильярдных шаров). Причем для выбивания электрона при таком соударении достаточно единственного фотона. Далее, повышение интенсивности света приводит к увеличению числа фотонов (и, следовательно,

числа выбитых электронов), но не энергии отдельно взятого фотона. Следовательно, и энергия, и скорость отдельно взятого выбитого фотоэлектрона не зависят от интенсивности света — но только от его частоты.

Рассуждая таким образом, Эйнштейн вывел следующее простое уравнение для описание энергии фотоэлектронов:

$$E = h\nu - \varphi,$$

где ν — частота падающего света, h — постоянная Планка, а φ — так называемая «работа выхода», то есть минимальная энергия, необходимая для того, чтобы выбить электрон из атома металла.

Химические связи

Атомы могут присоединяться друг к другу, либо отдавая и принимая электроны, либо делясь парами электронов с соседними атомами, либо делясь электронами со многими другими атомами, либо благодаря эффекту поляризации

1854	КАТАЛИЗАТОРЫ И ФЕРМЕНТЫ
1887	КИСЛОТЫ И ОСНОВАНИЯ
1919	ПРАВИЛО ОКТЕТА
кон. 1920-х	ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОРБИТАЛЕЙ
1930-е	ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Электроны в атоме занимают ряд вложенных слоев (см. атом бора), при этом воздействию другого атома могут подвергаться, как правило, только электроны, находящиеся во внешнем слое (он называется *валентным слоем*). Когда электроны в двух атомах выстраиваются так, что возникает сила, удерживающая вместе эти два атома, мы говорим, что образуется химическая связь. Различают несколько видов химической связи.

Ионная связь

Когда внешние электронные слои полностью заполнены, общая энергия атомов понижается. Например, атом натрия, имеющий на внешнем слое один электрон, охотно отдает этот электрон. И наоборот, атом хлора, которому не хватает одного электрона для заполнения внешнего слоя, стремится присоединить электрон для завершения уровня. Когда атомы натрия и хлора оказываются рядом, натрий отдает электрон, а хлор его принимает. При этом атом натрия, потеряв отрицательный заряд, становится положительно заряженным ионом натрия, а атом хлора, получив дополнительный электрон, становится отрицательно заряженным ионом хлора. По закону кулона между двумя ионами возникает электростатическое притяжение, приводящее к образованию химической связи, которая и удерживает атомы вместе (см. также правило октета).

С этой реакцией связано одно из чудес химии: бурно реагирующее вещество натрий и сильно ядовитый газ хлор, соединяясь, образуют обычную поваренную соль, широко применяемую в питании.

Ковалентная связь

Некоторые атомы, в основном это касается углерода, образуют связи по-другому. Когда два таких атома достаточно приближаются друг к другу, между ними возникает взаимодействие, которое можно рассматривать как длительный взаимный обмен электронами. Как будто атом бросает один из своих внешних электронов другому атому, затем ловит электрон другого атома и снова бросает его обратно в бесконечной игре в мяч. В соответствии с законами квантовой механики такой обмен электронами вызывает силу притяжения, которая и удерживает атомы вместе.

Дело в том, что такой атом, как углерод, имеющий четыре электрона во внешнем слое, может дополнить этот валентный слой до восьми электронов, образуя ковалентные связи с четырьмя другими атомами. Поэтому атомы углерода способны образовывать молекулы с длинными цепями, какие мы наблюдаем в биологических системах. Некоторые ученые (и я в том числе) даже утверждают, что вследствие этого свойства атома углерода *вся жизнь во Вселенной, как и жизнь на Земле, должна быть углеродной*.

Металлическая связь

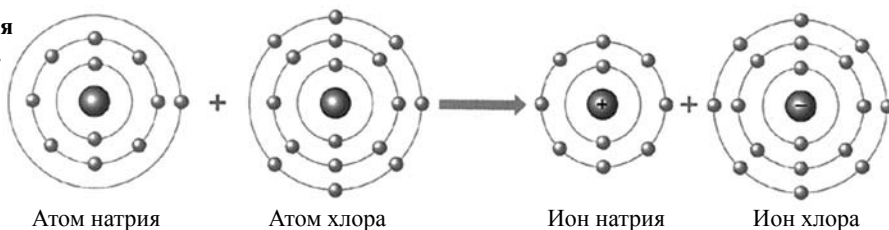
В металлах образуется химическая связь еще одного вида. Каждый атом в металле отдает один или два подвижных электрона, как бы делясь этими электронами со всеми соседними атомами металла. Эти квазисвободные электроны образуют что-то вроде желе, в котором располагаются тяжелые положительные ионы металла. Все это напоминает трехмерную пространственную решетку из стеклянных шариков в вязкой патоке — если толкнуть один из таких шариков, он слегка сдвинется, но сохранит свое положение относительно других. Точно так же атомы металла, потревоженные внешним механическим воздействием, останутся связанными друг с другом благодаря «электронному желе» (или «электронному газу»). Вот почему, если ударить по металлу молотком, останется вмятина, но сам кусок металла, скорее всего, не разломится. Именно «электронное желе» делает металлы хорошими проводниками электричества (см. ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ).

Химическая связь определяется расположением электронов в атомах по отношению к другим электронам и ядру, а также электростатическим притяжением между положительными и отрицательными зарядами

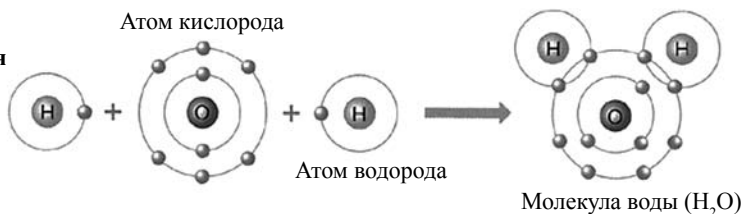
Водородная связь

Строго говоря, это не химическая связь в том смысле, в каком мы рассматривали предыдущие три типа связи. Это, скорее, притяжение между отдельными молекулами. Многие молекулы хотя и являются в целом нейтральными (то есть имеют одинаковое коли-

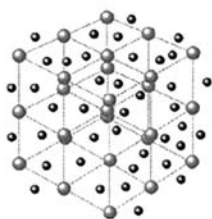
Ионная связь



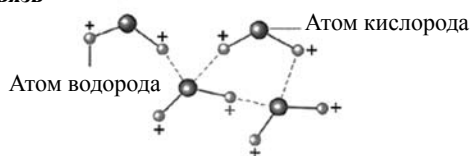
Ковалентная связь



Металлическая связь



Водородная связь



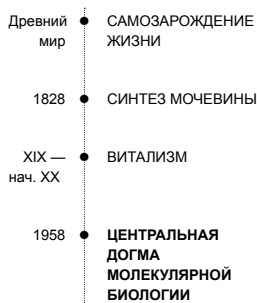
чество отрицательных электронов и положительных протонов в своем ядре), оказываются *поляризованными*. Это значит, что некоторые части таких молекул имеют суммарный отрицательный заряд, в то время как другие части — положительный. Конечно, суммарный заряд молекулы нейтрален, но положительный и отрицательный заряды распределены неравномерно.

Представим, что *полярная молекула*, как ее называют, приближается своей отрицательной областью к молекуле-мишени. Электростатическая сила со стороны этой отрицательной области больше, чем со стороны положительной, т.к. положительная область расположена дальше. Эта электростатическая сила вызывает в молекуле-мишени передвижение электронов прочь от точки контакта, тем самым создавая в этом месте молекулы-мишени незначительный положительный заряд. В результате между двумя молекулами возникает сила притяжения и, следовательно, образуется связь.

Самая известная полярная молекула — это молекула воды. Отрицательный заряд собирается вокруг атома кислорода, приводя к образованию слабого положительного заряда около атомов водорода. Благодаря такой поляризации вода является хорошим растворителем. Ее молекулы способны создавать связи более прочные, чем те, которые удерживают молекулы-мишени вместе. Связи, создаваемые посредством положительно заряженных атомов водорода, называются водородными связями. Поскольку молекул водорода очень много в биологических молекулах, водородные связи в них образуются достаточно часто. В частности, именно водородные связи удерживают вместе две спирали молекулы ДНК.

Центральная догма молекулярной биологии

Один ген молекулы ДНК кодирует один белок, отвечающий за одну химическую реакцию в клетке



Открытие химической основы жизни было одним из величайших открытий биологии XIX века, получившим в XX веке немало подтверждений. В природе нет никакой жизненной силы (см. ВИТАЛИЗМ), как нет и существенного различия между материалами, из которого построены живые и неживые системы. Живой организм больше всего похож на крупный химический завод, в котором осуществляется множество химических реакций. На погрузочных платформах поступает сырье и транспортируются готовые продукты. Где-то в канцелярии — возможно, в виде компьютерных программ — хранятся инструкции по управлению всем заводом. Подобным образом в ядре клетки — «руководящем центре» — хранятся инструкции, управляющие химическим бизнесом клетки (см. КЛЕТОЧНАЯ ТЕОРИЯ).

Эта гипотеза получила успешное развитие во второй половине XX века. Теперь нам понятно, как информация о химических реакциях в клетках передается из поколения в поколение и реализуется для обеспечения жизнедеятельности клетки. Вся информация в клетке хранится в молекуле ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота) — знаменитой двойной спирали, или «скрученной лестницы». Важная рабочая информация хранится на перекладинах этой лестницы, каждая из которых состоит из двух молекул азотистых оснований (см. КИСЛОТЫ И ОСНОВАНИЯ). Эти основания — аденин, гуанин, цитозин и тимин — обычно обозначают буквами А, Г, Ц и Т. Считывая информацию по одной цепи ДНК, вы получите последовательность оснований. Представьте себе эту последовательность как сообщение, написанное с помощью алфавита, в котором всего четыре буквы. Именно это сообщение и определяет поток химических реакций в клетке и, следовательно, особенности организма.

Гены, открытые Грегором Менделем (см. ЗАКОНЫ МЕНДЕЛЯ), на самом деле не что иное, как последовательности пар оснований на молекуле ДНК. А *геном* человека — совокупность всех его ДНК — содержит приблизительно 30 000–50 000 генов (см. ПРОЕКТ «ГЕНОМ ЧЕЛОВЕКА»). У наиболее развитых организмов, в том числе и человека, гены часто бывают разделены фрагментами «бессмысленной», некодирующей ДНК, а у более простых организмов последовательность генов обычно непрерывна. В любом случае клетка знает, как прочесть содержащуюся в генах информацию. У человека и других высокоразвитых организмов ДНК обернута вокруг молекулярного остова, вместе с которым она образует *хромосому*. Вся ДНК человека помещается в 46 хромосомах.

Точно так же, как информацию с жесткого диска, хранящуюся в канцелярии завода, необходимо транслировать на все устройства в цехах завода, информация, хранящаяся в ДНК, должна быть транслирована с помощью клеточного технического обеспечения в химические процессы в «теле» клетки. Основная роль в этой химической трансляции принадлежит молекулам *рибонуклеиновой кислоты*, РНК. Мысленно разрежьте двуспиральную «лестницу»-ДНК вдоль на две половины, разъединя «ступеньки», и замените все молекулы тимина (Т) на сходные с ними молекулы урацила (У) — и вы получите молекулу РНК. Когда необходимо транслировать какой-либо ген, специальные кле-

точные молекулы «расплетают» участок ДНК, содержащий этот ген. Теперь молекулы РНК, в огромном количестве плавающие в клеточной жидкости, могут присоединиться к свободным основаниям молекулы ДНК. В этом случае, так же как и в молекуле ДНК, могут образоваться лишь определенные связи. Например, с цитозином (Ц) молекулы ДНК может связаться только гуанин (Г) молекулы РНК. После того как все основания РНК выстроятся вдоль ДНК, специальные ферменты собирают из них полную молекулу РНК. Сообщение, записанное основаниями РНК, так же относится к исходной молекуле ДНК, как негатив к позитиву. В результате этого процесса информация, содержащаяся в гене ДНК, переписывается на РНК.

Этот класс молекул РНК называется *матричными*, или *информационными РНК* (мРНК, или иРНК). Поскольку мРНК намного короче, чем вся ДНК в хромосоме, они могут проникать через ядерные поры в цитоплазму клетки. Так мРНК переносят информацию из ядра («руководящего центра») в «тело» клетки.

В «теле» клетки находятся молекулы РНК двух других классов, и они оба играют ключевую роль в окончательной сборке молекулы белка, кодируемого геном. Одни из них — *рибосомные РНК*, или рРНК. Они входят в состав клеточной структуры под названием рибосома. Рибосому можно сравнить с конвейером, на котором происходит сборка.

Другие находятся в «теле» клетки и называются *транспортными РНК*, или тРНК. Эти молекулы устроены так: с одной стороны находятся три азотистых основания, а с другой — участок для присоединения аминокислоты (см. белки). Эти три основания на молекуле тРНК могут связываться с парными основаниями молекулы мРНК. (Существует 64 молекулы тРНК — четыре в третьей степени — и каждая из них может присоединиться только к одному триплету свободных оснований на мРНК.) Таким образом, процесс сборки белка представляет собой присоединение определенной молекулы тРНК, несущей на себе аминокислоту, к молекуле мРНК. В конце концов все молекулы тРНК присоединятся к мРНК и по другую сторону тРНК выстроится цепочка аминокислот, расположенных в определенном порядке.

Последовательность аминокислот — это, как известно, первичная структура белка. Другие ферменты завершают сборку, и конечным продуктом оказывается белок, первичная структура которого определена сообщением, записанным на гене молекулы ДНК. Затем этот белок сворачивается, принимая окончательную форму, и может выступать в роли фермента (см. катализаторы и ферменты), катализирующего одну химическую реакцию в клетке.

Хотя на ДНК различных живых организмов записаны разные сообщения, все они записаны с использованием одного и того же генетического кода — у всех организмов каждому триплету оснований на ДНК соответствуют одна и та же аминокислота в образовавшемся белке. Это сходство всех живых организмов — наиболее весомое доказательство теории эволюции, поскольку оно подразумевает, что человек и другие живые организмы произошли от одного биохимического предка.

Центробежная сила

Во вращающейся системе отсчета наблюдатель испытывает на себе действие силы, уводящей его от оси вращения

1604, 1609	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1659	ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА
1687	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1835	ЭФФЕКТ КОРИОЛИСА
1905, 1916	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Вам, наверное, доводилось испытывать неприятные ощущения, когда машина, в которой вы едете, входила в крутой вираж. Кажется, что сейчас вас так и выбросит на обочину. И если вспомнить законы механики Ньютона, то получается, что раз вас буквально вдавливало в дверцу, значит, на вас действовала некая сила. Эту видимую силу обычно называют «центробежная сила». Именно из-за центробежной силы так захватывает дух на крутых поворотах, когда эта сила прижимает вас к бортику автомобиля. (Между прочим, этот термин, происходящий от латинских слов *centrum* (центр) и *fugus* (бег), ввел в научный обиход в 1689 году Исаак Ньютон.)

Стороннему наблюдателю, однако, все будет представляться иначе. Когда машина закладывает вираж, наблюдатель сочтет, что вы просто продолжаете прямолинейное движение, как это и делал бы любой объект, на который не оказывает действия никакая внешняя сила, а автомобиль отклоняется от прямолинейной траектории. Такому наблюдателю покажется, что это не вас прижимает к дверце машины, а, наоборот, дверца машины начинает давить на вас.

Впрочем, никаких противоречий между этими двумя точками зрения нет. В обеих системах отсчета события описываются одинаково и для этого описания используются одни и те же уравнения. Единственным отличием будет интерпретация происходящего внешним и внутренним наблюдателем. В этом смысле центробежная сила напоминает силу Кориолиса (см. ЭФФЕКТ КОРИОЛИСА), которая также действует во вращающихся системах отсчета.

Поскольку не все наблюдатели видят действие этой силы, физики часто называют центробежную силу *мнимой силой*, или *псевдосилой*. Однако мне кажется, что такая интерпретация может вводить в заблуждение. В конце концов, едва ли можно назвать мнимой силу, которая ощутимо придавливает вас к дверце автомобиля. Просто все дело в том, что, продолжая двигаться по инерции, ваше тело стремится сохранить прямолинейное направление движения, в то время как автомобиль от него уклоняется и из-за этого давит на вас.

Чтобы проиллюстрировать эквивалентность двух описаний центробежной силы, давайте немного поупражняемся в математике. Тело, движущееся с постоянной скоростью по окружности, движется с ускорением, поскольку оно все время меняет направление. Это ускорение равно v^2/r , где v — скорость, а r — радиус окружности. Соответственно, наблюдатель, находящийся в движущейся по окружности системе отсчета, будет испытывать центробежную силу, равную mv^2/r .

Теперь обобщим сказанное: любое тело, движущееся по криволинейной траектории, будь то пассажир в машине на вираже, мяч на веревочке, который вы раскручиваете над головой, или Земля на орбите вокруг Солнца, испытывает на себе действие силы, которая обусловлена давлением дверцы автомобиля, натяжением

веревки или гравитационным притяжением Солнца. Назовем эту силу F . С точки зрения того, кто находится во вращающейся системе отсчета, тело не движется. Это означает, что внутренняя сила F уравнивается внешней центробежной силой:

$$F = mv^2/r.$$

Однако с точки зрения наблюдателя, находящегося вне вращающейся системы отсчета, тело (вы, мяч, Земля) движется равноускоренно под воздействием внешней силы. Согласно второму закону механики Ньютона, отношение между силой и ускорением в этом случае $F = ma$. Подставив в это уравнение формулу ускорения для тела, движущегося по окружности, получим:

$$F = ma = mv^2/r.$$

Но тем самым мы получили в точности уравнение для наблюдателя, находящегося во вращающейся системе отсчета. Значит, оба наблюдателя приходят к идентичным результатам относительно величины действующей силы, хотя и исходят из разных предпосылок.

Это очень важная иллюстрация того, что представляет собою механика как наука. Наблюдатели, находящиеся в различных системах отсчета, могут описывать происходящие явления совершенно по-разному. Однако, сколь бы принципиальными ни были различия в подходах к описанию наблюдаемых ими явлений, уравнения, их описывающие, окажутся идентичными. А это не что иное, как принцип инвариантности законов природы, лежащий в основе теории относительности.

Цикл и теорема Карно

Ни один тепловой двигатель, работающий по замкнутому циклу при двух заданных температурах, не может быть эффективнее идеального двигателя Карно

1798	●	МЕХАНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОТЫ
1824	●	ЦИКЛ И ТЕОРЕМА КАРНО
1842	●	ТЕРМОДИНАМИКА, ПЕРВОЕ НАЧАЛО
1850	●	ТЕРМОДИНАМИКА, ВТОРОЕ НАЧАЛО

Идеальных машин в реальной жизни не существует, это всего лишь мысленный конструкт. Каждая из таких гипотетических машин, среди которых *двигатель Карно* занимает немаловажное место, иллюстрирует какое-нибудь важное теоретическое заключение. (Даже воздушный замок под названием вечный двигатель служит, по сути, лишь для того, чтобы показать: нельзя получать энергию из ничего.) Двигатель Карно, лежащий в основе работы идеального теплового двигателя, был придуман французским инженером Сади Карно за двадцать лет до того, как были сформулированы основы термодинамики, однако он иллюстрирует важное следствие из второго начала термодинамики.

Рабочую часть двигателя Карно можно представить себе в виде поршня в заполненном газом цилиндре. Поскольку двигатель Карно — машина чисто теоретическая, то есть идеальная, силы трения между поршнем и цилиндром и тепловые потери считаются равными нулю. Поршень может свободно перемещаться между двумя *тепловыми резервуарами* — с высокой температурой и с низкой температурой. (Для удобства представим, что горячий тепловой резервуар нагревается посредством сжигания смеси бензина с воздухом, а холодный — остужается водой или воздухом комнатной температуры.) В этой тепловой машине происходит следующий идеальный четырехфазный цикл:

1. Сначала цилиндр вступает в контакт с горячим резервуаром и идеальный газ расширяется при постоянной температуре и постоянном давлении. На этой фазе газ получает от горячего резервуара некое количество тепла.
2. Затем цилиндр окружается идеальной теплоизоляцией, за счет чего количество тепла, имеющееся у газа, сохраняется и газ продолжает расширяться, пока его температура не упадет до температуры холодного теплового резервуара.
3. На третьей фазе теплоизоляция снимается и газ в цилиндре, будучи в контакте с холодным резервуаром, сжимается, отдавая при этом часть тепла холодному резервуару.
4. Когда сжатие достигает определенной точки, цилиндр снова окружается теплоизоляцией и газ сжимается за счет поднятия поршня до тех пор, пока его температура не сравняется с температурой горячего резервуара. После этого теплоизоляция удаляется и цикл повторяется вновь с первой фазы.

Двигатель Карно имеет много общего с реальными двигателями: он работает по замкнутому циклу (который называется, соответственно, *циклом Карно*); он получает энергию извне благодаря высокотемпературному процессу (например, при сжигании топлива); часть энергии рассеивается в окружающую среду. При этом производится определенная работа (в случае двигателя

Карно — за счет поступательного движения поршня). КПД, или *эффективность* двигателя Карно, определяется как отношение работы, которую он производит, к энергии (в форме тепла), отнятой у горячего резервуара. Нетрудно доказать, что эффективность (E) выражается формулой:

$$E = 1 - (T_c/T_h),$$

где T_c и T_h — соответственно температура холодного и горячего резервуаров (в кельвинах). Очевидно, что эффективность двигателя Карно меньше 1 (или 100%).

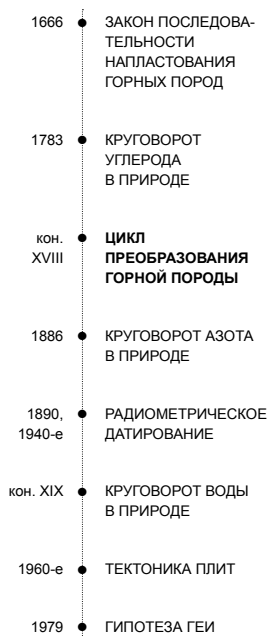
Великое прозрение Карно состоит в том, что он показал, что ни один тепловой двигатель, работающий при двух заданных температурах, не может быть эффективнее идеального двигателя Карно (это утверждение называют *теоремой Карно*). В противном случае мы столкнулись бы с нарушением второго начала термодинамики, поскольку такой двигатель отбирал бы тепло от менее нагретого резервуара и передавал бы его более нагретому. (На самом деле второе начало термодинамики является следствием теоремы Карно.) Таким образом, полученное Карно соотношение устанавливает *предел эффективности* реальных двигателей, работающих в реальном мире. К нему можно приблизиться, но достичь и тем более превзойти его инженеры не смогут. Так что чисто гипотетический двигатель Карно играет немаловажную роль в мире реальной, шумной и пахнущей разогретым машинным маслом техники, и это еще один пример прикладного значения чисто теоретических, на первый взгляд, изысканий.

НИКОЛА ЛЕОНАР САДИ КАРНО
(Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796–1832) — французский физик и военный инженер. Родился в Париже. Его отец — Лазар Никола Маргерит Карно (Lazare Nicolas Marguerite Carnot, 1753–1823) — был видным государственным деятелем наполеоновской эпохи, однако, будучи генералом и политиком, находил время для занятий чистой математикой. Сад Карно учился в знаменитой Политехнической школе и после ее окончания в 1814 году отправился добровольцем на фронт под командование Наполеона Бонапарта, где и нес службу военного инженера вплоть до падения Наполеона в 1819 году. После этого Сад Карно оставил военную службу и занялся изучением наук, экономики

и искусств. Его интересовали также многие новые промышленно-технологические разработки того времени. Занявшись теоретическим обоснованием принципов работы паровых машин, Карно стал одним из пионеров термодинамики и предложил свою знаменитую модель идеального двигателя. Свои идеи Сад Карно опубликовал в 1824 году в форме фундаментального трактата «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance*). Вернувшись в 1832 году на военную службу в чине капитана, Сад Карно вскоре скоропостижно скончался в возрасте всего 36 лет от холеры на фоне скарлатины.

Цикл преобразования горной породы

Горные породы на поверхности Земли последовательно проходят различные стадии преобразования



В начале жизни Земли был период, когда ее поверхность была расплавленной. По мере остывания планеты этот расплав (магма) затвердел и кристаллизовался и образовались первые горные породы. Породы такого типа называются *магматическими*. Магматические горные породы продолжают формироваться и сегодня — это, например, вулканическая лава или выбросы магмы вблизи срединно-океанических хребтов (см. **ТЕКТОНИКА ПЛИТ**). Поскольку это были первые породы, образовавшиеся на нашей планете, с них мы и начнем наш рассказ о цикле преобразования горной породы.

После формирования первых горных пород температура Земли продолжала снижаться, пока не опустилась ниже точки кипения воды. Как только на Землю упала первая капля дождя, магматические горные породы начали выветриваться. От породы отделилась первая частица и была смыта вниз, чтобы стать первой песчинкой на первом пляже. Время шло, все больше и больше частиц смывалось в недавно образовавшийся океан, скапливаясь на дне в виде слоя толщиной в несколько километров. В нижней части этого скопления вода протекала сквозь песчинки, оставляя между ними клейкий глинистый осадок, в результате чего образовалось что-то вроде цемента. Так под воздействием огромного давления верхних слоев рыхлое скопление песчинок превратилось в твердую горную породу — песчаник. Нечто похожее получится, если полить клеем кучу песка и затем поставить на нее что-нибудь тяжелое.

Когда на Земле появилась жизнь, стала создаваться новая, широко распространенная форма отложений. Микроскопические организмы, живущие в океане, извлекали кальций из морской воды, чтобы придать твердость своим раковинам. Когда эти организмы умирали, их раковины, словно снег, падали на дно океана. Спустя тысячелетия они тоже превратились в камень — в данном случае в известняк.

Породы, образованные в процессе оседания, называются, соответственно, *осадочными горными породами*. Существуют различные виды осадочных пород в зависимости от вида отложений: песок образует песчаник, кальций образует известняк, ил образует глинистые сланцы. Крупные реки — такие как Амазонка, Нил, Миссисипи — постоянно оставляют в своих дельтах тонны ила, который когда-нибудь превратится в сланцы.

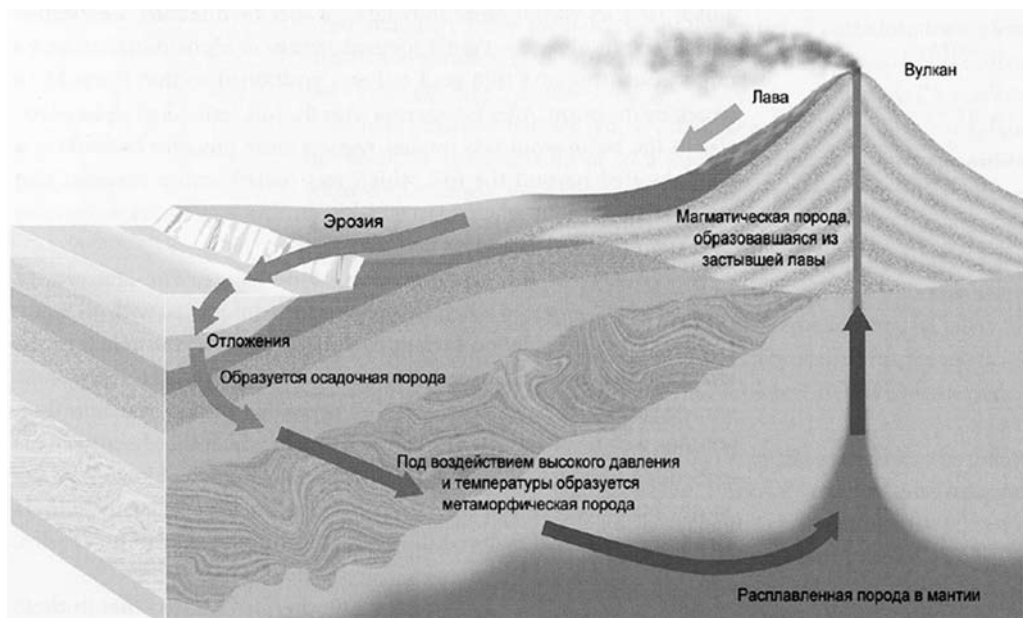
Осадочные горные породы, как правило, нетрудно распознать. Поскольку они образуются на дне океанов и озер, то откладываются слоями и выглядят как страницы лежащей на столе закрытой книги, если посмотреть на нее сбоку. Такие породы можно наблюдать по сторонам дорог, проложенных в холмистой или горной местности. И если вы видите осадочные породы высоко в горах, далеко от океанов, — это наглядная демонстрация того, что поверхность Земли находится в постоянном движении (см. **ТЕКТОНИКА ПЛИТ**).

После того как осадочные породы сформировались, с ними могут происходить самые разные вещи. Они могут подвергаться

эрозии (выветриваться, вымываться и т. п.), принося свои частицы в осадочные отложения новых поколений. В результате тектонической активности они могут оказаться погребенными глубоко под поверхностью Земли. Там под действием высокого давления и высокой температуры структура минералов, образующих породу, изменяется и становится кристаллической. Тогда существенно изменяется и сама горная порода, состоящая из этих минералов. Например, известняк в результате таких воздействий превращается в мрамор, а глинистые сланцы становятся кристаллическими сланцами. Горные породы, подвергшиеся таким превращениям, называются *метаморфическими*.

Первая частица, выветрившаяся из магматической породы, могла проделать этот путь — в земную кору и обратно — несколькими способами. Она могла входить в состав осадочных пород, которые, в свою очередь, могли вновь выветриться и образовать очередное поколение горных пород такого же типа. Или же она могла преобразоваться в породу другого типа. Наконец, любые из этих горных пород могли попасть под поверхность Земли в результате таких процессов, как столкновения материков или субдукция — когда из-за глубинных разломов одна тектоническая плита пододвигается под другую (см. тектоника плит. В этом случае они могли расплавиться, а их атомы — выйти на поверхность в виде магматической породы для того, чтобы весь цикл повторился вновь.

Жизненный цикл горной породы: расплав (магма), излияние лавы, эрозия, оседание, сжатие и снова расплав



Циклы Миланко- вича

Из-за периодических изменений параметров своей орбиты Земля проходит через повторяющиеся ледниковые периоды

1910-е • ЦИКЛЫ
МИЛАНКОВИЧА

В XIX веке геологи сделали неожиданное открытие: оказалось, что когда-то огромные арктические ледники наступили на сушу и накрыли почти всю Европу и Северную Америку. В частности, на оледенение этих зон указывают следующие два геологических признака. Представьте, что продвигающийся ледник действует наподобие бульдозера: он толкает перед собой грунт и обломки горных пород. Когда ледник достигает своего максимума и начинает отступать, гряда оставшейся горной породы превращается в цепь холмов — это так называемые *ледниковые морены*. Вдобавок при передвижении ледника движущийся (хотя и медленно) лед несет с собой куски горной породы. Если взглянуть на поверхность горной долины, образованной ледником, можно обнаружить на ней глубокие параллельные борозды. Происхождение этих *царапин* легко объяснить, если представить себе, что ледник с утопленной нижней частью передвигается по горной породе, действуя как напильник или наждачная бумага. Морены и царапины — яркие доказательства того, что когда-то здесь были ледники.

Вскоре после этого открытия стало ясно, что ледниковый период на Земле наступал не один раз. По-видимому, ледниковые периоды повторялись в прошлом через определенные промежутки времени. Почему так происходило, никто не мог объяснить вплоть до начала XX века, когда разрешить эту загадку взялся один выдающийся ученый. В своих мемуарах Милутин Миланкович рассказывает о том, как он пришел к мысли о причинах ледниковых периодов. Приятель Миланковича опубликовал сборник своих патриотических стихов, и они вместе отмечали это событие в кафе (молодые преподаватели Белградского университета могли себе позволить только кофе). Сидящему рядом богатому коммерсанту так понравились стихи, что он тут же купил десять экземпляров книги. Друзья заказали вина и стали праздновать по-настоящему. После первой бутылки Миланкович «вспомнил свои прежние достижения, которые теперь казались узкими и ограниченными». К концу третьей бутылки поэт уже собирался написать эпическую поэму, а Миланкович решил «постичь всю Вселенную и донести луч света до ее отдаленных уголков».

Во время Первой мировой войны Миланкович служил в Генеральном штабе сербской армии. Он был захвачен в плен австро-венгерскими войсками и отбывал заключение в Будапеште. К счастью для Миланковича (и для науки), его коллеги из Венгерской академии наук создали ему условия для работы — под честное слово, что он не попытается сбежать. Он согласился и большую часть войны разрабатывал теорию периодичности ледниковых периодов.

Его объяснение связано с изменениями в земной орбите (теперь они называются «циклы Миланковича»). В соответствии с законом всемирного тяготения ньютона (а также первым из законов Кеплера, описывающим траектории движения планет Солнечной системы) каждая планета вращается вокруг Солнца

по эллиптической орбите. Кроме того, согласно закону сохранения момента импульса, если Земля вращается вокруг своей оси, то направление этой оси в пространстве должно оставаться неизменным. Но в реальной Солнечной системе Земля вращается вокруг Солнца не в гордом одиночестве. На нее действует притяжение Луны и других планет, и это притяжение оказывает хоть и слабое, но очень важное влияние и на земную орбиту, и на вращение Земли. Это влияние выражается тройко:

- *Прецессия*. На самом деле земная ось не повернута всегда в одном и том же направлении — она медленно движется по круговому конусу. Этот эффект называется прецессией. На нем основано действие гироскопа. Когда гироскоп приходит в движение, он быстро вращается вокруг своей оси, при этом сама ось описывает конус. С земной осью происходит то же самое, причем период полного оборота составляет приблизительно 26 тысяч лет. Сейчас Земля наклонена так, что в январе (когда Земля находится ближе всего к Солнцу) Северное полушарие, где расположена основная часть суши, отвернуто от Солнца. Через 13 тысяч лет ситуация изменится на противоположную: в январе Северное полушарие будет повернуто к Солнцу, и январь станет в Северном полушарии серединой лета.
- *Нутация*. В дополнение к медленной прецессии Земли незначительно колеблется и угол наклона земной оси (эти колебания и называются нутацией). Сейчас ось наклонена на 23° к плоскости земной орбиты. Каждую 41 тысячу лет под влиянием не только Луны, но и Юпитера (далекой, но массивной планеты) угол наклона уменьшается до 22° и затем вновь возрастает до 23° .
- *Изменение формы орбиты*. Из-за притяжения других планет с течением времени меняется и форма земной орбиты. От эллипса, вытянутого в одном направлении, она превращается в круг, затем — в эллипс, вытянутый в направлении, перпендикулярном исходному, затем — снова в круг и т.д. Этот цикл длится примерно 93 тысячи лет.

Миланкович пришел к выводу, что каждый из этих факторов влияет на количество солнечного света, полученного разными областями Земли. Например, прецессия земной оси влияет на характер зим и лет в Северном полушарии (я обращаю особое внимание на Северное полушарие, так как там расположена основная часть суши и, следовательно, там находится основная часть ледников).

Миланкович понял, что с течением времени климат Земли меняется (см. РАВНОВЕСИЕ). Если количество солнечного света, которое получает Северное полушарие, уменьшается, то снег с каждым годом будет все дольше оставаться на поверхности. А поскольку

снег хорошо отражает свет, увеличившаяся снежная поверхность будет отражать больше солнечного света, и это приведет к дальнейшему охлаждению Земли. Значит, следующей зимой выпадет еще больше снега, еще больше увеличится площадь снежного покрова, будет отражаться еще больше солнечного света и т.д. С течением времени накопится много снега и ледники двинутся на юг. Земля вступит в ледниковый период. В конце этого цикла, когда в Северное полушарие начнет поступать больше солнечной энергии, произойдут обратные изменения — в некоторых местах лед растает, обнажатся участки почвы, хорошо поглощающей свет, Земля нагреется и все те же три фактора изменчивости вращения Земли приведут к тому, что ледник отступит.

Миланкович считал, что на климат на Земле оказывают влияние эти три цикла, каждый из которых связан с определенным астрономическим эффектом. Когда они усиливают друг друга, можно ожидать похолодания и наступления ледникового периода. Однако в норме эти три фактора действуют в разных направлениях и их влияние не суммируется, так что климат быстро возвращается в обычное состояние. Итак, ледниковые периоды возникают, когда три орбитальных фактора действуют в одном направлении, их эффекты складываются и подталкивают климат Земли к похолоданию. Это явление не раз повторялось в истории планеты.

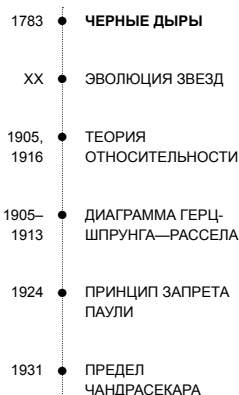
За последние 3 миллиона лет было по крайней мере четыре периода масштабного оледенения, а до этого были и еще. Хочу напомнить, что последний ледниковый период достиг своего максимума примерно 18 тысяч лет назад и что время, в которое мы живем, ученые определяют как *межледниковое* — весьма обнадеживающее определение.

МИЛУТИН МИЛАНКОВИЧ (Milutin Milanković, 1879–1958) — сербский климатолог. Родился в г. Даль (Dalj, ныне Хорватия), получил образование в Вене и стал работать инженером-строителем. В 1904 году поступил в Белградский университет, где прошла вся его научная жизнь. Во время Первой мировой

войны попал в плен в Будапеште, но благодаря венгерским коллегам продолжал свои исследования. Многие годы Миланкович пытался восстановить историю климата Земли. Теперь, когда стали доступны более совершенные методики датирования, его выводы считаются спорными.

Черные дыры

Черные дыры представляют собой сингулярные возмущения в пространственно-временном континууме



Из всех гипотетических объектов Вселенной, предсказываемых научными теориями, черные дыры производят самое жуткое впечатление. И, хотя предположения об их существовании начали высказываться почти за полтора столетия до публикации Эйнштейном общей теории относительности, убедительные свидетельства реальности их существования получены совсем недавно. Я вот, например, помню, как преподаватель теории относительности в высшей школе, где я учился, утверждал, что хотя существование черных дыр общей теорией относительности допускается и даже предсказывается, в реальном мире подобные объекты просто не могут образоваться.

Давайте начнем с того, как общая теория относительности решает вопрос о природе гравитации. Закон всемирного тяготения Ньютона утверждает, что между двумя любыми массивными телами во Вселенной действует сила взаимного притяжения. По причине такого гравитационного притяжения Земля обращается вокруг Солнца. Общая теория относительности заставляет нас взглянуть на систему Солнце—Земля иначе. Согласно этой теории, в присутствии столь массивного небесного тела, как Солнце, пространство-время как бы проминается под его тяжестью и равномерность его ткани нарушается. Представьте себе эластичный батут, на котором лежит тяжелый шар (например, от боулинга). Натянутая ткань прогибается под его весом, создавая вокруг разрежение. Таким же образом Солнце продавливает пространство-время вокруг себя.

Согласно этой картине, Земля просто катается вокруг образовавшейся воронки (за исключением того, что маленький шарик, катающийся вокруг тяжелого на батуте, неизбежно будет терять скорость и по спирали приближаться к большому). И то, что мы привычно воспринимаем как силу земного притяжения в нашей повседневной жизни, также есть не что иное, как изменение геометрии пространства-времени, а не сила в ньютоновском понимании. На сегодня более удачного объяснения природы гравитации, чем дает нам общая теория относительности, не придумано.

А теперь представьте, что произойдет, если мы будем — в рамках предложенной картины — увеличивать и увеличивать массу тяжелого шара, не увеличивая при этом его физических размеров? Будучи абсолютно эластичной, воронка будет углубляться до тех пор, пока ее верхние края не сойдутся где-то высоко над совсем потяжелевшим шаром, и тогда он просто перестанет существовать при взгляде с поверхности. В реальной Вселенной, накопив достаточную массу и плотность материи, объект захлопывает вокруг себя пространственно-временную ловушку, ткань пространства-времени смыкается, и он теряет связь с остальной Вселенной, становясь невидимым для нее. Так возникает черная дыра.

Важнейшее свойство черной дыры — что бы в нее ни попало, обратно оно не вернется. Это касается даже света, вот почему черные дыры и получили свое название: тело, поглощающее весь свет, падающий на него, и не испускающее собственного, кажется абсолютно черным. Согласно общей теории относительности, если

объект приближается к центру черной дыры на критическое расстояние — это расстояние называется *радиусом Шварцшильда*, — он уже никогда не сможет вернуться назад. (Немецкий астроном Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild, 1873–1916) в последние годы своей жизни, используя уравнения общей теории относительности Эйнштейна, рассчитал гравитационное поле вокруг массы нулевого объема.) Для массы Солнца радиус Шварцшильда составляет 3 км, то есть, чтобы превратить наше Солнце в черную дыру, нужно уплотнить всю его массу до размера небольшого городка!

Внутри радиуса Шварцшильда теория предсказывает явления еще более странные: все вещество черной дыры собирается в бесконечно малую точку бесконечной плотности в самом ее центре — математики называют такой объект *сингулярным возмущением*. При бесконечной плотности любая конечная масса материи, математически говоря, занимает нулевой пространственный объем. Происходит ли это явление реально внутри черной дыры, мы, естественно, экспериментально проверить не можем, поскольку все попавшее внутрь радиуса Шварцшильда обратно не возвращается.

Не имея, таким образом, возможности «рассмотреть» черную дыру в традиционном смысле слова «смотреть», мы тем не менее можем обнаружить ее присутствие по косвенным признакам влияния ее сверхмощного и совершенно необычного гравитационного поля на материю вокруг нее.

Сверхмассивные черные дыры

В центре нашего Млечного Пути и других галактик располагается невероятно массивная черная дыра в миллионы раз тяжелее Солнца. Эти *сверхмассивные черные дыры* (такое название они получили) были обнаружены по наблюдениям за характером движения межзвездного газа вблизи центров галактик. Газы, судя по наблюдениям, вращаются на близком удалении от сверхмассивного объекта, и простые расчеты с использованием законов механики Ньютона показывают, что объект, притягивающий их, при мизерном диаметре обладает чудовищной массой. Так закрутить межзвездный газ в центре галактики может только черная дыра. Фактически астрофизики нашли уже десятки таких массивных черных дыр в центрах соседних с нашей галактик и сильно подозревают, что центр любой галактики есть черная дыра.

Черные дыры со звездной массой

Согласно нашим нынешним представлениям об эволюции звезд, когда звезда с массой, превышающей примерно 30 масс Солнца, гибнет со вспышкой сверхновой, внешняя ее оболочка разлетается, а внутренние слои стремительно обрушиваются к центру и образуют черную дыру на месте израсходовавшей запасы топлива звезды. Изолированную в межзвездном пространстве черную дыру

ДЖОН МИЧЕЛЛ (John Michell, 1724–1793) — английский геолог, священник и теософ. О его жизни известно немного. В 1760 году его избрали в Королевское общество за заслуги в исследовании причин катастрофического землетрясения, буквально стершего с лица земли Лиссабон в 1755 году. Ученый верно установил причину толчков — ударные волны, возникшие в результате подвижки геотектонических плит на дне Атлантического океана. В астрономии Мичелл установил, что большинство двойных звезд, представляющих нам в телескопы отстоящими на мизерное расстояние друг от друга, реально являются парными звездными системами, связанным в единое тело силами взаимного тяготения, поскольку чистой случайностью такое их количество в небе объяснить невозможно. Однако самое невероятное «прозрение» Мичелла — предсказание того, что он сам называл «темными звездами», — которые, по его мнению, столь массивны, что даже свет не может преодолеть силу их притяжения. Примечательно и то, что сам Мичелл указал на то, что выявить их по отдельности невозможно, а в составе двойной звездной системы это вполне реально.

такого происхождения выявить практически невозможно, поскольку она находится в разреженном вакууме и никак не проявляет себя в плане гравитационных взаимодействий. Однако, если такая дыра входила в состав двойной звездной системы (две горячие звезды, обращающиеся по орбите вокруг их центра масс), черная дыра будет по-прежнему оказывать гравитационное воздействие на парную ей звезду. Астрономы сегодня имеют более десятка кандидатов на роль звездных систем такого рода, хотя строгих доказательств не получено в отношении ни одной из них.

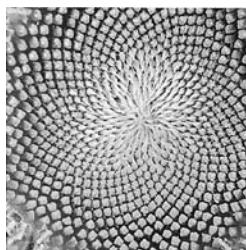
В двойной системе с черной дырой в ее составе вещество «живой» звезды будет неизбежно «перетекать» в направлении черной дыры. И закручиваться высасываемое черной дырой вещество при падении в черную дыру будет по спирали, исчезая при пересечении радиуса Шварцшильда. При подходе к роковой границе, однако, засасываемое в воронку черной дыры вещество будет неизбежно уплотняться и разогреваться в силу учащения соударений между поглощаемыми дырой частицами, пока не разогреется до энергий излучения волн в рентгеновском диапазоне спектра электромагнитного излучения. Астрономы могут измерить периодичность изменения интенсивности рентгеновского излучения такого рода и вычислить, сопоставив ее с другими доступными данными, примерную массу объекта, «перетягивающего» на себя материю. Если масса объекта превышает предел чандрасекара (1,4 массы Солнца), этот объект не может являться белым карликом, в которого суждено выродиться нашему светилу. В большинстве выявленных случаев наблюдения подобных двойных рентгеновских звезд массивным объектом является нейтронная звезда. Однако насчитано уже более десятка случаев, когда единственным разумным объяснением является присутствие в двойной звездной системе черной дыры.

Все другие типы черных дыр куда более спекулятивны и основаны исключительно на теоретических изысканиях — экспериментальных подтверждений их существования не имеется вовсе. Во-первых, это *черные мини-дыры* с массой, сопоставимой с массой горы и сжатой до радиуса протона. Идею об их зарождении на начальной стадии формирования Вселенной непосредственно после большого взрыва высказал английский космолог Стивен Хокинг (см. скрытый принцип необратимости времени). Хокинг предположил, что взрывами мини-дыр можно объяснить действительно загадочный феномен точечных вспышек гамма-излучения во Вселенной. Во-вторых, некоторые теории элементарных частиц предсказывают существование во Вселенной — на микроуровне — настоящего решета из черных дыр, представляющих собой своего рода пену из отходов мироздания. Диаметр таких микродыр предположительно составляет около 10^{-33} см — они в миллиарды раз мельче протона. На данный момент у нас нет каких-либо надежд на экспериментальную проверку даже самого факта существования таких черных дыр-частиц, не говоря уже о том, чтобы хоть как-то исследовать их свойства.

Числа Фибоначчи

Последовательность чисел, каждый член которой равен сумме двух предыдущих, имеет множество любопытных свойств

1202 • ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ



Семечки у подсолнуха упорядочены в две спирали. Числа, обозначающие количество семечек в каждой из спиралей, являются членами удивительной математической последовательности

Леонардо из Пизы, известный как Фибоначчи, был первым из великих математиков Европы позднего Средневековья. Будучи рожденным в Пизе в богатой купеческой семье, он пришел в математику благодаря сугубо практической потребности установить деловые контакты. В молодости Леонардо много путешествовал, сопровождая отца в деловых поездках. Например, мы знаем о его длительном пребывании в Византии и на Сицилии. Во время таких поездок он много общался с местными учеными.

Числовой ряд, который сегодня носит его имя, вырос из проблемы с кроликами, которую Фибоначчи изложил в своей книге *Liber abacci*, написанной в 1202 году:

Человек посадил пару кроликов в загон, окруженный со всех сторон стенами. Сколько пар кроликов за год может произвести на свет эта пара, если известно, что каждый месяц, начиная со второго, каждая пара кроликов производит на свет одну пару?

Можете убедиться, что число пар в каждый из двенадцати последующих месяцев месяцев будет соответственно

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144,...

Иными словами, число пар кроликов создает ряд, каждый член в котором — сумма двух предыдущих. Он известен как *ряд Фибоначчи*, а сами числа — *числа Фибоначчи*. Оказывается, эта последовательность имеет множество интересных с точки зрения математики свойств. Вот пример: вы можете разделить линию на два сегмента, так что соотношение между большим и меньшим сегментом будет пропорционально соотношению между всей линией и большим сегментом. Этот коэффициент пропорциональности, приблизительно равный 1,618, известен как *золотое сечение*. В эпоху Возрождения считалось, что именно эта пропорция, соблюденная в архитектурных сооружениях, больше всего радует глаз. Если вы возьмете последовательные пары из ряда Фибоначчи и будете делить большее число из каждой пары на меньшее, ваш результат будет постепенно приближаться к золотому сечению.

С тех пор как Фибоначчи открыл свою последовательность, были найдены даже явления природы, в которых эта последовательность, похоже, играет немаловажную роль. Одно из них *филлотаксис* (листорасположение) — правило, по которому располагаются, например, семечки в соцветии подсолнуха. Семечки упорядочены в два ряда спиралей, один из которых идет по часовой стрелке, другой против. И каково же число семян в каждом случае? 34 и 55.

ФИБОНАЧЧИ (Леонардо из Пизы) Fibonacci (Leonardo of Pisa, ок. 1175–1250) — итальянский математик. Родился в Пизе, стал первым великим математиком Европы позднего Средневековья. В математику его привела практическая потребность установить деловые контакты. Он издавал свои книги по арифметике,

алгебре и другим математическим дисциплинам. От мусульманских математиков он узнал о системе цифр, придуманной в Индии и уже принятой в арабском мире, и уверился в ее превосходстве (эти цифры были предшественниками современных арабских цифр).

Число Рейнольдса

Характер потока жидкости или газа — ламинарный или турбулентный — определяется безразмерным числом, зависящим от скорости потока, вязкости и плотности жидкости и характерной длины элемента потока

1883—1884 • ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА

Осборн Рейнольдс был в некотором смысле последним приверженцем старых добрых традиций классической механики Ньютона. В конце жизни он даже разработал тщательно продуманную механическую модель светоносного эфира (см. опыт МАЙКЕЛЬСОНА—МОРЛИ), согласно которой эфир представлял собой систему мельчайших шарообразных частиц, свободно перекатывающихся друг относительно друга подобно дробинкам в мешке. До конца своих дней он считал, что «прогрессу механики нет конца... и то, что современники полагают ее пределом и тупиком... со временем окажется лишь новым поворотом на пути ее развития».

Чтобы понять всю важность главного открытия его жизни, нужно сначала немного рассказать о так называемых *безразмерных величинах*. Предположим, нам нужно измерить геометрические размеры комнаты. Допустим, мы взяли рулетку и определили, что длина комнаты равна 5 метрам. Однако, если мы возьмем рулетку, проградуированную в футах, окажется, что длина комнаты равна 15 с небольшим футов. То есть полученные нами при измерении цифры будут зависеть от используемых единиц, в то время как реальная длина комнаты остается постоянной.

Есть, однако, и такие характеристики геометрии комнаты, которые никак не зависят от единиц измерения. В частности, такой величиной является отношение длины комнаты к ее ширине — так называемое *характеристическое соотношение*. Если комната имеет длину 20 футов и ширину 10 футов, ее характеристическое соотношение равно 2. Измерив длину и ширину комнаты в метрах, мы получим, что размеры комнаты равны 6,096 м × 3,048 м, однако характеристическое соотношение останется прежним: 6,096 м : 3,048 м = 2. В данном случае 2 — безразмерная характеристика комнаты.

Теперь давайте обратимся к потоку жидкости. Различные жидкости при течении в трубах, растекании по поверхности или обтекании препятствий обладают различными свойствами. Густая, клейкая жидкость (например, мед) обладает, как говорят физики, большей *вязкостью*, нежели легкая и подвижная жидкость (например, бензин). Степень вязкости жидкости определяется так называемым коэффициентом вязкости, который принято обозначать греческой буквой η («эта»). У густых, клейких жидкостей коэффициент вязкости η в десятки и сотни раз выше, чем у легких и текучих.

Рейнольдсу удалось обнаружить безразмерное число, описывающее характер потока вязкой жидкости. Сам ученый получил его экспериментально, проведя изнурительную серию опытов с различными жидкостями, однако вскоре было показано, что его можно вывести и теоретически из законов механики Ньютона и уравнений классической гидродинамики. Это

число, которое теперь называют числом Рейнольдса и обозначают Re , характеризует поток и равно:

$$Re = vL\rho/\eta,$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость потока, а L — характерная длина элемента потока (в этой формуле важно помнить, что Re — это одно число, а не произведение $R \times e$).

Теперь давайте посмотрим на размерность составляющих числа Рейнольдса:

- размерность коэффициента вязкости η — ньютон умножить на секунды разделить на кв. метры, или $н \cdot с / м^2$. Если вспомнить, что, по определению, $н = кг \cdot м / с^2$, мы получим $кг / м \cdot с$
- размерность плотности ρ — килограммы разделить на кубические метры, или $кг / м^3$
- размерность скорости v — метры разделить на секунды, или $м / с$
- размерность длины элемента потока L — метры, или $м$

Отсюда получаем, что размерность числа Рейнольдса равна:

$$(м / с) \times (м) \times (кг / м^3) : (кг / м \cdot с),$$

или после упрощения

$$(кг / м \cdot с) : (кг / м \cdot с)$$

Итак, все единицы измерения в размерности числа Рейнольдса сокращаются, и оно действительно оказывается безразмерной величиной.

Рейнольдсу удалось выяснить, что при значении этого числа 2000–3000 поток становится полностью *турбулентным*, а при значении Re меньше нескольких сотен — поток полностью *ламинарный* (то есть не содержит завихрений). Между двумя этими значениями поток носит промежуточный характер.

Можно, конечно, считать число Рейнольдса чисто экспериментальным результатом, однако его можно интерпретировать и с позиции законов Ньютона. Жидкость в потоке обладает импульсом, или, как иногда говорят теоретики, «инерционной силой». По сути это означает, что движущаяся жидкость стремится продолжить свое движение с прежней скоростью. В вязкой жидкости этому препятствуют силы внутреннего трения между слоями жидкости, стремящиеся затормозить поток. Число Рейнольдса как раз и отражает соотношение между двумя этими силами — инерции и вязкости. Высокие значения числа Рейнольдса описывают ситуацию, когда силы вязкости относительно малы и не способны сгладить турбулентные завихрения потока. Малые значения числа Рейнольдса соответствуют ситуации, когда силы вязкости гасят турбулентность, делая поток ламинарным.

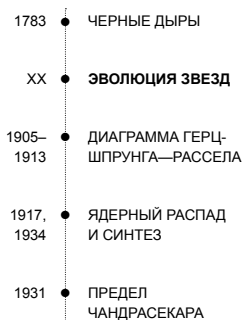
Число Рейнольдса очень полезно с точки зрения моделирования потоков в различных жидкостях и газах, поскольку их поведение зависит не от реальной вязкости, плотности, скорости и линейных размеров элемента потока, а лишь от их соотношения, выражаемого числом Рейнольдса. Благодаря этому можно, например, поместить в аэродинамическую трубу уменьшенную модель самолета и подобрать скорость потока таким образом, чтобы число Рейнольдса соответствовало реальной ситуации полномасштабного самолета в полете. (Сегодня, с развитием мощной компьютерной техники, нужда в аэродинамических трубах отпала, поскольку воздушные потоки можно смоделировать на компьютере. В частности, первым гражданским авиалайнером, полностью спроектированным исключительно с использованием компьютерного моделирования, стал «Боинг-747». В этой связи любопытно отметить, что при проектировании гоночных яхт и высотных зданий до сих пор практикуется их «обкатка» в аэродинамических трубах.)

ОСБОРН РЕЙНОЛЬДС (Osborne Reynolds, 1842–1912) — ирландский инженер-физик. Родился в Белфасте в семье потомственного священника англиканской церкви. После недолгого практического обучения инженерному делу в строительной фирме поступил в Кембридж, по окончании которого, несмотря на относительно молодость, сразу же получил должность профессора кафедры гражданского инженерного дела Оуэнс-кол-

леджа (современный Манчестерский университет), которую и занимал на протяжении 37 лет. Рейнольдс занимался научно-техническими разработками в области гидродинамики и гидравлики, стал основоположником теорий смазки и турбулентности, принципиально усовершенствовал конструкцию центробежных насосов. Для изучения устьевых потоков построил уменьшенную модель дельты реки Мерси.

Эволюция звезд

Жизненный цикл звезд зависит от их массы: звезды с низкой массой в конечном итоге превращаются в белых карликов, в то время как жизнь звезд с большой массой заканчивается взрывом сверхновых



Хотя по человеческой шкале времени звезды и кажутся вечными, они, подобно всему сущему в природе, рождаются, живут и умирают. Согласно общепринятой гипотезе газопылевого облака звезда зарождается в результате гравитационного сжатия межзвездного газопылевого облака. По мере уплотнения такого облака сначала образуется *протозвезда*, температура в ее центре неуклонно растет, пока не достигает предела, необходимого для того, чтобы скорость теплового движения частиц превысила порог, после которого протоны способны преодолеть макроскопические силы взаимного электростатического отталкивания (см. закон Кулона) и вступить в реакцию термоядерного синтеза (см. ядерный распад и синтез).

В результате многоступенчатой реакции термоядерного синтеза из четырех протонов в конечном итоге образуется ядро гелия (2 протона + 2 нейтрона) и выделяется целый фонтан разнообразных элементарных частиц. В конечном состоянии суммарная масса образовавшихся частиц *меньше* массы четырех исходных протонов, а значит, в процессе реакции выделяется свободная энергия (см. теория относительности). Из-за этого внутреннее ядро новорожденной звезды быстро разогревается до сверхвысоких температур и его избыточная энергия начинает выплескиваться по направлению к ее менее горячей поверхности — и наружу. Одновременно давление в центре звезды начинает расти (см. уравнение состояния идеального газа). Таким образом, «сжигая» водород в процессе термоядерной реакции, звезда не дает силам гравитационного притяжения сжать себя до сверхплотного состояния, противопоставляя гравитационному коллапсу непрерывно возобновляемое внутреннее термическое давление, в результате чего возникает устойчивое энергетическое равновесие. О звездах на стадии активного сжигания водорода говорят, что они находятся на «основной фазе» своего жизненного цикла, или эволюции (см. диаграмма Герцшпрунга—Рассела). Превращение одних химических элементов в другие внутри звезды называют *ядерным синтезом*, или *нуклеосинтезом*.

В частности, Солнце находится на активной стадии сжигания водорода в процессе активного нуклеосинтеза уже около 5 миллиардов лет, и запасов водорода в ядре для его продолжения нашему светилу должно хватить еще на 5,5 миллиарда лет. Чем массивнее звезда, тем большим запасом водородного топлива она располагает, но для противодействия силам гравитационного коллапса ей приходится сжигать водород с интенсивностью, превосходящей по темпу роста темп роста запасов водорода по мере увеличения массы звезды. Таким образом, чем массивнее звезда, тем короче время ее жизни, определяемое исчерпанием запасов водорода, и самые крупные звезды в буквальном смысле сгорают за «какие-то» десятки миллионов лет. Самые мелкие звезды, с другой стороны, «безбедно» живут сотни миллиардов лет. Так что по этой шкале наше Солнце относится к «крепким середнякам».

Рано или поздно, однако, любая звезда израсходует весь пригодный для сжигания в своей термоядерной топке водород. Что дальше? Это также зависит от массы звезды. Солнце (и все звезды, не превышающие его по массе более чем в восемь раз) заканчивают свою жизнь весьма банальным образом. По мере истощения запасов водорода в недрах звезды силы гравитационного сжатия, терпеливо ожидавшие этого часа с самого момента зарождения светила, начинают одерживать верх — и под их воздействием звезда начинает сжиматься и уплотняться. Этот процесс приводит к двоякому эффекту. Температура в слоях непосредственно вокруг ядра звезды повышается до уровня, при котором содержащийся там водород вступает наконец в реакцию термоядерного синтеза с образованием гелия. В то же время температура в самом ядре, состоящем теперь практически из одного гелия, повышается настолько, что уже сам гелий — своего рода «пепел» затухающей первичной реакции нуклеосинтеза — вступает в новую реакцию термоядерного синтеза: из трех ядер гелия образуется одно ядро углерода. Этот процесс вторичной реакции термоядерного синтеза, топливом для которого служат продукты первичной реакции, — один из ключевых моментов жизненного цикла звезд.

При вторичном сгорании гелия в ядре звезды выделяется так много энергии, что звезда начинает буквально раздуваться. В частности, оболочка Солнца на этой стадии жизни расширится за пределы орбиты Венеры. При этом совокупная энергия излучения звезды остается примерно на том же уровне, что и в течение основной фазы ее жизни, но, поскольку излучается эта энергия теперь через значительно большую площадь поверхности, внешний слой звезды остывает до красной части спектра. Звезда превращается в *красный гигант*.

Для звезд класса Солнца после истощения топлива, питающего вторичную реакцию нуклеосинтеза, снова наступает стадия гравитационного коллапса — на этот раз окончательного. Температура внутри ядра больше не способна подняться до уровня, необходимого для начала термоядерной реакции следующего уровня. Поэтому звезда сжимается до тех пор, пока силы гравитационного притяжения не будут уравновешены следующим силовым барьером. В его роли выступает *давление вырожденного электронного газа* (см. ПРЕДЕЛ ЧАНДРАСЕКАРА). Электроны, до этой стадии игравшие роль безработных статистов в эволюции звезды, не участвуя в реакциях ядерного синтеза и свободно перемещаясь между ядрами, находящимися в процессе синтеза, на определенной стадии сжатия оказываются лишенными «жизненного пространства» и начинают «сопротивляться» дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Состояние звезды стабилизируется, и она превращается в вырожденного *белого карлика*, который будет излучать в пространство остаточное тепло, пока не остынет окончательно.

Звезды более массивные, нежели Солнце, ждет куда более зрелищный конец. После сгорания гелия их масса при сжатии оказыва-

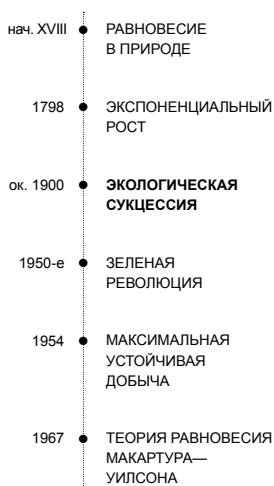
ется достаточной для разогрева ядра и оболочки до температур, необходимых для запуска следующих реакций нуклеосинтеза — углерода, затем кремния, магния — и так далее, по мере роста ядерных масс. При этом при начале каждой новой реакции в ядре звезды предыдущая продолжается в ее оболочке. На самом деле все химические элементы вплоть до железа, из которых состоит Вселенная, образовались именно в результате нуклеосинтеза в недрах умирающих звезд этого типа. Но железо — это предел; оно не может служить топливом для реакций ядерного синтеза или распада ни при каких температурах и давлениях, поскольку как для его распада, так и для добавления к нему дополнительных нуклонов необходим приток внешней энергии. В результате массивная звезда постепенно накапливает внутри себя железное ядро, не способное послужить топливом ни для каких дальнейших ядерных реакций.

Как только температура и давление внутри ядра достигают определенного уровня, электроны начинают вступать во взаимодействие с протонами ядер железа, в результате чего образуются нейтроны. И за очень короткий отрезок времени — некоторые теоретики полагают, что на это уходят считанные секунды, — свободные на протяжении всей предыдущей эволюции звезды электроны буквально растворяются в протонах ядер железа, все вещество ядра звезды превращается в сплошной сгусток нейтронов и начинает стремительно сжиматься в гравитационном коллапсе, поскольку противодействовавшее ему давление вырожденного электронного газа падает до нуля. Внешняя оболочка звезды, из-под которой оказывается выбита всякая опора, обрушивается к центру. Энергия столкновения обрушившейся внешней оболочки с нейтронным ядром столь высока, что она с огромной скоростью отскакивает и разлетается во все стороны от ядра — и звезда буквально взрывается в ослепительной вспышке *сверхновой звезды*. За считанные секунды при вспышке сверхновой может выделяться в пространство больше энергии, чем выделяют за это же время все звезды галактики вместе взятые.

После вспышки сверхновой и разлета оболочки у звезд массой порядка 10–30 солнечных масс продолжающийся гравитационный коллапс приводит к образованию нейтронной звезды, вещество которой сжимается до тех пор, пока не начинает давать о себе знать *давление вырожденных нейтронов* — иными словами, теперь уже нейтроны (подобно тому, как ранее это делали электроны) начинают противиться дальнейшему сжатию, требуя себе жизненного пространства. Это обычно происходит по достижении звездой размеров около 15 км в диаметре. В результате образуется быстро вращающаяся нейтронная звезда, испускающая электромагнитные импульсы с частотой ее вращения; такие звезды называются *пульсарами*. Наконец, если масса ядра звезды превышает 30 солнечных масс, ничто не в силах остановить ее дальнейший гравитационный коллапс, и в результате вспышки сверхновой образуется ЧЕРНАЯ ДЫРА.

Экологическая сукцессия

Восстановление экосистемой нарушенного равновесия проходит через четко определенные стадии



Экосистему можно вывести из состояния равновесия многими способами. Обычно это бывает пожар, наводнение или засуха. После такого нарушения равновесия новая экосистема сама себя восстанавливает, и этот процесс носит регулярный характер и повторяется в самых разных ситуациях. Что же происходит в нарушенной экосистеме? На месте нарушения определенные виды и вся экосистема развиваются таким образом, что порядок появления этих видов одинаков для схожих нарушений и схожих ареалов. В этой последовательной смене одних видов другими и заключается суть экологической сукцессии.

Например, в большинстве северо-восточных штатов США в XVIII веке земли, занятые лесами, были расчищены и на этих территориях были построены фермы, в XIX веке продолжалась обработка этих земель, а в XX веке фермы были заброшены и участки вновь стали превращаться в леса. Растения, с течением времени заселившие поля, появлялись в определенной, уже известной и строго повторяющейся последовательности. В первый год вырастали однолетние сорняки и одиночные сеянцы деревьев. В течение нескольких последующих лет происходило заселение определенными видами (это так называемые «пионерные виды», или, выражаясь более научно, *ранние сукцессионные виды*), которые начинали преобладать. Типичный пионерный вид — сосна Веймутова. Она растет очень быстро, и ее семена распространяются на большую территорию. В течение нескольких десятилетий пионерные виды образовывали густой лес.

Следующий этап — появление деревьев, которые хорошо растут в тени пионерных видов, — например, кленов. Через полвека пионерные деревья становились зрелыми и постепенно погибали. Их семена уже не могли прорасти под покровом леса, и состав популяции деревьев сдвигался в сторону медленно растущих новичков — так называемых *поздних сукцессионных видов*. В конце концов весь лес стал состоять из этих видов деревьев, что и наблюдают каждый год осенью жители Новой Англии, когда листья деревьев меняют окраску и лес приобретает огненный цвет, характерный для кленов.

Такой пример быстрорастущих пионеров с последующим заселением медленно растущими видами наблюдается во многих экосистемах. Например, на недавно образованных прибрежных песчаных дюнах первой появляется песчаный тростник. Эта трава помогает укрепить дюны так, чтобы в них смогли укорениться виды-преемники (вначале кустарники, а затем и деревья).

Изучая сукцессию в экосистемах, экологи выделили три механизма ее действия.

Содействие. Появившиеся в новой экосистеме пионерные виды облегчают другим видам последующее заселение. Например, после отступления ледника первыми появляются лишайники и некоторые растения с поверхностными корнями — то есть виды, способные выжить на бесплодной, бедной питательными веществ-

вами почве. По мере отмирания этих растений происходит нарастание слоя почвы, что дает возможность укорениться поздним сукцессионным видам. Аналогично ранние деревья дают тень и убежище для ростков поздних сукцессионных деревьев.

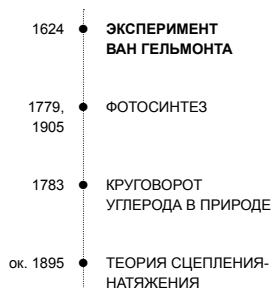
Сдерживание. Иногда пионерные виды создают условия, усложняющие или вообще делающие невозможным появление поздних сукцессионных растений. Когда около океана появляются новые поверхности (например, в результате строительства бетонных пирсов или волнорезов), они быстро обрастают пионерными видами водорослей, и другие виды растений просто вытесняются. Это вытеснение происходит очень легко, поскольку пионерный вид воспроизводится крайне быстро и вскоре покрывает все доступные поверхности, не оставляя места для последующих видов. Пример активного сдерживания — появление горчака, азиатского растения, распространившегося по американскому Западу. Горчак в значительной мере зашелачивает почву, в которой растет, что делает ее непригодной для многих диких трав.

Сосуществование. Наконец, пионерные виды могут вообще не оказывать на последующие растения никакого воздействия — ни полезного, ни вредного. В частности, это происходит, если разные виды используют разные ресурсы и растут независимо друг от друга (см. дифференциальное использование ресурсов).

Важно понимать, что конечное состояние леса или дюны экологически неустойчиво (см. равновесие в природе). Зрелый лес обычно характеризуется нулевым суммарным приростом органических веществ. Это означает, что с течением времени из-за потери веществ под воздействием таких процессов, как эрозия, лес постепенно начнет погибать. Кстати, большинство лесов обладают максимальной продуктивностью в течение первой половины сукцессионного цикла.

Эксперимент Ван Гельмонта

Растения добывают биомассу не из почвы



Цвет жизни на нашей планете — зеленый, потому что зеленые молекулы хлорофилла в растениях, которые составляют основу любой жизни и превращают энергию падающего солнечного света в материалы, из которых построены живые существа. Можно только удивляться тому, что в прошлые века люди почти не интересовались механизмом превращения этой энергии — процессом, который мы теперь называем фотосинтезом. Так уж сложилось, что закономерности движения планет и звезд стали понятны людям задолго до того, как у них появились малейшие представления о роли травы у них под ногами.

Первое серьезное исследование механизма роста растений провел фламандский аристократ Ян Баптист Ван Гельмонт. Перед тем как посадить дерево в горшок, он взвесил в нем землю. В течение нескольких лет Ван Гельмонт поливал дерево, а затем снова взвесил дерево и землю и обнаружил, что вес дерева увеличился на 74 кг, а вес почвы при этом уменьшился всего граммов на сто. Стало ясно, что почва не является источником материала для построения растущего дерева.

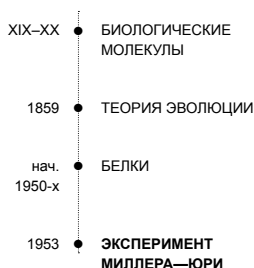
На самом деле Ван Гельмонт сделал неверный вывод из своего открытия — он утверждал, что дополнительный вес получен из воды. Оставалось два столетия до представления о том, что углерод дерева образуется в результате превращений атмосферного углекислого газа, и еще одно столетие до понимания молекулярного механизма фотосинтеза. Тем не менее Ван Гельмонт не оставил ни у кого сомнения в том, что материал, называемый нами биомассой, поступает не из почвы, а из другого источника, и это открытие позднее стало основой наших представлений о роли растений.

ЯН БАПТИСТ ВАН ГЕЛЬМОНТ (Jan Baptista Van Helmont, 1579–1644) — фламандский врач и химик. Родился в Брюсселе в аристократической семье. Изучал медицину и химию в Католическом университете Лувейна, но не стал получать ученой степени, а занялся собственными исследованиями. Он впервые использовал слово «газ» для описания состояния материи и установил четыре вида газов — это известные нам сегодня монооксид углерода (угарный газ), диоксид углерода (углекислый газ), закись азота (веселящий газ) и метан.

Во времена Ван Гельмонта химия была молодой и быстро развивающейся наукой, в которой еще сильно ощущалось влияние алхимии. Хотя он не питал безмерного почтения к считавшимся неприкосновенными древним учениям, он все же верил в философский камень. Однако его опыт с растущей ивой показывает, что Ван Гельмонт понимал ценность эксперимента. А однажды он даже вступил в конфликт с церковью, подвергнув сомнению распространенное поверье о том, что рану можно вылечить, врачуя нанесшее ее оружие.

Эксперимент Миллера—Юри

Молекулы, необходимые для жизни, могли возникнуть в ходе химических реакций на заре развития Земли



4,5 миллиарда лет назад, когда возникла Земля, она представляла собой раскаленный безжизненный шар. Сегодня же на ней в изобилии встречаются разные формы жизни. В связи с этим возникает вопрос: какие изменения происходили на нашей планете с момента ее образования и по сегодняшний день и главное — как на безжизненной Земле возникли молекулы, образующие живые организмы? В 1953 году в Чикагском университете был поставлен эксперимент, сегодня ставший классическим. Он указал ученым путь к ответу на этот фундаментальный вопрос.

В 1953 году Гарольд Юри был уже Нобелевским лауреатом, а Стэнли Миллер — всего лишь его аспирантом. Идея эксперимента Миллера была простой: в полуподвальной лаборатории он воспроизвел атмосферу древнейшей Земли, какой она была по мнению ученых, и со стороны наблюдал за тем, что происходит. При поддержке Юри он собрал простой аппарат из стеклянной сферической колбы и трубок, в котором испарявшиеся вещества циркулировали по замкнутому контуру, охлаждались и вновь поступали в колбу. Миллер заполнил колбу газами, которые, по мнению Юри и русского биохимика Александра Опарина (1894–1980), присутствовали в атмосфере на заре формирования Земли, — водяным паром, водородом, метаном и аммиаком. Чтобы симитировать солнечное тепло, Миллер нагревал колбу на бунзеновской горелке, а чтобы получить аналог вспышек молний — вставил в стеклянную трубку два электрода. По его замыслу материал, испаряясь из колбы, должен был поступать в трубку и подвергаться воздействию электрического искрового разряда. После этого материал должен был охлаждаться и возвращаться в колбу, где весь цикл начинался вновь.

После двух недель работы системы жидкость в колбе стала приобретать темный красно-коричневый оттенок. Миллер провел анализ этой жидкости и обнаружил в ней аминокислоты — основные структурные единицы белков. Так у ученых появилась возможность изучать происхождение жизни с точки зрения основных химических процессов. Начиная с 1953 года с помощью усложненных вариантов эксперимента Миллера—Юри, как стали его с тех пор называть, были получены все виды биологических молекул — включая сложные белки, необходимые для клеточного метаболизма, и жировые молекулы, называемые липидами и образующие мембраны клетки. По-видимому, тот же результат мог бы быть получен и при использовании вместо электрических разрядов других источников энергии — например, тепла и ультрафиолетового излучения. Так что почти не остается сомнений в том, что все компоненты, необходимые для сборки клетки, могли быть получены в химических реакциях, происходивших на Земле в древнейшие времена.

Ценность эксперимента Миллера—Юри состоит в том, что благодаря ему стало понятно, как вспышки молний в атмосфере древней Земли за несколько сот миллионов лет вызывали обра-

зование органических молекул, попадавших вместе с дождем в «первичный бульон» (см. также теория эволюции). Не установленные до сих пор химические реакции, происходящие в этом «бульоне», могли привести к образованию первых живых клеток. В последние годы возникают серьезные вопросы по поводу того, как развивались эти события, в частности подвергается сомнению присутствие аммиака в атмосфере древнейшей Земли. Кроме того, предложено несколько альтернативных сценариев, которые могли привести к образованию первой клетки, начиная от ферментативной активности биохимической молекулы РНК и кончая простыми химическими процессами в океанских глубинах. Некоторые ученые даже предполагают, что происхождение жизни имеет отношение к новой науке о сложных адаптивных системах и что не исключено, что жизнь — это неожиданное свойство материи, возникающее скачкообразно в определенный момент и отсутствующее у ее составных частей. В наши дни эта область знаний переживает период бурного развития, в ней появляются и проходят проверку различные гипотезы. Из этого водоворота гипотез должна появиться теория о том, как же возникли наши самые далекие предки.

СТЭНЛИ ЛЛОЙД МИЛЛЕР (Stanley Lloyd Miller, р. 1930) — американский химик. Родился в Окленде, штат Калифорния, получил образование в Калифорнийском университете в Беркли и в Чикагском университете. Начиная с 1960 года профессиональная деятельность Миллера была в основном связана с Калифорнийским университетом в Сан-Диего, где он занимал должность профессора химии. За работу по проведению эксперимента Миллера—Юри был удостоен звания научного сотрудника в Калифорнийском технологическом институте.

ГАРОЛЬД КЛЕЙТОН ЮРИ (Harold Clayton Urey, 1893–1981) — американский химик. Родился в Уолкертоне, штат Индиана, в семье священника. Изучал зоологию в университете штата Монтана и получил докторскую степень по химии в Калифорнийском университете в Беркли. Впервые применил физические методы в химии и в 1934 году был удостоен Нобелевской премии в области химии за открытие дейтерия — тяжелого изотопа водорода. Позднее его деятельность была связана в основном с изучением различий в скорости химических реакций при использовании разных изотопов.

Эксперимент Херши— Чейз

*ДНК кодирует
наследственную
информацию*

1952 • ЭКСПЕРИМЕНТ
ХЕРШИ—ЧЕЙЗ

ДНК имеет долгую и интересную историю. После того как в 1869 году ее впервые выделил Иоганн Мишер (Johann Miescher, 1844–95), она несколько десятилетий терпеливо ожидала своего часа в относительной безвестности. В 1914 году немецкий химик обнаружил, что ДНК окрашивается красной краской, но счел это открытие настолько незначительным, что не публиковал его в течение 10 лет. Однако позднее это окрашивание было использовано для того, чтобы установить факт присутствия ДНК во всех клетках и ее характерную локализацию в хромосомах. В 1920-е годы американский биохимик российского происхождения Фибус Левин (Phoebus Levene, 1869–1940), проводивший анализ ДНК, определил основные «кирпичики», из которых строится ДНК. Это фосфатная группа, сахар и молекулы четырех типов — *азотистые основания*. Он пришел к правильному выводу о том, что молекула ДНК построена из структурных единиц (так называемых *нуклеотидов*), собранных из комбинаций этих трех компонентов.

Начиная с 1940-х годов два микробиолога, которые бежали в США из Европы, оказавшейся под властью Адольфа Гитлера, — итальянец Сальвадор Лурия (Salvador Luria, 1912–91) и американец немецкого происхождения Макс Дельбрюк (Max Delbrück, 1906–81) — разработали важнейшую методику, обогатившую генетические исследования. Они изучали свойства группы вирусов-*бактериофагов* («пожирателей бактерий»). Любая из известных бактерий является добычей хотя бы для одного из этих вирусов, которые состоят из ДНК, окруженной белковой оболочкой. Бактериофагов легко хранить в лаборатории, а их действие на клетку-хозяина поистине поражает воображение — за какие-то несколько минут после заражения бактерия-хозяин оказывается взломанной и производит на свет не меньше сотни идентичных копий исходного вируса. Очевидно, что что-то в вирусе передает генетическую информацию потомкам, но что — белки или ДНК?

Ответ на этот вопрос дал эксперимент Херши и Чейз. Методика, использованная Алфредом Херши и его коллегой Мартой Коулз Чейз (Martha Cowles Chase, р. 1927), проста в описании. Они выращивали две группы бактерий: одну в среде, содержащей радиоактивный фосфор-32, другую — в среде с радиоактивной серой-35. Бактериофаги, добавленные в среду с бактериями и атаковавшие их, поглощали эти радиоактивные маркеры. Чтобы понять происходившие далее события, надо знать, что фосфор входит в состав ДНК (он находится в фосфатных группах в ядре), но отсутствует в белковой оболочке вируса. Сера же, наоборот, входит в состав белка, но отсутствует в ДНК. Таким образом, пара радиоактивных маркеров позволяла разграничить роли двух компонентов вируса в его репродукции.

После этого ученые «натравливали» на бактерии две группы вирусов — с меченой ДНК и меченым белком. Не дожидаясь завершения процесса инфицирования, бактерии отделяли от остального материала с помощью центрифуги, а затем выявляли присутствие

радиоактивной метки. Результаты говорили сами за себя: в бактериях был обнаружен фосфор-32, а сера-35 оставалась в среде. Поскольку размножение вирусов происходит внутри бактерий, куда белки не проникают, было ясно, что это размножение может быть обусловлено только ДНК.

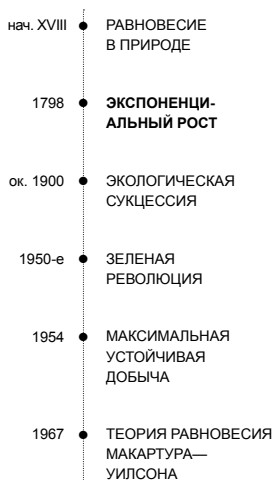
Сегодня нам известен механизм этого процесса: вирус прикрепляется к бактерии и вводит в нее вирусную ДНК, оставляя снаружи белковую оболочку. Вирусная ДНК встраивается в бактериальную ДНК и «переключает» генетический аппарат бактерии, заставляя его работать на себя для создания многочисленных копий вируса. После того как ресурсы бактерии будут исчерпаны, клетка разрушается, высвобождая новое поколение «штампованных» вирусов. Эксперимент Херши—Чейз со всей очевидностью показал, что гены размещены в молекуле ДНК, и это главный принцип современной науки.

АЛФРЕД ДЕЙ ХЕРШИ (Alfred Day Hershey, 1908–97) — американский биолог. Родился в штате Мичиган и получил докторскую степень в Мичиганском университете. Поработав некоторое время на медицинском факультете Вашингтонского университета, в 1950 году перешел в институт Карнеги в Колд Спринг Харбор (штат

Нью-Йорк) и позднее стал директором отдела генетических исследований в этом институте. За исследования, продемонстрировавшие роль ДНК в передаче генетической информации, Алфред Херши, Сальвадор Лурия и Макс Дельбрюк были удостоены Нобелевской премии 1969 года в области медицины и физиологии.

Экспоненциальный рост

Если прирост численности популяции пропорционален количеству особей, численность популяции будет расти экспоненциально



Выражение «экспоненциальный рост» вошло в наш лексикон для обозначения быстрого, как правило безудержного увеличения. Оно часто используется, например, при описании стремительного роста числа городов или увеличения численности населения. Однако в математике этот термин имеет точный смысл и обозначает определенный вид роста.

Экспоненциальный рост имеет место в тех популяциях, в которых прирост численности (число рождений минус число смертей) пропорционален числу особей популяции. Для популяции человека, например, коэффициент рождаемости примерно пропорционален количеству репродуктивных пар, а коэффициент смертности примерно пропорционален количеству людей в популяции (обозначим его N). Тогда в разумном приближении

$$\begin{aligned} \text{прирост населения} &= \text{число рождений} - \text{число смертей} \\ &\propto N \\ &= rN \end{aligned}$$

(Здесь r — так называемый *коэффициент пропорциональности*, который позволяет нам записать выражение пропорциональности в виде уравнения.)

Пусть dN — число особей, добавившихся к популяции за время dt , тогда если в популяции в общей сложности N особей, то условия для экспоненциального роста будут удовлетворены, если

$$dN = rN dt$$

После того как в XVII веке Исаак Ньютон изобрел дифференциальное исчисление, мы знаем, как решать это уравнение для N — численности популяции в любое заданное время. (Для справки: такое уравнение называется *дифференциальным*.) Вот его решение:

$$N = N_0 e^{rt},$$

где N_0 — число особей в популяции на начало отсчета, а t — время, прошедшее с этого момента. Символ e обозначает такое специальное число, оно называется *основание натурального логарифма* (и приблизительно равно 2,7), и вся правая часть уравнения называется *экспоненциальной функцией*.

Чтобы лучше понять, что такое экспоненциальный рост, представьте себе популяцию, состоящую изначально из одной бактерии. Через определенное время (через несколько часов или минут) бактерия делится надвое, тем самым удваивая размер популяции. Через следующий промежуток времени каждая из этих двух бактерий снова разделится надвое и размер популяции вновь удвоится — теперь будет уже четыре бактерии. После десяти таких удвоений будет уже более тысячи бактерий, после двадцати — более миллиона, и так далее. Если с каждым делением популяция будет удваиваться, ее рост будет продолжаться до бесконечности.

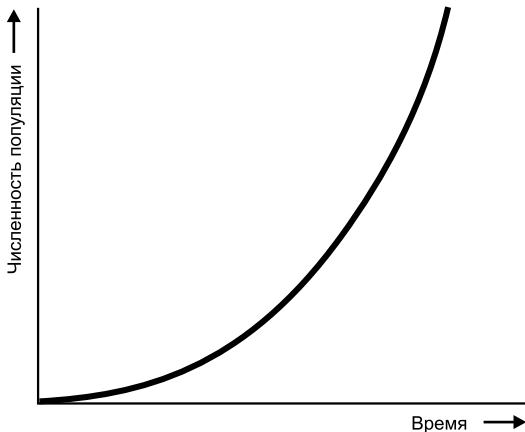
Существует легенда (скорее всего, не соответствующая действительности), будто бы человек, который изобрел шах-

маты, доставил этим такое удовольствие своему султану, что тот пообещал исполнить любую его просьбу. Человек попросил, чтобы султан положил на первую клетку шахматной доски одно зерно пшеницы, на вторую — два, на третью — четыре и так далее. Султан, посчитав это требование ничтожным по сравнению с оказанной им услугой, попросил своего подданного придумать другую просьбу, но тот отказался. Естественно, к 64-му удвоению число зерен стало таким, что во всем мире не нашлось бы нужного количества пшеницы, чтобы удовлетворить эту просьбу. В той версии легенды, которая известна мне, султан в этот момент приказал отрубить голову изобретателю. Мораль, как я говорю моим студентам, такова: иногда не следует быть чересчур умным!

Пример с шахматной доской (как и с воображаемыми бактериями) показывает нам, что никакая популяция не может расти вечно. Рано или поздно она попросту исчерпает ресурсы — пространство, энергию, воду, что угодно. Поэтому популяции могут расти по экспоненциальному закону лишь некоторое время и рано или поздно их рост должен замедлиться. Для этого нужно изменить уравнение так, чтобы при приближении численности популяции к максимально возможной (которая может поддерживаться внешней средой) скорость роста замедлялась. Назовем эту максимальную численность популяции K . Тогда видоизмененное уравнение будет выглядеть так:

$$dN = rN(1 - (N/K)) dt.$$

При экспоненциальном росте скорость увеличения численности популяции повышается до бесконечности



Когда N намного меньше K , членом N/K можно пренебречь, и мы возвращаемся к первоначальному уравнению обычного экспоненциального роста. Однако когда N приближается к своему максимальному значению K , значение $1 - (N/K)$ стремится к нулю, соот-

ветственно стремится к нулю и прирост численности популяции. Общая численность популяции в этом случае стабилизируется и остается на уровне K . Кривая, описываемая этим уравнением, а также само уравнение имеют несколько названий — *S-кривая*, *логистическое уравнение*, *уравнение Вольтерра*, *уравнение Лотка—Вольтерра*. (Вито Вольтерра (1860–1940) — выдающийся итальянский математик и преподаватель; Альфред Лотка (1880–1949) — американский математик и страховой аналитик.) Как бы она ни называлась, это достаточно простое выражение численности популяции,

резко возрастающей экспоненциально, а затем замедляющейся при приближении к некоему пределу. И она гораздо лучше отражает рост численности реальных популяций, чем обычная экспоненциальная функция.

Электрические свойства вещества

По электропроводящим свойствам все вещества можно разделить на проводники, изоляторы и полупроводники; такая классификация обусловлена расположением электронов в атомах этих веществ

XIX	● ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА
1826	● ЗАКОН ОМА
1900	● ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ
1926	● ПОЛОСНАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ
1957	● ТЕОРИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

При формировании кристаллических решеток твердых тел из атомов различных веществ валентные электроны, расположенные на внешних орбитах атомов, различным образом взаимодействуют друг с другом и как следствие ведут себя по-разному (см. ПОЛОСНАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОРБИТАЛЕЙ). Таким образом, свобода валентных электронов перемещаться внутри вещества обуславливается его молекулярно-кристаллической структурой. В целом же по электропроводящим свойствам все вещества можно (с некоторой долей условности) подразделить на три категории, каждая из которых обладает ярко выраженными характеристиками поведения валентных электронов под воздействием внешнего электрического поля.

Проводники

В некоторых веществах валентные электроны свободно перемещаются между атомами. Прежде всего к этой категории относятся металлы, в которых электроны внешних оболочек буквально находятся в «общей собственности» атомов кристаллической решетки (см. ХИМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ И ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ). Если подать на такое вещество электрическое напряжение (например, подключить к двум его концам полюса аккумуляторной батареи), электроны начнут беспрепятственное упорядоченное движение в направлении южного полюса *разности потенциалов*, создавая тем самым электрический ток. Токопроводящие вещества подобного рода принято называть *проводниками*. Самые распространенные в технике проводники — это, конечно же, металлы, прежде всего медь и алюминий, обладающие минимальным электрическим сопротивлением и достаточно широко распространенные в земной природе. Именно из них в основном изготавливаются и высоковольтные электрические кабели, и бытовая электропроводка. Имеются и другие виды материалов, обладающих хорошей электропроводностью, — это, в частности, солевые, щелочные и кислотные растворы, а также плазма и некоторые виды длинных органических молекул.

В этой связи важно помнить, что электропроводность может быть обусловлена наличием в веществе не только свободных электронов, но и свободных положительно и отрицательно заряженных ионов химических соединений. В частности, даже в обычной водопроводной воде растворено столько всевозможных солей, разлагающихся при растворении на отрицательно заряженные *катионы* и положительно заряженные *анионы*, что вода (даже пресная) является весьма хорошим проводником, и об этом нельзя забывать, работая с электрооборудованием в условиях повышенной влажности — иначе можно получить весьма ощутимый удар током.

Изоляторы

Во многих других веществах (в частности, в стекле, фарфоре, пластмассах) электроны прочно привязаны к атомам или молекулам и

не способны к свободному перемещению под воздействием приложенного извне электрического напряжения. Такие материалы называются *изоляторами*.

Чаще всего в современной технике в качестве электроизоляторов используются различные пластмассы. По сути, любой пластик состоит из *полимерных молекул* — то есть очень длинных цепочек органических (водородно-углеродных) соединений, — которые к тому же образуют сложные и весьма прочные взаимные переплетения. Проще всего структуру полимера представить себе в виде тарелки перепутавшейся и слипшейся длинной и тонкой лапши. В таких материалах электроны прочно привязаны к своим сверхдлинным молекулам и не способны покинуть их под воздействием внешнего напряжения. Хорошими изоляционными свойствами обладают и *аморфные* вещества, такие как стекло, фарфор или резина, не имеющие жесткой кристаллической структуры. Они также нередко используются в качестве электроизоляторов.

И проводники, и изоляторы играют важную роль в нашей техногенной цивилизации, использующей электричество в качестве основного средства передачи энергии на расстояние. По проводникам электроэнергия поступает от электростанций в наши дома и на всевозможные производственные предприятия, а изоляторы обеспечивают нашу безопасность, ограждая от губительных последствий прямого контакта человеческого организма с высоким электрическим напряжением.

Полупроводники

Наконец, имеется малочисленная категория химических элементов, занимающих промежуточное положение между металлами и изоляторами (самые известные из них — кремний и германий). В кристаллических решетках этих веществ все валентные электроны, на первый взгляд, связаны химическими связями и свободных электронов для обеспечения электрической проводимости, казалось бы, оставаться не должно. Однако на деле ситуация выглядит несколько иначе, поскольку часть электронов оказывается выбитой со своих внешних орбит в результате теплового движения по причине недостаточной энергии их связи с атомами. В результате при температуре выше абсолютного нуля они все-таки обладают определенной электропроводностью под воздействием внешнего напряжения. Коэффициент проводимости у них достаточно низкий (тот же кремний проводит электрический ток в миллионы раз хуже меди), но какой-то ток, пусть и незначительный, они все-таки проводят. Такие вещества называют *полупроводниками*.

Как выяснилось в результате исследований, электрическая проводимость в полупроводниках, однако, обусловлена не только движением свободных электронов (так называемой *n-проводимостью*

за счет направленного движения отрицательно заряженных частиц). Имеется и второй механизм электропроводности — при этом весьма необычный. При высвобождении электрона из кристаллической решетки полупроводника за счет теплового движения на его месте образуется так называемая *дырка* — положительно заряженная ячейка кристаллической структуры, которая может в любой момент оказаться занятой отрицательно заряженным электроном, перескочившим в нее с внешней орбиты соседнего атома, где, в свою очередь, образуется новая положительно заряженная дырка. Такой процесс может продолжаться сколь угодно долго, и выглядеть со стороны (в макроскопическом масштабе) все будет так, что электрический ток под внешним напряжением обусловлен не движением электронов (которые всего лишь перескакивают с внешней орбиты одного атома на внешнюю орбиту соседнего атома), а направленной миграцией положительно заряженной дырки (дефицита электрона) в направлении отрицательного полюса приложенной разности потенциалов. В итоге в полупроводниках наблюдается и второй тип проводимости (так называемая *дырочная*, или *p-проводимость*), обусловленная, конечно же, также движением отрицательно заряженных электронов, но с точки зрения макроскопических свойств вещества представляющаяся направленным током положительно заряженных дырок к отрицательному полюсу.

Явление дырочной проводимости проще всего проиллюстрировать на примере дорожной пробки. По мере продвижения вперед машины, застрявшей в ней, на ее месте образуется свободное пространство, которое тут же занимает следующая машина, место которой сразу же занимает третья машина и т.д. Этот процесс можно представить себе двояко: можно описывать редкое продвижение отдельных машин из числа стоящих в длинной пробке; проще, однако, характеризовать ситуацию с точки зрения эпизодического продвижения в противоположном направлении многочисленных *пустот* между застрявшими в пробке машинами. Именно руководствуясь подобной аналогией, физики и говорят о дырочной проводимости, условно принимая за данность, что электрический ток проводится не благодаря движению многочисленных, но редко трогающихся с места отрицательно заряженных электронов, а благодаря движению в противоположном направлении положительно заряженных пустот на внешних орбитах атомов полупроводников, которые они условились называть дырками. Таким образом, дуализм электронно-дырочной проводимости носит чисто условный характер, поскольку с физической точки зрения ток в полупроводниках в любом случае обусловлен исключительно направленным движением электронов.

Полупроводники нашли широкое практическое применение в современной радиоэлектронике и компьютерных технологиях именно благодаря тому, что их проводящие свойства легко и точно контролируются посредством изменения внешних условий.

Электронная теория проводимости

Электропроводность твердых тел обусловлена коллективным направленным движением свободных электронов

ок. 420 до н.э.	• АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА
1900	• ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ПРОВОДИМОСТИ
1913	• АТОМ БОРА
1926	• УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
1926	• ПОЛОСНАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Электрический ток протекает по проводнику благодаря наличию в нем свободных электронов, сорвавшихся с атомных орбит



К концу XIX века ученые знали связь между электрическим сопротивлением, силой тока и напряжением, которая описывается законом Ома. Благодаря эффекту Холла знали они и то, что носителями электрического тока в металлах являются отрицательно заряженные электроны. Оставалось составить описание электрического сопротивления на атомном уровне. Первую попытку такого рода предпринял в 1900 году немецкий физик Пауль Друде (Paul Drude, 1863–1906).

Смысл электронной теории проводимости сводится к тому, что каждый атом металла отдает валентный электрон из внешней оболочки и эти свободные электроны растекаются по металлу, образуя некое подобие отрицательно заряженного газа. Атомы металла при этом объединены в трехмерную кристаллическую решетку, которая практически не препятствует перемещению свободных электронов внутри нее (см. химические связи). Как только к проводнику прикладывается электрическая разность потенциалов (например, посредством замыкания на два его конца двух полюсов аккумуляторной батареи), свободные электроны приходят в упорядоченное движение. Сначала они движутся равноускоренно, но длится это недолго, поскольку очень скоро электроны перестают ускоряться, сталкиваясь с атомами решетки, которые, в свою очередь, от этого начинают колебаться все с большей амплитудой относительно условной точки покоя, и мы наблюдаем термоэлектрический эффект разогревания проводника.

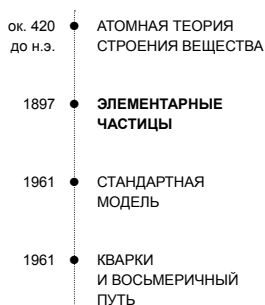
На электроны же эти столкновения оказывают затормаживающее воздействие, аналогично тому, как, допустим, человеку тяжело с достаточно большой скоростью передвигаться в плотной людской толпе. В результате скорость электронов устанавливается на некоей усредненной отметке, которая называется *скоростью миграции*, и скорость эта на самом деле отнюдь не высока. Например, в обычной бытовой электропроводке средняя скорость миграции электронов составляет всего несколько миллиметров в секунду, то есть электроны отнюдь не летят по проводам, а скорее ползут по ним темпами, достойными разве что улитки. Свет же в лампочке зажигается практически моментально лишь потому, что с места все эти медлительные электроны трогаются *одновременно*, как только вы нажимаете на кнопку выключателя, и электроны в спирали лампочки также приходят в движение сразу же. То есть, нажимая на кнопку выключателя, вы производите в проводах эффект, аналогичный тому, как если бы включили насос, подсоединенный к поливочному шлангу, до отказа заполненному водой, — струя на противоположном от насоса конце хлынет из шланга незамедлительно.

Друде весьма серьезно подошел к описанию свободных электронов. Он предпо-

ложил, что внутри металла они ведут себя подобно идеальному газу, и применил к ним уравнение состояния идеального газа, достаточно справедливо проведя аналогию между соударениями электронов и тепловыми соударениями молекул идеального газа. Это позволило ему сформулировать формулу электрического сопротивления как функции среднего времени между соударениями свободных электронов с атомами кристаллической решетки. Подобно многим простым теориям, электронная теория проводимости хорошо описывает некоторые основные явления из области электропроводности, но бессильна описать многие нюансы этого явления. В частности, она не только не объясняет явления сверхпроводимости при сверхнизких температурах (см. теория сверхпроводимости), но, напротив, предсказывает неограниченный рост электрического сопротивления любого вещества при стремлении его температуры к абсолютному нулю. Поэтому сегодня электропроводящие свойства вещества принято интерпретировать в рамках квантовой механики (см. уравнение Шрёдингера).

Элементарные частицы

Существует множество различных элементарных частиц субатомного уровня



Наше понимание базовой структуры материи развивалось постепенно. АТОМНАЯ ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА показала, что не все в мире устроено так, как кажется на первый взгляд, и что сложности на одном уровне легко объясняются на следующем уровне детализации. На протяжении всего XX века, после открытия структуры атома (то есть после появления модели атома БОРА), усилия ученых были сосредоточены на разгадке структуры атомного ядра.

Первоначально предполагалось, что в атомном ядре существует только два типа частиц — нейтроны и протоны. Однако начиная с 1930-х годов, ученые все чаще стали получать экспериментальные результаты, необъяснимые в рамках классической модели Бора. Это навело ученых на мысль, что на самом деле ядро представляет собой динамичную систему разнообразных частиц, чье скоротечное образование, взаимодействие и распад играют ключевую роль в ядерных процессах. К началу 1950-х годов изучение этих элементарных, как их называли, частиц вышло на передний край физической науки.

Основной метод изучения элементарных частиц состоит в том, что ядро-мишень бомбардируется мощным пучком протонов или электронов, а ученые ведут наблюдения за осколками ядра, образующимися в результате столкновений. Согласно ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ, кинетическая энергия быстрых частиц может быть преобразована в массу по знаменитой формуле $E = mc^2$, так что новые виды частиц могут образовываться (и реально образуются) в изобилии.

Начиная с 1930-х годов ученые занимались изучением воздействия космических лучей на ядра-мишени. *Космические лучи* представляют собой потоки быстрых частиц (в основном протонов), образующиеся в результате различных процессов во Вселенной и постоянно изливаемые в земную атмосферу. Этим подарком природы в виде дождя частиц с высокими энергиями физики и не преминули воспользоваться. В 1950-е годы были разработаны и построены первые установки под названием «ускорители элементарных частиц», на которых стало возможным одним нажатием кнопки искусственно получать направленные, управляемые потоки быстрых частиц с высокими энергиями. За последующие десятилетия физикам удалось открыть более двухсот различных элементарных частиц.

За исключением протона и электрона все эти частицы нестабильны, то есть очень скоро распадаются на другие элементарные частицы (за пределами ядра быстрому распаду подвержен даже нейтрон). Однако для участия во внутриядерных процессах частице хватает и мизерного времени существования, достаточного для перемещения в пределах границ ядра.

Элементарные частицы подразделяются на два класса.

Лептоны

К классу лептонов относятся частицы, которые, подобно электрону, не участвуют в водовороте внутриядерных взаимодействий. На сегодня известно шесть таких частиц. К одному семейству с

электроном относятся *мюоны* и *тау-частицы*, которые похожи на электрон, но массивнее его. Обе эти тяжелые частицы нестабильны и со временем распадаются на несколько продуктов, включая электрон. Также имеется три электрически нейтральные частицы с нулевой (или близкой к нулю, на этот счет ученые до конца не определились) массой, получившие название *нейтрино*. Каждая из трех разновидностей нейтрино парна одной из трех частиц электронного семейства. Слово «лептон» происходит от греческого *leptos*, что значит «маленький».

Адроны

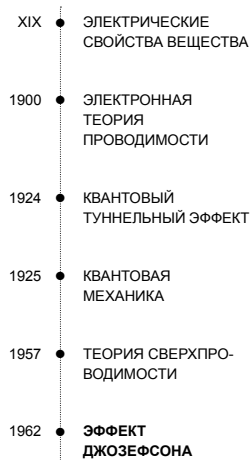
К адронам относят частицы, существующие внутри атомного ядра. Самые известные из них — это протон и нейтрон, но быстро распадающихся родственников у них сотни (в буквальном смысле). За исключением протона все они нестабильны, и их можно классифицировать по составу частиц, на которые они распадаются. Если среди конечных продуктов распада частицы имеется протон, ее называют *барион* (от греческого *barys* — «тяжелый»); если же протона среди продуктов распада нет, частица называется *мезон* (от греческого *mesos* — «средний»). Сам термин «адрон» происходит от греческого *hadros* — «большой».

Сумбурная картина субатомного мира, усложнявшаяся с открытием каждого нового адрона, уступила место новой простой картине с появлением концепции кварков (см. кварки и восьмеричный путь). Согласно кварковой модели, все адроны (но не лептоны) состоят из еще более элементарных частиц. Барионы состоят из трех кварков, а мезоны — из пары кварк—антикварк (см. античастицы).

Вышеописанные элементарные частицы являются своего рода строительным материалом атомного ядра — кирпичиками, из которых сложена Вселенная. Другая группа частиц, *калибровочные бозоны* (к их числу относятся и фотоны), — носители сил, удерживающих элементарные частицы вместе (см. универсальные теории); это своего рода цемент, которым скреплена Вселенная.

Эффект Джозефсона

Электрический ток способен проходить сквозь тонкий слой изолятора между двумя сверхпроводниками. Пара контактов такого типа позволяет с высочайшей точностью измерять интенсивность магнитного поля



ТЕОРИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ Бардина—Купера—Шриффера объясняет, почему при сверхнизких температурах электрическое сопротивление ряда веществ падает практически до нуля, так что электрический ток может циркулировать в них без потерь очень долго. В основе этого механизма лежит *спаривание электронов по Куперу*, смысл которого заключается в том, что спаренные электроны с противоположно направленным спином практически перестают испытывать сопротивление со стороны проводника, в отличие от одиночных электронов, обеспечивающих электропроводность в обычных условиях.

В 1962 году Брайан Джозефсон — будучи тогда всего лишь студентом-старшекурсником — сообразил, что два сверхпроводящих слоя, разделенные ничтожно тонкой прослойкой изолятора всего в несколько атомов толщиной, будут вести себя как единая система. Применяв к такой системе принципы квантовой механики, он показал, что куперовские пары будут преодолевать этот барьер (теперь его принято называть *переходом Джозефсона*) даже при отсутствии приложенного к ним напряжения. Существование электрического тока подобного рода вскоре было подтверждено экспериментально, а сам эффект также получил название *стационарного эффекта Джозефсона*.

Если же приложить постоянное напряжение по обе стороны перехода, квантовая механика предсказывает, что куперовские пары электронов начнут перемещаться через барьер сначала в одном направлении, а затем в обратном, в результате чего возникнет переменный ток, частота которого увеличивается по мере роста напряжения. Этот эффект получил название *нестационарного эффекта Джозефсона*. Поскольку частоту тока можно измерить с большой точностью, эффект переменного тока теперь используется для высокоточной калибровки напряжений.

Однако, пожалуй, самое распространенное практическое применение эффекта Джозефсона вытекает из другого прогноза, даваемого квантовой механикой. Если сделать небольшой сверхпроводящий контур с двумя встроенными переходами Джозефсона на каждом конце, а затем пропустить по нему ток, мы получим прибор под названием «сверхпроводниковый квантовый интерферометр», или СКВИД (от английского SQUID — Superconducting QUantum Interference Device). В зависимости от интенсивности внешнего электромагнитного поля ток в его цепи может изменяться от нуля (когда токи, идущие от двух переходов, взаимно гасятся) до максимума (когда они однонаправленны и усиливают друг друга).

Сверхпроводниковый квантовый интерферометр — самый точный на сегодняшний день прибор для измерения магнитных полей, и при этом весьма компактный. Он находит самое широкое

практическое применение в самых разных областях, начиная с предсказания землетрясений и заканчивая медицинской диагностикой (см. рисунок). А учит нас история эффекта Джозефсона тому, что самое отвлеченное, казалось бы, физическое открытие может принести колоссальную практическую пользу.

БРАЙАН ДЭВИД ДЖОЗЕФСОН (Brian David Josephson, р. 1940) — валлийский физик. Родился в Кардиффе, окончил Кембриджский университет и остался там работать. В 1964 году получил докторскую степень, с 1974 года — профессор физики. Еще в 1962 году, будучи студентом, теоретически предсказал эффект, получивший впоследствии его имя, за что в 1973 году разделил Нобелевскую

премию в области физики с учеными-экспериментаторами, подтвердившими его догадку. Важное прикладное значение эффекта с точки зрения вычислительной техники и информационных технологий — вплоть до возможности его применения для разработки искусственного интеллекта — в дальнейшем заставили Джозефсона вплотную заняться исследованиями человеческого разума.

1842 ● ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

1859 ● СПЕКТРОСКОПИЯ

1929 ● ЗАКОН ХАББЛА

1948 ● БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

Как только волна пошла, скорость ее распространения определяется только свойствами среды, в которой она распространяется, — источник же волны никакой роли больше не играет. По поверхности воды, например, волны, возбудившись, далее распространяются лишь в силу взаимодействия сил давления, повер-

This photograph shows a laser beam passing through a series of concentric circular apertures. The beam is visible as a bright, horizontal line of light passing through the center of the apertures. The apertures are arranged in a series of concentric circles, with the central aperture being the smallest and the outer ones being larger. The background is dark, and the beam is the primary source of light in the image.

хностного натяжения и гравитации. Акустические же волны распространяются в воздухе (и иных звукопроводящих средах) в силу направленной передачи перепада давлений. И ни один из механизмов распространения волн не зависит от источника волны. Отсюда и эффект Доплера.

Давайте еще раз задумаемся над примером с воющей сиреной. Предположим для начала, что спецмашина стоит. Звук от сирены доходит до нас потому, что упругая мембрана внутри нее периодически воздействует на воздух, создавая в нем сжатия — области повышенного давления, — чередующиеся с разрежениями. Пики сжатия — «гребни» акустической волны — распространяются в среде (воздухе), пока не достигнут наших ушей и не воздействуют на барабанные перепонки, от которых поступит сигнал в наш головной мозг (именно так устроен слух). Частоту воспринимаемых нами звуковых колебаний мы по традиции называем тоном, или высотой звука: например, частота колебаний 440 герц в секунду соответствует ноте ля первой октавы. Так вот, пока спецмашина стоит, мы так и будем слышать неизменный тон ее сигнала.

Но как только спецмашина тронется с места в вашу сторону, добавится новый эффект. За время с момента испускания одного пика волны до следующего машина проедет некоторое расстояние по направлению к вам. Из-за этого источник каждого следующего пика волны будет ближе. В результате волны будут достигать ваших ушей чаще, чем это было, пока машина стояла неподвижно, и высота звука, который вы воспринимаете, увеличится. И наоборот, если спецмашина тронется в обратном направлении, пики акустических волн будут достигать ваших ушей реже и воспринимаемая частота звука понизится. Вот и объяснение тому, почему при проезде машины со спецсигналами мимо вас тон сирены понижается.

Мы рассмотрели эффект Доплера применительно к звуковым волнам, но он в равной мере относится и к любым другим. Если источник видимого света приближается к нам, длина видимой нами волны укорачивается и мы наблюдаем так называемое *фиолетовое смещение* (из всех видимых цветов гаммы светового спектра фиолетовому соответствуют самые короткие длины волн). Если же источник удаляется, происходит кажущееся смещение в сторону красной части спектра (удлинение волн).

Этот эффект назван в честь Кристиана Иоганна Доплера, впервые предсказавшего его теоретически. Эффект Доплера меня на всю жизнь интересовал благодаря тому, как именно он был впервые проверен экспериментально. Голландский ученый Кристиан Баллот (Christian Buys Ballot, 1817–1870) посадил духовой оркестр в открытый железнодорожный вагон, а на платформе собрал группу музыкантов с абсолютным слухом. (Абсолютным слухом называется умение, выслушав ноту, точно назвать ее.). Всякий раз, когда состав с музыкальным вагоном проезжал мимо платформы, духовой оркестр тянул какую-либо ноту, а наблюдатели (слушатели) записывали слышащуюся им нотную партитуру.

Как и ожидалось, кажущаяся высота звука оказалась в прямой зависимости от скорости поезда, что, собственно, и предсказывалось законом Доплера.

Эффект Доплера находит широкое применение и в науке, и в быту. Во всем мире он используется в полицейских радарх, позволяющих отлавливать и штрафовать нарушителей правил дорожного движения, превышающих скорость. Пистолет-радар излучает радиоволновой сигнал (обычно в диапазоне УКВ или СВЧ), который отражается от металлического кузова вашей машины. Обратный на радар сигнал поступает уже с доплеровским смещением частоты, величина которого зависит от скорости машины. Сопоставляя частоты исходящего и входящего сигнала, прибор автоматически вычисляет скорость вашей машины и выводит ее на экран.

Несколько более эзотерическое применение эффект Доплера нашел в астрофизике: в частности, Эдвин Хаббл, впервые измеряя расстояния до ближайших галактик на новейшем телескопе, одновременно обнаружил в спектре их атомного излучения красное доплеровское смещение, из чего был сделан вывод, что галактики удаляются от нас (см. закон Хаббла). По сути, это был столь же однозначный вывод, как если бы вы, закрыв глаза, вдруг услышали, что тон звука двигателя машины знакомой вам модели оказался ниже, чем нужно, и сделали вывод, что машина от вас удаляется. Когда же Хаббл обнаружил к тому же, что чем дальше галактика, тем сильнее красное смещение (и тем быстрее она от нас улетает), он понял, что Вселенная расширяется. Это стало первым шагом на пути к теории большого взрыва — а это вещь куда более серьезная, чем поезд с духовым оркестром.



КРИСТИАН ИОАНН ДОПЛЕР

(Christian Johann Doppler, 1803–1853) — австрийский физик. Родился в Зальцбурге в семье каменщика. Окончил Политехнический институт в Вене, оставался в нем на младших преподавательских должностях до 1835 года, когда получил предложение возглавить кафедру

математики Пражского университета, что в последний момент заставило его отказаться от назревшего решения эмигрировать в Америку, отчаявшись добиться признания в академических кругах на родине. Закончил свою карьеру в должности профессора Венского королевского имперского университета.

Эффект Зеемана

Энергетические уровни и спектральные линии излучения атомов в магнитном поле расщепляются



Долгая традиция изучения влияния магнитного поля на свет, испускаемый атомами, восходит к Майклу Фарадею. Сегодня неизбежность существования эффектов подобного влияния кажется нам очевидной, поскольку мы знаем, что электроны и другие атомы обладают *спином*, то есть ведут себя подобно микроскопическим электрически заряженным волчкам, образующим вокруг себя магнитное поле, и, по сути, представляют собой микроскопические магниты (см. ОПЫТ ШТЕРНА—ГЕРЛАХА). В конце XIX столетия, когда Питер Зееман решил провести серию опытов и проверить, обладают ли атомы магнитными свойствами, все было, однако, далеко не столь очевидно. Ученый поместил крошечный образец натрия между полюсами регулируемого магнита и стал изучать влияние магнитного поля на спектральные линии излучения атомов натрия (см. СПЕКТРОСКОПИЯ). Выяснилось, что при усилении магнитного поля спектральные линии в каждой группе частот размываются, то есть в них появляются новые частоты излучения. Так было впервые однозначно подтверждено существование эффекта, который впоследствии будет назван эффектом Зеемана.

Чтобы понять его природу, проще всего обратиться к модели АТОМА БОРА и задуматься о том, как именно испускается свет. Электрон совершает квантовый скачок с высшей орбиты на низшую (или, что то же самое, с высшего энергетического уровня на низший), испуская при этом фотон строго определенной частоты, соответствующей разности энергий между двумя энергетическими уровнями. Теперь, если предположить, что электрон в действительности представляет собой микроскопический магнит, а сам атом помещен во внешнее магнитное поле, энергия электрона будет зависеть от полярности его магнитного спина — если магнитное поле электрона на орбите однонаправлено внешнему магнитному полю, он обладает одной энергией, если же оно ориентировано в противоположном направлении, то другой. То есть электроны с противоположным магнитным спином, находящиеся на одной орбитали, будут обладать несколько различающимися энергиями и каждый энергетический уровень окажется расщеплен на два близких подуровня. Соответственно, там, где раньше имела единственная возможная энергия квантового перехода между двумя уровнями, теперь имеется четыре возможные энергии перехода. На спектре излучения это должно отразиться таким образом, что вместо одной четко выделенной спектральной линии (частоты излучения) в мощном магнитном поле появятся четыре близко расположенные равноудаленные спектральные линии (частоты).

В первоначальном опыте Зееману не удалось различить эти четыре спектральные линии, поскольку несовершенство спектроскопа и недостаточная мощность магнита приводили к тому, что вместо расщепления наблюдалось простое размытие спектральных линий. Однако позже ученому удалось усовершенствовать аппаратуру и выявить четыре отдельных спектральных линии на месте одной размытой, как это и предсказывала теория. Для этого

потребовалось усилить магнитное поле, и Зееману даже удалось доказать, что расстояние между расщепленными линиями спектра напрямую зависит от напряженности магнитного поля.

Эффект Зеемана впоследствии нашел очень полезное применение в астрономии, поскольку по расщеплению линий в спектре излучения небесных тел можно судить о напряженности их магнитных полей. Например, именно по эффекту Зеемана астрофизикам удалось установить, что пятна на Солнце являются следствием возмущения мощных магнитных полей вблизи его поверхности — солнечных магнитных бурь.

ПИТЕР ЗЕЕМАН (Pieter Zeeman, 1865–1943) — нидерландский физик. Родился в Зоннемайре (Zonnemaire) в семье священника и всю жизнь провел на родине за исключением периода обучения в Лейденском университете. Завершив в Лейдене под научным руководством Хендрика Лоренца (Hendrick Lorentz, 1853–1928) работу по выявлению теоретически предсказанного Лоренцем расщепления спектров атомов в магнитном поле, в 1900 году занял кресло

профессора физики Амстердамского университета и занимал его до выхода на пенсию. Прославился как искуснейший экспериментатор и конструктор измерительных приборов, обеспечивавших революционную по тем временам точность измерений. В 1902 году разделил с Лоренцем Нобелевскую премию по физике. В 1918 году дал экспериментальное подтверждение принципа эквивалентности гравитационной и инерциальной масс.

Эффект Комптона

При рассеянии на свободных электронах фотоны теряют энергию, причем количество потерянной энергии зависит от угла рассеяния

1922 • ЭФФЕКТ КОМПТОНА

В первые десятилетия XX века ученые постепенно приходили к осознанию того, что объекты микромира обладают одновременно свойствами и частиц, и волн (см. принцип дополнительности). Начало этому процессу положило предложенное Альбертом Эйнштейном объяснение фотоэлектрического эффекта, согласно которому любое электромагнитное излучение, включая свет, представляет собой пучки фотонов. Открытый же американским физиком Артуром Комптоном эффект рассеяния фотонов на свободных электронах стал еще одним подтверждением квантовой природы фотона.

Эксперимент, проделанный Комптоном, описать несложно. Пучок электромагнитных лучей (Комптон использовал рентгеновские лучи) направляется на кристалл, после чего измеряются энергии и угол отклонения рассеянных лучей. В рамках классической теории взаимодействия лучей с веществом (до постулирования принципов квантовой механики) энергия отраженного излучения не должна отличаться от энергии исходного излучения. Комптон же получил принципиально иную картину: энергия рассеянной волны отличалась от энергии исходной волны, и эта разница зависела от угла рассеяния, достигая максимума при угле 90° . Единственным способом дать разумную интерпретацию полученным Комптоном результатам было рассматривать взаимодействие лучей с атомами как столкновение исходящей частицы (фотона) с электроном. Как и два бильярдных шара, эти две частицы, взаимодействуя, отскакивают друг от друга. А поскольку электрон движется медленно, он в общем случае должен приобретать энергию при этом столкновении, в то время как фотон эту же энергию теряет.

После публикации Комптоном в начале 1923 года полученных результатов среди физиков осталось мало сомневающихся в реальности фотонов. Сегодня эффект Комптона находит применение в астрофизике: гамма-лучи от космических объектов подвергаются многократному рассеянию, пока их энергия не падает до длин волн рентгеновской части спектра, после чего их можно анализировать на стандартных рентгенографических установках. Подобный детектор был в 1991 году выведен НАСА на орбиту в составе Гамма-лучевой обсерватории имени Комптона.

АРТУР ХОЛЛИ КОМПТОН (Arthur Holly Compton, 1892–1962) — американский физик. Родился в Вустере, штат Огайо (Wooster, Ohio), в семье профессора философии. В 1916 году окончил Принстонский университет. В первые годы после окончания университета работал в частной промышленной лаборатории, где участвовал в создании первых ламп дневного света. Вернувшись к академическим исследованиям, большую часть времени проработал в Чикагском университете, где в 1923 году стал профессором физики. За открытие и объяснение

эффекта Комптона он был удостоен Нобелевской премии по физике за 1927 год. Во время Второй мировой войны Комптон руководил металлургической лабораторией при Чикагском университете, участвовавшей в работе по созданию «уранового котла» в рамках Манхэттенского проекта. После окончания Второй мировой войны Комптон много своего времени стал уделять общественно-политической деятельности. В частности, с 1946 по 1948 год состоял членом Комиссии по высшему образованию при президенте США.

Эффект Кориолиса

Во вращающейся системе отсчета (например, на поверхности Земли) наблюдателю кажется, что тела движутся по изогнутой траектории. Иногда этот эффект объясняют действием некой фиктивной силы — силы Кориолиса

1537	●	РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
1604, 1609	●	УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ
1659	●	ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА
1687	●	ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА
1835	●	ЭФФЕКТ КОРИОЛИСА
1905, 1916	●	ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Представьте, что кто-то, находясь на Северном полюсе, бросил мяч кому-то, кто находится на экваторе. Пока мяч летел, Земля провернулась вокруг своей оси и ловящий успел сместиться к востоку. Если бросающий, целясь мячом, не учел этого движения Земли, мяч упал западнее (или левее) ловящего. С точки зрения человека на экваторе, получается, что мяч летел левее, чем надо, с самого начала — как только его выпустил из рук бросающий — и до тех пор, пока не приземлился.

Согласно законам механики Ньютона, чтобы движущееся прямолинейно тело отклонилось от изначально заданной траектории, на него должна действовать какая-то внешняя сила. Значит, ловящий на экваторе должен сделать вывод, что брошенный мяч отклонился от прямолинейной траектории под действием некоей силы. Если бы мы смогли посмотреть на летящий мяч из космоса, мы бы увидели, что на самом деле никакая сила на мяч не действовала. Отклонение же траектории было вызвано тем, что Земля успела повернуться под мячом, пока он летел по прямой. Таким образом, действует в подобной ситуации какая-то сила или нет, — это целиком зависит от *системы отсчета*, в которой находится наблюдатель.

И подобное явление неизбежно возникает, когда есть какая-нибудь вращающаяся система координат — например, Земля. Для описания этого явления физики часто используют выражение *фиктивная сила*, имея в виду, что сила реально отсутствует, просто наблюдателю во вращающейся системе отсчета кажется, что она действует (другой пример фиктивной силы — это *центробежная сила*). И противоречий здесь нет никаких, поскольку оба наблюдателя единодушны относительно реальной траектории полета мяча и уравнений, ее описывающих. Расходятся они лишь в терминах, которые они используют для описания этого движение.

Фиктивная сила, которая действует в приведенном выше примере, называется *силой Кориолиса* — в честь французского физика Гаспара Кориолиса, впервые описавшего этот эффект. Интересно, что именно сила Кориолиса определяет направление вращения вихрей циклонов, которые мы наблюдаем на снимках, полученных с метеоспутников. Изначально воздушные массы начинают прямолинейно устремляться из областей высокого атмосферного давления в области пониженного атмосферного давления, однако сила Кориолиса заставляет их закручиваться по спирали. (С тем же успехом можно утверждать, что воздушные потоки продолжают двигаться прямолинейно, но, поскольку Земля под ними поворачивается, нам, находящимся на поверхности планеты, кажется, что они движутся по спирали.) Вернемся к примеру с бросанием мяча с полюса к экватору. Нетрудно понять, что в Северном и Южном полушариях сила Кориолиса действует на движущееся тело в прямо противоположных направлениях. Именно поэтому в Северном полушарии вихри циклонов закручены против часовой стрелки, а в Южном — по часовой стрелке.

Отсюда же происходит и неистребимая фольклорная премудрость, согласно которой вода в канализационных отверстиях ванн и раковин в двух полушариях вращается в противоположных направлениях, — якобы это обусловлено эффектом Кориолиса. (Помню, когда я сам был студентом, мы всей группой, включая одного аргентинца, не один час провели в мужском туалете физического факультета Стэнфордского университета, наблюдая за потоками воды в раковине в надежде подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.) На самом же деле, хотя и верно, что сила Кориолиса действует противоположно в двух полушариях, направление закручивания воды в сливной воронке лишь отчасти определяется этим эффектом. Дело в том, что вода долгое время течет по водопроводным трубам, при этом в потоке воды образуются течения, которые хоть и трудно увидеть простым глазом, продолжают закручивать струю воды и тогда, когда она льется в раковину. Кроме того, когда вода уходит в сливное отверстие, могут создаваться похожие течения. Именно они определяют направление движения воды в воронке, поскольку силы Кориолиса оказываются гораздо слабее этих течений. В обычной жизни направление закручивания воды в сливной воронке в Северном и Южном полушариях больше зависит от конфигурации канализационной системы, чем от действия природных сил.

Однако все-таки нашлась группа экспериментаторов, которой хватило терпения повторить этот опыт в «чистых» условиях. Они взяли идеально симметричную раковину сферической формы, устранили канализационные трубы, позволив воде проходить сквозь сливное отверстие свободно, оборудовали сливное отверстие автоматической заслонкой, которая открывалась лишь после того, как в воде успокаивались любые остаточные токи, — и увидели-таки эффект Кориолиса в действии! Несколько раз им даже удалось увидеть, как вода сначала под слабым внешним воздействием закручивалась в одну сторону, а затем силы Кориолиса брали верх, и направление спирали менялось на противоположное!



ГЮСТАВ ГАСПАР КОРИОЛИС

(Gaspard Gustave de Coriolis, 1792–1843) — французский физик и инженер. Родился в Париже. Окончил престижную Политехническую школу, которую со временем возглавил в качестве директора. (Он оснастил аудитории «водяными холодильниками» — прообразами кондиционеров, — которые работают до сих пор, и студенты так и называют их

«кориолями».) Основным научным интерес ученого лежал в области разработки движущихся частей различных механизмов. В частности, Кориолис — один из изобретателей подшипников. Однако его интересы не носили чисто прикладного характера: занимаясь, в общем-то, практической механикой, он дал современные определения работы и кинетической энергии.

Эффект Тиндаля

В замутненных средах фиолетовый и синий свет рассеиваются сильнее всего, а оранжевый и красный — слабее всего

1859 • ЭФФЕКТ ТИНДАЛЯ

Эффект Тиндаля был открыт в результате исследования ученым взаимодействии световых лучей с различными средами. Он выяснил, что при прохождении лучей света через среду, содержащую взвесь мельчайших твердых частиц — например, пыльный или задымленный воздух, коллоидные растворы, мутное стекло, — эффект рассеяния уменьшается по мере изменения спектральной окраски луча от фиолетово-синей к желто-красной части спектра. Если же пропустить через мутную среду белый, например солнечный, свет, который содержит полный цветовой спектр, то свет в синей части спектра частично рассеется, в то время как интенсивность зелено-желто-красной части света останется практически прежней. Поэтому, если смотреть на рассеянный свет после прохождения им замутненной среды в стороне от источника света, он покажется нам синее, чем исходный свет. Если же смотреть на источник света вдоль линии рассеяния, то есть через замутненную среду, источник покажется нам краснее, чем он есть на самом деле. Именно поэтому дымка от лесных пожаров, например, кажется нам голубовато-фиолетовой.

Эффект Тиндаля возникает при рассеянии на взвешенных частицах, размеры которых превышают размеры атомов в десятки раз. При укрупнении частиц взвеси до размеров порядка $1/20$ длины световых волн (примерно от 25 нм и выше) рассеяние становится *полихромным*, то есть свет начинает рассеиваться равномерно во всем видимом диапазоне цветов от фиолетового до красного. В результате эффект Тиндаля пропадает. Вот почему густой туман или кучевые облака кажутся нам белыми — они состоят из плотной взвеси водяной пыли с диаметром частиц от микронов до миллиметров, что значительно выше порога рассеяния по Тиндалю.

Можно подумать, что небо кажется нам сине-голубым благодаря эффекту Тиндаля, но это не так. В отсутствие облачности или задымления небо окрашивается в сине-голубой цвет благодаря рассеянию дневного света на молекулах воздуха. Такой тип рассеяния называется *рассеянием Рэлея* (в честь сэра Рэлея; см. КРИТЕРИЙ РЕЛЕЯ). При рассеянии Рэлея синий и голубой свет рассеивается даже сильнее, чем при эффекте Тиндаля: например, синий свет с длиной волны 400 нм рассеивается в чистом воздухе в девять раз сильнее красного света с длиной волны 700 нм. Вот почему небо кажется нам синим — солнечный свет рассеивается во всем спектральном диапазоне, но в синей части спектра почти на порядок сильнее, чем в красной. Еще сильнее рассеиваются ультрафиолетовые лучи, обуславливающие солнечный загар. Именно поэтому загар распределяется по телу достаточно равномерно, охватывая даже те участки кожи, на которые не попадают прямые солнечные лучи.

ДЖОН ТИНДАЛЬ (John Tyndall, 1820–1893) — ирландский физик и инженер. Родился в Лайлин-Бридж, графство Карлоу (Leighlin Bridge, County Carlow). По окончании средней школы работал топографом-геодезистом в военных организациях и на строительстве железных дорог. Одновременно окончил механический институт в Престоне. Уволен с военно-геодезической службы за протесты против плохих условий труда. Преподавал в Куинвуд-колледже (Хэмпшир), одновременно продолжал самообразование. В 1848–51 гг. слушал лекции в Марбургском и Берлинском университетах. Вернувшись в Англию, стал преподавателем, а затем и профессором Королевского института (Royal Institution) в Лондоне. Основные труды ученого посвящены магнетизму, акустике, поглощению теплового излучения газами и парами,

рассеянию света в мутных средах. Изучал строение и движение ледников в Альпах.

Тиндаль был крайне увлечен идеей популяризации науки. Регулярно читал публичные лекции, часто в форме бесплатных лекций для всех желающих: для рабочих на заводских дворах в обеденные перерывы, рождественские лекции для детей в Королевском институте. Слава Тиндаля как популяризатора достигла и другого берега Атлантики — весь тираж американского издания его книги «Фрагменты науки» (*Fragments of Science*, 1871) был раскуплен за один день. Погиб в 1893 году нелепой смертью: готовя обед, жена ученого (пережившая его на 47 лет) по ошибке использовала вместо поваренной соли один из хранившихся на кухне химических реактивов.

Эффект Холла

Электрический ток при его протекании через металл в присутствии магнитного поля производит электрическое напряжение, перпендикулярное направлению и самого тока, и силовых линий магнитного поля

1785	• ЗАКОН КУЛОНА
1820	• ОТКРЫТИЕ ЭРСТЕДА
1820	• ЗАКОН БИО—САВАРА
1831	• ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ
1833	• ПРАВИЛО ЛЕНЦА
1879	• ЭФФЕКТ ХОЛЛА

При движении электрического заряда в магнитном поле на него действует отклоняющая сила. Именно на этом принципе основана работа таких экспериментальных установок, как синхрофазотрон, широко используемых в исследованиях в области физики элементарных частиц: в них заряженные частицы оказываются пойманными в тороидальную (в форме бублика) магнитную ловушку и летают по кругу внутри нее. В малых масштабах этот эффект используется в устройстве микроволновой печи — в ней электроны, циркулируя в магнитном поле, производят сверхвысокочастотное излучение, разогревающее пищу.

Представьте, что на столе перед вами лежит кусок проводящей проволоки, а магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости крышки стола. Если по проволоке пропустить ток, магнитное поле заставит заряды внутри провода отклоняться в одну сторону (вправо или влево от направления тока, в зависимости от ориентации магнитного поля и полярности зарядов). Смещаясь от направления прямолинейного движения внутри проводника, заряды будут скапливаться в приграничной зоне, пока силы взаимного электростатического отталкивания между ними, возникающие в силу закона Кулона, не уравновесят отклоняющую силу воздействия магнитного поля на ток. После этого ток снова потечет прямолинейно, однако на проводнике возникнет разность электрических потенциалов в плоскости, перпендикулярной как направлению тока, так и направлению силовых линий магнитного поля, вызванная перераспределением электрических зарядов в плоскости сечения проводника, а величина этой разности потенциалов будет пропорциональна силе тока и напряженности магнитного поля.

Первым поперечное электрическое напряжение, возникающее под воздействием внешнего магнитного поля, по вышеописанной схеме измерил в 1879 году Эдвин Холл. Он осознал, что направление вектора напряжения будет зависеть от того, какие заряды — отрицательные или положительные — являются носителем тока. И в результате проведенных опытов Холл первым в мире наглядно продемонстрировал, что электрический ток в металлах создается направленным движением отрицательно заряженных *электронов*. А до этого опыта ученые сомневались и относительно полярности зарядов — носителей тока, и относительно того, воздействует ли магнитное поле на заряженные частицы внутри проводника или на саму неподвижную структуру проводника.

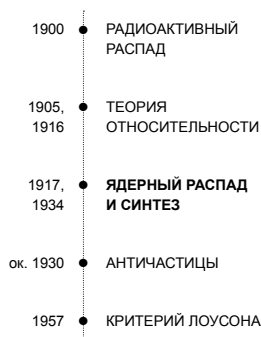
Прошло более столетия после экспериментов Холла, и германский физик Клаус фон Клитцинг (Klaus von Klitzing, р. 1943) открыл квантово-механический аналог эффекта Холла, за что и был в 1985 году удостоен Нобелевской премии по физике.

ЭДВИН ГЕРБЕРТ ХОЛЛ (Edwin Herbert Hall, 1855–1938) — американский физик. Родился в г. Грейт-Фолз (ныне Горем), штат Мэн, США. Поступил в первый набор на физический факультет только что открытого университета Джонса Хопкинса в Балтиморе — первого американского научно-исследовательского и учебно-образовательного учреждения, смоделированного по

образцу немецких научно-исследовательских заведений. Эффект, названный впоследствии его именем, Холл открыл при подготовке докторской диссертации по электричеству и магнетизму. Защитив ее, ученый перешел в Гарвардский университет, где затем прославился инновациями в области преподавания физики в высшей и особенно средней школе.

Ядерный распад и синтез

Можно получать энергию как за счет управляемого распада ядер некоторых элементов, так и за счет слияния мелких ядер в более крупные в процессе так называемой реакции термоядерного синтеза



Согласно теории относительности, масса представляет собой особую форму энергии, о чем и свидетельствует известная формула Эйнштейна $E = mc^2$. Из нее следует возможность преобразования массы в энергию и энергии в массу. И такие реакции на внутриатомном уровне вещества реально имеют место. В частности, часть массы атомного ядра может превращаться в энергию, и происходит это двумя путями. Во-первых, крупное ядро может распасться на несколько мелких — такой процесс называется реакцией *распада*. Во-вторых, несколько более мелких ядер могут объединиться в одно более крупное — это так называемая реакция *синтеза*. Реакции ядерного синтеза во Вселенной распространены очень широко — достаточно упомянуть, что именно из них черпают энергию звезды. Ядерный распад сегодня служит одним из основных источников энергии для человечества — он используется на атомных электростанциях. И при реакции распада, и при реакции синтеза совокупная масса продуктов реакции меньше совокупной массы реагентов. Эта-то разница в массе и преобразуется в энергию по формуле $E = mc^2$.

Распад

В природе уран встречается в форме нескольких изотопов, один из которых — уран-235 (^{235}U) — самопроизвольно распадается с выделением энергии. В частности, при попадании достаточно быстрого нейтрона в ядро атома ^{235}U последнее распадается на два крупных куса и ряд мелких частиц, включая обычно два или три нейтрона. Однако, сложив массы крупных фрагментов и элементарных частиц, мы недосчитаемся определенной массы по сравнению с массой исходного ядра до его распада под воздействием удара нейтрона. Эта-то недостающая масса и выделяется в виде энергии, распределенной среди получившихся продуктов распада — прежде всего *кинетической энергии* (энергии движения). Стремительно движущиеся частицы разлетаются от места распада и сталкиваются с другими частицами вещества, разогревая их.

Они представляют собой стремительно разлетающиеся от места распада частицы, при этом далеко они не улетают, врезаясь в соседние атомы вещества и разогревая их. Таким образом, энергия, порождаемая ядерным распадом, преобразуется в теплоту окружающего вещества.

В уране, добываемом из природной урановой руды, изотопа урана-235 содержится всего 0,7% от общей массы урана — остальные 99,3% приходятся на долю относительно устойчивого (слаборadioактивного) изотопа ^{238}U , который просто поглощает свободные нейтроны, не распадаясь под их воздействием. Поэтому для использования урана в качестве *топлива* в ядерных реакторах его нужно предварительно *обогатить* — то есть довести содержание радиоактивного изотопа ^{235}U до уровня не менее 5%.

После этого уран-235 в составе обогащенного природного урана в атомном реакторе распадается под воздействием бомбардировки нейтронами. В результате из одного ядра ^{235}U выделяется в среднем 2,5 нового нейтрона, каждый из которых вызывает распад еще 2,5 ядра, и запускается так называемая *цепная реакция*. Условием для продолжения незатухающей реакции распада урана-235 является превышение числа выделяемых распадающимися ядрами нейтронов числа нейтронов, покидающих урановый конгломерат; в этом случае реакция продолжается с выделением энергии.

В атомной бомбе реакция носит умышленно неконтролируемый характер, в результате чего за доли секунды распадается огромное число ядер ^{235}U и выделяется колоссальная по своей разрушительности взрывная энергия. В атомных реакторах, используемых в энергетике, реакцию распада необходимо строго контролировать с целью дозирования выделяемой энергии. Хорошим поглотителем нейтронов является кадмий — его-то обычно и используют для управления интенсивностью распада в реакторах АЭС. Кадмиевые стержни погружают в активную зону реактора до уровня, необходимого для снижения скорости выделения свободной энергии до технологически разумных пределов, а в случае падения энерговыделения ниже необходимого уровня частично выводят стержни из активной зоны реакции, после чего реакция распада интенсифицируется до необходимого уровня. Выделившаяся тепловая энергия затем в обычном порядке (посредством турбогенераторов) преобразуется в электрическую.

Синтез

Термоядерный синтез — реакция прямо противоположная реакции распада по своей сути: более мелкие ядра объединяются в более крупные. Самая распространенная во Вселенной реакция вообще — это реакция термоядерного синтеза ядер гелия из ядер водорода: она непрерывно протекает в недрах практически всех видимых звезд. В чистом виде она выглядит так: четыре ядра водорода (протона) образуют атом гелия (2 протона + 2 нейтрона) с выделением ряда других частиц. Как и в случае реакции распада атомного ядра, совокупная масса образовавшихся частиц оказывается *меньше* массы исходного продукта (водорода) — она и выделяется в виде кинетической энергии частиц — продуктов реакции, за счет чего звезды и разогреваются.

В недрах звезд реакция термоядерного синтеза происходит не одновременно (когда сталкиваются 4 протона), а в три этапа. Сначала из двух протонов образуется ядро дейтерия (один протон и один нейтрон). Затем, после попадания в ядро дейтерия еще одного протона, образуется гелий-3 (два протона и один нейтрон) плюс другие частицы. И, наконец, два ядра гелия-3 сталкиваются, образуя гелий-4, два протона, а также другие частицы. Однако по

совокупности эта трехэтапная реакция дает чистый эффект образования из четырех протонов ядра гелия-4 с выделением энергии, уносимой быстрыми частицами, прежде всего фотонами (см. эволюция звезд).

Естественная реакция термоядерного синтеза происходит в звездах; искусственная — в водородной бомбе. Увы, человек до сих пор не сумел найти средств для того, чтобы направить термоядерный синтез в управляемое русло и научиться получать за счет него энергию для использования в мирных целях. Однако ученые не теряют надежды на достижение положительных результатов в области получения «мирной и дешевой» термоядерной энергии уже в обозримом будущем, для этого главное — научиться удерживать высокотемпературную плазму либо посредством лазерных лучей, либо посредством сверхмощных тороидальных электромагнитных полей (см. КРИТЕРИЙ ЛОУСОНА).

	Древний мир—1599	1600–1649	1650–1699
Астрономия	XVI Принцип Коперника	1609, 1619 Законы Кеплера	
Взгляд в прошлое	Древний мир Само- зарождение жизни		1683 Флогистон
Математика	V до н.э. Парадокс Зенона 1202 Числа Фибоначчи	1630 Великая теорема Ферма	
Науки о жизни		1624 Эксперимент Ван Гельмонта	1663, 1839 Клеточная теория
Науки о Земле			1666 Закон последовательности напластования горных пород
Разное	ок. XIV Бритва Оккама		
Физика	Античность Агрегатные состояния вещества III до н.э. Закон Архимеда ок. 420 до н.э. Атомная теория строения вещества ок. 100 н.э. Закон отражения света 1537 Распределенное движение	1600 Магнетизм 1604, 1609 Уравнения равноускоренного движения 1621 Закон Снеллиуса	1650 Принцип Ферма 1659 Центробежная сила 1662 Закон Бойля—Мариотта 1668 Закон сохранения линейного импульса 1678 Закон Гука 1687 Закон всемирного тяготения Ньютона; Законы механики Ньютона 1690 Принцип Гюйгенса
Химия			

1700–1749	1750–1799	1800–1819	1820–1839	1840–1859
1742, 1823 Парадокс Ольберса	1755 Гипотеза газопылевого облака 1766 Правило Тициуса—Боденштерна 1783 Черные дыры			
нач. XVIII Равновесие в природе		1809 Ламаркизм		ок. 1850 Социальный дарвинизм
1742 Проблема Гольдбаха				1822 Анализ Фурье
1729, сер. XX Суточные ритмы ок. 1730 Система классификации Линнея	1779, 1905 Фотосинтез 1798 Экспоненциальный рост			1852, 1878 Мимикрия 1859 Теория эволюции
	1783 Круговорот углерода в природе 1788 Униформизм кон. XVIII Цикл преобразования горной породы			1852 Кислотный дождь
1736 Закон сохранения момента импульса 1738 Уравнение Бернулли 1747 Закон сохранения электрического заряда	1761 Фазовые переходы 1785 Закон Кулона 1787 Закон Шарля 1798 Механическая теория теплоты	XIX Электрические свойства вещества ок. 1800 Тепловое расширение 1801 Закон Генри 1807 Интерференция 1813 Теорема Гаусса 1815 Закон Брюстера 1818 Дифракция	1820 Закон Ампера; Закон Био—Савара; Открытие Эрстеда 1824 Цикл и теорема Карно 1826 Закон Ома 1827 Броуновское движение 1831 Законы электромагнитной индукции Фарадея 1833 Правило Ленца 1834 Уравнение Клапейрона—Клаузиуса; Уравнение состояния идеального газа 1835 Эффект Кориолиса	1842 Термодинамика, первое начало; Эффект Доплера 1845 Законы Кирхгофа 1849 Молекулярно-кинетическая теория 1850 Термодинамика, второе начало 1851 Предельная скорость падения 1859 Открытие Кирхгофа—Бунзена; Спектроскопия; Эффект Тиндалля
	кон. XVIII Проба на окрашивание пламени	1801 Закон Дальтона 1811 Закон Авогадро	1828 Синтез мочевины 1829 Закон Грэма 1834 Законы электролиза Фарадея	1854 Катализаторы и ферменты

	1860–1879	1880–1899	1900–1919
Астрономия		1887 Опыт Майкельсона—Морли	XX Эволюция звезд 1905–1913 Диаграмма Герцшпрунга—Рассела 1912 Зависимость период—светимость 1917 Космологическая постоянная
Взгляд в прошлое		1896 Закон Копи 1899 Онтогенез повторяет филогенез XIX — нач. XX Витализм	
Математика			
Науки о жизни	1865 Законы Менделя 1873 Принцип мутуализма 1877 Микробная теория инфекционных заболеваний; Правило Алена; Симбиоз	ок. 1895 Теория сцепления-натяжения XIX–XX Биологические молекулы; Распространение нервных импульсов	ок. 1900 Территориальность у животных; Экологическая сукцессия 1908 Закон Харди—Вайнберга
Науки о Земле	1863 Парниковый эффект	1886 Круговорот азота в природе кон. XIX Круговорот воды в природе 1890, 1940-е Радиометрическое датирование	1910-е Циклы Миланковича
Разное			1913 Объяснение Бора
Физика	1864 Спектр электромагнитного излучения; Уравнения Максвелла 1867 Демон Максвелла 1872 Постоянная Больцмана 1879 Закон Стефана—Больцмана; Эффект Холла	1883–84 Число Рейнольдса 1887 Ударные волны 1890 Постоянная Ридберга 1891 Принцип эквивалентности 1895 Закон Кюри; Точка Кюри 1896 Критерий Рэлея; Эффект Зеемана 1897 Открытие электрона; Элементарные частицы 1899 Фотоэлектрический эффект	1900 Излучение черного тела; Постоянная Планка; Радиоактивный распад; Электронная теория проводимости 1905 Термодинамика, третье начало 1905, 1916 Теория относительности 1911 Опыт Резерфорда 1912 Закон Брэгга 1913 Атом Бора; Опыт Милликена 1917, 1934 Ядерный распад и синтез
Химия	1860-е Периодическая система Менделеева 1868, 1895 Открытие гелия	1887 Кислоты и основания 1888 Принцип Ле Шателье 1892 Открытие аргона	1919 Правило октета



1920–1939	1940–1959	1960–1969	1970–1999	2000–
1929 Закон Хаббла 1931 Предел Чандрасекара 1933 Темная материя	1940 Гипотеза гига- нтского столкновения 1948 Большой взрыв 1950 Парадокс Ферми	1961 Антропный при- нцип; Формула Дрейка	1980-е Ранняя Вселенная 1981 Инфляционная стадия расширения Вселенной 1990-е Космический треугольник	
	1948 Теория стацио- нарной вселенной сер. XX Триединный мозг			
1931 Теорема Гёделя о неполноте		1965 Закон Мура	1980-е Детерминисти- ческий хаос	
1920-е Дрейф генов 1926 Отношения хищник—жертва 1928 Открытие пенициллина 1934 Принцип конку- рентного исключения 1937 Гликолиз и дыхание	1947 Устойчивость мик- робов к антибиотикам нач. 1950-х Белки 1950-е Зеленая революция 1952 Эксперимент Херши—Чейз 1953 ДНК 1954 Максимальная устойчивая добыча 1958 Центральная догма молекулярной биологии	1960-е Стволовые клетки нач. 1960-х Родс- твенный отбор 1961 Генетический код 1964 Козволюция сер. 1960-х Иммунная система 1966 Теория оптималь- ного фуражирования 1967 Теория равновесия Макартура—Уилсона	1970-е Дифферен- циальное исполь- зование ресурсов; Молекулярные часы 1976 Теорема о мар- гинальных значениях 1995 Клонирование	2000 Проект «Геном человека»
ок. 1930, 1980 Массовые вымирания	1953 Эксперимент Миллера—Юри	1960-е Тектоника плит	1979 Гипотеза Геи 1985 Озоновая дыра	
	1942 Три закона робототехники сер. 1940-х Закон Мёрфи 1950 Тест Тьюринга			
1921 Опыт Штерна—Герлаха 1922 Эффект Комптона 1923 Принцип соответствия 1924 Квантовый тун- нельный эффект; При- нцип запрета Паули; Соот- ношение де Бройля 1925 Квантовая механика 1926 Полосная теория твердотельной прово- димости; Уравнение Шрёдингера 1927 Опыт Дэвиссона— Джермера; Принцип дополнительности; При- нцип неопределенности Гейзенберга ок. 1930 Античастицы 1931 Магнитные монополи 1934 Излучение Черенкова	1957 Критерий Лоусона; Теория сверхпроводимости	1961 Кварки и восьме- ричный путь; Стандар- тная модель 1962 Эффект Джозефсона 1964 Теорема Белла 1968 Теория струн	1972 Квантовая хромодинамика 1980-е Скрытый при- нцип необратимости времени	XXI (?) Универ- сальные теории
ок. 1920 Принцип Aufbau кон. 1920-х Теория молеку- лярных орбиталей 1930-е Химические связи				

Амплитуда — максимальное отклонение волны от среднего положения — высота гребня или глубина впадины.

Атом — мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его химические свойства; ядро с электронами на орбиталях вокруг него.

Бактерия — простейший одноклеточный микроорганизм.

Биосфера — тонкая оболочка Земли, поддерживающая жизнь; включает поверхность, приповерхностную почву, гидросферу и атмосферу.

Вес — см. **масса**

Вид — совокупность организмов, способных к скрещиванию и размножению.

Вирус — микроорганизм, представляющий собой фрагмент ДНК или РНК в белковой оболочке.

Галактика — скопление звёзд, космической пыли, газа и тёмной материи. Подавляющая масса материи Вселенной приходится на галактики.

Гамма-лучи — электромагнитное излучение, характеризующееся сверхмалой длиной волны и сверхвысокой энергией.

Ген — фрагмент молекулы ДНК, кодирующий белок, который ферментирует определённую биохимическую реакцию в клетке; «единица наследственности».

Горная порода — см. **минерал**

Двойная звезда — система двух звезд, обращающихся по орбитам вокруг общего центра масс.

Длина волны — расстояние между гребнями волны.

ДНК — важнейшая биологическая молекула, содержащая гены, который передаются из поколения в поколение.

Единицы СИ — единицы Международной системы измерений (Système Internationale, SI), основанной на использовании метра в качестве единицы длины, килограмма в качестве единицы массы и секунды в качестве единицы времени.

Излучение — поток частиц или волн высоких энергий, испускаемых при радиоактивном распаде или, в обобщённом смысле, поток частиц или волн, испускаемых любым источником излучения.

Изотоп — ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов называются изотопами данного химического элемента.

Импульс — масса тела, умноженная на его векторную скорость.

Инерция — свойство материи оставаться в состоянии движения до тех пор, пока на нее не окажет воздействие внешняя сила.

Инфракрасное излучение — электромагнитные лучи с несколько большей, чем у видимого света, длиной волны.

Ион — атом или фрагмент молекулы (радикал) с положительным или отрицательным электрическим зарядом, полученным за счёт захвата или потери одного или нескольких электронов.

Ископаемое топливо — виды топлива, например уголь, нефть и природный газ, образовавшиеся в результате древних геологических процессов.

Кварк — один из видов элементарных частиц, из которых состоят другие элементарные частицы, такие как протоны и нейтроны.

Кинетическая энергия — энергия, связанная с движением.

Красное смещение — смещение наблюдаемой длины волны излучения (обычно света) в сторону длинноволновой (красной) части спектра при удалении источника излучения от наблюдателя.

Масса — мера сопротивления физического объекта ускорению, мера количества вещества в физическом объекте. Вес объекта — это сила, действующую на него в гравитационном поле.

Минерал — неорганическое вещество с упорядоченным строением кристаллической решетки. Горные породы представляют собой смесь минералов.

Молекула — не менее двух атомов, удерживаемых вместе химическими связями.

Моль — количество вещества, содержащее одно и то же число атомов, равное числу атомов в 12 г углерода.

Нейтрон — тяжелая элементарная частица с нулевым зарядом.

Оболочка — см. **орбиталь**

Орбиталь — область в атоме или молекуле, где могут находиться электроны. Вероятность нахождения электрона на той или иной орбитали определяется его волновой функцией. Оболочка — это совокупность электронных орбиталей.

Органическое соединение — химическое соединение, содержащее углерод, за исключением простейших соединений углерода — оксидов углерода и карбонатов; последние, наряду со всеми остальными химическими соединениями, условно относят к неорганическим соединениям.

Осмоз — процесс проникновения атомов в раствор через мембрану.

Относительная атомная масса (атомный вес) — средняя масса атомов (включая все изотопы) химического элемента в том виде, в котором оно встречается в природе; измеряется в единицах $1/12$ атомной массы углерода.

Пищевая цепь — цепь биологических видов, в которой каждый вид питается представителями низшего звена и служит пищей для представителей высшего по отношению к нему звена.

Плазма — агрегатное состояние вещества, в котором электроны отделены от атомного ядра.

Потенциальная энергия — энергия, которой обладает тело, находящееся в гравитационном поле.

Пропорция — одна величина пропорциональна другой, если при ее возрастании вторая величина возрастает в то же число раз. Если же при возрастании первой величины вторая убывает в то же число раз, говорят об обратной пропорции.

Простое число — натуральное число, делящееся без остатка только на единицу и само себя

Пространство-время — четырёхмерное пространство, в котором время рассматривается в качестве дополнительного четвёртого измерения к трем пространственным измерениям.

Протон — тяжёлая элементарная частица с единичным положительным зарядом.

Протонное (атомное) число — число протонов (и, соответственно, положительных зарядов) в ядре атома.

Радиоволны — длинноволновое электромагнитное излучение.

Разложение — химическая реакция, приводящая к делению тяжелых молекул на несколько лёгких.

Реакция (химическая) — преобразование одного или нескольких химических веществ в одно или несколько других химических веществ.

Рентгеновские лучи — коротковолновое электромагнитное излучение.

Сверхновая — продукт катастрофического взрыва догоревшей звезды, при котором всё её вещество выбрасывается в межзвездное пространство в виде химических элементов.

Световой год — расстояние, которое проходит свет за один год. Это НЕ мера времени.

Сила — воздействие, приводящее к изменению состояния движения физического тела

Скорость — расстояние, покрываемое телом за единицу времени. Векторная скорость — это скорость с учетом направления движения тела.

Спектр — обычно спектр электромагнитного излучения: весь диапазон электромагнитного излучения от гамма-лучей до радиоволн.

Углеводороды — органические вещества, молекулы которых состоят из атомов углерода и водорода; например, бензин.

Ультрафиолетовое излучение — электромагнитное излучение с несколько меньшей, чем у видимого света, длиной волны.

Ускоритель — экспериментальная установка для разгона элементарных частиц до сверхвысоких, часто близких к скорости света (субсветовых) скоростей. Столкновения между частицами на субсветовых скоростях помогают раскрывать их свойства.

Фаза (волны) — мера синхронизации волны с другой волной того же типа.

Фотон — частица света или иного электромагнитного излучения.

Частота — число пиков (или впадин) волны, проходящих через фиксированную точку в единицу времени.

Экосистема — совокупность всего живого, обитающего в конкретной местности, вместе со средой обитания.

Электрон — лёгкая элементарная частица с единичным отрицательным зарядом. В атомах электроны размещаются на орбиталях вокруг ядра.

Элемент (химический) — вещество, не поддающееся дальнейшему химическому разложению.

Элементарные частицы — фундаментальные субатомные частицы, из которых состоят все остальные частицы физического мира. Различают два класса элементарных частиц: кварки и лептоны (к которым относится, в частности, электрон).

Энергетический уровень — энергия каждого из группы электронов, находящихся на определённой орбитали атомного ядра.

Ядро (атома) — центральная часть атома, состоящая из протонов и (как правило) нейтронов.

Ядро (клетки) — элемент структуры высокоорганизованных биологических клеток, содержащий ДНК клетки.

Джеймс Трефил

200 ЗАКОНОВ МИРОЗДАНИЯ

Издатель *Н. Ушакова*

Оформление обложки *А. Песнин*

Технический редактор *В. Ерофеев*

Верстка *С. Чорненький*

Корректор *М. Журавлева*

Подписано в печать ??.??.06. Формат 70×100 1/16

Тираж ?000 экз. Заказ № .

Общероссийский классификатор продукции ОК-005-93,
том 2; 953000 — книги, брошюры

Гигиеническое заключение

№ 77.99.02.953.Д.006738.10.05 от 18.10.2005 г.

ЗАО «Издательский Дом ГЕЛЕОС»

115093, Москва, Партийный переулок, 1

Тел.: (495) 785-0239. Тел./факс: (495) 951-8972

www.geleos.ru

Издательская лицензия № 065489 от 31 декабря 1997 г.

ЗАО «Читатель»

115093, Москва, Партийный переулок, 1

Тел.: (495) 785-0239. Тел./факс: (495) 951-8972

ПО ВОПРОСУ ОПТОВОЙ И МЕЛКООПТОВОЙ ПОКУПКИ КНИГ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГЕЛЕОС» ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:

Москва:

ЗАО «Читатель»
(отдел реализации издательства)
115093, г. Москва,
Партийный пер., д. 1
тел.: (495) 785-02-39,
факс (495) 951-89-72
e-mail: zakaz@geleos.ru
Internet: <http://www.geleos.ru>

Воронеж:

ООО «Амиталь»
394021, г. Воронеж,
ул. Грибоедова, 7а
тел.: (4732) 26-77-77
e-mail: mail@amital.ru

Казань:

ООО «ТД «Аист-Пресс»
420132, Республика Татарстан,
г. Казань,
ул. 7-я Кадышевская, д.9б,
тел.: (843) 525-55-40, 525-52-14
e-mail: sp@aistpress.com

Краснодар:

ЗАО «Когорта»
350033, г. Краснодар,
ул. Ленина, 101
тел.: (8612) 62-54-97,
факс (8612) 62-20-11
e-mail: kogorta@internet.kuban.ru

Пермь:

ООО «Ли́ра-2»
614036, г. Пермь,
ул. Леонова, 10а
тел.: (3422) 26-66-91,
факс (3422) 26-44-10
e-mail: lira2@permonline.ru

Ростов-на-Дону:

ООО «Сеть книжных магазинов
«Магистр»
344006, г. Ростов-на-Дону,
пр. 1-й Машиностроительный, 11
тел.: (863) 266-28-74,
факс (863) 263-53-31
e-mail: magistr@aaanet.ru
Internet: <http://www.booka.ru>

Санкт-Петербург:

ООО «Северо-Западное книготорговое
объединение»
192029, г. Санкт-Петербург,
пр-т Обуховской обороны, д. 84
тел.: (812) 365-46-04, 365-46-03
e-mail: books@szko.sp.ru

Самара:

Книготорговая фирма «Чакона»
443030, г. Самара, ул. Чкалова, 100
тел.: (8462) 42-96-28,
факс (8462) 42-96-29
e-mail: commdir@chaconne.ru
Internet: <http://www.chaconnre.ru>

Уфа:

ООО ПКП «Азия»
450077, г. Уфа, ул. Гоголя, д. 36
тел.: (3472) 50-39-00,
факс (3472) 51-85-44
e-mail: asiaufa@ufanet.ru

Украина:

Книготорговая фирма «Визарди»
г. Киев, ул. Вербова, д. 17, оф. 31
тел.: 8-10-38 (044) 247-42-65,
247-74-26
e-mail: wizardy@inbox.ru

Беларусь:

ТД «Книжный»
г. Минск, пер. Козлова, д. 7в
тел.: 8-10-375-(17) 294-64-64,
299-07-85

e-mail: td-book@mail.ru

Израиль:

P.O.B. 2462, Ha-Sadna st., 6,
Kefar-Sava, 44424, Israel
тел.: 8-10 (972) 766-88-43, 766-55-24
e-mail: michael@sputnic-books.com

Книги издательства «Гелеос»
в Европе:

«Fa. Atlant». D-76185 Karlsruhe
тел.: +49(0) 721-183-12-12,
721-183-12-13

факс: +49(0) 721-183 12 14

e-mail: atlant.book@t-online.de;

Internet: <http://www.atlant-shop.com>

