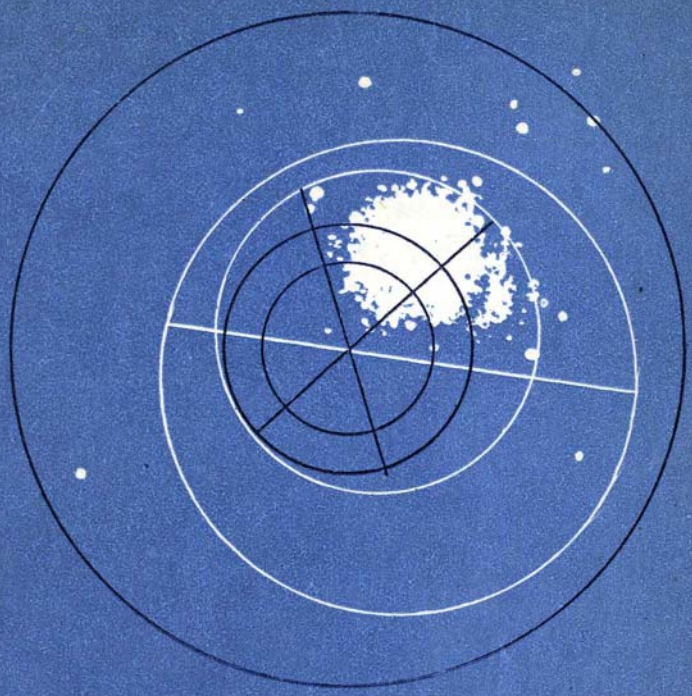
А. УАЙТ



Планета ПЛУТОН

МОСКВА «МИР»

A. J. WHYTE
Director, Ellerslie Observatory

The Planet PLUTO

Pergamon Press
Toronto Oxford New York
Sydney Frankfurt Paris

А. УАЙТ

Планета ПЛУТОН

Перевод с английского
Л. А. Исакович

под редакцией
д-ра физ.-мат. наук
В. А. Брумберга

МОСКВА
МИР
1983

ББК 22.654.3
У13
УДК 523.4

Уайт А.

У13 Планета Плутон./Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 127 с., ил.

В книге канадского астронома изложена увлекательная история открытия и приведены результаты изучения самой далекой от Солнца и во многом еще загадочной планеты, включая ее физические характеристики, элементы орбиты, спектральные и фотометрические свойства. Описаны последние достижения, в том числе открытие спутника Плутона, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Предназначена для астрономов, включая студентов и аспирантов, по уровню изложения доступна всем читателям, интересующимся проблемами астрономии.

У $\frac{1705050000-322}{041(01)-83}$ 75-83, ч. 1 ББК 526

Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии и геофизике

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

В 1980 г. исполнилось 50 лет с момента открытия Плутона. Эта дата была отмечена появлением нескольких книг, специально посвященных самой далекой из известных больших планет Солнечной системы. Однако, надо думать, полувековой юбилей явился лишь поводом для такого повышенного внимания, а истинная причина заключается в большом объеме качественно новой информации, полученной о Плутоне в 70-е годы, и во все возрастающем интересе к этой планете со стороны астрономов, представляющих самые различные направления исследований. Одна из таких книг — «Планета Плутон» Антони Уайта — предлагается в русском переводе советским читателям.

Советские астрономы всегда проявляли большой интерес к Плутону. Достаточно вспомнить, например, что первая полуаналитическая теория движения Плутона была разработана в Институте теоретической астрономии АН СССР (Шараф, 1955), а о возможности существования спутника Плутона еще за год до его фактического открытия говорилось в работе Р. И. Киладзе «О роли околопланетного роя частиц в возникновении суточного вращения» (Бюлл. Абастум. астроф. обс., № 48, 191, 1977). Поэтому можно надеяться, что книга Уайта будет встречена в нашей стране с особым интересом.

Содержание этой книги можно рассматривать в трех аспектах. Прежде всего в ней имеется детальное описание событий, связанных с открытием Урана, Нептуна и Плутона и составивших одну из самых увлекательных и драматических глав в истории астрономии. Во-вторых, в книге в лаконичной форме излагаются результаты практически всех основных работ по исследованию Плутона с 1930 по 1979 г. и приводится исчерпывающая библиография. В этом отношении книга напоминает издаваемые ВИНИТИ сборники «Итоги науки» и может оказаться весьма полезной специалистам как обзор литературы о Плутоне. Наконец, в-третьих, книгу можно использовать и как источник современных сведений о Плутоне. Здесь освещены практически все вопросы, связанные с Плутоном, — его движение, физические характеристики, методы исследований. Однако для сведения читателя следует отметить, что автор излагает все работы в хронологическом порядке без указания на то, насколько результаты тех или иных работ соответствуют современным данным.

В русском переводе книга издается практически без изменений. Редактором сделаны лишь немногочисленные примечания в основном с целью указать наиболее важную журнальную литературу, появившуюся уже после выхода книги.

Книга «Планета Плутон» Уайта будет полезна для астрономов и специалистов по космической технике, в том числе для студентов и аспирантов. С большим вниманием прочтут ее также астрономы-любители и все читатели, интересующиеся успехами современной науки.

В. А. Брумберг
июнь 1982

Моему другу и наставнику Гарри А. Вайзу

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга написана в надежде, что она заполнит давно существующую брешь на полках астрономических библиотек. «Планета Плутон» присоединяется к небольшому семейству книг с аналогичными заглавиями и целями, включающему в себя книги: «Планета Меркурий» В. Санднера, «Планета Юпитер» Б. М. Пика и «Планета Сатурн» А. Александера. До сих пор не было попыток представить в единой монографии описание поиска планеты, находящейся за орбитой Нептуна, историю открытия Плутона и известные нам сведения об этом далеком мире; до самого недавнего времени Плутон вообще мало упоминался в литературе. Однако накануне 50-й годовщины открытия планеты наши знания о Плутоне существенно обогатились — был открыт спутник Плутона; поэтому издание такой книги, как «Планета Плутон», стало не только возможным, но и весьма желательным.

Мы надеемся, что эта книга представит читателям возможность совершить экскурс в захватывающую историю поиска неизвестной планеты, оказывающей влияние на движение других тел Солнечной системы, и хотя бы частично передаст огромный интерес общественности и научных кругов, вызванный открытием Плутона Клайдом В. Томбо в 1930 г. Для исследователей планеты эта книга с обширной библиографией может оказаться особенно ценной в качестве полезного конспекта научной литературы по Плутону. Если в ней были пропущены какие-либо существенные работы по Плутону, то это произошло непреднамеренно.

Антони Дж. Уайт,
июль 1979.

Я благодарен за поддержку и помощь, оказанные большим числом отдельных лиц и организаций. Особой признательности заслуживают М. Мартин, Дж. В. Кристи, И. Холидей, Дж. Марелли, Б. Марсден, К. Остервинтер, М. Уайт, Дж. Г. Вильямс, библиотека физических наук университета провинции Альберта (Канада), библиотека Морской обсерватории США, Совет директоров обсерватории Эллерсли (Канада).

ГЛАВА 1

РАСШИРЕНИЕ ГРАНИЦ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ 1781—1846

Со времен античности было известно только пять планет, кроме Земли, и именно на этой, далеко не полной картине планетной системы последующие поколения астрономов основывали свои космологические теории, в течение веков пройдя путь от геоцентрических эпициклов Птолемея до гелиоцентрических кеплеровских эллипсов, подчиняющихся ньютоновскому закону тяготения. К середине восемнадцатого столетия астрономы описывали известную им Солнечную систему с большой надежностью и точностью, и казалось, что непознанного осталось совсем мало. Поэтому открытие Гершелем седьмой планеты, которое привело к увеличению вдвое размера Солнечной системы, оказалось полным сюрпризом.

В 1781 г. Гершель начал то, что стало делом всей его жизни: полный и систематический обзор неба, предусматривающий наблюдения с помощью телескопа и описание положения и внешнего вида каждого объекта. В ночь на 13 марта Гершель, используя свой излюбленный 16-сантиметровый рефлектор, заметил любопытный незвездный объект вблизи звезды Н. Близнецов. Он заподозрил, что этот объект представляет собой комету. По его собственным словам:

«Увеличение телескопа, при котором я впервые увидел комету, было равно 227. Из опыта я знал, что диаметры неподвижных звезд в отличие от планет не возрастают пропорционально с ростом увеличения, поэтому я перешел к увеличениям 460 и 932 и обнаружил, что диаметр кометы возрос пропорционально увеличению, как это и должно быть, если исходить из предположения, что объект не является неподвижной звездой. В то же время диаметры звезд сравнения не возросли в соответствующей пропорции. Более того, изображение кометы, будучи увеличенным гораздо больше, чем это допускал ее свет, казалось туманным и неясным при этих больших увеличениях. В то же время звезды сохраняли тот же блеск и отчетливость, которые, как я знал из многих тысяч наблюдений, они и должны были иметь».

19 марта Гершель обнаружил, что объект движется в восточном направлении относительно звезд, подтверждая его подозре-

ние, что это комета, хотя позднее, 6 апреля, он должен был отметить, что объект имеет совершенно четкие края и не обнаруживает никаких следов хвоста. Несмотря на полную согласованность с видимой картиной, предположение о том, что объект представляет собой планету, сначала не пришло в голову Гершелю. Только королевский астроном Маскелайн, один из трех людей, которых Гершель первыми информировал о своем открытии, заподозрил, что объект может быть планетой. 23 апреля Маскелайн указал на возможность планетной природы объекта в письме к Гершелю. Тем не менее на заседании Королевского общества 26 апреля Гершель (1781) сделал доклад, озаглавленный просто «Сообщение о комете», неправильно приписав объекту суточный параллакс от 10″ до 20″, что соответствовало положению объекта внутри орбиты Земли.

Извещенные Маскелайном об открытии, многие астрономы континента, включая Мессье, Лаланда, Мешэна, Боде и других, предприняли наблюдения объекта в попытке определить характер его движения. После получения достаточного количества данных наблюдений, было предпринято несколько безуспешных попыток вывести на их основе параболическую (кометную) орбиту, представляющую действительное движение объекта. Несовместимость этого движения с орбитами кометного типа в конце концов убедила астрономов в невозможности такого согласования. Мессье в письме к Гершелю заметил, что указанный объект совершенно не похож ни на одну из открытых им ранее комет, которых в то время насчитывалось восемнадцать.

Отказ от кометной гипотезы последовал вскоре после того, как Лексель (1781) подытожил некометные характеристики объекта и вычислил для него круговую (планетную) орбиту. Различные системы круговых элементов, удовлетворяющие наблюдавшемуся малому участку орбиты объекта, были вскоре опубликованы в России, Франции и Германии. Стало очевидным, что для получения более точной орбиты необходим большой промежуток времени. Широкое признание планетной природы объекта показало значение открытия Гершеля и вызвало огромный триумф. В 1782 г. Гершель был назначен придворным астрономом при короле Англии Георге III. В благодарность Гершель предложил для новой планеты название «Георгиева звезда», в то время как Лаланд назвал ее «Гершель», а Боде предложил название «Уран», чтобы сохранить традиционную связь с мифологией, присущую названиям остальных планет. В течение шестидесяти лет после открытия новая планета носила три названия, пока окончательно не установилось название «Уран».

К 1783 г. предварительные круговые элементы для орбиты Урана были впервые заменены системой эллиптических элементов, вычисленных совместно Лапласом и Мешэном. Таблицы движения новой планеты появились в немецких и французских

эфемеридах на 1781 г. опубликованных в 1784 г. Учитывая ограниченную точность этих таблиц, обусловленную малым количеством наблюдений Урана со времени его открытия, Боде решил расширить интервал времени наблюдений путем исследования каталогов, составленных до открытия Урана, в которых Уран мог быть отмечен как звезда. Эта идея Боде оказалась очень удачной, и в августе 1781 г. он обнаружил, что Майер 25 сентября 1756 г. ошибочно отметил Уран как звезду в Водолее. Три года спустя с помощью Фиксмиллнера Боде нашел, что Флемстид, первый королевский астроном, наблюдал Уран 23 декабря 1690 г. в Тельце.

Обнаружение результатов наблюдений Флемстида 1690 г. означало, что теперь имелись данные о положении Урана, охватывающие более одного оборота. Фиксмиллнер (1787), используя наблюдения 1690 и 1756 г. вместе с наблюдениями 1781 и 1783 г., смог вычислить систему эллиптических элементов, приведенную в табл. 1. Однако в 1788 г. стало ясным наличие

Таблица 1

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ УРАНА, ПОЛУЧЕННЫЕ ФИКСМИЛЛНЕРОМ

Эпоха: январь 1, 1784

Средняя аномалия	297° 9′ 25″
Долгота перигелия	167 31 33
Долгота восходящего узла	72 50 50
Наклон	0 46 20
Тропический период, сут	30587,37
Среднее расстояние, а. е.	19,18254
Эксцентриситет	0,0461183
Среднесуточное тропическое движение	42,3704″

каких-то несоответствий, так как в этом году таблицы дали значительные расхождения с наблюдаемыми положениями Урана. При переработке своих орбитальных элементов и таблиц Фиксмиллнер обнаружил, что он не может согласовать наблюдение Флемстида 1690 г. с современными наблюдениями и поэтому он опустил его в своих вычислениях. Другие теоретики, включая Ориани, Лаланда и Деламбра, пытались преодолеть эту трудность, учитывая возмущающие эффекты Сатурна и Юпитера в движении Урана. В таблицах Деламбра, в частности, удалось согласовать все современные наблюдения с наблюдениями Майера и Флемстида.

В течение последующих 30 лет интерес к Урану ослаб, так как астрономы, успокоенные казавшимися верными таблицами Деламбра, занимались другими интересовавшими их проблемами. Число проводимых наблюдений Урана стало резко уменьшаться, и, наоборот, обнаруживалось все больше и больше на-

блюдений планеты до ее открытия. В 1788 г. Лемонье выяснил, что он ошибочно принимал Уран за звезду в 1764 и 1769 гг. Бессель (1818) обнаружил, что Брадлей наблюдал Уран как звезду 3 декабря 1753 г. Буркгардт нашел, что Флемстид наблюдал Уран не только в 1690 г., но также 2 апреля 1712 г. и 29 апреля 1715 г. В 1820 г. Бувар, просматривая записи уже умершего Лемонье, обнаружил десять еще более ранних наблюдений Урана. В январе 1769 г. один лишь Лемонье наблюдал Уран шесть раз в течение девяти дней, не подозревая о его незвездной природе. В табл. 2 приведены известные к 1820 г. данные наблюдений Урана, сделанных до его открытия.

Таблица 2

НАБЛЮДЕНИЯ УРАНА ДО ЕГО ОТКРЫТИЯ

Дата		Наблюдатель	Дата		Наблюдатель
Декабрь	23, 1690	Флемстид	Декабрь	30, 1768	Лемонье
Апрель	2, 1712	«	Январь	15, 1769	«
Апрель	29, 1715	«	Январь	16, 1769	«
Октябрь	14, 1750	Лемонье	Январь	20, 1769	«
Декабрь	3, 1750	«	Январь	21, 1769	«
Декабрь	3, 1753	Брадлей	Январь	22, 1769	«
Сентябрь	25, 1756	Майер	Январь	23, 1769	«
Январь	15, 1764	Лемонье	Декабрь	18, 1771	«
Декабрь	27, 1768	«			

Но теперь даже таблицы Деламбра 1790 г., подобно более ранним таблицам Фиксмиллнера, стали серьезно расходиться с наблюдаемыми положениями Урана. Поэтому Бувар (1821) взялся за исправление ошибок Деламбра и вычислил новые таблицы для всех трех внешних планет. Он успешно внес исправления для Юпитера и Сатурна, но встретился с той же трудностью в отношении Урана, которая раньше тревожила Фиксмиллнера, а именно с задачей согласования наблюдений, сделанных до открытия, с современными наблюдениями. Более того, в то время как Фиксмиллнер имел дело только с двумя старыми наблюдениями, одно из которых он полностью отбросил, Бувар имел 17 наблюдений, перечисленных в табл. 2. Бувар нашел задачу неразрешимой и во введении к своим новым таблицам написал:

«Задача построения таблиц для Урана приводит к следующей альтернативе: если мы объединим старые наблюдения с современными, то первые будут представляться удовлетворительно, а вторые не будут описываться в пределах их известной точности; если же мы отбросим старые наблюдения и сохраним только современные, то получающиеся таблицы будут точно представлять последние, но не будут удовлетворять старым данным. Мы должны сделать выбор между этими двумя возможностями. Я выбрал второй путь, считая, что у него больше вероятности быть верным. Я оставляю на будущее выяснение вопроса о том, чем обусловлены затруднения в согласовании двух совокупностей результатов: неточностью старых наблюдений или же влиянием на планету какого-то неизвестного внешнего фактора».

Отбрасывание Буваром наблюдений, сделанных до открытия Урана, означало, что измерения прежних наблюдателей, в том числе двух королевских астрономов, оказались настолько неточными, что на них совершенно нельзя было положиться. Такое мнение разделялось далеко не всеми современниками Бувара. К примеру, Леверье (1846а) высказал позднее свое отношение к обоснованности утверждений Бувара следующим образом:

«Необходимо отметить, что, хотя наблюдения Флемстида, Брадлея, Майера и Лемонье не столь точны, как наблюдения астрономов нашего времени, нельзя сколько-нибудь достоверно считать, что они отягчены такими огромными ошибками, какие им приписывают на основе сравнения с современными таблицами. Однако автор этих таблиц (Бувар) дает понять, что он поддерживает это утверждение».

Бессель обнаружил ряд теоретических ошибок в вычислениях Бувара, которые, несмотря на свою незначительнось, лишь усилили его скептицизм. В 1823 г. Бессель предпринял новые наблюдения Урана, контролируя любое расхождение между наблюдаемыми положениями и значениями, предвычисленными Буваром. К середине 1825 г. наблюдаемые положения Урана начали существенно, хотя и не катастрофически, отличаться от таблиц Бувара. В следующем году рассогласование еще более увеличилось. Из результатов 54 наблюдений, выполненных Шварценбруннером в обсерватории Кремсмунстер во время оппозиции Урана в июле 1826 г., менее половины оказалось лежащими внутри допустимого 5″-го отклонения от таблиц.

Затем наблюдаемая гелиоцентрическая долгота Урана, которая раньше постоянно опережала вычисленную долготу, необъяснимым образом стала уменьшаться, пока в 1829—1830 гг. табличные и наблюдаемые долготы не совпали. Но вместо того, чтобы мирно идти по своей расчетной орбите, Уран начал все больше и больше отставать, и табличные значения стали совершенно несостоятельными. В отчете Британской Ассоциации развития науки Эри (1832), вскоре ставший королевским астрономом, отмечал, что таблицы Бувара одиннадцатилетней давности дают ошибку в гелиоцентрической долготе почти в полминуты дуги.

После его отчета в Ассоциации Эри получил письмо от британского любителя астрономии преподобного д-ра Хассея который спрашивал мнение Эри в отношении того, не связаны ли аномалии в движении Урана с влиянием неизвестной планеты и не следует ли начать ее поиски. Отрицательный ответ Эри удержал Хассея от реализации его замыслов, но возможность

существования восьмой планеты неоднократно обсуждалась в течение нескольких последующих лет профессиональными астрономами. Вальц (1835) и Николаи (1836), два директора Мангеймской обсерватории, на основе своих исследований наблюдаемых возмущений орбиты кометы Галлея предположили существование еще одной планеты за Ураном.

Директор обсерватории в Палермо Н. Каччиатори (1836) сообщал о наблюдении движущейся звезды в мае 1835 г. в трех случаях, вплоть до ее исчезновения в сумерках. В силу ее медленного движения он заподозрил, что она находилась за Ураном.

В начале 1841 г. Адамс, талантливый молодой студент Кембриджского университета, случайно наткнулся в книжной лавке на написанный Эри отчет Британской Ассоциации за 1831—1832 гг. Постоянный интерес Адамса к астрономии сразу же был возбужден сообщением Эри о невязках в движении Урана, и он отметил в своих записях:

«В начале этой недели появилась мысль заняться сразу же после получения степени исследованием аномалий в движении Урана, которые до сих пор еще не объяснены; надо найти, могут ли они быть обусловлены влиянием находящейся за ним неоткрытой планеты и, если возможно, определить, хотя бы приближенно, элементы ее орбиты, что может привести к ее открытию».

Работа по университетской программе помешала Адамсу заняться проблемой Урана до сдачи экзаменов и получения ученой степени. Однако позже, во время столь необходимых ему каникул, в спокойной обстановке своего семейного дома в Корнуэлле, Адамс приступил к долгожданному исследованию движения Урана. К октябрю 1843 г. его вычисления, хотя еще предварительные и приближенные, укрепили его веру в существование неизвестной планеты, вызывающей возмущения орбиты Урана.

Первый анализ Адамса не учитывал никаких наблюдений Урана, сделанных до его открытия. В своих вычислениях он использовал таблицы Бувара для периода 1781—1821 гг. и более поздние данные, основанные на наблюдениях Эри, опубликованных в журнале «Astronomische Nachrichten», и на записях наблюдений в Кембриджской и Гринвичской обсерваториях. Адамс начал свой повторный, уточненный анализ накануне нового 1844 г. Прежде всего он попросил профессора Чаллиса предоставить ему неопубликованные данные наблюдений планет в Гринвиче в период 1818-1826 гг. В его первом анализе этому периоду соответствовали наибольшие невязки в положении Урана. Чаллис получил необходимые данные от Эри. В основу своих пересмотренных уравнений Адамс положил полные ряды старых и новых наблюдений. Он сохранил свое первоначальное среднее значение радиуса орбиты 38,4 а. е., но отказался от простой круговой орбиты и включил члены, учитывающие возможный эксцентриситет новой планеты. Однако из-за различных перерывов Адамсу удалось закончить свою работу только в сентябре 1845 г.

Когда Адамс показал свои результаты Чаллису, тот убедил его послать их Эри, королевскому астроному. Адамс решил отвезти их лично на пути домой в Корнуэлл, и Чаллис дал ему рекомендательное письмо к Эри. Однако Эри был на конференции в Париже, так что Адамс заехал к нему снова на обратном пути из Корнуэлла. К сожалению, в силу ряда недоразумений Адамс так и не увиделся с Эри и возвратился в Кембридж раздосадованный, оставив Эри лишь окончательные результаты своего решения проблемы Урана:

«Согласно моим вычислениям, наблюдаемые аномалии в движении Урана могут быть объяснены существованием внешней планеты, масса и орбита которой таковы:

Среднее расстояние (выбираемое приблизительно в соответствии с законом Боде)	38,4 а. е.
Среднее сидерическое движение в 365,25 сут	1° 30,9′
Средняя долгота, 1 октября 1845	323° 34′
Долгота перигелия	315° 55′
Эксцентриситет	0,1610
Масса (в единицах массы Солнца)	0,0001656

Для современных наблюдений я использовал метод нормальных мест, принимая, что среднее из табличных невязок, даваемых наблюдениями вблизи трех последовательных оппозиций, соответствует среднему моменту времени; гринвичские наблюдения использовались вплоть до 1830 г.: с этого момента использовались кембриджские и гринвичские наблюдения, а также те, которые даны в «Astronomische Nachrichten». Ниже приводятся остающиеся невязки в средней долготе:

	Наблюдения — Теория				
1780	+0,27″	1801	—0,04″	1822	+0,36″
1783	—0,23	1804	—0,04	1825	+1,92
1786	—0,96	1807	—0,21	1828	+2,25
1789	+1,82	1810	+0,56	1831	—1,06
1792	—0,91	1813	—0,94	1834	—1,44
1795	+0,09	1816	—0,31	1837	—1,62
1798	—0,99	1819	—2,00	1840	+1,73

Невязка на 1780 г. выведена из невязки на 1781 г., даваемой наблюдениями, и сопоставлена с невязками четырех или пяти последующих лет, а также с наблюдениями Лемонье в 1769 и 1771 гг. Для старых наблюдений остающиеся невязки составляют

	Наблюдения — Теория				
1690	+44,4″	1750	—1,6″	1763	— 5,1″
1712	+ 6,7	1753	+5,7	1769	+ 0,6
1715	— 6,8	1755	—4,0	1771	+11,8

Невязки малы, за исключением невязки наблюдения Флемстида 1690 г. Но это изолированное наблюдение, далеко отстоящее от остальных, и я решил, что лучше не использовать его при составлении условных уравнений. Не исключено, однако, что эта невязка может быть ликвидирована за счет небольшого изменения принятого среднего движения планеты» (Эри, 1846).

Совершенно необъяснимо, почему Эри отреагировал на работу Адамса отрицательно, что позднее имело большие последствия. Ответ преподобного д-ра Дауса на результаты Адамса, показанные ему Эри, находится в разительном контрасте с ответом последнего. Даус сейчас же написал своему другу Ласселу, послав ему результаты Адамса и убеждая его начать поиски новой планеты с помощью 60-сантиметрового рефлектора. К сожалению, Лассел потерял письмо Дауса прежде, чем успел что-либо предпринять.

Когда Эри 5 ноября 1845 г. отреагировал, наконец, на работу Адамса, он выразил свое отрицательное отношение к ней в форме вопроса. Эри спрашивал, может ли «предполагаемое» возмущение Урана объяснить невязку в радиусе-векторе Урана, которая тогда была очень большой. Адамс почувствовал отговорку в вопросе Эри, был раздражен частым повторением в нем слова «предполагаемый» и не отвечал в течение года. В своем письме Адамс объяснил свои соображения:

«В течение нескольких последних лет наблюдаемое положение Урана все более и более отставало от его табличного положения. Другими словами, реальное угловое движение Урана значительно меньше значения, даваемого таблицами. Поэтому мне казалось совершенно ясным, что табличное значение радиуса-вектора должно быть значительно увеличено в любой теории, представляющей движение по долготе, поскольку изменение правой части уравнения

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \sqrt{a(1-e^2)} \qquad (1)$$

очень мало. В соответствии с этим я заключил, что если я просто исправлю эллиптические элементы, чтобы удовлетворить, насколько возможно, современным наблюдениям, не учитывая никаких дополнительных возмущений, то соответствующее увеличение радиуса-вектора не будет очень отличаться от значения, даваемого моей фактической теорией» (Смарт, 1847).

Чаллис (1846) отверг возражение Эри относительно радиуса-вектора в письме к редактору журнала «Athenaeum» от 17 декабря 1846 г. Эри обосновал свою позицию в письме к Чаллису, утверждая, что *a priori* нет оснований верить в то, что гипотеза, объясняющая невязку в долготе, будет объяснять и невязку в радиусе-векторе. Это соображение верно, так как Литлвуд (1957) указал, что в уравнении Адамса (1) изменение момента количества движения $r^2 d\theta/dt$ имеет тот же порядок, что невязка в угловом положении (θ — долгота); поправка в долготе не исправляет автоматически радиус-вектор.

Какова бы ни была обоснованность возражений Эри, непосредственным результатом его скепсиса была потеря Адамсом и английской астрономией пальмы первенства в пользу Леверье. 10 ноября 1845 г. Леверье (1845) представил Французской академии наук результаты своего строгого анализа движения Урана. Результаты Леверье, которые могли быть применены к любой эпохе, основывались на наблюдениях, сделанных в 1781—1801 гг. в Гринвичской обсерватории и, кроме того, в 1801—1845 гг. в Парижской обсерватории. В своей работе Леверье показал, что таблицы, вычисленные по гипотетическим элементам орбиты Урана, основанным на наблюдениях 1790—1820 гг., привели бы к ошибке более 40″ дуги в оппозиции 1845 г. В заключение он написал: «Ошибки существующих таблиц имеют такой же порядок величины, но расхождение еще больше. Это можно объяснить воздействием внешнего фактора, эффект которого я оценю во втором трактате». Работа Леверье достигла Англии в декабре и встретила гораздо более благоприятное отношение Эри, чем работа Адамса.

Леверье работал над обещанным вторым трактатом (1846а) в течение первой половины 1846 г. и представил его Академии наук 1 июня. В своей работе Леверье пришел к выводу, что наблюдаемые аномалии в движении Урана лучше всего могут быть объяснены возмущающим влиянием неизвестной планеты. Он показал, что, если эта гипотетическая планета влияет только на Уран, но не на Сатурн, то она должна быть расположена за Ураном. Затем он принял радиус орбиты новой планеты равным удвоенному радиусу орбиты Урана, основываясь на законе Боде (табл. 3).

Таблица 3

ЗАКОН БОДЕ ПЛАНЕТНЫХ РАССТОЯНИЙ (в а.е.)

	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Церера	Юпитер	Сатурн	Уран	?
	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	+0,0	0,3	0,6	1,2	2,4	4,8	9,6	19,2	38,4
Закон	0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	38,8
Наблюдения	0,39	0,72	1,0	1,52	2,77	5,2	9,54	19,2	—

Замечая, что орбиты Юпитера, Сатурна и Урана обладают очень малыми наклонами к эклиптике, Леверье предположил, что то же условие выполняется и для гипотетической планеты. Он определил последнюю необходимую координату — долготу в произвольную эпоху, количественно оценивая влияние на Уран при различных комбинациях значений средней долготы и

предполагаемой массы гипотетической планеты. После исчерпывающего анализа многочисленных возможностей он в конце концов заключил: «Имеется лишь одна область эклиптики, где может быть расположена возмущающая планета, обусловливающая аномалии в движении Урана; средняя долгота планеты на 1 января 1800 г. должна заключаться между 243 и 252°». После дальнейшего уточнения и исправления эпохи Леверье пришел к значению гелиоцентрической долготы 325° на эпоху январь 1, 1847.

Эри, получивший второй трактат Леверье об Уране в июне 1846 г., с энтузиазмом говорил об «очень близком совпадении результатов исследований Адамса и Леверье относительно положения предполагаемой планеты, возмущающей движение Урана», на специальном заседании Совета инспекторов Гринвичской обсерватории. Хотя Эри теперь верил в возможность существования планеты за Ураном, он, как и раньше, не торопился предпринять ее поиск, несмотря на просьбу Леверье. Однако в течение первой недели июля 1846 г. Эри резко изменил свою позицию. Возможно, он представил себе бурю негодования, которая разразилась бы, если бы обнаружилось, что он в течение восьми месяцев имел в своем распоряжении вычисленные Адамсом данные о положении и только его бездействие позволило кому-то другому открыть новую планету. В письме, датированном 9 июля, за которым последовало еще более настоятельное письмо от 13 июля, Эри просил Чаллиса начать поиски планеты с помощью 30-сантиметрового рефрактора Кембриджской обсерватории.

В то время как Чаллис приступил к поискам новой планеты, Леверье (1846b) представил 31 августа в Академию наук свой третий трактат, озаглавленный «О планете, которая вызывает наблюдаемые аномалии в движении Урана. — Определение ее массы, орбиты и фактического положения». В нем Леверье (1846) приводит окончательную систему элементов для гипотетической планеты (табл. 4).

2 сентября, пересмотрев свои элементы для возмущающей планеты и использовав новое, несколько меньшее значение средн-

Таблица 4

ЭЛЕМЕНТЫ ЛЕВЕРЬЕ (1846 b)

Эпоха: январь 1, 1847

Большая полуось	36,154 а. е.
Сидерический период	217,387 года
Эксцентриситет	0,10761
Долгота перигелия	284° 45′
Средняя долгота, январь 1, 1847	318° 47′
Масса	1/9300
Истинная гелиоцентрическая долгота, январь 1, 1847	326° 32′
Расстояние от Солнца	33,06 а. е.

него орбитального радиуса, чем это следует из закона Боде, Адамс снова написал Эри. К сожалению, Эри был в Германии, а Чаллису, для которого новые элементы Адамса (табл. 5) были бы особенно важны, не посчастливилось увидеть письмо Эри.

Таблица 5

ПЕРЕСМОТРЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АДАМСА

Эпоха: октябрь 1, 1846

Средняя долгота, октябрь 1, 1846	323° 2′
Долгота перигелия	299° 11′
Эксцентриситет	0,12062
Масса	0,00015003

Во Франции Леверье имел еще меньше успеха в попытке убедить французских астрономов организовать поиски предсказанной им планеты, и в середине сентября его нетерпение пересилило его патриотизм. 18 сентября Леверье послал описание своей системы элементов (табл. 4) Галле, работавшему в то время ассистентом в Берлинской обсерватории, с просьбой поискать новую планету. Галле прочитал письмо Леверье и сразу же попросил у директора обсерватории Энке разрешения на поиск планеты. Энке неохотно дал свое согласие, и 23 сентября Галле с помощью молодого, полного энтузиазма студента Д'Арре навел 23-сантиметровый фраунгоферовский рефрактор в направлении, соответствующем элементам Леверье (прямое восхождение 22^h46^m, склонение —13°24′). После того как Галле не смог обнаружить никакого планетообразного объекта, Д'Арре предложил использовать звездную карту. Астрономы достали соответствующий раздел нового «Звездного атласа» Берлинской академии, и Галле, возвратившись к телескопу, стал описывать вслух Д'Арре положения и вид наблюдаемых звезд для сверки с картой. Почти тотчас же Д'Арре обнаружил, что на карте нет звезды восьмой величины с прямым восхождением $22^h53^m25{,}84^s$, которую описал ему Галле. С волнением Д'Арре информировал об этом Энке, и все три астронома вместе стали наблюдать таинственный объект. На следующую ночь после определения его движения и измерения его диска с помощью микрометра немецкие астрономы убедились в том, что это планета.

Энке был поражен близостью значения диаметра 3,3″, предвычисленного Леверье, к фактическим результатам измерений, давших значения от 2,7″ до 3,2″ и еще больше — точностью предвычисленных координат. Вычисленная Леверье геоцентрическая долгота на сентябрь 23,5, 1846 была 324°58′ и отличалась менее чем на 1° от наблюденного значения Галле 325°52′45″. 25 сентября Галле написал Леверье об открытии, а затем Энке послал ему свои поздравления. 1 октября Леверье сообщил Эри

и Струве, директору Пулковской обсерватории в России, что французское Бюро долгот остановилось на названии Нептун, причем, несомненно, это был выбор Леверье. Символом планеты должен был стать трезубец. Однако менее чем неделю спустя Леверье решил назвать планету своим именем и попросил своего друга Араго посодействовать в этом перед Французской академией наук. В процессе споров, возникших в связи с этой непопулярной акцией, Леверье узнал, что молодой англичанин по имени Джон Адамс также предвычислил положение новой планеты.

3 октября Джон Гершель, сын открывшего Уран сэра Вильяма Гершеля и также известный астроном, написал письмо в журнал Athenaeum, в котором он обращал внимание на замечательное совпадение, выразившееся в том, что Леверье и Адамс, совершенно неосведомленные о работе друг друга, независимо пришли к фактически одинаковым системам элементов для новой планеты. Это послужило началом яростных дебатов, которые приобрели все более усиливающуюся политическую окраску. Во французских научных кругах публикация элементов Леверье делала его приоритет бесспорным. При этом пресса подогревала публичные страсти эмоциональными призывами к французскому патриотизму и антианглийским чувствам. В Англии Эри подвергался серьезным нападкам за нежелание действовать и даже непризнание какого-либо значения предвычислений Адамса, повлекшие за собой потерю Англией славы открытия еще одной планеты. Во Франции Эри критиковался за то, что он не указал раньше на вычисления Адамса, когда узнал о работе Леверье. В свою защиту Эри (1846) опубликовал свой «Отчет о некоторых обстоятельствах, исторически связанных с открытием планеты за Ураном». Однако менее через год споры затихли, планета сохранила свое первоначальное название Нептун, а достижения и Адамса, и Леверье были оценены должным образом; в конечном итоге оба стали друзьями на всю жизнь.

10 октября Лассел, который ранее упустил возможность участвовать в поисках планеты, сообщил о возможном открытии спутника Нептуна. Это произошло менее чем через три недели после открытия самой планеты. К концу года Нептун наблюдался большинством европейских и американских астрономов.

ГЛАВА 2

ПОИСКИ ПЛАНЕТЫ X
1847—1927

Когда орбита Нептуна стала известна с достаточной точностью, максимальные невязки в движении Урана, первоначально достигавшие 133″, уменьшились до 4″. Однако, по мере того как орбитальные элементы обеих планет становились все более точными, оказалось, что невязки в движении Урана опять являются значительно большими, чем это можно объяснить ошибками наблюдений и неточностью элементов орбит.

Этот вопрос был поднят Пирсом (1848а), который сравнил свою теорию движения Урана с наблюдениями и провел аналогичное сравнение для теорий Адамса и Леверье (см. табл. на с. 20). Числа, приведенные в таблице, Ньюком (1874) рассматривал как разности между вычисленными и наблюденными значениями долгот, хотя явных указаний на это у Пирса нет.

В своей работе Пирс представил результаты полных вычислений общих возмущений в долготе и радиусе-векторе Урана, производимых Нептуном. Правда, он не привел никаких деталей своего исследования или использованных методов. Малость невязок в последнем столбце данных таблицы Ньюкома показывает, что использование этих возмущений от Нептуна, а также возмущений от Юпитера и Сатурна, вычисленных Леверье, позволило бы получить очень точные таблицы движения Урана. Однако попыток построить такие таблицы не предпринималось почти 30 лет.

Как отметил Ньюком (1874), исследования Адамса и Леверье показали, что наблюдаемое движение Урана может быть объяснено, по крайней мере приближенно, действием планеты, имеющей долготу Нептуна. Ньюком был согласен с Пирсом, что действие самого Нептуна обусловливает эти возмущения в пределах возможных ошибок наблюдений, использованных Леверье. Однако Ньюком сделал следующее замечание: «Остается узнать, сохранится ли согласие между теорией и наблюдениями, когда сравнительно немногочисленные наблюдения, использованные этими исследователями, будут заменены более точными данными, имеющимися теперь в нашем распоряжении, и когда будет учтено большое число дополнительных на-

Таблица

ОСТАТОЧНЫЕ РАЗНОСТИ МЕЖДУ ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ И НАБЛЮДЕННЫМИ ДОЛГОТАМИ УРАНА ПО ТЕОРИЯМ ПИРСА, ЛЕВЕРЬЕ И АДАМСА (НЬЮКОМ, 1874)

Год	По наилучшей орбите Урана, вычисленной Леверье на основе новых наблюдений без учета внешней планеты	По первоначальной теории Леверье с его наилучшей орбитой гипотетической планеты с массой 1/9322	По первоначальной теории Адамса с учетом его второй гипотетической планеты с массой 1/6666	По теории Пирса движения Нептуна со значением массы Нептуна		
				1/14496 (Струве, из собственных наблюдений спутника)	1/18780 (Пирс, из наблюдений Бонда и Лассела)	1/19840 (Пирс, из наблюдений Бонда спутника Лассела)
1690	+289,0″	−19,9″	+50,0″	−124,7″	+13,0″	+0,8″
1715	+279,6	+5,5	−6,6	−99,6	+10,0	+8,7
1756	+230,9	−4,0	−4,0	−102,4	−12,7	+4,0
1769	+123,3	+3,7	+1,8	−67,0	−16,0	−6,0
1782	+20,5	+2,3	0,0	−18,3	−5,6	−3,0
1787	+2,0	−1,2	−0,2	−4,7	−1,2	−0,5
1792	−7,8	+0,3	−1,1	+1,6	+0,5	+0,3
1797	−6,7	−1,0	−0,5	+3,3	+0,8	+0,3
1803	−3,4	+0,8	+1,6	+3,2	+1,2	+0,8
1808	+3,8	+0,8	0,0	−1,3	−0,6	−0,4
1813	+4,5	+0,9	−1,0	−2,3	+1,1	−0,3
1819	+3,8	+0,4	−2,2	+0,9	+0,7	+1,0
1824	−7,6	−5,4	+1,7	−1,6	−1,9	−2,0
1829	−7,8	−2,2	+2,0	+2,5	−1,3	+0,8
1835	−4,5	−0,8	−1,2	+3,9	+2,4	+2,0
1840	+0,7	+2,2	+1,3	−1,3	−1,3	−1,1
1845	+6,5	−0,3	...	−2,8	−1,2	−0,9

блюдений, сделанных как до, так и после исследований Леверье».

Ньюком взялся за построение новой теории Урана, учитывая возмущения в движении Урана от Юпитера, Сатурна и Нептуна. Он обработал старые наблюдения, а также наблюдения периода 1781—1872 гг. и сравнил их со своей предварительной теорией. После учета поправок в условных уравнениях Ньюком получил таблицу невязок, т. е. таблицу выделяющихся значений разностей наблюденных и вычисленных долгот. По его словам, даже при беглом взгляде на невязки видно, что их вероятные значения много больше вероятных ошибок в условных уравнениях и что на протяжении некоторых периодов они носят систематический характер. В течение 1748—1753 гг. наблюдения требовали заметной положительной поправки к теории, большей по величине, чем можно было бы ожидать. После 1800 г. поправка стала отрицательной на протяжении примерно 20 лет со средним значением около 1″. В 1821 г. поправка снова стала положительной вплоть до 1833 г., после чего она стала нерегулярной. Ньюком указал, что невязки были гораздо больше, чем чисто случайные ошибки, следующие из метода наименьших квадратов, и привел три главные возможные причины невязок:

1. Систематические ошибки наблюдений, из которых две основные обусловлены отклонением визирной линии инструмента от истинного большого круга или личной особенностью наблюдателя, приводящей к тому, что он регистрирует прохождение Урана раньше или позже прохождения неподвижной звезды.

2. Ошибки рассматриваемой теории, которые могут быть вызваны ошибками вычислений, пренебрежением членами второго порядка, обусловленными влиянием Нептуна, употреблением ошибочного значения массы Сатурна или же притяжением неизвестной планеты.

3. Ошибки различных редукций, с помощью которых сравниваются результаты теории и наблюдений. Метод, принятый для этого сравнения, неизбежно содержит некоторое количество небольших неточностей, присущих старым данным.

При обсуждении вероятности этих различных источников ошибок Ньюком заметил, что транснептуновая планета, вызывающая ощутимое на протяжении столетия отклонение орбиты Урана от эллипса, была бы слишком большой для того, чтобы оставаться необнаруженной. После уточнений Ньюком (1874) нашел средние элементы орбиты Урана, приведенные в табл. 6.

Ньюком построил таблицы, основанные на этих элементах и на его теории, предназначенные для вычисления положения Урана на любой год и дату от 1000 до 2200 г.

В своей книге «Популярная астрономия», опубликованной в ноябре 1879 г., французский астроном Фламмарион сформулировал вывод о существовании транснептуновой планеты на ос-

Таблица 6

СРЕДНИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НЬЮКОМА ОРБИТЫ УРАНА (НЬЮКОМ, 1874)

Эпоха: январь 0, 1850, гринвичский средний полдень	
Долгота перигелия	170° 38′ 48,7″ +8698″μ
Средняя долгота в эпоху	29° 12′ 43,73″ +2811,4″μ
Долгота узла	73° 14′ 37,6″ + 29,6″μ
Наклон орбиты	0° 46′ 20,92″ + 0,38″μ
Эксцентриситет	0,0463592 — 5236μ
Эксцентриситет в секундах дуги	9562,27″ — 108,0″μ
Среднее движение	15424,797″ — 0,838″μ
Логарифм среднего расстояния (без поправки)	1,2829251 + 179μ
Та же величина с поправкой	1,2831223 + 179μ
Истинная масса Нептуна	(1 + μ)/19700

нове анализа афелиев комет 1862 III, 1532 и 1661. Позднее Фламмарион (1884) опубликовал работу по тому же вопросу. Он предсказал существование большой планеты, движущейся по орбите с радиусом около 43 а. е. и периодом 330 лет.

Как отмечал Форбс (1880a), «уже давно известно, что наибольшие расстояния (афелийные расстояния), на которые кометы удаляются от Солнца, группируются по классам». Он указал обширный класс комет, афелии которых расположены в окрестности орбиты Юпитера, а также другой класс с афелиями, равными радиусу орбиты Нептуна. Он также отметил другие группы кометных афелиев со значениями расстояний 100 а. е. и 300 а. е. По его словам, «не может быть сомнений в существовании двух планет за орбитой Нептуна, одна из которых отстоит от Солнца в 100 раз дальше, чем Земля, а другая — в 300 раз дальше, и их периоды обращения составляют соответственно 1000 и 5000 лет». Свои соображения о существовании группы афелиев со значением 100 а. е. Форбс (1880a) обосновывал данными, приведенными в табл. 7.

Таблица 7

ТАБЛИЦА ФОРБСА КОМЕТНЫХ АФЕЛИЕВ (ФОРБС, 1880a)

	Дата	Афелийное расстояние, а. е.	Момент прохождения через афелий	Вычисленный период, годы	L
1	1840, IV	96,7	1668 г.	350	313°
2	1843, I	100,0	1655	376	225
3	1846	108,2	....	...	...
4	1861, I	110,3	1654	413	139
5	1793, II	111,0	....	...	...
6	1861, II	111,2	....	...	...
7	1855, II	124,2	1608	493	192

Форбс отметил, что гипотетическая планета не могла пройти при одном обороте в прямом или обратном направлении каждый из указанных в табл. 7 афелиев в соответствующие времена. Исследование возможности такого прохождения в течение двух или трех оборотов потребовало значительной работы. Форбс испробовал большое число вариантов, прежде чем нашел один, хорошо согласующийся с фактами. В результате он вычислил элементы орбиты гипотетической планеты со средним расстоянием 98 а. е. В заключение Форбс в поддержку своей гипотезы рассчитал положение Нептуна по его влиянию на кометы с точностью 2°, совершенно не принимая во внимание заранее его фактическое положение.

Во второй работе Форбс (1880b) детализировал элементы своей гипотетической планеты. Он определил, что влияние Нептуна на Уран в 10 раз сильнее влияния гипотетической планеты. Но последняя, по его расчетам, находилась в три раза дальше от Солнца, чем Нептун, а ее возмущающий эффект должен быть обратно пропорционален кубу расстояния. В случае Нептуна интервал времени с максимальным возмущением равнялся 75 годам, в то время как в случае гипотетической планеты он составлял только 45 лет. В соответствии с этим Форбс вычислил массу новой планеты. Она оказалась равной 1/1964 массы Солнца, что в десять раз превышает значение Ньюкома (1874) для массы Нептуна и является вторым по величине значением планетной массы в Солнечной системе (после Юпитера). Форбс сообщал также, что он получил письмо от Тодда из Бюро Морского ежегодника в Вашингтоне. В этом письме Тодд писал, что положение внутренней (98 а. е.) из двух гипотетических планет Форбса только на 4° отличается от положения, которое Тодд предвычислил для планеты, обусловливающей невязки в долготе Урана и Нептуна. Тодд упомянул также безуспешные поиски своей планеты, предпринятые им с помощью 65-сантиметрового рефрактора Морской обсерватории США. Форбс разослал около 100 копий своей работы по обсерваториям, в результате чего некоторые из них организовали поиск планеты. Робертс (1892) снял две серии из 18 пластинок, причем каждая пластинка охватывала более четырех квадратных градусов и время экспозиции составляло 90 мин. Тщательное исследование Робертсом своих пластинок показало, что «никакой планеты ярче звезды пятнадцатой величины в указанной области неба не существует».

В дополнение к своему письму Форбсу Тодд (1880) опубликовал полный отчет о своих поисках планеты. Он имел в виду планету со средним расстоянием 52 а. е. и с диаметром 80 000 км, видимым под углом 2,1″. В течение 30 ясных безлунных ночей между 3 ноября 1877 г. и 5 марта 1878 г. он обследовал двойную полосу шириной в один градус по обе стороны от неизменной плоскости от долготы 146,8° до долготы 186,1°, используя

400—600-кратное увеличение и пытаясь обнаружить объект с заметным диском. После проверки многих подозрительных объектов Тодд удостоверился, что никакой подобной планеты там, где он искал, не существует.

Гайо (1909) указал, что источниками возмущений в движении Урана и Нептуна могут быть две транснептуновые планеты. По его предположениям, одна планета имела массу в 5 раз больше земной и среднее расстояние 44 а. е., а другая — массу в 24 раза больше массы Земли и среднее расстояние 66 а. е. Он предсказал, что более массивная планета находилась на долготе 128,5° в эпоху 1930,0; менее массивная планета была расположена на долготе 308,4° (эпоха 1930,0). Лау (1914) также предсказывал существование планет с массами 24 и 48 земных масс и со средним расстоянием 46,5 и 71,8 а. е. соответственно (см. Кроммелин, 1931).

Пикеринг (1909) усовершенствовал графический метод, описанный Джоном Гершелем (1849), и применил его для предсказания существования транснептуновой планеты, которую он назвал планетой О, по ее возмущающему действию на Нептун и, в меньшей степени, на Сатурн и Уран. Он нарисовал графики производимых смещений, определив невязки в долготах трех внешних планет и исправив их, насколько это было возможно, за ошибки в периоде, эксцентриситете и линии апсид. Затем он стал искать характерные признаки соединений с неизвестной планетой. Эти признаки заключаются в заметной тенденции невязок к положительным значениям с последующим четко выраженным переходом к отрицательным значениям, так как известная планета под влиянием неизвестной планеты сначала ускоряет свое движение по сравнению с вычисленным, а затем замедляет его. Отсюда Пикеринг заключил, что Нептун находился в соединении с неизвестной планетой приблизительно в в начале нашего столетия, а соединение между неизвестной планетой и Ураном имело место около 1850 г.

Пикеринг считал свой эмпирический метод гораздо более простым и быстрым, чем аналитический метод, использованный Адамсом и Леверье, а затем Ловеллом. Хотя его метод давал не орбитальные элементы неизвестной планеты, а только ее положение, Пикеринг полагал, что самое важное — это найти планету и что использование орбиты сводится лишь к уточнению гелиоцентрической долготы по дате максимального возмущения. Позднее Пикеринг (1928а) предсказал, что планета О должна быть небольшой, а ее орбита должна иметь большой эксцентриситет и пересекать орбиту Нептуна. Таким образом, планета О иногда должна быть ближе к Солнцу, чем Нептун (рис. 2.1). Такая конфигурация орбит больших планет уникальна для Солнечной системы.

Пикеринг отметил также тот любопытный факт, что, хотя планета О движется в прямом направлении относительно Солнца, для воображаемых обитателей Нептуна она казалась бы движущейся по обратной орбите, подобно спутнику Нептуна Тритону.

Примерно в то же время, что и Пикеринг, Гайо (1910) опубликовал результаты аналитического исследования возмущений от неизвестной планеты в движении Урана. Гайо включил в

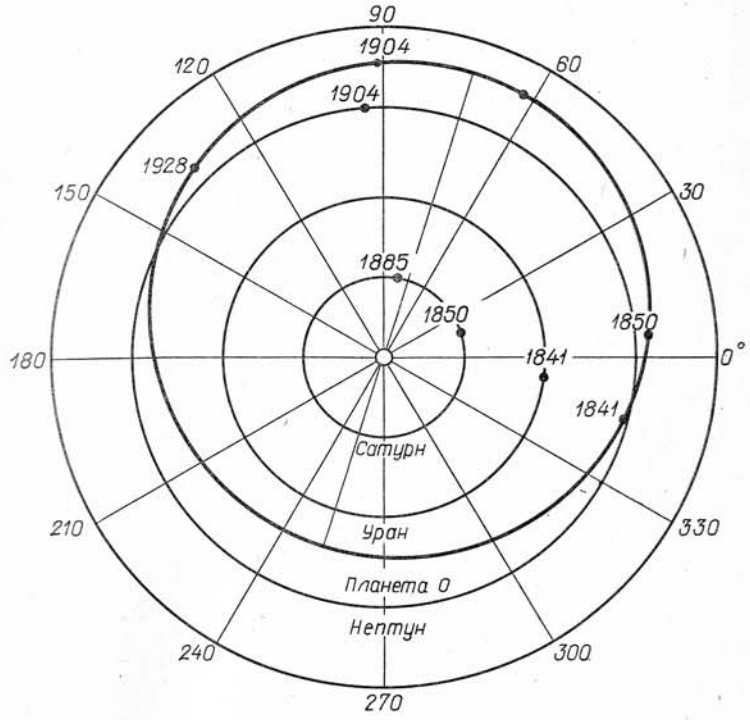


Рис. 2.1

Эллиптическая орбита планеты О (Пикеринг, 1928а).

анализ данные нескольких наблюдений между 1873 и 1882 гг., которых не имел Пикеринг, а также использовал более новые значения масс больших планет, чем значения, употреблявшиеся Леверье в 1877 г. Результаты Леверье, Гайо и Пикеринга сопоставлены на рис. 2.2 (Пикеринг, 1928а).

Однако человеком, имя которого наиболее тесно связано с Плутоном, является Персиваль Ловелл. С более детальными сведениями об этом одаренном любителе астрономии, который построил обсерваторию очень высокого класса и который не только сам все свое время посвятил астрономии, но и создал целый коллектив профессиональных астрономов, читатель мо-

жет ознакомиться по превосходной биографии, написанной Эб-ботом Ловеллом (1935).

В своем «Трактате о транснептуновой планете», содержащем около ста страниц, Ловелл (1915) приводит почти без упоминания о проделанной им огромной работе результаты своих де-

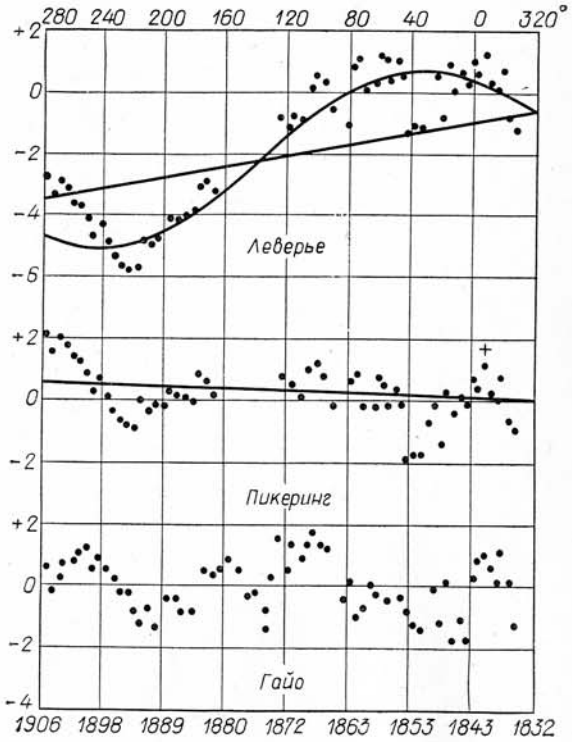


Рис. 2.2

Принятая и пересмотренная орбиты Урана с учетом возмущений от планеты О (Пикеринг, 1928а).

сятилетних исследований по теоретическому доказательству существования планеты за Нептуном. Для этого неизвестного члена Солнечной системы Ловелл выбирает название «планета X». Как отмечают Путнам и Слайфер (1932), для характеристики работы Ловелла лучше всего процитировать начало его классического «Трактата...»

«1. С тех пор как небесная механика искусными руками Леверье и Адамса привела к изумившему мир открытию Нептуна, этот успех породил веру в существование и других планет, ожидающих своего открытия. Сам Леверье с прозорливостью

гения был в этом уверен, хотя и чересчур оптимистичен в отношении сроков наступления счастливого дня, когда это будет доказано. С того времени предпринималось много попыток указать положение одной или нескольких неизвестных планет, попыток, которые большей частью не имели научного значения, так как не были основаны на строгом математическом анализе. Эта проблема настолько сложна, что все элементарные средства ее решения могут привести только к ошибкам. Единственный путь, дающий надежду на успех, заключается в последовательном кропотливом анализе.

Не только все быстрые методы оказываются бесполезными, приводящими к ложным выводам, но и сами собой напрашивающиеся приближения не оправдываются на практике. Так, упрощение задачи за счет предположения о круговой орбите неизвестной планеты, первоначально сделанное Тиссераном и разработанное со всей должной осторожностью Гайо, а также более или менее аналогичное предположение Лау оказались несостоятельными...

2. Для получения реального решения задача должна исследоваться аналитически со всей возможной строгостью. Прежде чем предпринять такое исследование, нужно правильно сформулировать задачу в общем виде, отметив данные, на которых она базируется, и диктуемые ими ограничения. Недостаточное внимание к этим вопросам приводит к ошибочным представлениям о том, что возможно и что невозможно.

3. По самой природе вещей теория движения планеты не может быть точной. Это обусловлено тремя причинами:

1) Наблюдения, на которых она основана, обязательно в большей или меньшей мере ошибочны;

2) Теория сама по себе более или менее несовершенна;

3) Возможно наличие неизвестного тела, влияние которого не принимается во внимание...»

Ловелл использовал старый аналитический метод, предложенный Адамсом и Леверье, и ограничился только возмущениями в движении Урана. Его метод не был пригоден в случае Нептуна, потому что наблюденная орбита Нептуна охватывала только половину оборота, и в силу этого неточности элементов орбиты Нептуна были столь же велики, как и предполагаемые возмущения. Ловелл модифицировал старый аналитический метод в нескольких отношениях. Он нашел решения для различных гелиоцентрических расстояний планеты X, а не использовал закон Боде, как это сделал Леверье в случае с Нептуном. Он почти всегда применял метод наименьших квадратов и ограничился только получением возмущений в долготе. В силу предполагаемого большого эксцентриситета орбиты неизвестной планеты Ловелл учитывал в решении члены второго порядка. В качестве меры точности своего решения Ловелл использовал выраженное в процентах уменьшение невязок в движении Ура-

на. Для вычисления долготы планеты X Ловелл сделал исходное предположение, что она движется в той же плоскости, что и Уран. Таким образом, у него осталось пять неизвестных величин: a' — среднее расстояние (или n' — среднее движение), ε' — средняя долгота в начальный момент, e' — эксцентриситет, ω' — долгота перигелия, m' — масса.

Необходимо было включить в решение также поправки Δn, $\Delta\varepsilon$, Δe и $\Delta\omega$ к соответствующим элементам Урана, так что общее число неизвестных равнялось девяти. Общий прием Ловелла заключался в выборе определенных значений a' и ε' и определении семи остающихся неизвестных методом наименьших квадратов; многократное повторение этого процесса с различными значениями a' и ε' привело в конце концов к такому решению для всех девяти неизвестных, которое обеспечило максимальное уменьшение невязок в движении Урана.

Наблюдательные данные, использовавшиеся Ловеллом, представляли собой отклонения наблюдаемых значений долготы Урана от значений, даваемых теорией Гайо (1910); они были разделены на 37 групп, охватывающих период от 1690 до 1910 г. Сначала Ловелл получил предварительное частное решение, обозначенное им (H_{14}), в котором использовались 24 группы наблюдений, охватывающих период от 1750 до 1903 г. В этом решении учитывались 25 возмущающих членов, включающих e', e и e^2; величина a' выбиралась равной 47,5 а. е. и решения находились для 30 значений ε' в интервале от 0° до 345°. Основной результат этого частного решения заключался в приближенной локализации ε', так что в полном решении (повторяемом для других значений a') не было необходимости пробегать всю окружность и можно было ограничиться лишь двумя ее участками. Полное решение, обозначенное (H_{20}), было получено для значения a' в интервале от 40,5 а. е. до 51,25 а.е. Окончательные результаты Ловелла суммированы на двух последних страницах его «Трактата...» (рис. 2.3).

[*Перевод текста, представленного на рисунке:* ...как показало дальнейшее изучение, эта уверенность была не вполне оправданной. Таким образом, в свете последующих исследований замечательная точность определения положения планеты, которая была получена в результате смелой попытки анализа, предпринятой Леверье и Адамсом, оказалась возможной лишь при определенных условиях. Предполагалось, что используемый метод анализа обещает точность винтовки, но в конце концов оказалось, что мы вынуждены довольствоваться неразборчивостью дробовика, хотя причиной этого является не несовершенство оружия, а неустойчивость основания, на котором это оружие находится. Однако получение общего решения и граничных условий задачи на самом деле столь же важно и поучительно, как точное предсказание положения, поскольку оно также означает огромный прогресс.

as further study has shown this confidence to have been misplaced; so the fine definiteness of positioning of an unknown by the bold analysis of LEVERRIER or ADAMS appears in the light of subsequent research to be only possible under certain circumstances. Analytics thought to promise the precision of a rifle and finds it must rely upon the promiscuity of a shot gun after all, though the fault lies not more in the weapon than in the uncertain bases on which it rests. But to learn of the general solution and the limitations of a problem is really as instructive and important as if it permitted specifically of exact prediction

For that, too, means advance.

SUMMARY

69. This investigation establishes the following:

1. By the most rigorous method, that of least squares throughout, taking the perturbative action through the first powers of the excentricities, the outstanding squares of the residuals from 1750 to 1903 have been reduced 71% by the admission of an outside perturbing body.

2. The inclusion of further terms yielded solutions in accordance with the first.

3. Solutions taking the years 1690–1715 also into account agreed substantially with those from the years 1750–1903.

4. So did those in which the additional years to 1910 were considered.

5. The second part of the investigation, in which the solutions were made for the second powers of the excentricities as well, gave conformable results.

6. When the probable errors of observation were reckoned, the outstanding squares of the residuals of theory excluding an outside planet proved to have been reduced by its admission from 90% to 100% nearly, the solutions seeming to confirm one another as follows:

for ε' around 180°	and for ε' around 0°
24 obs. eqs. 97%	25 obs. eqs. 99½%
25 " " 91%	27 " " 99½%.
27 " " 89½%	
37 " " 88%	

7. Though this would indicate an absolute solution of the problem, it must be remembered that the actual as against the probable errors of observation might decidedly alter the result; and so might the terms above the squares in ε and ε' necessarily left out of account.

8. The investigation disclosed two possible solutions in each case, one with ε' around 0°, one with it around 180°; and that this duality of possible place would necessarily always be the case.

9. On the whole, the best solutions for the two gave:

ε' around 0°	ε' around 180°
$\varepsilon' = 22°.1$	$\varepsilon' = 205°.0$
$a' = 43.0$	$a' = 44.7$
$m' = 1.00$	$m' = 1.14$
$e' = .202$	$e' = .195$
$\omega' = 203°.8$	$\omega' = 19°.6$
hel. long. July 0, 1914 84°.0	262°.8

the unit of $m' = \frac{1}{50000}$ the mass of the *Sun*.

10. It indicates for the unknown a mass between *Neptune*'s and the *Earth*'s; a visibility of the 12·13 magnitude according to albedo; and a disk of more than 1″ in diameter.

11. From the analogy of the other members of the solar family, in which excentricity and inclination are usually correlated, the inclination of its orbit to the plane of the ecliptic should be about 10°. This renders it more difficult to find.

12. Investigations on the perturbation in latitude yielded no trustworthy results. This is probably because the excentricity e' as well as the planet's other elements enter as data into the latitude observation equations.

13. The perturbative function is not discontinuous at the commensurability of period points, a fact hitherto in doubt.

14. That when an unknown is so far removed relatively from the planet it perturbs, precise prediction of its place does not seem to be possible. A general direction alone is predicable.

Рис. 2.3

Последние две страницы исторического «Трактата...» Персиваля Ловелла (1915) (см. перевод в тексте).

Заключение

69. Это исследование устанавливает следующее:

1) На основе предположения о существовании внешнего возмущающего тела с помощью наиболее строгого метода, именно метода наименьших квадратов, с учетом возмущений первой степени относительно эксцентриситетов выскакивающие квадраты невязок за период 1750—1903 гг. были уменьшены на 71%.

2) Включение дальнейших членов приводит к решениям, согласующимся с первым.

3) Решения, охватывающие период 1690—1715 гг., также в основном согласуются с решениями для периода 1750—1903 гг.

4) То же самое происходит при включении дополнительных наблюдений до 1910 г.

5) Вторая часть работы, в которой решение развито до вторых степеней эксцентриситета, привела к аналогичным результатам.

6) С учетом вероятных ошибок наблюдений выскакивающие квадраты невязок в теории, не включающей внешнюю планету, уменьшаются при ее включении на 90% и даже почти на 100%, причем решения подтверждают одно другое следующим образом:

при $\varepsilon' \approx 180°$			при $\varepsilon' \approx 0°$		
24	условных уравнения	99%	25	условных уравнений	99,5%
25	» »	91%	27	« «	99,5%
27	« «	89,5%			
37	« «	88%			

7) Хотя это могло бы указывать на абсолютное решение задачи, нужно помнить, что в противоположность вероятным ошибкам фактические ошибки могут коренным образом изменить результат; поэтому члены выше второго порядка по e и e' оставлены без рассмотрения.

8) Работа дает два возможных решения в каждом случае, одно со значением ε', близким к нулю, и второе со значением ε', близким к 180°; эта двойственность возможного положения имеет место в любом случае.

9) В итоге наилучшие решения для двух возможных случаев дают:

ε' в окрестности 0°	ε' в окрестности 180°
$\varepsilon' = 22{,}1°$	$\varepsilon' = 205{,}0°$
$a' = 43{,}0$	$a' = 44{,}7$
$m' = 1{,}00$	$m' = 1{,}14$
$e' = 0{,}202$	$e' = 0{,}195$
$\tilde{\omega}' = 203{,}8°$	$\tilde{\omega}' = 19{,}6°$
Гелиоц. долг. (июль 0, 1914) 84,0°	262,8°

Единица m' равна 1/50000 массы Солнца

10) Это показывает, что неизвестная планета имеет массу, значение которой лежит между значениями масс Нептуна и Земли, 12—13-ю видимую звездную величину в зависимости от альбедо и диск более 1″ в диаметре.

11) По аналогии с другими телами Солнечной системы, где эксцентриситет и наклон обычно коррелируют друг с другом, наклон орбиты к плоскости эклиптики должен составлять около 10°. Это затрудняет поиск планеты.

12) Исследование возмущений в широте не дает достоверных результатов. Это, вероятно, обусловлено тем, что эксцентриситет e', как и другие элементы планеты, входит в условные уравнения для широты.

13) Возмущающая функция не является разрывной в точках соизмеримости периодов — факт, вызывавший до сих пор сомнения.

14) Когда неизвестная планета так далеко отстоит от возмущаемой планеты, точное предсказание ее положения, по-видимому, невозможно. Можно предсказать лишь общее направление на планету.]

Таким путем Ловелл получил двойное решение для положения планеты X. Указанная ситуация аналогична задаче предвычисления положения Луны по наблюдениям лунных приливов. Два лучших решения Ловелла, соответствующих значениям $\varepsilon' = 0°$ и 180°, уменьшили выделяющиеся невязки в движении Урана на 99 и 90% соответственно; это небольшое различие было, по мнению Ловелла, недостаточно для того, чтобы выбрать одно из двух решений.

Хотя Ловелл опубликовал свои окончательные результаты в 1915 г., он начал исследования гораздо раньше. Действительно, его самые ранние вычисления были настолько обнадеживающими, что предварительные шаги с целью поисков планеты X были предприняты под его руководством еще в 1905 г. Ловелл ясно представлял себе, что фотография является единственным средством отыскания такой слабой планеты среди многочисленных звезд. После нескольких предварительных пробных фотографий, сделанных в 1905 г., он купил 12,5-сантиметровый фотографический объектив фирмы «Джон Брэшир Компани». С этой камерой Слайфер получил около 200 пластинок в 1906 и 1907 гг., а Вильямс снял еще 50 пластинок летом 1907 г. Эти серии фотографий, фиксировавшие звезды до 16-й величины с выдержкой в три часа, охватывали целую окружность на небе вдоль неизменной плоскости. Дубликаты пластинок делались через каждые 5°.

Сначала Ловелл исследовал эти пластинки с помощью ручной лупы, но вскоре обнаружил, что это не обеспечивает нужную точность (Слайфер позднее нашел два слабых изображения планеты X — Плутона, которых Ловелл не заметил на пластинках 1905 г.). В дальнейшем он пользовался компаратором

Гартманна, предназначенным для измерения небольших спектрограмм, но приспособленным для исследования фотографий звезд. Еще позднее он приобрел цейссовский блинк-компаратор.

Затем Ловелл получил в свое распоряжение обширную серию пластинок, снятых Слайфером и Лампландом с помощью 105-сантиметрового рефлектора. Хотя светосила этого инструмента с большой апертурой значительно уменьшала необходимое время экспозиции, каждая отдельная пластинка охватывала столь малое поле зрения, что нужны были тысячи пластинок, чтобы покрыть даже скромный по размерам участок неба. Скоро стало ясно, что необходим фотографический телескоп с большим полем зрения и значительной светосилой. К сожалению, начало первой мировой войны отсрочило приобретение такого инструмента. Персиваль Ловелл умер в 1916 г., не дождавшись ни установки необходимого инструмента, ни открытия его планеты X. В 1925 г. Слайфер предложил Ги Ловеллу, попечителю Ловелловской обсерватории, купить для фотографического инструмента набор 32,5-сантиметровых стеклянных дисков. Ги Ловелл получил их перед самой своей смертью в 1927 г., а вскоре после этого необходимые средства для завершения инструмента и его установки были любезно предоставлены братом Персиваля Ловелла, президентом Гарвардского университета Лоуренсом Ловеллом.

Пикеринг (1919) использовал невязки в долготе Урана и Нептуна для предсказания положения планеты О на эпоху 1920,0. Он также использовал невязки в широте Нептуна для предвычисления наклона и положения узла орбиты планеты О. Вычисления Пикеринга (1909, 1919) и Ловелла (1915) побудили Хьюмасона в обсерватории Маунт-Вилсон снять серию пластинок в декабре 1919 г. и январе 1920 г. на телескопе с 25-сантиметровым триплетом Кука. Экспозиция пластинок составляла два часа, и при этом фиксировались звезды до 17-й величины. Тщательно исследуемая на пластинках область ограничивалась двумя градусами по обе стороны эклиптики, и никакого изображения ни планеты О Пикеринга, ни планеты X Ловелла не было найдено. Это было тем более досадно, что неудача, видимо, заставила Пикеринга усомниться в его предвычислениях и в самой возможности существования такой одной планеты. Действительно, позднее Пикеринг (1928d, 1931c) опубликовал работу, основанную на идее множественности неизвестных планет. В 1930 г. он сначала не поверил, что объект, открытый в Ловелловской обсерватории, является планетой. По иронии судьбы, как только Плутон был открыт и его орбита точно определена, пластинки 1919 г. были повторно обработаны Никольсоном и на них были обнаружены четыре очень слабых изображения Плутона.

Кроммелин (1931c) собрал в единую таблицу элементы гипотетических планет Ловелла, Пикеринга, Гайо, Лау, Тодда и Форбса (табл. 8).

Таблица 8

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТЫ ПЛУТОНА И ПРЕДСКАЗАННЫХ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ПЛАНЕТ (КРОММЕЛИН, 1931c)

	Ловелл, 1915	Пикеринг, 1909	Пикеринг, 1919	Пикеринг, 1928	Гайо, 1909	Реальные элементы орбиты Плутона	Ловелл, 1915	Гайо, 1909	Лау	Тодд, 1877	Форбс, 1887	Лау	Си, 1904
Среднее расст., а. е.	43,0	51,9	55,1	30,1	66	39,5	44,7	44	46,5	52,0	104,4	71,8	42,2
Период, годы	282	373,5	409,1	164,8	536,1	248	299	292	317	375	1066	608	275
e	0,202	..	0,31	0,195	..	0,248	0,195	..	..	..	..	..	..
Долгота перигелия	204,9°	..	280,1°	252,5°	..	223,4°	20,7°	..	..	..	..	..	..
Момент прохождения через перигелий	1991,2	..	1720,0	1973,8	..	1989,8	1994,9	..	..	..	..	..	..
Ω	..	..	100°	180°	..	109,4°	..	..	..	104°	..	..	..
i	10°	..	15°	..	..	17,1°	..	..	..	1,4°	..	..	..
Долгота (1930,0)	102,7°	135,1°	102,6°	135°	128,5°	108,5°	279,0°	308,4°	308,9°	221,6°	191°	173,1°	233°
Звездная величина	12—13	13,4	15	12,2v 13,5p	..	15	12—13	..	..	13	..	..	..
Масса (масса Земли равна 1)	6,7	2	2	0,75	24	..	7,6	5	9	..	..	48	..

Примечание: буквы v, p обозначают визуальную и фотографическую величины.

ГЛАВА 3

ОТКРЫТИЕ ПЛУТОНА

1928—1930

Согласно Пикерингу (1928c), «наиболее продуктивной орбит в Солнечной системе для поисков неизвестных планет являе ся, без сомнения, орбита Урана». С помощью графических изо ражений возмущений Урана Пикеринг нашел новые свидетел ства существования своей планеты O, а также свидетельства пользу существования еще одной планеты P, расположенной долготе 294° на расстоянии от Солнца 61,7 а. е. и имеющей р риод 485 лет. Кроме того, он обнаружил свидетельства сущ ствования планеты S, расположенной на долготе 344°. Ра Пикеринг постулировал ее существование на основе анал данных о кометных афелиях. В своей последующей работе П керинг (1928d) отметил, что из невязок в движении Ура нельзя извлечь много новой информации относительно планет и S. Однако он указал, что еще одним источником информа для определения элементов орбиты планеты P может стать и чение кометных афелиев. На основе исследования этих дан Пикеринг нашел для планеты P новые значения пери (556,6 лет) и расстояния от Солнца (67,7 а. е.). На эпоху 192 он определил ее положение координатами $\alpha = 20^h19^m$ и = —51,5°. Он вычислил, что ее визуальная величина равна 11 и поэтому уверенно констатировал, что ее нетрудно будет об жить. Тот факт, что планета P до сих пор не была откры случайно, он приписывал ее южному склонению.

В отношении планеты S Пикеринг заметил, что поскольку ней связаны только четыре кометы, то его предвычисления клона и узла являются недостаточно надежными. Тем не ме на эпоху 1920,0 он дал ее пробные координаты $\alpha = 22^h04^m$ и = +3,4°. Что касается планеты O, то ее орбита должна име по его мнению, большой наклон, как это часто бывает свой венно орбитам с большими эксцентриситетами. Для планеты Пикеринг предсказал значения $12{,}2^m$ для визуальной величи и $13{,}5^m$ для фотографической величины. Как отмечалось в п дыдущей главе, неудача фотографических поисков планеты Пикеринга, предпринятых Хьюмасоном в 1919 г. на обсерва рии Маунт-Вилсон, возможно, привела Пикеринга к утра веры в собственные предвычисления и в существование одной

кой планеты. Когда впервые было объявлено об открытии Плутона в марте 1930 г., Пикеринг (1930c) был, по-видимому, убежден, что это комета, а не планета. Он сетовал на то, что это объявление не было сделано сразу же по открытии (в феврале 1930 г.), как это было принято раньше, так как тогда можно было бы быстрее определить орбиту планеты.

Изготовленный 32,5-сантиметровый объектив, предназначенный для поисков планет на Ловелловской обсерватории, поступил во Флагстафф в начале 1929 г. Как только линзы были смонтированы, начались предварительные работы по юстировке и контролю. Когда была закончена первоначальная пробная серия фотографий предсказанной Ловеллом подходящей области в Близнецах, Клайд Томбо, который незадолго до этого вошел в штат обсерватории, был назначен ответственным за поиски планеты X. Обнаружилось, что пластинки размером 35×42 см позволяют получить достаточно большое поле хороших изображений. Фокусное расстояние 32,5-сантиметрового объектива составляло 169 см, что давало масштаб 122″ на 1 мм, или 2,95 см на 1°. Таким образом, каждая пластинка покрывала на небе площадь ≈12°×14°. Для установки пластинок в фокальной плоскости большой линзы были предусмотрены специальные приспособления.

Программа наблюдений началась 1 апреля 1929 г. с фотографирования области Близнецов. Вскоре выяснилось, что для выявления различий между далекими планетами и астероидами вблизи их точек стояния существенно фотографирование областей около точки оппозиции. Вблизи точки оппозиции угловые движения астероидов гораздо больше и их следы на изображениях с одночасовой выдержкой выделяются с первого взгляда.

К сентябрю 1929 г. фотографирование в окрестности точки оппозиции на эклиптике шло полным ходом. При этом с особым вниманием и тщательностью производилось исследование пластинок на блинк-компараторе. Однако, как бы аккуратно ни обрабатывались пластинки, нельзя было избежать ряда дефектов, вызванных наличием частиц грязи или других примесей в эмульсии. Исследовались только негативы; позитивы содержали значительно больше дефектов.

Первое исследование пластинок, снятых в оппозиции, началось с сентябрьских снимков области Водолея и продолжалось месяц за месяцем с продвижением в восточном направлении через созвездия Рыбы, Овен и Телец. К тому времени фотографирование участков неба выполнялось уже в районе Млечного Пути. Когда завершилась обработка фотографий созвездия Тельца, фотографировалась область Близнецов. Сначала Томбо исследовал на цейссовском блинк-компараторе пару снимков окрестности δ Близнецов. Обычно делались три снимка каждой области с интервалами в два дня. Однако интервал между датой первого снимка окрестности δ Близнецов (январь, 21, 1930) и датой

третьей пластинки (январь, 29) был на четыре дня длинн обычного. Когда четверть снимка области δ Близнецов бы исследована, 18 февраля Томбо открыл «подозреваемую пла ту». Изображения отстояли друг от друга на 3,5 мм, что указ вало на расположение объекта за орбитой Нептуна. Изображ ния были также обнаружены на пластинках, сделанных 21, и 29 января на 12,5-сантиметровом когшеловском телескопе.

19 февраля Томбо смог получить четвертую пластинку и сн ва обнаружил изображение на предсказанном месте. Были оп сения, что объект быстро переместится и окажется всего ли каким-то необычным астероидом или кометой, как и предпол жили впоследствии Пикеринг и Джексон, но последующие пла тинки неизменно обнаруживали объект на его предвычисле ном месте. 20 февраля сотрудники обсерватории исследова объект визуально с помощью 60-сантиметрового рефрактора целью обнаружения диска. Диска не оказалось, а так как Л велл предсказывал диаметр диска 1″, возникло подозрение, ч главный объект еще не найден. Спустя несколько ночей Лам ланд, используя 105-сантиметровый рефлектор, фотографичес сравнил цвет объекта с цветом Нептуна. Его сравнение по твердило визуальное впечатление, что цвет объекта явно же товатый, а не голубоватый, как у Нептуна. Пластинки с одн часовой экспозицией, полученные 105-сантиметровым инстр ментом, не выявили никаких спутников; поэтому масса объек не поддавалась непосредственному определению. Слайфер пр должал исследовать новую планету визуально на 60-сантим ровом рефракторе по ночам с прекрасной видимостью. Тем вр менем Лампланд на 105-сантиметровом рефлекторе начал дл ную серию фотоснимков Плутона с небольшой экспозиц предназначенных для астрометрических целей. Вплоть до сво смерти в 1951 г. Лампланд получал по возможности кажд месяц по одной пластинке (рис. 3.1).

Наконец, 12 марта 1930 г. была послана телеграмма попеч телю Ловелловской обсерватории Путнаму для ее передачи Гарвардскую обсерваторию. На следующий день она была зослана многим астрономам и обсерваториям. Эта историческ телеграмма гласила:

«Систематические многолетние поиски, дополняющие исс дования Ловелла по транснептуновой планете, привели к обн ружению объекта, который в течение семи недель имел скоро движения и траекторию, согласующиеся с данными транснеп нового тела на предписанном ему расстоянии. Пятнадцатая в личина. Положение 12 марта в три часа Гринвичского средне времени было 7 секунд к западу от δ Близнецов в согласии долготой, предвычисленной Ловеллом» (Слайфер, 1930).

Объявление об открытии новой планеты было, таким обр зом, сделано 13 марта, что совпало сразу с двумя событиям с днем рождения Ловелла, а также со 149-й годовщиной откр

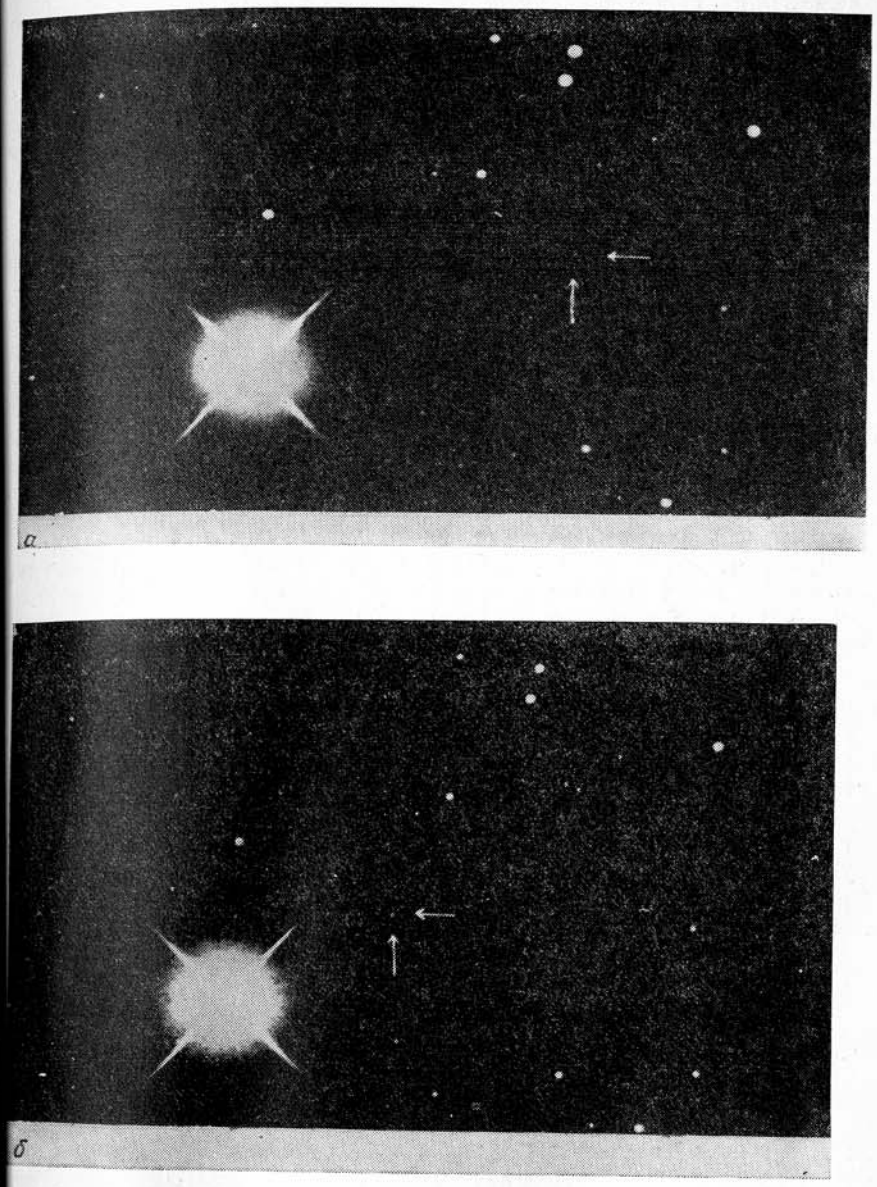


Рис. 3.1

Британское астрономическое общество, № 416. Две пластинки с изображением Плутона, снятые Лампландом с помощью 105-сантиметрового рефлектора Ловелловской обсерватории (фокусное расстояние 550 см); *а* — 2 марта 1930 г., 4 ч 56 мин; *б* — 5 марта 1930 г., 3 ч 44 мин (с разрешения Ловелловской обсерватории).

тия Урана сэром Вильямом Гершелем. Харлоу Шепли послал телеграмму об открытии в Британское астрономическое общество, где она была прочитана на заседании на следующий день. За ней был прочитан официальный ответ общества, подготовленный по поручению его совета секретарем по иностранным связям:

«Президент, совет и члены Британского астрономического общества, собравшиеся на заседание, шлют Ловелловской обсерватории свои самые сердечные поздравления в связи с великим открытием транснептуновой планеты. — Тернер, секретарь по иностранным связям»*.

Реакция собрания была отмечена в протоколах как «бурные аплодисменты».

Публичное объявление об открытии было сделано также утром 13 марта вдовой Персиваля Ловелла миссис Констанцией Ловелл во время вручения премии, ежегодно присуждаемой в память Ловелла в Педагогическом колледже в Аризоне.

Сотрудники Ловелловской обсерватории были сразу же завалены «огромным и настойчивым» потоком вопросов от представителей прессы. Большое число телеграмм и писем, полученных обсерваторией, а также широкое освещение открытия газетами и журналами явились дополнительным стимулом для сотрудников в деле быстрейшего определения элементов орбиты планеты. Циркуляр, в котором приводились предварительные значения элементов орбиты и некоторые дальнейшие результаты наблюдательной работы, был направлен Шепли в Гарвардскую обсерваторию. Затем Шепли (1930b) опубликовал эти данные в виде сообщения "Harvard College Observatory Announcement Card", No. 121:

«Предварительная орбита планеты X была вычислена сотрудниками Ловелловской обсерватории при участии доктора Джона А. Миллера, директора обсерватории Спрул, на основе положений 23 января, 23 февраля и 23 марта, определенных по пластинкам Ловелловской обсерватории Лампландом. Эти положения дали следующие элементы, отнесенные к среднему равноденствию 1930,0:

Долгота узла	109° 21′
Наклон	17° 21′
Логарифм большой полуоси	2,3359
Долгота перигелия	12°52′
Эксцентриситет	0,909
Среднесуточное движение	1,112″
Средняя аномалия (1930,0)	3° 20′ 47″
Расстояние от Солнца	41,3

* Meeting of the Royal Astronomical Society, Friday, 1930 March 14. Observatory, 53, 97, 1930.

Положение, вычисленное на основании этой орбиты на 30 марта, совпало с наблюденным положением с точностью до долей секунды дуги по обеим координатам. Однако, поскольку наблюдавшаяся дуга орбиты очень коротка, а широта объекта чрезвычайно мала, существенного пересмотра некоторых элементов, в частности эксцентриситета, пока не ожидается. Наша первая предварительная круговая орбита, вычисленная по положениям 23 января и 23 марта, дала значения долготы узла и наклона, согласующиеся со значениями для эллиптической орбиты. Дальнейшие детали будут сообщаться в Циркулярах Ловелловской обсерватории. Слайфер.»

Путнам, который направил извещение об открытии из Ловелловской обсерватории в Гарвардскую, считал, что заслуга открытия принадлежит Слайферу, директору Ловелловской обсерватории. Однако, по мнению Шепли, честь открытия принадлежала в первую очередь Персивалю Ловеллу, который математически предвычислил новую планету, «и лишь затем администраторам Ловелловской обсерватории и наблюдателям, выполнявшим свою обычную ночную работу». Для новой планеты Шепли предложил название Кронос. Шлезингер, директор Йельской обсерватории, предсказывал, что и другие, пока неизвестные большие планеты могут дополнить нашу картину Солнечной системы, хотя открыть их будет чрезвычайно трудно из-за слабого блеска. Капитан Фримэн из Морской обсерватории США заявил, что научное сообщество «очень удовлетворено и очень взволновано» открытием. Он добавил, что Морская обсерватория попытается наблюдать планету, хотя при 15-й звездной величине она может оказаться неуловимой, так как ее положение еще не определено с достаточной точностью. Отто Струве из Йеркской обсерватории охарактеризовал открытие как «одно из величайших в истории астрономии». Стьюард из астрономического факультета Принстонского университета назвал открытие «важным и интересным вкладом в наши знания о Солнечной системе». Сэр Джеймс Джинс сделал пророческое предсказание, что новая планета «возможно, обладает одним сравнительно большим спутником, подобно Нептуну и Земле».

Пикеринг (1930a) заметил, что, так как открытие новой планеты вызвало столь большой интерес, было бы желательно по возможности быстрее найти название для новой планеты. Он предложил назвать планету Плутоном в честь греческого бога мрака, который был способен в любое время по своему желанию становиться невидимым. Пикеринг отметил, что при прохождении через афелий новая планета получает менее 0,002 солнечного света, падающего на Землю, и ее блеск составляет только 1/19 от соответствующего значения в перигелии.

Через два дня после того, как миссис Ловелл впервые публично объявила об открытии новой планеты, она предложила назвать ее «Персиваль» в честь ее покойного мужа. Неделю

спустя миссис Ловелл передумала и сказала, что она предпочитает для новой планеты название «Ловелл». Однако капитан Фримэн предположил, что Персиваль Ловелл, без сомнения, протестовал бы против использования его имени для новой планеты, подобно тому, как Гершель отверг аналогичные попытки назвать Уран в его честь. Фримэн предложил вместо этого название «Минерва», отметив, что названия «Кронос» и «Сатурн» идентичны, а название «Плутон» нежелательно в силу ассоциации с Сатаной. Слайфер (1930b) отметил, что из множества имен, предложенных для новой планеты, «Минерва» и «Плутон» наиболее популярны. Но он обратил внимание на то, что название «Минерва» уже использовалось для астероида. Название «Плутон» подходило во всех отношениях, и Ловелловская обсерватория предложила его Американскому астрономическому обществу и Королевскому астрономическому обществу Великобритании. Слайфер заметил, что, насколько ему известно, первым человеком, предложившим название «Плутон», была 11-летняя мисс Венеция Берней из Оксфорда, Англия. В качестве символа планеты Ловелловская обсерватория предложила знак ♇, легко запоминаемый, поскольку он образован из первых двух букв названия планеты. Новый символ являлся также, причем не случайно, монограммой инициалов Персиваля Ловелла.

Через неделю после открытия Плутона Джексон из Королевской Гринвичской обсерватории, который раньше придерживался мнения, что «хотя пока имеется мало деталей, сам факт проведения наблюдений в течение семи недель дает уверенность в реальности объекта как очень отдаленной планеты», внезапно изменил свою точку зрения. Теперь Джексон заявил о своей неуверенности в том, что Плутон является планетой, поскольку, во-первых, он не был обнаружен в точности там, где предсказывал Ловелл, а во-вторых, он не имел предсказанную яркость. Кроме того, Джексон считал странным, что Ловелловская обсерватория обнародовала так мало подробностей. В ответ на скептицизм Джексона Шепли (1930a) сообщил, что Гарвардская обсерватория получила результаты дополнительных наблюдений из Йеркской обсерватории. Г. Струве из обсерватории в Потсдаме сообщил о визуальных и фотографических наблюдениях Плутона с помощью 65-сантиметрового рефрактора; Плутон был также обнаружен в обсерватории в Гейдельберге. Бианки из обсерватории Брера близ Милана в Италии информировал об обнаружении новой планеты на пластинках, снятых 16 марта. Капитан Фримэн из Морской обсерватории США сообщил, что Плутон был сфотографирован с помощью 25-сантиметрового фотографического телескопа и наблюдался визуально на 65-сантиметровом рефракторе. Параскевопулос (1930) на станции Гарвардской обсерватории в Бойдене (Южная Африка) сообщил о фотографировании новой планеты с помощью 60-сантиметрового рефрактора Брюса 18, 19 и 27 марта, а также 16 и 18 апреля.

Согласно сообщению Эсклангона (1930a), микрометрические измерения фотографий Плутона в Парижской обсерватории показали, что минимум прямого восхождения был пройден в момент март 30,5, 1930. Самые первые вычисления дали круговую орбиту с периодом 489 лет. Используя метод Лапласа, Минер и Канаваджия в Парижской обсерватории показали, что скорость Плутона была постоянной по величине и направлению в течение первых 18 дней наблюдений. С помощью параллактического метода Стойко нашел: 1) гелиоцентрические координаты планеты, отнесенные к эклиптике и равноденствию; 2) расстояние от Солнца $R=44{,}4$ а. е.; 3) долготу узла $\Omega=108°55'$ и 4) наклон $i=38°54'$. По этому поводу Эсклангон заметил, что надежны только значения R и Ω и потребуется много месяцев и лет наблюдений для вычисления точной орбиты. Позднее, используя пары наблюдений по обе стороны от минимума, Стойко нашел модифицированным методом Лагранжа $R=41{,}524$ а. е., $\Omega=109°16'$ и $i=19°51'$.

Жеховский (1930) также вычислил гелиоцентрическое расстояние Плутона методом Лагранжа на основе ранних наблюдений и появившихся результатов новых наблюдений. Он получил значения $R=44{,}219$ а. е. на момент март 25, 1930 и $R=41{,}595$ а. е. на момент апрель 2. Стойко (1930a) вычислил новые элементы орбиты Плутона, используя наблюдения до открытия, сделанные 16 марта и 1 апреля 1926 г. Он нашел нижний предел эксцентриситета, равный 0,407, но отметил, что его фактическое значение точно еще не установлено.

Банахевич (1930c) заметил, что в силу сомнений относительно действительной траектории Плутона наблюдения в марте и апреле 1930 г. недостаточны для определения орбиты, если использовать три любых наблюдения. Он предложил новый метод, в котором выводятся линейные уравнения для определения координат и вектора скорости планеты путем рассмотрения проекции траектории планеты на земную сферу. По утверждению Банахевича, этот метод дает возможность определить характер орбиты Плутона из наблюдений первой половины 1930 г., в то время как все другие методы, основанные на трех наблюдениях, приводят к ошибочным результатам. Эсклангон (1930d) для перевычисления орбиты Плутона использовал фотографические наблюдения, сделанные между августом и октябрем 1930 г. в Парижской, Йеркской и Гейдельбергской обсерваториях, а также парижские наблюдения с января по май 1930 г. Он нашел, что расстояние планеты от Солнца меняется в течение одного оборота от 30 до 50 а. е., превышая расстояние Нептуна от Солнца всюду, кроме области перигелия. Он получил существенно улучшенные значения долготы узла и наклона, но отметил, что значения эксцентриситета и долготы перигелия долж-

ны быть в дальнейшем исправлены по мере накопления данных наблюдений.

Банахевичем (1930a) было отмечено, что определения орбиты Плутона, произведенные в Ловелловской и Парижской обсерваториях, были основаны на наиболее далеко отстоящих друг от друга наблюдениях 1930 г. Оба определения указывали на очень эксцентричную эллиптическую орбиту и движение планеты в направлении удаления от Земли. Однако положения, наблюдавшиеся в период с 1919 по 1927 г. свидетельствуют об эксцентриситете астероидного типа и приближении планеты к Земле. Банахевич обнаружил, что при использовании другого метода вычислений наблюдения 1930 г. подтверждают более ранние наблюдения. Отсюда он заключил, что орбита Плутона похожа на орбиту астероида и планета приближается к нам. Банахевич (1930b) вычислил орбиту Плутона по наблюдениям 23 января, 21 февраля, 21 марта и 17 мая 1930 г. и нашел, что его элементы хорошо согласуются с элементами, полученными Миллером (1930) и Стойко (1930b), за исключением эксцентриситета и большой полуоси. По мнению Банахевича, его результаты и вычисления Бауэра и Уиппла, а также Никольсона и Мейолла подтверждают заключение, что Плутон является транснептуновой планетой, предугаданной Ловеллом, или во всяком случае первой из нескольких планет, предсказанных Лау.

По сообщению Слайфера (1931), наблюдатели Ловелловской обсерватории, работавшие на 60-сантиметровом рефракторе, на основе наблюдений за удаленными земными объектами переменного диаметра и освещенности заключили, что в силу малой яркости Плутона его диск не может быть обнаружен, даже если он достигает размера 0,6″. Их эксперимент был повторен Альтером (1952) и дал аналогичные результаты. Сотрудники Ликской обсерватории с помощью 90-сантиметрового рефрактора нашли, что максимальный диаметр Плутона, даже с учетом некоторого потемнения к краю диска, едва ли превышает 0,3″ (Бауэр, 1931). Никольсону с помощью 250-сантиметрового рефлектора обсерватории Маунт-Вилсон не удалось обнаружить диск при плохих условиях видимости, и он смог только заключить, что диаметр Плутона не превышает 0,4″. Однако, поскольку эффект потемнения к краю ослаблялся за счет большой светосилы 250-сантиметрового инструмента, Никольсон определил, что диаметр вряд ли может превышать 0,1″.

Бауэр (1931), принимая значение видимого диаметра Земли на расстоянии Плутона равным 0,43″ и предполагая одинаковую плотность Плутона и Земли, вычислил, что масса Плутона составляет 0,34 массы Земли. При этом он использовал оценку 0,3″ для диаметра диска Плутона, полученную в Ликской обсерватории. Однако при использовании значения 0,1″, полученного в обсерватории Маунт-Вилсон, масса Плутона должна составлять 0,01 массы Земли. Бауэр пришел к выводу, что масса

Плутона не может быть уверенно определена динамическим путем. На основе наблюдений видимой звездной величины и при самых благоприятных предположениях относительно альбедо и плотности он установил верхний предел массы Плутона равным 0,7 массы Земли. Окончательный вывод Бауэра состоял в том, что, пока диск не будет окончательно измерен, наиболее вероятным значением массы Плутона останется значение 0,1 массы Земли.

Предчувствуя, возможно, будущее изменение своей позиции (см. гл. 4), Пикеринг (1930b) опубликовал «дополнительные замечания», в которых он прокомментировал исследования Ловелла, касающиеся новой планеты. Пикеринг писал, что, хотя работа Ловелла явилась «без сомнения, очень элегантным математическим исследованием, продемонстрировавшим математическое искусство и изобретательность», ему лично кажется, что математика здесь не к месту и должна быть заменена здравым смыслом. Далее Пикеринг продолжал:

«Одно время Ловелл и я были более или менее близкими друзьями и в течение всей его жизни я поддерживал его работу по Марсу, пожалуй, значительно больше, чем любой другой профессиональный астроном, так как я верил в его правоту. Только потому, что я не хотел поддерживать его во всех его теориях и открыто говорил об этом, мы позднее, к моему сожалению, отдалились друг от друга. Он радовался и ценил мои благоприятные замечания относительно своей работы, но обижался на мою критику».

ГЛАВА 4

ЗАПОЛНЕНИЕ БЕЛЫХ ПЯТЕН — I

1931—1956

Бауэр и Уиппл (1930а) опубликовали шесть систем предварительных элементов, основанных на доступных в то время немногочисленных наблюдениях объекта Ловелловской обсерватории (Плутона). Они нашли, что явно выраженная транснептуновая орбита удовлетворяет полученным в то время результатам наблюдений, но должны были также признать, что наблюдениям можно удовлетворить и параболическими орбитами. По их оценкам, диаметр объекта в 1,4 раза больше диаметра Земли в предположении 15-й визуальной звездной величины, расстояния 41 а. е. и альбедо 0,07. Бауэр и Уиппл отметили, что единственной другой планетой с таким низким альбедо является Меркурий и что большее значение альбедо дало бы и меньший диаметр. Поэтому казалось более вероятным, что объект меньше Земли, а не больше. Если плотность объекта не является необычно большой, то его масса должна была быть значительно меньше предсказанного Ловеллом значения, равного семикратному значению массы Земли. Таким образом, уже в апреле 1930 г. астрономы представляли себе противоречие между видимым размером Плутона и предсказанным значением, выведенным на основе наблюдаемых возмущений в движении других планет.

Балде (1930) измерил диаметр Плутона с помощью 80-сантиметрового рефрактора Медонской обсерватории и указал, что он не может превышать 6400 км. Оценка Пикеринга (1931а) массы Плутона в 0,71 массы Земли в комбинации со значением диаметра Плутона, полученным Балде, приводит к средней плотности 31 г/см³, что в полтора раза больше плотности платины. Далее, если диаметр Плутона фактически меньше, скажем 4800 км, то средняя плотность достигает значения 73 г/см³. Пикеринг заметил, что если последнее значение правильно, то «Плутон является первым открытым планетным телом, внутренняя структура которого указывает на его происхождение за пределами Солнечной системы. Его плотность указывала бы в этом случае на связь с такими звездами, как белые карлики».

Вскоре появилась вторая работа Бауэра и Уиппла (1931), содержащая элементы и эфемериды Плутона на основе данных

многочисленных наблюдений, опубликованных со времени его открытия. Особую важность имело отождествление Плутона на нескольких пластинках, сделанных до его открытия. В частности, это были пластинки на обсерваториях Уккль в январе 1927 г., Маунт-Вилсон в декабре 1919 г. и Вильямс-Бей в январе 1927 г. и январе 1921 г. Окончательная система элементов Бауэра (1931) под номером XIX (табл. 9) была основана на еще большем числе наблюдений до и после открытия и считалась наиболее авторитетной до работы Коэна, Хаббарда и Остервинтера (1967).

Таблица 9

СИСТЕМА XIX БАРИЦЕНТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, 1900,0, (БАУЭР, 1931)

Эпоха оскуляции 1930, сентябрь 20 G.C.T. = 242 6240 J.C.T.

T	1989 октябрь 0,0344	P	248,43015 тропич. лет
ω	113°31′17,72″	a	39,517738
Ω	108°56′16,18″	p	37,074604
i	17°8′48,40″	μ	0,0039 6750 28°
q	29,691898	$k\sqrt{m_0}$	0,0172 0215 04
e	0,2486438	$k\sqrt{m_0}$	0,9856 1062°

$$x = -27{,}623487(\cos E - e) + 25{,}205408 \sin E$$
$$y = -28{,}252784(\cos E - e) - 24{,}309108 \sin E$$
$$z = -\ 0{,}612178(\cos E - e) - 15{,}455070 \sin E$$

В своей работе 1930 г. Браун пишет, что трудно понять, почему на основании очень малых невязок в долготе Урана оказались возможны предсказания существования внешней планеты, сделанные Ловеллом, Гайо, Лау и Пикерингом. Он отмечает, что масса только что открытого Плутона недостаточна для предвычисления планеты по ее влиянию на Уран и, следовательно, это открытие вблизи предвычисленного места было чисто случайным. Позднее Браун (1931), подтверждая свой скептицизм, показал, как использование формулы

$$\sin(x + \Delta x) + \sin(x - \Delta x) - 2\sin x = -\left(4\sin^2\frac{1}{2}\Delta x\right)\sin x \qquad (1)$$

или, в более компактной форме,

$$\Delta^2 \sin x + \left(4\sin^2\frac{1}{2}\Delta x\right)\sin x = 0 \qquad (2)$$

позволяет эффективно исключить из непрерывного ряда наблюдений периодический член с известным периодом, но неизвестными амплитудой и фазой. Браун нашел, что если это преобразование применить к возмущениям в долготе планеты, обусловленным притяжением внешней планеты, то кривая, изображающая эти возмущения в функции от времени, примет характер-

ную форму, остающуюся практически неизменной в широкой области значений отношений расстояний планет от Солнца. Он также нашел, что преобразованные данные наблюдений могут иногда выявлять, обусловлен ли данный ряд невязок существованием неизвестной планеты или нет. Применяя свою формулу к случаю Плутона, Браун еще раз показал, что невязки в долготе Урана не имеют никакой ценности для предвычисления неизвестной планеты. и поэтому открытие Плутона вблизи предвычисленного Ловеллом места является случайным. Для массы Плутона Браун вывел новый верхний предел, равный половине массы Земли. Затем Браун показал, что существующие данные наблюдений Нептуна недостаточны для предсказания существования Плутона, какова бы ни была его масса, и что потребуется по крайней мере еще сто лет наблюдений Нептуна, чтобы определить значение массы Плутона с вероятной ошибкой менее 1/4 массы Земли.

Критические замечания Брауна вызвали возражение у тех ученых, которые считали предсказания Ловелла и Пикеринга слишком близкими к действительности для того, чтобы оказаться чисто случайными. Как отметил Ривс (1951) (см. ниже), глубокий анализ этих двух противоположных точек зрения сделал Курганов (1941).

В то время как раньше Пикеринг (1931а) цитировал первую работу Брауна (1930) в поддержку своей критики предсказания Ловелла, теперь он (1932с) возражал против некоторых положений новой работы Брауна (1931). Пикеринг считал, что Браун спутал «два совершенно различных явления», происходящих при сближении одной планеты с другой; одно явление — это «максимальное отклонение», второе — «максимальный наблюдаемый эффект». Пикеринг отмечает, что, когда две планеты движутся рядом, возмущающая сила, или ускорение, гораздо больше, чем когда они находятся по противоположные стороны от Солнца, но время действия такой силы мало, так что максимальное отклонение может быть меньшим. Затем он объясняет, что максимальный наблюдательный эффект проявляется в виде острого пика кривой невязок, когда две планеты находятся в соединении. В случае же возмущений, происходящих вблизи оппозиции, никакого внезапного изменения скорости не происходит, хотя производимое отклонение может быть бóльшим и охватывать больший промежуток времени. В самом деле, такое постепенное возмущение, представленное графически, едва ли вообще покажет наблюдаемый эффект. Пикеринг заключил свои возражения Брауну следующими словами: «Очень жаль, что его положения, основанные на его теории, по-видимому, не согласуются с фактами...»

Интересно отклониться здесь немного в сторону и проследить за любопытным изменением отношения Пикеринга к Ловеллу. В одной работе Пикеринг (1931е) отмечает, что, хотя ни он, ни Ловелл никогда не видели ни одной пластинки, содержащей изображение Плутона, и, следовательно, сами не смогли найти планету, Ловелл по крайней мере оставил деньги на продолжение поисков. Поскольку Пикеринг не сделал подобного дара, он написал:

«Если, как утверждают некоторые, было простым совпадением, что его (Ловелла) вычисленное положение оказалось столь близким к действительному, то это совпадение, конечно, стало поистине счастливым для обнаружения планеты. Но если бы не посмертный дар Ловелла, вполне вероятно, что планета не была бы открыта еще многие годы, и поэтому нужно в полной мере оценить его важную роль в открытии».

Возможно, уязвленный «удивительными и безрассудными претензиями на исключительную роль в предвычислении положения, предъявляемыми его (Ловелла) активными сторонниками, интенсивно поддерживаемыми газетной пропагандой», Пикеринг (1931а) отмечал:

«Я не могу назвать ни одного астронома, который с гордостью указывал бы на успех Ловелла в предвычислении положения планеты, отличающегося по долготе почти на 5° от фактического положения на небе... Ни у кого из тех, кто внимательно изучал его работу, не сложилось впечатления, что этот скромный успех обязан чему-то иному, чем простому совпадению».

Бауэр (1932) отметил, что масса Плутона слишком мала для уверенного определения ее значения гравитационным путем по имеющимся невязкам в движении какой бы то ни было планеты. Он высказал предположение, что масса Плутона может быть равной массе Тритона, т. е. 0,06—0,09 массы Земли, так как, если бы Тритон был удален на расстояние Плутона (40 а. е.), его визуальная звездная величина изменилась бы от $13{,}5^m$ до $14{,}2^m$ — значения, найденного для Плутона. Однако Кроммелин обратил внимание на ошибку в этом расчете изменения звездной величины: на самом деле удаление Тритона на расстояние Плутона изменило бы его звездную величину до $14{,}9^m$. Поэтому Бауэр (1933) пересмотрел оценку массы Плутона с 0,1 до 0,3 массы Земли. Бауэр (1934) использовал определение Бааде (1934) фотографической звездной величины Плутона, равной $14{,}9^m$, как подтверждение того, что массы Плутона и Тритона одинаковы.

В своей работе Джексон (1930) рассмотрел отставание Нептуна в 1904 г. на 5″ от положения, вычисляемого по теории Леверье. После 1904 г. фактическое положение планеты отставало на 3″ от положения по теории Ньюкома (1899), заменившей теорию Леверье. Джексон показал, что простым изменением элементов, а именно увеличением периода на три часа, можно удовлетворить не только современным наблюдениям, но и наблюдениям Лаланда 1795 г. Пикеринг (1933) указал, что эта по-

правка обусловлена «подталкиванием» Нептуна Плутоном, что увеличивает скорость Нептуна и, очевидно, приводит к уменьшению его периода. Он привел таблицы, дающие вычисленные им и Ньюкомом отклонения от теоретических положений Нептуна на интервале 1795—1896 гг., а также вычисленные им и Джексоном отклонения на интервале 1898—1929 гг. Пикеринг полагал, что там, где нерегулярная составляющая отклонений была большой относительно самих отклонений, как это имело место в табличных значениях, более удовлетворительные результаты могли бы быть получены с помощью его графического метода, а не аналитическими методами. Пикеринг высказал предположение, что Джексон мог бы предсказать положение Плутона по полученной им кривой так же точно, как Пикеринг по своей. Если бы Джексон закончил свою работу двумя или тремя годами раньше и исследовал свои фотографические пластинки с достаточным вниманием, он мог бы «обеспечить Англии очень большую долю заслуги в открытии девятой планеты».

Никольсон и Мейолл (1931) вычислили новые элементы орбиты Плутона, используя положения Плутона, полученные по пластинкам Хьюмасона, снятым в 1919 г. с помощью 25-сантиметрового телескопа с триплетом Кука, и по пластинкам, сделанным в 1930 г. с помощью 150- и 250-сантиметрового рефлекторов обсерватории Маунт-Вилсон. Для определения массы Плутона методом наименьших квадратов они также использовали сводку разностей Джексона (1930) между наблюдаемыми долготами Нептуна и значениями, вычисленными по элементам Ньюкома. Для массы Плутона они получили значение $0{,}94 \pm 0{,}25$ массы Земли. Рассел (1931) считал, что значение массы Плутона, найденное Никольсоном и Мейоллом, достаточно для объяснения возмущений в движении Урана и Нептуна и довольно оптимистично заключил, что «все противоречия исчезли».

Пикеринг (1931b) описал орбиту кометы Уилка 1930 III, интересную тем, что эта комета принадлежит группе из 15 или 20 комет, афелии которых предположительно считались связанными с гипотетической трансплутоновой планетой P. Пикеринг (1931d) полагал, что положение планеты P известно почти столь же точно, как было известно положение Плутона перед его открытием. На эпоху 1930,0 он дал ее координаты $\alpha = 20^h08^m$, $\delta = -53{,}9°$. Пикеринг предсказал, что планета P обладает диском более 1″ в диаметре и имеет 11-ю звездную величину. Он призывал к проведению визуальных поисков в течение нескольких ночей в наиболее вероятной области пребывания планеты, так как это могло бы, возможно, сделать ненужными длительные фотографические поиски. На рис. 4.1 (Пикеринг, 1931c) приводится сравнение орбит Плутона и гипотетической планеты P.

В последующей работе Пикеринг (1932b) сообщил, что он разослал циркулярное письмо примерно пятнадцати различным обсерваториям в Южном полушарии. В этом письме он приводил данные о положении планеты P, ее звездной величине и другую соответствующую информацию. К своему удивлению, он

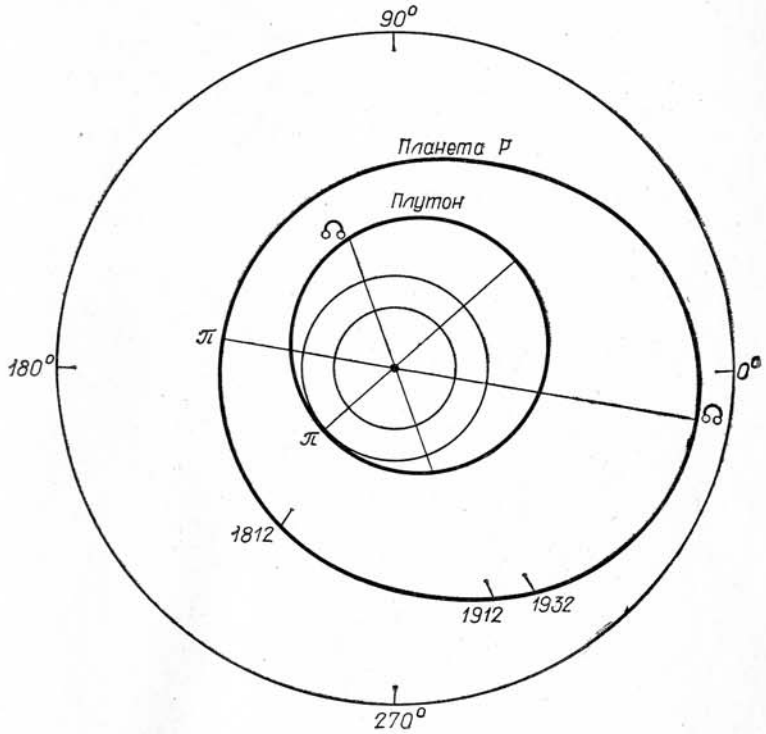


Рис. 4.1
Орбиты Плутона и планеты P (Пикеринг, 1931c).

получил пять ответов: два наблюдателя не имели подходящих инструментов для этой работы, один сообщал о пасмурной погоде, а двум не удалось найти планету. Параскевопулос на Гарвардской станции в Южной Африке, который раньше получил снимки Плутона после его открытия, снял с помощью 25-сантиметрового рефрактора Меткалфа пластинки с изображениями звезд даже слабее 15-й величины. Однако, сообщал он, «к сожалению, никакого неизвестного объекта не было обнаружено». Хоррокс из Капской обсерватории извещал, что он не нашел никаких свидетельств занептуновой планеты вплоть до 14,7 звездной величины на пластинках, снятых с помощью 12,5-сантиметровой широкоугольной камеры.

Пикеринг (1932a) на основе невязок в долготах Юпитера и Сатурна предсказывал также существование планеты U с орбитой, лежащей между орбитами Юпитера и Сатурна. Кроме того, он (1931c) постулировал существование планеты S с периодом обращения 328 лет, наклоном орбиты 30,5° и долготой 347°, а также планеты T, орбита которой находится между орбитами Урана и Нептуна.

Файе (1931a) исследовал орбиты всех комет, появлявшихся между 1680 и 1930 г., и нашел, что только одна из 240 комет имела тесное сближение с Плутоном, происшедшее в 1920 г.

Подобно Форбсу (1880a, b) и Фламмариону (1884), Шютте (1949) отметил корреляцию между афелиями кометных семейств и соответствующими планетами-гигантами и на этом основании пришел к выводу о существовании планеты за Плутоном, названной им «Трансплутон» и находящейся на среднем расстоянии 77,2 а. е. В своей работе Шютте (1949) нарисовал окружность указанного радиуса и нанес в соответствующем масштабе орбиты восьми комет трансплутонового семейства (рис. 4.2).

Он отметил тот замечательный факт, что плоскости орбит всех восьми комет наклонены по отношению к эклиптике в одном направлении, указывая на высокий наклон орбиты Трансплутона. По его мнению, вряд ли можно определить орбиту этой планеты на основе возмущений в движении Урана, Нептуна или Плутона. Кроме того, Трансплутон, вероятно, имеет такой слабый блеск, что его открытие может произойти только случайно.

Используя элементы Никольсона и Мейолла (1931) и пренебрегая возмущениями, Файе (1931b) нашел, что интервал между последовательными гелиоцентрическими соединениями Плутона и Нептуна составляет немногим менее 500 лет. Рур (1934) выяснил, что среднее движение Плутона мало отличается от 1/3 значения среднего движения Урана; период соответствующего неравенства составляет 6516 лет. В рамках теории вековых возмущений Рур (1939) нашел период 21 000 лет для неравенства в среднем движении Плутона, обусловленного возмущениями от Юпитера и Сатурна. Позднее он (1940) нашел период 12 000 лет для изменения эксцентриситета орбиты Плутона вследствие возмущающего влияния Нептуна.

Хотя позднее Коэн и Хаббард (1964, 1965) доказали невозможность захвата Плутона Нептуном, Литлтон (1936) считал, что такой захват может иметь место в будущем или мог случиться в прошлом. Он исследовал несколько различных типов таких событий, в частности случай, когда Тритон и Плутон были сначала прямыми спутниками Нептуна. По мнению Литлтона, если бы Плутон был независимой планетой, то было бы естественно ожидать такой его орбиты, которая целиком расположена за орбитами других планет. С другой стороны, если

считать, что Плутон и Тритон в прошлом были прямыми спутниками Нептуна, то нужно найти механизм, объясняющий их тесное сближение, необходимое для выброса. Литлтон предположил, что под влиянием приливного трения средние расстояния спутников могут стать равными, что приводит к тесному сбли-

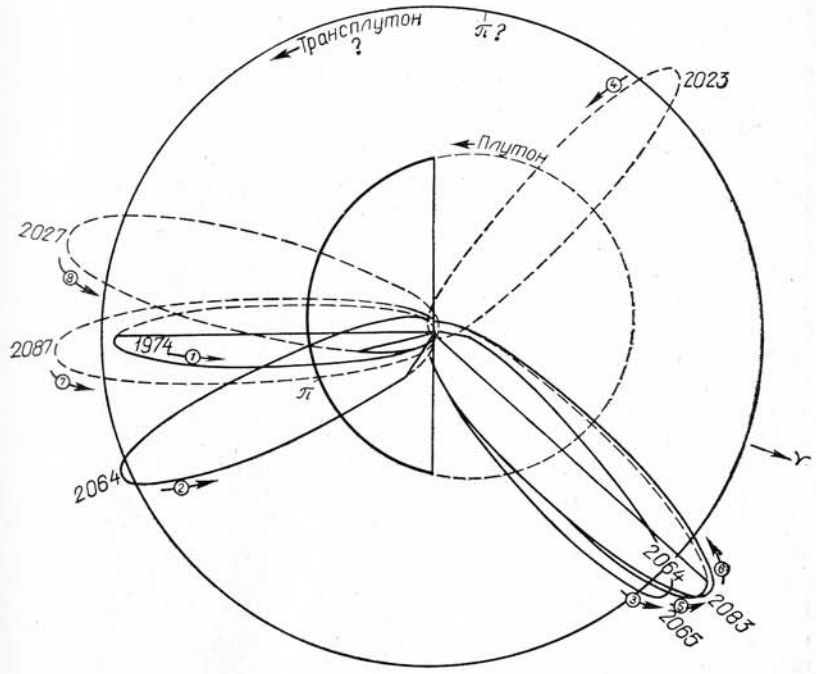


Рис. 4.2

Восемь комет семейства Трансплутона. *1* — комета 1851 IV (Петерса), *2* — комета 1932 X (Додвелла—Форбса), *3* — комета 1937 III (Нагаты), *4* — комета 1885 II Брукса), *5* — комета 1905 III (Джакобини), *6* — комета 1932 I (Хотона — Энсора), *7* — комета 1932 V (Пельтье — Уиппла), *8* — комета 1874 IV (Кагги). (Из работы Шютте, 1949).

жению. В связи с этим он заметил также, что период вращения Нептуна является самым большим среди всех планет-гигантов. На основании расчетов относительных энергий, требующихся при таком захвате, он заключил, что Плутон мог первоначально быть прямым спутником Нептуна, а сближение с Тритоном, сделавшее его независимой планетой, изменило также общее направление движения Тритона.

Довилье (1951) предположил, что Плутон и Тритон в действительности являются близнецами из семейства планет-гигантов, у которых, как и у земных планет, образовалась плотная кора в силу недостаточной начальной массы и высокой началь-

ной температуры, приведших к потере ими более легких элементов.

Путнам и Слайфер (1932) отметили, что отчетливый желтоватый цвет Плутона, наблюдавшийся Лампландом с помощью 105-сантиметрового ловелловского рефлектора, указывает на отличие атмосферы Плутона от той, которая окружает Нептун. Возможно также, что Плутон, подобно Меркурию, лишен атмосферы. Они указали, что в силу значительности эксцентриситета орбиты Плутона яркость планеты подвержена значительным изменениям. Яркость Плутона будет медленно увеличиваться до 1989 г., после чего в течение следующих 125 лет она будет убывать. Это увеличение яркости было подтверждено визуальными оценками видимой звездной величины Плутона, сделанными Мосли (1969), но оказалось в противоречии с фотометрическими наблюдениями Харди (1965 a, b), которые показали ослабление яркости планеты.

После открытия Плутона было решено (Слайфер, 1938), что поиски планет в Ловелловской обсерватории должны продолжаться вдоль эклиптики и распространяться как на более высокие, так и на более низкие склонения. Пластинки, снятые в 1930 г., покрывали одну полосу, расположенную вдоль эклиптики. При продолжении поисков фотографировались две полосы, параллельные эклиптике, одна к северу, а другая к югу от нее. К сентябрю 1932 г. полный пояс шириной от 30 до 35° был сфотографирован и исследован на блинк-компараторе. К маю 1943 г. вся часть неба, доступная наблюдениям из Флагстаффа, от 50° южной широты до северного полюса мира, была сфотографирована с не менее чем трехкратным покрытием каждой области при времени экспозиции в один час (Томбо, 1961). Пластинки, снятые 12,5-сантиметровой когшеловской камерой, охватывали звезды до 14—15-й величины, в то время как пластинки размером 25×42,5 см фиксировали звезды до 18,6-й величины. С июля 1943 г. по август 1945 г. поисковая работа была прервана из-за военных исследований, но с августа по ноябрь 1945 г. вновь проводилось изучение на блинк-компараторе некоторых снимков северных областей. С тех пор дальнейшие поиски не производились вплоть до работы Фосса, Шейв-Тейлора и Уитворта (1972). На рис. 4.3 показана область неба, исследованная к 1945 г. (Томбо, 1961).

Томбо выразил надежду, что оставшиеся неисследованными области будут изучены в будущем. Такое исследование на блинк-компараторе могло бы оказаться плодотворным (см. Брэди, 1972).

Всего на блинк-компараторе с учетом перекрывающихся участков была исследована область площадью 45 117 квадратных градусов, что составило 75,4 кв. м фотографических пластинок. Это исследование потребовало примерно 7000 часов работы. Общее число звезд в исследованных областях по оценкам со-

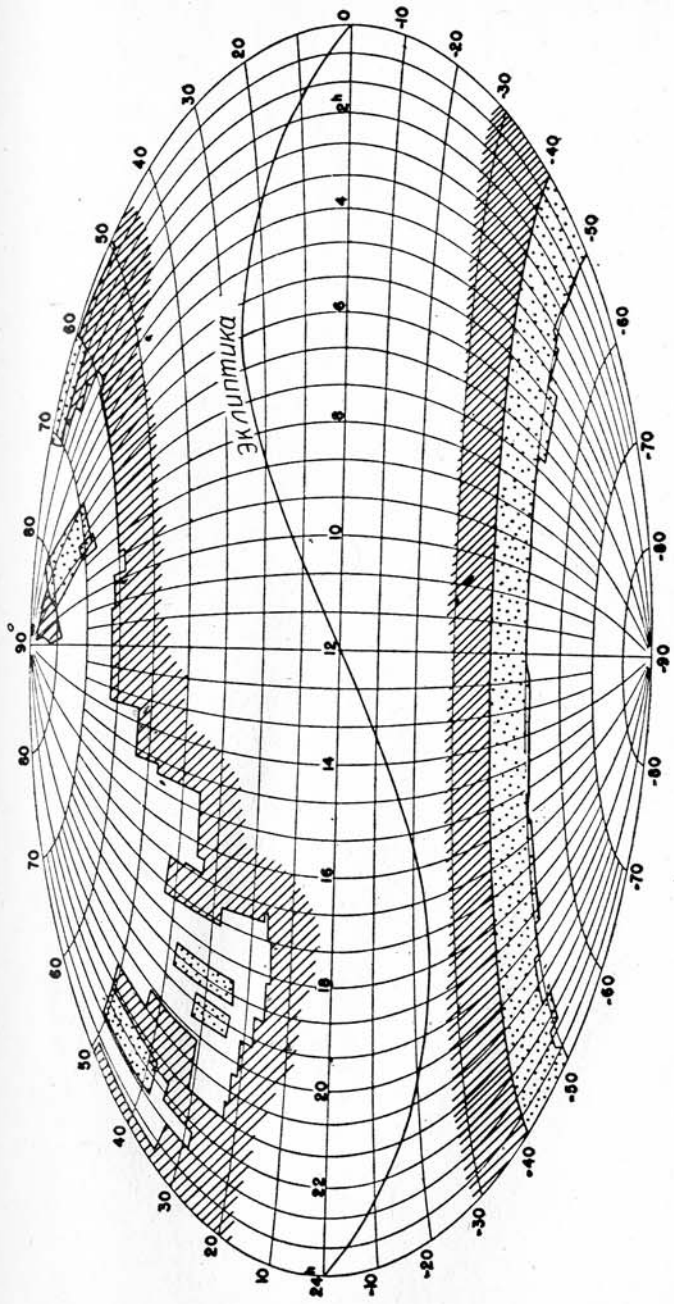


Рис. 4.3

Область, охваченная поиском транснептуновых планет в Ловелловской обсерватории, 1929—1945 гг. Заштрихованные участки — предельная звездная величина 16—17m; участки, отмеченные точками (в основном между —40° и —50° по склонению) — предельная звездная величина 14—15m (Томбо, 1961).

ставляет 44 675 000, или в среднем 1000 звезд на квадратный градус. Учитывая ту тщательность, с которой выполнялась работа по поиску планет, Томбо (1961) выразил уверенность, что не существует неизвестных отдаленных планет ярче 16-й звездной величины и что любая планета 16—17-й величины имела бы хорошие шансы быть обнаруженной. По его мнению, можно было бы распространить поиск до 20-й величины с помощью 120-сантиметрового телескопа Шмидта обсерватории Маунт-Паломар. Этот инструмент позволил бы обнаружить объект с диаметром 600 км в предположении, что его альбедо в 2,5 раза превышает альбедо Луны. Но Томбо признал также, что количество сфотографированных звезд до 20-й величины в области Млечного Пути было бы совершенно необъятным, так что поиски планет надо было бы ограничить областями, лежащими вне Млечного Пути. Томбо предложил для такого обзора две области: в Водолее и восточной части созвездия Рака, где следовало бы выполнять фотографирование каждый год во время оппозиции с целью обнаружить возможные объекты при пересечении ими границ Млечного Пути.

Шехтмэн (1945) остановился на эйнштейновском смещении перигелия Меркурия. Так как Меркурий подвержен возмущениям от планет, то иногда высказываются сомнения, «достаточны» ли невязки в возмущениях для решающей проверки предсказаний теории Эйнштейна. В связи с этим Шехтмэн указал, что Плутон находится у внешних границ Солнечной системы и свободен от сложностей возмущенного движения линии апсид орбиты Меркурия. Кроме того, Плутон имеет еще больший эксцентриситет, чем Меркурий, так что исследование смещения перигелия Плутона может служить для еще более решающей проверки теории Эйнштейна. Шехтмэн заключил, что характерная особенность орбиты Плутона, обладающего фактически невозмущенным и несложным движением перигелия, делает наблюдательную проверку его апсидального движения чрезвычайно желательной *.

В 1948 и 1949 гг. Джерард Койпер попытался измерить диаметр Плутона с помощью 205-сантиметрового телескопа обсерватории Мак-Дональд. Несмотря на значительные усилия, из-за малой яркости Плутона он не получил надежных результатов. На рис. 4.4 изображены две фотографии Плутона, сделанные Койпером. Позднее Койперу (1950) удалось измерить диаметр Плутона с помощью 500-сантиметрового телескопа Хэйла обсерватории Маунт-Паломар. Работая в сотрудничестве с Хьюмасоном, Койпер помещал в главный фокус телескопа устройство для измерения размеров изображения и наблюдал Плутон с

* Эти рассуждения неверны. Ньютоновское возмущенное движение перигелия орбиты Плутона более сложно, чем в случае Меркурия (см. гл. 6), а эйнштейновское смещение перигелия Плутона совершенно ничтожно. — *Прим. ред.*

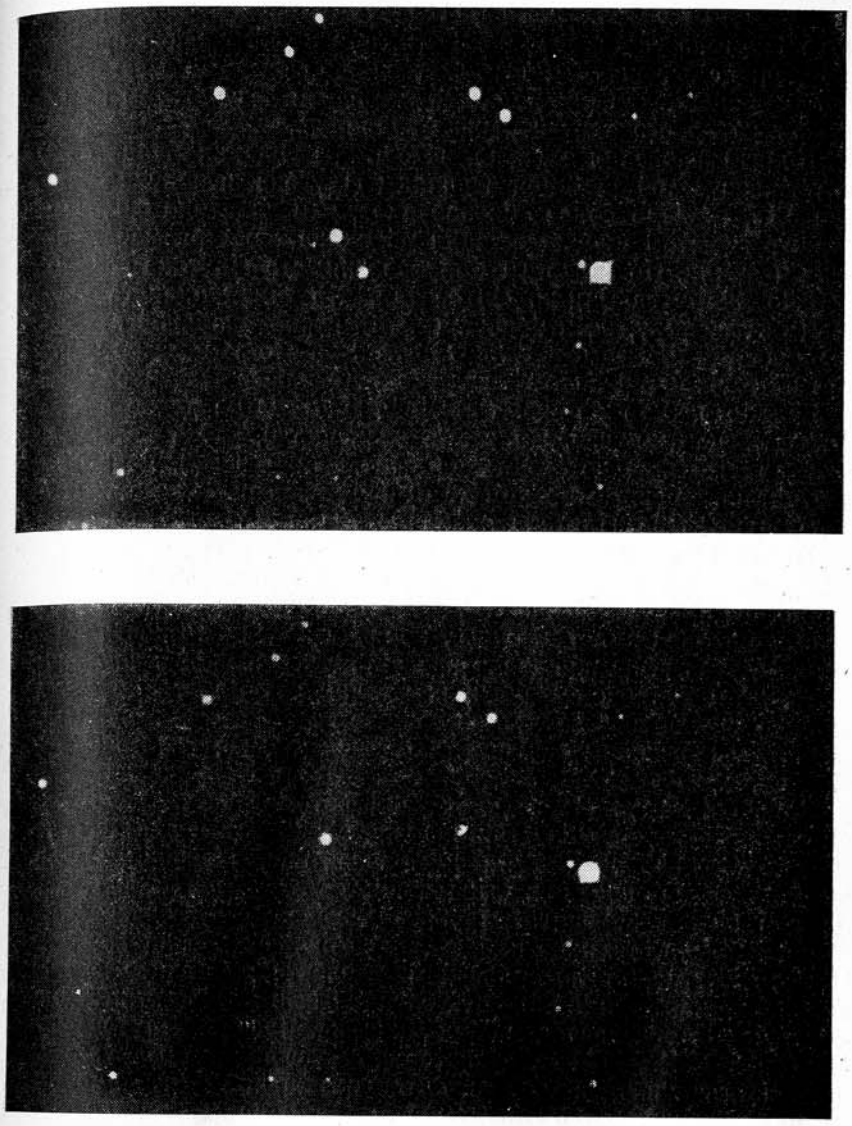


Рис. 4.4

Британское астрономическое общество, № 577. Снимки, полученные Койпером на обсерватории Мак-Дональд с помощью 2,1-метрового рефлектора (главный фокус). *Вверху* — 24 января 1950 г., 7 ч 01 мин UT. Экспозиция 30 мин, полная апертура. *Внизу* — 25 января 1950 г., 6 ч 50 мин UT. Экспозиция 60 мин, диафрагма 1,4 м. Пластинки 103а—О. На втором снимке заметно движение Плутона. Видно много слабых галактик. (С разрешения обсерватории Мак-Дональд).

эффективным увеличением в 1140 раз. Было найдено, что диаметр Плутона составляет 0,021 мм, или 0,23″. Койпер произвел сравнение с освещаемыми искусственными дисками и установил, что указанное значение является реальным результатом измерения, а не просто дает верхнюю границу.

Койпер вычислил альбедо, исходя из оценки Бааде (1934) фотографической звездной величины Плутона, и получил значение 0,17, гораздо более обоснованное, чем значение 0,04, выведенное с учетом предположения об одинаковых размерах Плутона и Земли. По расчетам Койпера диаметр Плутона составляет 0,46 диаметра Земли. Он считал, что такая планета может иметь атмосферу, хотя бо́льшая часть первоначальной атмосферы должна была замерзнуть. Он отметил, что атмосфера и снежная или покрытая льдом поверхность исключают низкое значение альбедо. В то же время альбедо Плутона не может соответствовать чистому снегу и иметь значение 0,7—0,8, потому что снег должен был потемнеть на протяжении веков, покрываясь частицами, заносимыми кометами и метеорами. По оценке Койпера, атмосфера Плутона эквивалентна 0,1 атмосферы Земли.

Позднее Койпер (1953) указал, что если период вращения Плутона имеет величину порядка одних суток или меньше, то планетное происхождение Плутона становится очень вероятным; если же период имеет величину порядка недели, то почти наверняка Плутон сформировался как спутник Нептуна в согласии с медленным вращением внешних спутников. Во всяком случае, Койпер считал массу Плутона слишком малой, чтобы оказывать значительное возмущающее влияние на кометы в зоне за Нептуном.

Уокер и Харди (1955) произвели фотометрическое определение периода вращения Плутона спустя 25 лет после того, как Рассел (1930 а) предложил идею такого определения. Они использовали наблюдения, выполненные Уокером в 1954 г. с помощью 150- и 250-сантиметрового рефлекторов обсерватории Маунт-Вилсон, а также наблюдения Уокера и Харди 1955 г. на 105-сантиметровом ловелловском рефлекторе. Койпер добавил несколько наблюдений 1953 г., сделанных на 205-сантиметровом инструменте обсерватории Мак-Дональд. Яркость Плутона в измерениях 1954—1955 гг. сопоставлялась с яркостью двух соседних звезд сравнения. Для того чтобы уменьшить требуемое время наблюдений, эти звезды были выбраны на две величины более яркими, чем Плутон, и имеющими примерно тот же самый цвет. Поэтому не надо было учитывать ни изменение зенитного расстояния, ни дифференциальную поправку за цвет. Уокер и Харди получили значение периода вращения 6,390±0,003 сут. Они оставили на долю будущих наблюдений выяснение того, сохраняет ли кривая блеска свой вид и не является ли ее амплитуда функцией положения планеты на орбите, что могло бы указать на наклон оси вращения Плутона. Они предполагали, что наблюдали Плутон скорее со стороны экватора, чем со стороны полюса, так как его интегральный блеск менялся с вращением планеты на 0,1 звездной величины. Такое изменение блеска наблюдается в случае Марса, который, конечно, виден со стороны экватора.

Как отметил Ривс (1951), в большинстве работ, посвященных открытию Плутона, не упоминаются фундаментальные исследования Курганова (1941). Вскоре после открытия Плутона Браун (1930, 1931) опубликовал две работы, в которых он пришел к выводу, что вычисления Пикеринга и Ловелла не имели отношения к открытию Плутона, а само это открытие вблизи места, указанного Ловеллом, было случайным. Браун не стремился проанализировать ни одну из работ этих авторов, возможно, потому, что детальный анализ работы Ловелла был бы слишком трудоемким, а метод Пикеринга был скорее эмпирическим, чем аналитическим. Вместо такого анализа Браун сформулировал свои косвенные возражения в четырех главных аргументах:

1) Предсказание, подобное предсказанию Ловелла, опирающееся на старые наблюдения Урана (до 1780 г.) из-за малых невязок современных наблюдений, не имеет значения в силу больших вероятных ошибок старых наблюдений.

2) Фактическая масса Плутона оказалась гораздо меньше предсказанного Ловеллом значения, и, следовательно, возмущения в движении Урана, обусловленные Плутоном, меньше вероятных ошибок наблюдений до 1780 г.

3) Ловелл предсказал соединение между Плутоном и Ураном в 1853 г. просто потому, что эта дата была близка к середине интервала современных наблюдений.

4) Современные невязки в движении Урана не обнаруживают характерных черт, обусловленных возмущениями от транснептуновой планеты.

Браун не задавался целью изучить вопросы, которые следуют из его критических замечаний и которые возникли у других исследователей, в частности у Курганова, а именно: почему Ловелл получил определенное решение; почему предсказания Ловелла и Пикеринга так близко совпали; почему планета X Ловелла обеспечила уменьшение систематических невязок в движении Урана на 99%? Изучая эту проблему, Курганов выделил следующие пять пунктов: 1) возмущения в движении Урана от Плутона; 2) работа Ловелла; 3) работа Пикеринга; 4) обсуждение критики Брауна; 5) общие выводы.

Рассмотрев очевидные свидетельства наличия возмущений от Плутона в движении Урана, Курганов заключил, что возмущения до 1780 г. по величине значительно больше, чем современные возмущения, но эту разницу нельзя целиком объяснить большими систематическими ошибками в старых наблюдениях. Курганов согласен с Брауном, что современные возмущения в

движении Урана слишком малы для предвычисления каких-либо элементов орбиты Плутона. Чтобы проиллюстрировать, насколько близким к действительности оказалось предсказание Ловелла и насколько невероятными были любое совпадение или случайность, Курганов нарисовал диаграмму, представленную на рис. 4.5 (Ривс, 1951).

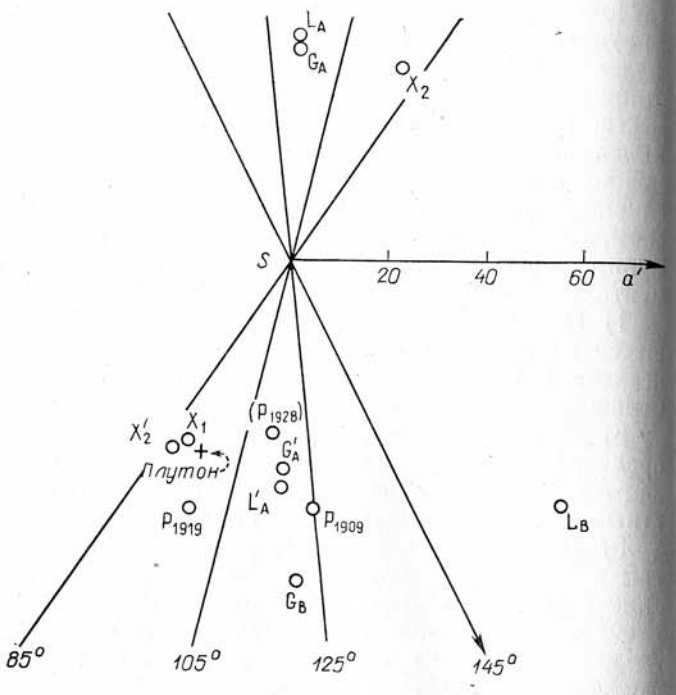


Рис. 4.5

Положения Плутона и «теоретических» планет на эпоху 1920,0. Положения даны в проекции на плоскость эклиптики. Истинное положение Плутона на эпоху 1920,0 отмечено знаком +. Приведены обозначения, использованные разными авторами (X_1 и X_2 — Ловелл; L_A и L_B — Лау; G_A и G_B — Гайо; P_{1909}, P_{1919}, P_{1928} — Пикеринг). Буквы со штрихами указывают симметричные положения. (Это рис. 21 из работы Курганова, см. Ривс, 1951.)

Ловелл получил два диаметрально противоположных решения, которые уменьшили невязки в движении Урана на 99 и 90% соответственно. Хотя сам Ловелл считал разницу в 9% недостаточной, чтобы предпочесть одно решение другому, в действительности Плутон был найден вблизи положения, обеспечивающего 99%-ное уменьшение невязок.

Метод Пикеринга был графическим и, следовательно, носил эмпирический и приближенный характер; тем не менее, как отмечает Курганов, этот метод позволил Пикерингу сделать ряд важных выводов:

1) Успешное предсказание в 1909 г. по невязкам в движении Урана дальнейших возмущений от неизвестной планеты.

2) Предсказание положения транснептуновой планеты в 1919 г. по невязкам в движении как Урана, так и Нептуна.

3) Устранение двойственности решения Ловелла.

4) Успешное предсказание значения наклона и долготы узла орбиты Плутона по невязкам в широте Нептуна.

При обсуждении критических замечаний Брауна Курганов опроверг его аргументы по отдельности. Во-первых, он обнаружил, что наблюдения, выполненные до 1780 г., за немногими исключениями, были гораздо более точными, чем предполагал Браун. Во-вторых, неправильное предсказание Ловеллом значения массы Плутона не влияет на предсказанную им долготу, а масса Плутона хотя и меньше предсказанного значения, все-таки достаточна для того, чтобы вызвать возмущения, объясняющие невязки до 1780 г. Курганов очень детально рассмотрел законность третьего аргумента Брауна и заключил, что соображения Ловелла были обоснованны. Для упрощения сравнений наблюдаемых невязок в движении Урана с возмущениями, обусловленными гипотетической транснептуновой планетой, Браун вывел математическую формулу (1). Курганов подверг сомнению справедливость формулы Брауна, опровергая тем самым его четвертый аргумент. Ривс (1951) отмечает:

«Курганов показывает, что использование Брауном рассматриваемого преобразования в качестве критерия недопустимо по нескольким причинам:

1) в силу характера преобразования оно неприменимо непосредственно к изолированным наблюдениям и, следовательно, к старым невязкам;

2) при выводе преобразования сделано предположение о круговых орбитах; это плохое предположение для орбиты Плутона, имеющей эксцентриситет 0,25;

3) недостаточно преобразовать только современные невязки, так как возмущения в движении Урана существенны только до 1780 г. и вновь начнут проявляться лишь после 1950—1960 гг.

Курганов модифицировал преобразование Брауна и использовал все наблюдения. Он нашел, что как для Урана, так и для Нептуна преобразованные невязки (в окрестности максимальных возмущений) имеют характерную форму возмущений от внешней планеты».

Что касается общего вывода Курганова, мы снова цитируем Ривса (1951):

«Заключение Курганова таково: тезис о «чистой случайности» в отношении открытия Плутона абсолютно неприменим. Плутон был «открыт» Ловеллом в 1915 г. и переоткрыт Пикерингом в 1919 г. методами небесной механики до своего «физи-

ческого» открытия, сделанного Томбо в Ловелловской обсерватории».

Альтер (1952) отметил, что если справедливо значение диаметра Плутона, полученное Койпером, и принято разумное значение для его плотности, то масса Плутона оказывается слишком малой, чтобы обусловить возмущения орбиты Урана, приведшие к его открытию. Альтер развил дальше возможное решение этой проблемы, предложенное сэром Джеймсом Джинсом и приведенное Кроммелином (1934), которое основано на предположении, что поверхность Плутона отражает свет в большей или меньшей степени подобно зеркалу. В таком случае мы наблюдаем солнечный свет, отражающийся только от небольшой области вблизи центра поверхности, но не от ее краев. Неровная поверхность позволила бы нам измерить действительный диаметр. Альтер сообщает об эксперименте, в котором с помощью 30-сантиметрового рефрактора фотографировались четыре освещенных небольших шара одинакового размера, но с поверхностями различных типов. Поверхности шаров были соответственно следующими: полированная сталь, матово-белая краска, алюминиевая краска и, наконец, комбинация темных неровных областей с пятнами алюминиевой краски. Все шары казались имевшими разные диаметры, и Альтер пришел к выводу, что в случае планеты с неизвестными поверхностными характеристиками, как бы тщательно ни измерялся диаметр, мы просто получаем его минимальное значение. Планета может быть такой же по величине, как показывают измерения, но может быть и гораздо больше. По-видимому, единственная надежда провести верные измерения может быть связана с «чрезвычайно трудоемким» методом наблюдения покрытий звезд планетой. Однако даже при этом необходимо значительное число покрытий.

ГЛАВА 5

ЗАПОЛНЕНИЕ БЕЛЫХ ПЯТЕН — II
1957—1972

Койпер (1956) отметил, что предположение о формировании Плутона как протопланеты из первичной солнечной туманности несовместимо с его современными орбитальными характеристиками — большими эксцентриситетом и наклоном. Он исключил возможность того, что орбита Плутона могла быть впоследствии возмущена проходящей мимо звездой, указав на малую вероятность такого события и на то обстоятельство, что почти круговая орбита Нептуна, видимо, не подвергалась сильным возмущениям. Вместо этого он предположил, что Плутон первоначально образовался как спутник прото-Нептуна. Гипотеза Койпера отличается от гипотезы Литлтона (1936), согласно которой Плутон и Тритон первоначально оба были спутниками Нептуна до их тесного сближения, в результате которого движение Тритона стало обратным, а Плутон был выброшен из системы. Койпер считал, что Плутон мог сохранить большой период вращения, как следствие своего происхождения в качестве спутника Нептуна. Фотометрические наблюдения Плутона, начавшиеся в 1952 г. и достигшие высшей точки в работе Уокера и Харди (1955), установили значение периода вращения 6,4 сут.

Рабе (1954) использовал результаты ограниченной задачи трех тел, и в частности интеграл Якоби

$$V^2 = \frac{2}{r} + r^2 + \left(\frac{2}{p} + p^2\right)\mu - C, \tag{9}$$

где r и p — расстояния спутника от Солнца и от планеты соответственно в единицах расстояния между Солнцем и планетой, C — постоянная Якоби, μ — масса планеты, а V — скорость спутника во вращающейся системе координат ограниченной задачи трех тел.

По предложению Койпера Рабе (1957 а) добавил переменные массы прото-Юпитера и прото-Сатурна к солнечной массе M для изучения эволюции орбиты Плутона при совместном уменьшении масс Нептуна, Юпитера и Сатурна. Включение двух переменных масс M и μ означает, что уравнение (9) должно быть переписано в виде

$$V^2 = M\left(\frac{2}{r} + r^2\right) + \mu\left(\frac{2}{p} + p^2\right) - C, \tag{1}$$

где r и p — расстояние спутника от M и μ соответственно, V — его линейная скорость во вращающейся системе координат, а C — переменная Якоби.

Из уравнения (1) следует, что совместное уменьшение масс dM и $d\mu$ приведет к следующему изменению C:

$$dC = \left(\frac{2}{r} + r^2\right) dM + \left(\frac{2}{p} + p^2\right) d\mu. \qquad (2)$$

Здесь dM и $d\mu$ отрицательны при убывающих массах, и, следовательно, C будет уменьшаться. Если движение спутника не происходит в плоскости движения масс M и μ, то должен быть учтен член для координаты z:

$$V^2 = M\left(\frac{2}{r} + r^2\right) + \mu\left(\frac{2}{p} + p^2\right) - (M + \mu) z^2 - C \qquad (3)$$

и уравнение (2) приобретает тогда следующую форму:

$$dC = \left(\frac{2}{r} + r^2\right) dM + \left(\frac{2}{p} + p^2\right) d\mu - z^2 (dM + d\mu). \qquad (4)$$

Рабе (1957 a) использовал уравнение (3) и значения r, z и V, данные Эккертом, Брауэром и Клеменсом (1951) для того, чтобы вычислить C на произвольную дату — июль 10,0, 1921. Полученный результат $C = 2{,}901$ и современная орбита Плутона согласуются с предположением Койпера (1956) о происхождении Плутона в системе прото-Нептуна при условии, что общая потеря массы протопланет dM после выбрасывания Плутона из системы Нептуна составляла 0,04 массы Солнца. По оценкам Койпера (1957), масса самого Нептуна уменьшилась за счет испарения под влиянием Солнца в 40 раз до выброса Плутона.

Рабе (1957b) заметил, что, хотя вышеприведенные результаты вполне удовлетворительны, из них не следует, что начальное среднее движение Плутона как планеты было столь же близким к соизмеримости 2 : 3 со средним движением Нептуна, как в наше время. Он предположил, что дальнейшая орбитальная эволюция после выброса из системы прото-Нептуна привела к постепенному достижению современной близкой соизмеримости. Вышеупомянутая потеря масс протопланет dM, происшедшая после выброса Плутона, вызвала увеличение угла эксцентриситета φ от 11° до современного значения 14,4°, а также увеличение наклона i по сравнению с его неизвестным начальным значением.

Гипотеза Койпера (1956) о спутнике прото-Нептуна, подкрепленная вычислениями Рабе (1957 a, b), должна была реализовываться на более ранней стадии развития Солнечной системы, чем гипотеза Литлтона (1936) взаимодействия пары Тритон — Плутон. Голдрайх и Сотер (1966) предположили, что до своего взаимодействия и Плутон, и Тритон имели орбиты с прямым движением, лежащие в экваториальной плоскости Нептуна или вблизи нее, причем неодинаковая приливная эволюция в конце концов привела их к тесному сближению. В случае если масса Плутона не слишком превосходит массу Тритона, такое сближение могло при сохранении момента количества движения изменить направление движения Тритона и выбросить Плутон, придав орбитам обоих тел значительные эксцентриситеты и наклоны. Голдрайх и Сотер указали, что гипотеза Литлтона поддерживается найденным Уокером и Харди (1955) значением 6,39 сут для периода вращения Плутона. Действительно, если период синхронного обращения Плутона вокруг Нептуна когда-то имел такое значение, то Плутон должен был находиться за пределами современной орбиты Тритона, который имеет период 5,88 сут. Приливы, вызываемые Тритоном на Нептуне и в особенности приливы, вызываемые Нептуном на Тритоне, должны были затем в течение $\sim 10^{17}$ с ($\approx 3 \cdot 10^9$ лет) погасить значительный эксцентриситет орбиты Тритона, появившийся в результате тесного сближения с Плутоном.

Голдрайх и Сотер отметили, что подобный приливной механизм мог бы уменьшить эксцентриситет Тритона и в случае его захвата на обратную орбиту. Они также указали, что повышающаяся таким образом вероятность гипотезы Литлтона делает правдоподобным менее аномальное значение плотности Плутона, чем значение ~ 50 г/см^3, требуемое для того, чтобы планета диаметром, соответствующим данным Койпера, могла вызвать возмущения в движении Урана и Нептуна. Они предполагают, что возмущения могут быть приписаны транснептуновому поясу комет, существование которого было постулировано Уипплом (1964). Если, как требуется гипотезой Литлтона, масса Плутона не намного больше массы Тритона, скажем, не более чем вдвое, то плотность Плутона станет меньше $\sim 2{,}3$ г/см^3, что согласуется со значениями, найденными для спутников больших планет.

Мак-Корд (1966) детально исследовал динамическую эволюцию системы спутников Нептуна и подтвердил, что механизм приливного трения мог привести даже очень эксцентричную орбиту Тритона к ее современному виду за время существования Солнечной системы. По его мнению, Тритон будет быстро приближаться к Нептуну, в течение 10—100 миллионов лет достигнет предела Роша и разрушится. Мак-Корд считает происхождение Тритона путем захвата вполне возможным, но также не исключает и гипотезы столкновения Тритон — Плутон.

Коэн и Хаббард (1964, 1965) исследовали эволюцию орбиты Плутона путем численного интегрирования уравнений движения пяти внешних планет на интервале более чем 120 000 лет назад от нашей эпохи. Вычисления производились на машине NORC в Лаборатории ВМС США со скоростью ~ 1500 лет за час машинного времени. При этом использовались данные Эккерта, Брауэра и Клеменса (1951). Программа давала геометрические

характеристики каждого относительного минимума расстояния между Плутоном и Нептуном.

Первое тесное сближение AA' пришлось на календарную дату август 27, 1896, когда средняя аномалия Плутона составляла 210° и Плутон отставал от Нептуна на 6° по истинной долготе, а расстояние между ними было 19 а. е. В течение одного синодического периода, равного примерно 500 лет, когда Плутон совершает 2 оборота, а Нептун — 3, имеют место два других относительных минимума BB' и CC', при которых взаимные расстояния составляют 25 и 52 а. е. соответственно. Эти минимумы наступают, когда Плутон находится вблизи перигелия. При последовательных синодических периодах координаты Плутона и Нептуна испытывают либрацию с периодом ~19 670 лет, как это очевидно из графика изменения расстояния при тесном сближении AA' или из графика значений истинной аномалии Плутона в момент наиболее тесного сближения. Последний график изображен на рис. 5.1 (Коэн, Хаббард, 1965).

На рис. 5.2 (Коэн, Хаббард, 1965) показана картина положений и движений при тесных сближениях. Орбиты здесь даны в проекциях на неизменную плоскость. Верхний ряд на этом рисунке охватывает синодический период, когда либрация положений при тесном сближении достигает своего первого экстремума приблизительно 1500 лет назад от нашей эпохи. Здесь показано положение Плутона и Нептуна при последовательных тесных сближениях AA', BB' и CC' на протяжении этого синодического периода. Второй ряд показывает положения при сближениях AA', BB' и CC' в течение синодического периода на 5000 лет раньше, а положения третьего ряда отстоят еще на 5000 лет назад. Все три ряда охватывают половину периода либрации; до этого интервала времени и после него движение происходит в обратном порядке и периодически повторяется.

Либрация при тесных сближениях может быть выражена в классических переменных путем представления угла отклонения фаз Плутона и Нептуна от соизмеримости в виде

$$\delta = 3\lambda_P - 2\lambda_N - \tilde{\omega}_P - 180°,$$

где λ — средняя долгота, $\tilde{\omega}$ — долгота перигелия, а P и N — индексы для Плутона и Нептуна соответственно. Угол δ осциллирует относительно среднего значения 180° с амплитудой 76° и с периодом 19 670 лет.

Помимо средней аномалии, другие элементы орбиты Плутона также подвержены изменениям. Большая полуось a испытывает изменения с периодом 19 670 лет и амплитудой 0,14 а. е. Эксцентриситет e обнаруживает уменьшение на 0,005 в 120 000 лет с периодом не менее 1 млн. лет. Наклон i возрастает примерно на 0,2° в 120 000 лет и также имеет период не менее 1 млн. лет. Узел отступает по орбите приблизительно на 9,5° в 100 000 лет,

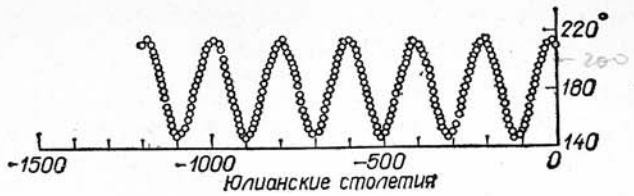


Рис. 5.1

Истинная аномалия Плутона при тесном сближении AA' (Коэн, Хаббард, 1965).

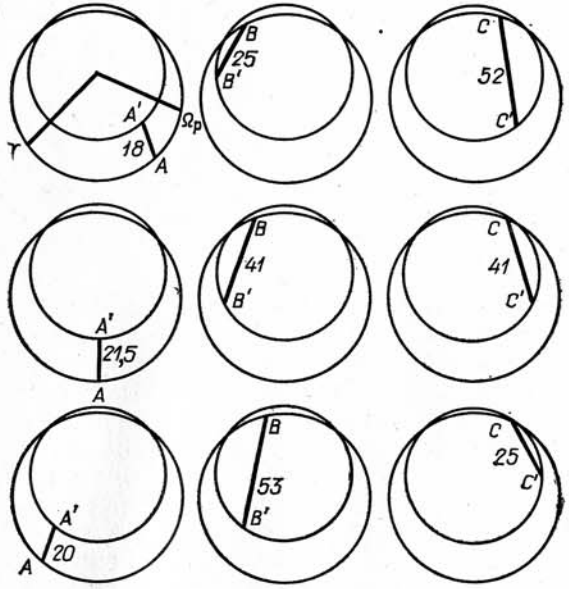


Рис. 5.2

Либрация тесных сближений; расстояния даны в а. е. (Коэн, Хаббард, 1965).

что дает период 4 млн. лет. Аргумент перигелия, имевший в начальную эпоху значение 113,6°, возрастает со скоростью 1,2° за 100 000 лет, совершая полный оборот по орбите за 30 млн. лет.

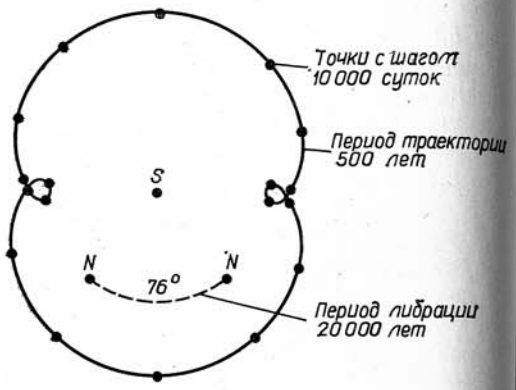
Механизм либрации может быть наглядно представлен с помощью рис. 5.3. Коэн, Хаббард и Остервинтер (1979) дают следующее объяснение:

«Траектория Плутона изображается в гелиоцентрической системе координат, вращающейся с угловой скоростью Нептуна. Орбита Плутона нарисована для синодического периода, а две петли соответствуют двум последовательным прохождениям Плутона через перигелий. В течение периода либрации, состав-

ляющего 80 оборотов Плутона, синодическая траектория испытывает вращательные колебания вокруг точки S относительно линии Солнце — Нептун. Вместо изображения либрации траектории при фиксированном положении Нептуна N рисунок показывает движение Нептуна $N — N$ относительно синодической траектории. Заметим, что направление движения относительно

Рис. 5.3

Траектория Плутона в синодической системе Солнце — Нептун в граничных точках либрации (Коэн, Хаббард, 1965).



вращающейся системы, как показано на рисунке, противоположно направлению относительно невращающейся инерциальной системы. Рассмотрим направление и величину возмущающего ускорения, обусловленного действием Нептуна на Плутон, соединяя положения Нептуна и Плутона, когда Нептун находится в экстремальных точках либрации. Чтобы выделить компоненту этой силы, оказывающую главное влияние на движение Плутона, возьмем компоненту, которая перпендикулярна линии Солнце — Плутон. Среднее по времени от этой компоненты, взятое вдоль синодической траектории, как легко видеть, будет в основном определяться компонентой, соответствующей положению Плутона в ближайшей к Нептуну петле перигелия. Таким образом, ясно, что тангенциальная компонента силы в среднем ускоряет Плутон в направлении его движения в инерциальной системе, когда Нептун находится в левой половине дуги $N — N$ (рис. 5.3), и в направлении, противоположном его движению, когда Нептун находится в правой половине этой дуги. На основе соображений, касающихся энергии и периода, очевидно, что Нептун ускоряется вправо, когда он находится в левой половине дуги относительно синодической траектории, и ускоряется влево, когда находится с правой стороны. Этот процесс можно сравнить с движением маятника, поскольку Нептун движется вперед и назад по дуге $N — N$. Сила, которая вызывает это либрационное движение Нептуна, может быть интерпретирована как взаимное отталкивание между Нептуном и петлями перигелия Плутона».

В силу либрации около отношения соизмеримости минимальное расстояние сближения Плутона с Нептуном составляет около 18 а. е. и достигается вблизи афелия. Поэтому очень тесное сближение, которое могло бы произойти вблизи перигелия и сильно возмутить орбиты планет, совершенно исключается. Это серьезно ослабляет гипотезу, что Плутон был когда-то связан с системой спутников Нептуна.

Коэн и Хаббард (1965) использовали данные об орбите Плутона, опубликованные Эккертом, Брауэром и Клеменсом (1951), которые в свою очередь основывались на элементах Плутона, полученных Бауэром (1931). В 1967 г. Коэн, Хаббард и Остервинтер повторили работу 1965 г., расширив протяженность исследуемого интервала до 300 000 лет и использовав улучшенные элементы орбиты Плутона при сохранении значений 1951 г. для остальных планет. Орбита Плутона была улучшена по методу наименьших квадратов с использованием наблюдений, сделанных между 1914 и 1965 гг. Некоторые из этих наблюдений ранее не публиковались.

Из работы Шараф (1955) были взяты результаты 14 наблюдений до открытия, а из работы Шараф и Будниковой (1964) — 33 нормальных места в интервале 1930—1958 гг. Всего было использовано 183 наблюдения, полученных с помощью 60-сантиметрового Йеркского и 215-сантиметрового Мак-Дональдского рефлекторов. Кроме того, использовалось более 300 наблюдений, сделанных главным образом Лампландом на 105-сантиметровом рефлекторе Ловелловской обсерватории. Данные 21 наблюдения Йеркской обсерватории, опубликованных ван Бисбруком (1963) и 9 наблюдений, использованных Холидеем и сотрудниками (1966) в их работе по покрытиям, дополняли наблюдательный материал. Для получения весов различных групп наблюдений использовались четыре отдельных решения, по одному на каждую группу данных — отдельно для данных Шараф — Будниковой, обсерваторий Йеркс — Мак-Дональд, Ловелловской обсерватории, и, наконец, для данных Холидея.

Орбита Плутона, а также орбиты Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна были рассчитаны с помощью численного интегрирования. Новые элементы, полученные для Плутона, существенно отличаются от элементов Эккерта, Брауэра и Клеменса (1951), что и неудивительно. В табл. 10 (Коэн, Хаббард, Остервинтер, 1967) сравнены две системы элементов.

Коэн, Хаббард и Остервинтер (1967) уточнили параметры либрации, получив значение периода 19 440 лет и значение амплитуды 80°. В 1971 г. они распространили свой интервал интегрирования до 1 000 000 лет.

Вильямс и Бенсон (1971) проинтегрировали уравнения движения Плутона на интервале 2,1 млн. лет вперед и 2,4 млн. лет назад. Для начала интегрирования они использовали элементы Коэна и коллег (1967). При интегрировании уравнений движе-

Таблица 10

СТАРЫЕ И НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ ПЛУТОНА (КОЭН, ХАББАРД, ОСТЕРВИНТЕР, 1967)

Элемент	Коэн, Хаббард, Остервинтер (1967) Эпоха: JD2430000,5	Эккерт и др. (1951) Эпоха: JD2430000,5	Разность
a, а.е.	39,53322	39,51811	0,01511
e	0,2460034	0,2459386	0,0000648
i	17,122886°	17,122599°	0,000287°
M	289,35427°	289,27952°	0,07475°
ω	113,27485°	113,34253°	—0,06768°
$M+\omega$	42,62912°	42,62205°	0,00707°
Ω	109,606471°	109,606852°	—0,000381°

ния Плутона они сделали несколько упрощающих предположений. Влияние четырех внутренних планет учитывалось приближенно путем присоединения их масс к массе Солнца. Значение, использованное для величины обратной массе Плутона, составляло 1 812 000 в единицах массы Солнца (Данком, Клепчинский и Сейделмен, 1968a, b). В табл. 11 (Вильямс, Бенсон, 1971) даны принятые значения масс внешних планет.

Вильямс и Бенсон подтвердили и уточнили значение периода либрации, равное 19 951 лет, на интервале интегрирования в 4,5 млн. лет. Они нашли, что либрация совершенно устойчива и возможны лишь изменения ее среднего значения, приводящие к увеличению минимального расстояния сближения с Нептуном и повышающие тем самым устойчивость системы. В предположении, что эта устойчивость на промежутке интегрирования соответствует устойчивости на протяжении всего возраста Солнечной системы, можно заключить, что либрация Нептун — Плутон возникла еще в период формирования Солнечной системы. Авторы считают, что, прежде чем предпринимать интегрирование уравнений движения Плутона на еще более длительном интервале, желательно уточнить модель Солнечной системы.

Трудности, с которыми встретились Фиксмиллнер, Деламбр и Бувар (см. гл. 1) в попытках вычислить орбиту Урана, которая удовлетворяла бы как старым, так и новым наблюдениям,

Таблица 11

ОБРАТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МАСС ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ (ВИЛЬЯМС, БЕНСОН, 1971)

Планета	$M_\odot$/(масса планеты)	Планета	$M_\odot$/(масса планеты)
Юпитер	1047,35	Нептун	19314,0
Сатурн	3501,6	Плутон	1812000,0
Уран	22869,0		

по-видимому, встают и перед современными исследователями, пытающимися найти решение для орбиты Нептуна. Данком, Клепчинский и Сейделмен (1968a, b) указывают на очевидную неспособность как прошлых, так и современных теорий движения Нептуна представить другие наблюдения, помимо тех, которые были первоначально использованы при построении данной теории. Например, теория Ньюкома (1899), которая была в хорошем согласии с наблюдениями 1795 и 1846—1896 гг., оказалась не в состоянии представить наблюдения в долготе с точностью лучшей 5″ к 1938 г. даже при дополнительном учете возмущений от Плутона. Теория движения Нептуна, разработанная Эккертом, Брауэром и Клеменсом (1951), которая учитывала влияние Плутона с обратным значением его массы 360 000 и удовлетворяла наблюдениям 1795 и 1846—1938 гг., привела к отклонениям в наблюдаемой долготе Нептуна примерно в 4″ к 1960 г.

Данком и его коллеги (1968 a, b) предположили, что эти неудачи указывают на необходимость другого значения массы Плутона. Они выполнили численное интегрирование уравнений движения пяти внешних планет для четырех разных значений обратной массы Плутона: 360 000, 930 000, 1500 000, 2640 000. Наилучшим должно было считаться то значение массы Плутона, при котором решение, построенное по наблюдениям 1846—1938 гг., лучше всего представляет наблюдения долготы на период 1960—1968 гг. Подобно Бувару (1821), отбросившему в свое время данные ранних наблюдений Урана (см. гл. 1), Данком и его коллеги опустили в своих вычислениях результаты наблюдений 1795 г., обосновывая свое решение во многом теми же причинами, что и Бувар.

На рис. 5.4 показаны невязки О—С в долготе орбиты λ и широте β по теории Эккерта, Брауэра и Клеменса с обратным значением массы Плутона 360 000.

Та же процедура была выполнена для других принятых значений масс. В результате было найдено, что лучше всего согласуется с наблюдениями значение обратной массы 1 812 000. Окончательная орбита, полученная с этой массой Плутона и построенная по наблюдениям 1846 — 1938 гг., удовлетворяет наблюдениям 1960—1968 гг. (рис. 5.5).

Если плотность Плутона предполагать равной плотности Земли, то новое значение его массы (равное 0,18 массы Земли) приводит к значению диаметра 7200 км. Однако если принять верхнюю оценку 6400 км для диаметра Плутона, найденную Холидеем и др. (1966), то плотность Плутона должна быть по крайней мере в 1,4 раза больше плотности Земли.

Данком, Клепчинский и Сейделмен заключили, что дальнейшее уточнение массы Плутона и элементов орбиты Нептуна должно быть отложено до завершения обработки наблюдений Нептуна, выполняющейся в Морской обсерватории США.

Холидей (1969) отметил, что значение плотности Плутона, предложенное Данкомом и др. (1968a, b) и превышающее плотность Земли в 1,4 раза, является более допустимым, чем гораздо бо́льшие значения, предлагавшиеся ранее на основании более высоких оценок массы Плутона. Но даже это более низкое значение близко к плотности железных метеоритов, а такой состав

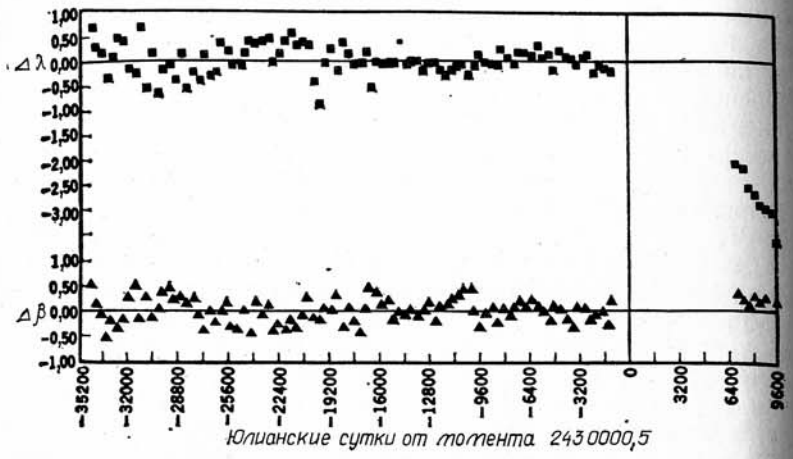


Рис. 5.4

Разности наблюдаемых и вычисленных значений долготы и широты Нептуна для обратного значения массы Плутона, равного 360 000.

Плутона, по мнению Холидея, несовместим с теориями образования Солнечной системы. Он указал на две причины, ставящие под сомнение определение массы Плутона на основе наблюдений Нептуна:

I) Невязки в долготе могут быть отягчены невыявленными систематическими ошибками.

II) Принятые значения масс Юпитера, Сатурна и Урана также могут быть неточными.

В связи со вторым предположением Холидей заметил, что даже небольшая поправка к значениям масс Сатурна и Урана может оказать влияние на Нептун, достаточное, чтобы привести к еще меньшему значению массы Плутона. Холидей предложил провести вычисление невязок для Нептуна, используя решения с одновременным изменением масс Сатурна, Урана и Плутона.

Данком, Клепчинский и Сейделмен (1970, 1971) повторили свой анализ 1968 г. движения Нептуна на основе того же наблюдательного материала, но с использованием новых обратных значений масс Сатурна и Урана — 3498,7 и 22692 соответственно. Они нашли обратное значение массы Плутона 1 900 000

(0,17 массы Земли), что несущественно отличается от их результата 1968 г. (0,18 массы Земли).

Будет очень полезным повторить анализ движения Урана, используя гораздо более точные значения массы Сатурна, полученные в результате полетов космических аппаратов «Пионер-11», «Вояджер-1» и «Вояджер-2». Позднее можно будет уточнить значения масс Урана и Нептуна, если «Вояджер-2» пройдет мимо этих планет. Однако в настоящее время не планируется никаких космических полетов, которые обеспечили бы непосредственное определение массы Плутона.

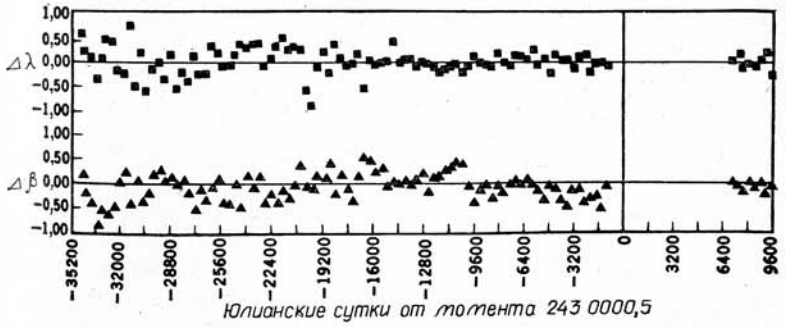


Рис. 5.5

Разности наблюдаемых и вычисленных значений долготы и широты Нептуна для обратного значения массы Плутона, равного 1 812 000 (Данком, Клепчинский, Сейделмен, 1968 *b*).

Сейделмен, Клепчинский и Данком (1971) подтвердили свое прежнее заключение (Данком, Клепчинский и Сейделмен, 1968a, b), что всякое уточнение значения массы Плутона должно быть отложено до завершения обработки наблюдений Нептуна, проведенных в Морской обсерватории. Они выполнили совместное численное интегрирование орбит пяти внешних планет, используя пересмотренные значения масс Сатурна и Урана (Данком, Клепчинский, Сейделмен, 1970) и ряд значений массы Плутона. Использованные конкретные обратные значения массы Плутона составляли 1 812 000, 2 500 000, 3 624 000 и 5 436 000. Наилучшим значением массы Плутона считалось то, которое обеспечивало для орбиты Нептуна, построенной по наблюдениям 1846 — 1938 гг., наилучшее согласие с наблюдениями долготы 1939 — 1968 гг. Как и следовало ожидать, значения массы Плутона, определенные по наблюдениям различных периодов, оказались весьма противоречивыми. Обратное значение массы, равное 2 848 000, дало наилучшее решение для наблюдений 1939—1968 гг., в то время как при использовании наблюдений только 1960 — 1968 гг. наилучшим значением было

3 473 000. По этой причине Сейделмен и сотрудники решили принять округленное обратное значение массы Плутона, равное 3 000 000 (0,11 массы Земли), считая его наиболее правдоподобным значением, основанным на всех доступных им данных наблюдений. Это значение массы в комбинации с верхним пределом 6400 км для диаметра Плутона дает плотность 4,86 г/см³, или 0,88 средней плотности Земли. Если же предполагать плотности Плутона и Земли одинаковыми, то значение диаметра Плутона станет 6112 км.

Эш, Шапиро и Смит (1971) дали сводку наиболее надежных оценок масс всех больших планет. Они обрисовали три главных метода получения таких оценок:

I. Небесно-механические эксперименты с использованием космических аппаратов, пролетающих вблизи планеты.

II. Применение третьего закона Кеплера к наблюдениям периода движения спутника и его среднего расстояния от планеты.

III. Наблюдения резонансных, долгопериодических и короткопериодических эффектов возмущающего действия одной планеты на другую.

Нужно отметить, что метод III был до недавнего времени единственным возможным методом определения массы Плутона, в то время как метод II стал применяться начиная с 1978 г. (Кристи и Харрингтон), а метод I не будет доступен еще достаточно долго. Эш и др. пришли к выводу, что масса Плутона не может быть надежно определена из имевшихся данных с помощью метода III, который в то время был единственно возможным.

Киладзе (1968) предложил определять массу планеты, используя известные значения ее радиуса и периода вращения, с помощью соотношения

$$\lg(Q\sqrt{R}) = -0{,}93 + \frac{7}{3}\lg m - 0{,}17m^{0{,}38}, \qquad (1)$$

где Q — кинетический момент планеты, R — радиус ее орбиты, а m — масса планеты в единицах массы Земли.

Если Q в формуле (1) выразить через массу, радиус и период вращения планеты, массу выразить через плотность и радиус планеты и подставить уже известные значения радиуса орбиты и периода вращения, то при отбрасывании малых членов получим следующее соотношение:

$$q^2r^3 \approx 0{,}05, \qquad (2)$$

где q — плотность планеты в единицах плотности Земли, r — радиус планеты, выраженный в радиусах Земли.

Киладзе отметил, что поскольку плотность Плутона, вероятно, не превышает плотности Земли, то формула (2) дает нижний предел для радиуса Плутона 0,37. В то же время нижний предел плотности Плутона составляет 0,6 плотности Земли.

Комбинация этих значений приводит к значениям массы Плутона от 0,05 до 0,09 массы Земли. Киладзе рассматривает значение радиуса 0,46 как наиболее вероятное значение, которое соответствует плотности 0,72 (4 г/см³). Результирующая масса Плутона составляет тогда 0,07 массы Земли. Киладзе замечает также, что если период вращения Плутона не равен 6,39 сут (Харди, 1965а), а имеет вдвое большее значение, то тогда масса Плутона составит 0,04 массы Земли. По его заключению, столь малая масса Плутона означает, что возмущения в движении Урана и Нептуна могут быть объяснены только влиянием какого-то неизвестного тела, возможно десятой планеты Солнечной системы.

Камерон (1962) предположил, что в результате конденсации первичного газопылевого облака и образования Солнца и планетной системы на периферии Солнечной системы должна содержаться значительная масса в виде малых твердых частиц. По мнению Уиппла (1964), такая масса может существовать в форме кометного пояса. Этот кометный пояс, слишком слабый для наблюдений с наземными инструментами, может быть обнаружен по его гравитационному влиянию на внешние планеты. По расчетам Уиппла, кометный пояс, содержащий, возможно, от 10 до 20 масс Земли, может существовать на расстоянии от 40 до 50 а. е. от Солнца.

В случае Нептуна предположение о существовании кометного пояса приводит к несколько лучшему уравниванию широтных наблюдений, чем предположение о влиянии возмущений от Плутона. Любое из этих предположений уменьшает сумму квадратов невязок более чем втрое, т. е. довольно существенным образом. Для Урана ни одно из этих предположений не приводит к существенно лучшему уравниванию. Ни одно из предположений не улучшает значительно уравнивания в долготе ни для Урана, ни для Нептуна. Уиппл указывает, что масса Плутона слишком мала для объяснения возмущений в движении Урана и Нептуна и это может служить поддержкой в пользу предположения о существовании кометного пояса за Нептуном.

Сейделмен (1971) исследовал возможность того, что наблюдаемые невязки в движении Урана и Нептуна могут быть объяснены влиянием неизвестной планеты или нескольких планет за Плутоном. Он отметил, что существование такой планеты предполагалось ранее Шютте (1949), Нэфом (1955), Роулинсом (1970) и Ганном (1970). Он использовал программу численного интегрирования, употреблявшуюся Данкомом и его сотрудниками (1968a, b), а также другими исследователями, так как с ее помощью можно было легко учесть влияние дополнительных планет. Сейделмен выбрал три гипотетические планеты: S 1, P 1 и P 2. При этом первые две планеты в основном идентичны гипотетическим планетам S и P, предложенным Пикерингом (1931c), в то время как P 2 — это планета Пикеринга P, но с бо-

лее правдоподобным значением массы. Слишком большая масса гипотетической планеты означала бы, что эта планета должна быть достаточно большой и яркой и непременно была бы обнаружена во время систематических поисков Томбо (1961). Томбо пришел к заключению, что возможность существования неоткрытой планеты ярче 16-й звездной величины исключается и что любая планета от 16-й до 17-й величины имела бы хорошие шансы быть обнаруженной. Элементы трех гипотетических планет Сейделмена приведены в табл. 12 (Сейделмен, 1971).

Таблица 12

ОРБИТАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТ ДЛЯ ЭКВАТОРА И РАВНОДЕНСТВИЯ 1950,0 НА ЭПОХУ 2430000,5 (СЕЙДЕЛМЕН, 1971)

	P1	P2	S1
Средняя аномалия	141°26′51,898″	141°26′51,898″	141°26′51,898″
Аргумент перигелия	170°30′	170°30′	0°
Долгота узла	351°	351°	271°
Наклон	37°	37°	30°36′
Эксцентриситет	0,265	0,265	0,0
Большая полуось, а.е.	75,5	75,5	48,3
Обратная масса	7000	300 000	3 000 000
Оценка звездной величины	13,6	16,1	15,7

Три гипотетические планеты были по отдельности введены в вычисления со значениями орбитальных элементов, масс и звездных величин, указанными в табл. 12. Результаты интегрирования показывают, что гипотетическая планета P 1 оказала бы такое сильное возмущающее влияние на внешние планеты, в результате которого невязки увеличились бы, а не уменьшились. Кроме того, такая яркая планета ($13{,}6^m$) к настоящему времени почти наверняка была бы открыта. Если же масса уменьшалась так, что яркость планеты ослаблялась до допустимого уровня, то она больше не оказывала ощутимого влияния на невязки. Точно так же планета S 1 со звездной величиной, равной 15,7, не влияет существенно на движение внешних планет в течение периода наблюдений. Сейделмен пришел к выводу, что если и есть некоторые свидетельства существования трансплутоновых планет, основанные, в частности, на рассмотрении афелиев ряда семейств комет, то такие планеты должны оказывать незначительное влияние на движение известных планет, за исключением маловероятного случая тесного сближения.

Однако, по утверждению Брэди (1972), нет логических оснований предполагать, что Плутон является самой крайней планетой в Солнечной системе. Поскольку влияние возмущающего тела прямо пропорционально эксцентриситету орбиты возмущаемого тела, трансплутоновая планета возмущала бы объекты с большими эксцентриситетами типа кометы Галлея гораздо более ощутимо, чем большие планеты. Он провел численно-графический эксперимент, чтобы определить, можно ли улучшить предвычисленную орбиту кометы Галлея путем учета влияния гипотетической планеты за Плутоном. Брэди установил, что гипотетическая планета с орбитальными элементами, приведенными в табл. 13 (Брэди, 1972), уменьшила бы невязки во времени прохождения через перигелий кометы Галлея на 93% для орбиты 12а (1910—1456 гг.). Влияние гипотетической планеты на невязки в движении кометы Галлея показано в табл. 14 (Брэди, 1972).

Таблица 13

ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ТРАНСПЛУТОНОВОЙ ПЛАНЕТЫ (БРЭДИ, 1972) ДЛЯ ЭКВАТОРА И РАВНОДЕНСТВИЯ 1959,0 И ЭПОХИ 2419326,5 (1911, ОКТЯБРЬ 16,5)

Аргумент перигелия	181°
Долгота узла	115,75°
Наклон	120°
Эксцентриситет	0,07
Большая полуось, а. е.	59,93575
Обратная масса	90 000
Период, годы	464
Радиус-вектор	63,491

Таблица 14

НЕВЯЗКИ В ДВИЖЕНИИ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ С УЧЕТОМ И БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТРАНСПЛУТОНОВОЙ ПЛАНЕТЫ (БРЭДИ, 1972)

Год появления	ΔT, сут Орбита 12 а, 9 планет	ΔT, сут Орбита 52 В, 10 планет
1910	0,0	0,0
1835	0,0	—0,8
1759	+4,2	—0,8
1682	+8,2	—3,0
1607	+42,6	—2,7
1531	+53,5	+2,5
1456	+49,6	+3,9

Однако для того, чтобы влияние гипотетической планеты на комету стало заметным, комета должна наблюдаться в трех или больше появлениях и иметь достаточно большое афелийное расстояние. При этих условиях можно отделить искомый эффект от ошибок наблюдений. Только две кометы — комета Ольберса и комета Понса — Брукса — удовлетворяют этим условиям. Орби-

ты этих комет интегрировались подобно орбите кометы Галлея с учетом и без учета гипотетической планеты. Влияние планеты явственно сказывается в уменьшении невязок в табл. 15 (Брэди, 1972).

Таблица 15

НЕВЯЗКИ В ДВИЖЕНИИ КОМЕТ ОЛЬБЕРСА И ПОНСА—БРУКСА С УЧЕТОМ И БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТРАНСПЛУТОНОВОЙ ПЛАНЕТЫ (БРЭДИ, 1972)

Год появления	ΔT, сут 9 планет	ΔT, сут 10 планет
	Комета Ольберса	
	Орбита A	Орбита B
1815	0,0	0,0
1887	—0,5	0,0
1956	+5,0	+1,5
	Комета Понса—Брукса	
	Орбита C	Орбита D
1954	0,0	0,0
1884	—4,6	0,0
1812	—7,2	—4,1

Планета, существование которой постулировал Брэди, должна двигаться вокруг Солнца на удвоенном расстоянии Нептуна по орбите с наклоном 120°. Ее гипотетическая масса в три раза больше массы Сатурна, а вероятный блеск этой планеты соответствует 13-й или 14-й звездной величине. Как такая планета могла избежать обнаружения при поисках Томбо? Брэди указывает, что в течение 16-летнего периода поисков с 1929 по 1946 г. вся траектория планеты лежала вне области, охваченной поисками (рис. 5.6) (Брэди 1972).

Фосс, Шейв-Тейлор и Уитворт (1972) провели фотографические поиски гипотетической планеты Брэди (1972) в области, простирающейся по крайней мере на 3,5° в любом направлении от предвычисленного положения. С помощью 33-сантиметрового астрографа Гринвичской обсерватории были сняты две серии пластинок с минимальным интервалом в одни сутки между парами пластинок. Предсказанное суточное движение планеты на пластинках составляло 0,7 мм. Каждая пластинка исследовалась на блинк-компараторе до звездной величины, равной по крайней мере 15,5, а в большинстве случаев — до 16,0. Фосс, Шейв-Тейлор и Уитворт не обнаружили никакого движущегося объекта ярче указанной величины ни на одной паре пластинок. Они пришли к заключению, что если трансплутоновая планета существует, то она либо значительно менее массивна и, следовательно, существенно слабее, чем предсказал Брэди, либо она не находится вблизи указанного Брэди положения.

Харди (1965a, b) выполнил новую серию фотоэлектрических наблюдений Плутона, используя 60-сантиметровый сейфертовский рефлектор Дайеровской обсерватории. Ему удалось получить уточненное значение синодического периода вращения,

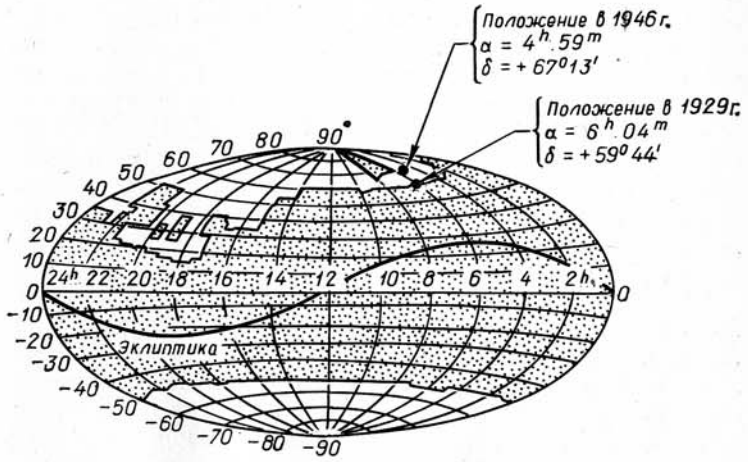


Рис. 5.6

Область, охваченная поиском транснептуновой планеты в Ловелловской обсерватории в 1929—1945 гг. (темная область). Положения гипотетической трансплутоновой планеты показаны на 1929 и 1946 гг. (Брэди, 1972).

равное 6,38673 сут, или 6 сут 9 ч 16 мин 54±26 с, которое может отличаться от сидерического или истинного периода вращения на ±45 с. Эта неточность обусловлена незнанием ориентации оси вращения Плутона и направления его вращения. Данные Харди указывают на некоторое уменьшение средней яркости Плутона по сравнению с измерениями 1955 г. Результат Харди (1965a) находится в противоречии с визуальными оценками яркости Плутона Мосли (1969), который получил среднее значение визуальной звездной величины 14,0 из наблюдений с 25-сантиметровым рефрактором обсерватории Арма.

Харди (1969) приписал изменение в звездной величине Плутона изменению в характере его поверхности и, следовательно, его альбедо. Плутон стал ближе к Солнцу по сравнению со своим средним гелиоцентрическим расстоянием 5864 млн. км. Харди предположил, что вследствие этого возможный снежно-ледяной покров Плутона, состоящий из замерзшего азота, растаял и это привело к снижению его отражательной способности. Такой фазовый переход может объяснить потускнение Плутона

в течение предыдущего десятилетия, а также вариации его блеска с периодом 6,39 сут (обусловленные циклом день/ночь — таяние/замерзание).

Лацис и Фикс (1972) провели фурье-анализ кривой блеска Плутона с целью исследования распределения по долготе ярких и темных областей поверхности Плутона. Хотя было ясно, что существует заметная разница в альбедо между светлыми и темными областями, не удалось определить, обусловлено ли изменение блеска темными или же светлыми зонами и являются ли эти зоны большими или сравнительно малыми. Однако авторы считают, что если два типа областей поверхности имеют различные поляризационные свойства и если изменение поляризации в функции от фазы может быть измерено, то природа поверхности Плутона будет определена более надежно. Лацис и Фикс указывают также, что гипотеза пятнистой поверхности позволяет лучше объяснить кривую блеска Плутона, чем предположения о несферической форме Плутона или о большом наклоне его оси вращения.

Андерссон (1973), используя *UBV*-наблюдения Плутона, сделанные в 1972 г. в обсерватории Мак-Дональд и в лаборатории Луны и планет США, вычислил среднее значение звездной величины, эквивалентное значению $V=15{,}15$ для среднего расстояния в противостоянии. Первоначальные определения Уокера и Харди (1955) дали значение 14,90. Андерссон указал альтернативное объяснение этого различия, предположив, что ось вращения Плутона лежит в плоскости орбиты; ось была направлена к Земле в 1930 г. во время открытия планеты. Согласно этой модели, отражательная способность полярной шапки Плутона должна почти вдвое превышать отражательную способность его экваториальной области.

Фикс, Неф и Килси (1970) измерили относительную яркость Плутона на 21 равноотстоящих длинах волн между 3400 и 5900 Å. На основе этих измерений и нормализованного солнечного спектра они определили относительное альбедо Плутона на каждой длине волны (рис. 5.7). Они нашли, что альбедо Плутона обнаруживает общее увеличение к красной области спектра с пиком около 3800 Å и явным падением в районе 4900 Å.

В работе Мэннинга (1971), подобно более ранней работе Холидея (1969), отмечается, что, согласно теории первичной вращающейся туманности, Плутон в силу своего положения в Солнечной системе не может быть планетой, богатой железом. Однако Мэннинг обращает внимание на значительное сходство в общем характере и деталях между спектром отражения Плутона, полученным Фиксом, Нефом и Килси (1970), и спектром поглощения земных силикатов, содержащих железо (рис. 5.8). Мэннинг отмечает, например, корреляцию между минимумом спектральной кривой Плутона при 3780 Å и выделяющейся линией поглощения вблизи 3700 Å в спектрах минералов. Он заключил, что имеется достаточная корреляция по положению и полуширине полос в спектрах Плутона и земных кристаллов для оправдания его предположения об обильном присутствии железа на поверхности Плутона.

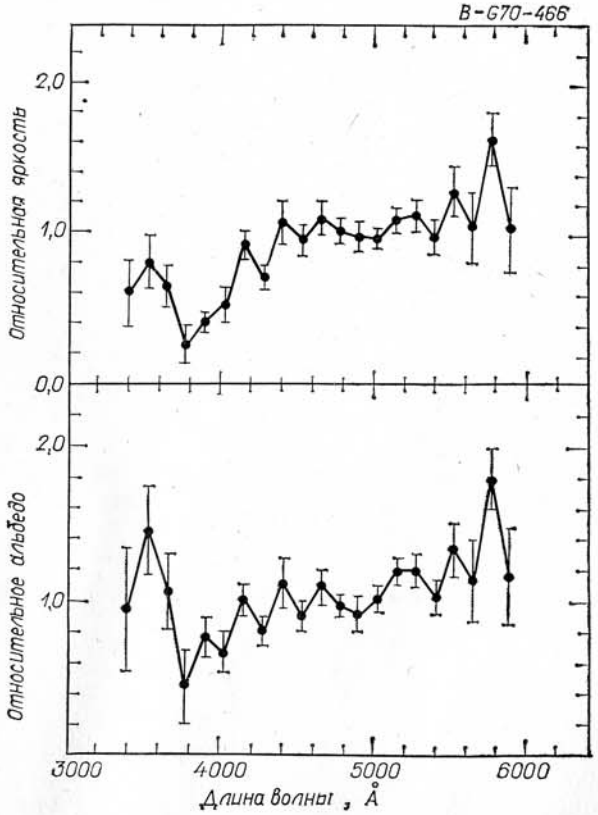


Рис. 5.7

Зависимость относительной яркости и относительного альбедо Плутона от длины волны (Фикс, Неф, Килси, 1970).

В. Вебстер, А. Вебстер и Дж. Вебстер (1972) сделали попытку обнаружения теплового радиоизлучения Плутона с помощью интерферометра с 26-метровой антенной Национальной радиоастрономической обсерватории. Однако ни на одной из двух использованных длин волн — 11,1 см (2,695 ГГц) и 3,7 см — (8,085 ГГц) им не удалось зафиксировать излучение от Плутона. Наблюдения на волне 8,085 ГГц дали верхний предел 162° К для температуры диска Плутона на волне 3,7 см.

Согласно Рубашевскому (1966), первым, кто еще в 1941 г. говорил о возможности определения диаметра Плутона из наблюдений покрытий на нескольких обсерваториях, был польский астроном Банахевич. Банахевич ошибочно оценил, что Плутон покрывает звезды ярче 15-й фотографической величины в среднем раз в году и высказал предположение, что визуальные наблюдения этих событий возможны с помощью телескопов

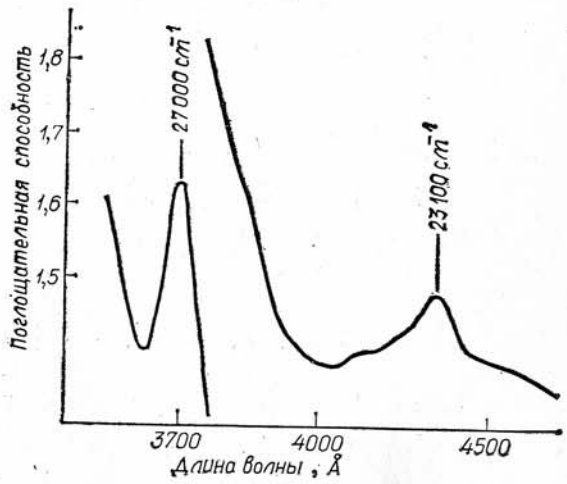


Рис. 5.8

Спектры поглощения земных гроссуляров — гранатов при 293 К (Мэннинг, 1971).

с 30—50-сантиметровой апертурой. Безуспешные попытки Кордылевского (1956—1958) обнаружить какие-либо покрытия вызвали у него сомнения в справедливости оценок частоты покрытий, полученной Банахевичем.

Холидей (1963) предложил новый способ определения диаметра Плутона путем наблюдения покрытия звезды на двух или нескольких обсерваториях. Он указал два возможных пути согласования малого значения диаметра Плутона, измеренного Койпером (1950), со значением массы, необходимой в качестве причины предполагаемых возмущений от Плутона в движении Урана и Нептуна; комбинация этих значений дает неправдоподобное значение средней плотности планеты порядка 50 г/см³. Во-первых, Холидей предположил, что ошибка может быть приписана неверному определению массы, по необходимости основанному на старых наблюдениях. Если для средней плотности предположить более разумное значение 4 г/см³, то масса Плутона составит только 0,07 массы Земли, что сравнимо с массой Меркурия или самых больших спутников Юпитера, Сатурна и

Нептуна. Альтернативное решение Холидей видел в признании ошибочности измерения диаметра. Согласно более ранней работе Альтера (1952), видимый диаметр Плутона может представлять собой только нижний предел истинного диаметра, если отражательная способность поверхности такова, что при наблюдении с большого расстояния кажется освещенной лишь центральная область. Такое потемнение к краю действительно наблюдалось Харди (1965b). При рассмотрении этих двух возможных объяснений Холидей отметил, что ошибка в определении диаметра более существенно влияет на среднюю плотность, чем ошибка в массе, так как плотность зависит от куба диаметра и лишь от первой степени массы.

Альтер (1952) пришел к заключению, что, по-видимому, измерить истинный диаметр можно пока лишь при покрытии звезды Плутоном, но даже в этом случае, по его мнению, потребуются наблюдения многих покрытий. Определив сначала, что измерение продолжительности покрытия не представляет серьезной проблемы, Холидей (1963) предположил, что одного покрытия достаточно для определения точного значения диаметра Плутона. Это объясняется тем, что Земля и Плутон имеют сравнимые размеры, и поэтому параллакс при наблюдении Плутона из двух обсерваторий составляет существенную долю углового диаметра Плутона. Вследствие этого будет наблюдаться разная продолжительность покрытия на двух обсерваториях. Указанный эффект заметен даже при малом расстоянии между двумя обсерваториями. Для почти-центральных покрытий (происходящих вдоль диаметра Плутона) продолжительность будет примерно одинаковая, но само это равенство доказывает почти-центральный характер покрытия, и, следовательно, на каждой обсерватории будет измеряться истинный диаметр Плутона.

Принцип метода, согласно описанию Холидея (1963), проиллюстрирован на рис. 5.9 в предположении, что на двух обсерваториях наблюдается полное покрытие. Сначала нанесем изображение (в сильно увеличенном масштабе) траектории Плутона на небе, как она была бы видна из центра Земли. Отметим точки *A, B, C, D* на этой траектории, где *A* и *D* — положения в моменты исчезновения и появления звезды, наблюдаемые из одной обсерватории, а *B* и *C* — соответствующие точки для второй обсерватории. Эти положения могут быть найдены интерполированием из эфемерид Плутона. Относительное расположение точек *A, B, C, D* нужно знать с большой точностью, но этого не требуется для расчета всей траектории на небесной сфере. Используя стандартные формулы, приводимые в астрономических ежегодниках, вычислим геоцентрический параллакс в прямом восхождении и склонении для каждой обсерватории и нанесем видимые положения центра Плутона (точки *1, 2, 3, 4*), соответствующие геоцентрическим положениям (*A, B, C, D*). При этом учитываются долгота и широта обсерваторий, а также вращение Земли;

кроме того, в формулы входят известное расстояние Плутона от Земли и диаметр Земли. Продолжительность покрытия, наблюдаемого в первой обсерватории (положения *1* и *4*), довольно большая и соответствует более центральному покрытию, чем наблюдаемое из второй обсерватории (положения *2* и *3*).

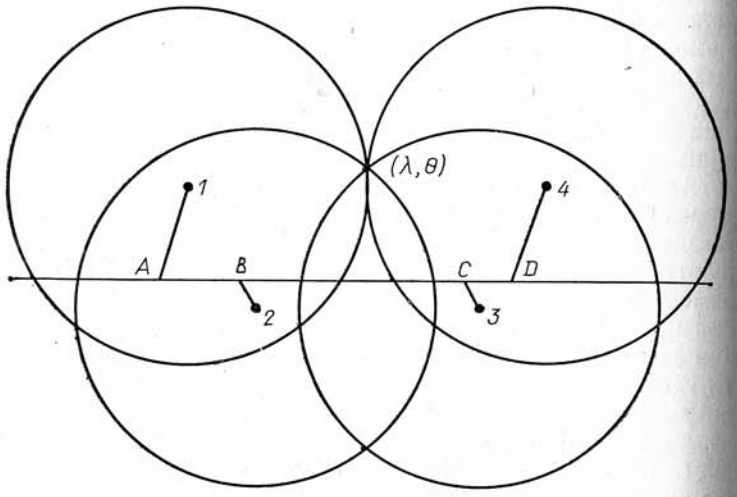


Рис. 5.9

Геометрическая картина покрытия, наблюдаемого из двух обсерваторий, иллюстрирующая эффекты параллакса (Холидей, 1963).

Обозначим радиус Плутона через R. Тогда четыре окружности, каждая с радиусом R и с центрами в точках *1, 2, 3, 4*, должны все пройти через положение покрываемой звезды. Обозначим координаты звезды через (λ, θ), а координаты четырех известных центров через (x_1, y_1) и т. д. Тогда можно написать четыре уравнения вида

$$(\lambda - x_1)^2 + (\theta - y_1)^2 = R^2.$$

Комбинируя любые три из этих уравнений, мы можем найти λ, θ и R, т. е. положение покрываемой звезды относительно Плутона и диаметр Плутона. Четвертое уравнение служит контролем.

Заметим, что в принципе требуется только три уравнения, поэтому в случае двух обсерваторий можно получить решение, даже если одно исчезновение или появление не наблюдались из-за облачности или другой помехи. В случае трех подходящим образом расположенных обсерваторий для получения решения достаточно трех наблюдений исчезновения звезды (Холидей, 1963).

По оценке Холидея, средняя частота покрытий составляет от 0,16 покрытий в год для звезд с визуальной величиной, равной 14, до 1,24 покрытий в год для звезд с визуальной величиной, равной 19. Возможно, эти значения должны быть уменьшены в два или три раза, если учитывать неблагоприятные положения планет и погодные условия. Тем не менее Холидей пришел к выводу, что подходящие покрытия происходят каждые несколько лет и, учитывая желательность точного определения диаметра Плутона, следует организовать службу предвычисления покрытий для обсерваторий.

В период времени после внесения Холидеем (1963) предложения о наблюдении покрытий до первой фактической попытки такого наблюдения, предпринятой двумя годами позже, Харди (1965b) опубликовал данные, свидетельствующие о том, что диаметр Плутона существенно больше значения 5900 км, установленного Койпером (1950). Эти данные были основаны на фотометрических наблюдениях 1964 г., которые выявили кривую блеска в основном того же вида, что и ранее, но с несколько большей амплитудой (Уокер, Харди, 1955). Кривая блеска показывает усиление блеска Плутона в течение четырех суток, а затем его резкое ослабление в течение двух суток во время каждого периода вращения, составляющего 6 сут 9 ч 16 мин 54±26 с. Такая кривая блеска указывает на то, что Плутон имеет наибольшую яркость в центре со значительным потемнением к краю.

В соответствии с предложением Холидея была осуществлена программа измерения траектории Плутона среди слабых опорных звезд на пластинках, снятых 120-сантиметровым шмидтовским телескопом Паломарской обсерватории и 60-сантиметровым сейфертовским телескопом Дайеровской обсерватории. Положения звезд измерялись на блинк-компараторе Манна в Оттавской обсерватории. Далее использовалась небольшая вычислительная программа для определения минимального расстояния между Плутоном и звездами, лежащими вблизи его предвычисленной траектории, совместно с указанием времени наиболее тесного сближения. Возможное покрытие звезды с визуальной величиной 15,3 было предсказано в ночь с 28 на 29 апреля 1965 г. (Холидей, 1965a). Объявляя о предсказанном покрытии, Холидей указал, что суммарный блеск Плутона и звезды с координатами $\alpha = 11^h23^m12{,}1^s$, $\delta = 19°47'32''$ (1950) будет соответствовать звездной величине 13,8. Таким образом, если бы покрытие действительно произошло, блеск должен был резко упасть до значения 14,1 звездной величины, соответствующего Плутону. Результирующее 25%-ное изменение яркости было бы доступно наблюдениям на телескопах с диаметром свыше 50 см. В этой попытке фиксировать ожидаемое покрытие участвовали фактически все обсерватории Северной Америки, обладающие телескопами с соответствующей апертурой и под-

ходящими фотометрами. По широте эти обсерватории простирались от Виктории в Британской Колумбии до Форта Дэвиса в Техасе.

К сожалению, никакого покрытия не наблюдалось. Край полосы покрытия прошел чуть южнее самой южной из участвовавших в наблюдениях обсерваторий — обсерватории Мак-Дональд.

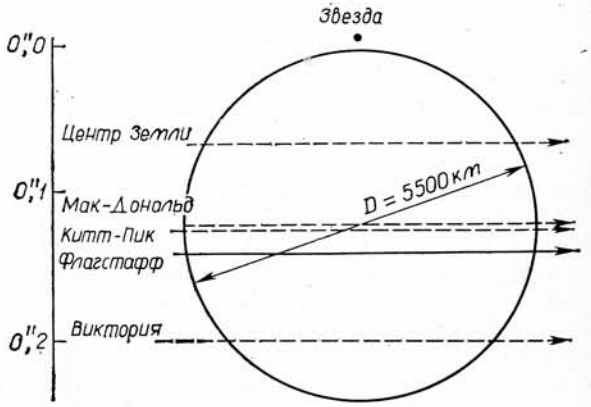


Рис. 5.10

Представление фотоцентрической траектории Плутона, проходящего мимо звезды (Холидей и др., 1966).

Однако в итоговых отчетах Холидея (1965b) и Холидея, Харди, Франца и Прайзера (1966) отмечалось, что удалось получить крайнюю верхнюю границу в 6800 км для диаметра Плутона. Результаты этой наблюдательной программы были представлены в работе 1966 г. диаграммой, приводимой на рис. 5.10. Положение звезды на этом рисунке отмечено точкой; сплошная линия изображает фотоцентрическую траекторию Плутона на расстоянии 0,143″ от звезды. Минимальное фотоцентрическое расстояние для обсерватории Мак-Дональд составляло 0,125″, соответствуя диаметру Плутона 5800 км для касательного покрытия. Круг изображает проекцию диска планеты, видимого в обсерватории Мак-Дональд при значении диаметра Плутона 5500 км. При оценке средней ошибки 0,013″ можно установить крайний верхний предел для диаметра 6800 км. Таким образом, значение Койпера 5900 км, хотя и не подтвержденное непосредственно, оказывается заключенным между новым верхним пределом 6800 км и нижним пределом 2000 км; последнее значение диаметра соответствует единичному альбедо. Верхний предел 6800 км соответствует крайнему нижнему пределу для альбедо Плутона 0,1. Комбинируя значение диаметра 6800 км с наиболее высоким разумным значением плотности 5,5 г/см³ (плотность Земли), получаем пересмотренный верхний предел массы Плутона 0,14 массы Земли, или 2 200 000 для обратного отношения к массе Солнца. Даже это максимальное значение массы Плутона недостаточно, чтобы вызвать возмущения в движении Урана и Нептуна, использовавшиеся при определении массы и предсказании существования Плутона. Поскольку, как указали Холидей и др. (1966), надежно установлено, что диаметр Плутона значительно меньше диаметра Земли, описанный выше параллактический эффект может дать еще большую точность и в конечном итоге диаметр Плутона может быть определен с точностью до 1%. Сандерс (1965) опубликовал результаты попыток наблюдать покрытия в Ликской обсерватории с помощью 90-сантиметрового рефрактора и 300-сантиметрового рефлектора.

Рубашевский (1966) наметил программу наблюдения покрытий, аналогичную программе Холидея (1963). Эта программа отличается в основном методикой предвычисления покрытий звезд Плутоном и содержит более пессимистические оценки частоты таких покрытий. Он указал на желательность наблюдения покрытий звезд Плутоном с помощью баллонов или спутников, пока не будут созданы такие околоземные обсерватории, как 240-сантиметровый космический телескоп, намечаемый к выводу на орбиту по программе Спейс Шаттл в конце 1983 г.* По его мнению, в результате работы Холидея (1965b) стало очевидным, что источник противоречия между массой и размерами Плутона заключается в очень неточном определении массы планеты из теории возмущений, а не в «квазизеркальном» характере отражения солнечного света от поверхности Плутона, как считалось ранее (Харди, 1965b). Рубашевский заключил, что противоречие с массой Плутона происходит, вполне возможно, из-за неучета в его движении эффектов, вызываемых гипотетической трансплутоновой планетой.

О'Лири (1972) призвал к организации систематической и широкой программы предвычисления покрытий с учетом в случае Плутона звезд до 18-й фотографической величины включительно. Он отметил, что в силу коротких времен упреждения (порядка нескольких недель) для наблюдения более частых покрытий более слабых звезд требуется кооперирование между обсерваториями, располагающими подходящими инструментами. Он оценил, что количество «подходящих» покрытий звезд Плутоном, а именно таких покрытий, где интенсивность света падает более чем на 10%, составляет по крайней мере одно в год. Интересно отметить, что Барбиери, Капаччиоли и Пинто (1975) сообщили о почти-покрытии Плутоном звезды 17-й величины на пластинке, снятой 25 мая 1974 г. с помощью телескопа Шмидта в обсерватории Азиаго.

* Ряд работ, посвященных техническим аспектам и научной программе Космического Телескопа опубликован в журнале Celestial mechanics, **22**, № 2, 1980. — *Прим. ред.*

ГЛАВА 6

ХОЛОДНЫЙ ЛУННЫЙ СВЕТ
1973—1979

Андерссон и Фикс (1973) провели анализ новых фотометрических наблюдений изменения блеска Плутона, выполненных в 1971, 1972 и 1973 гг. Как и в более ранних исследованиях Уокера и Харди (1955) и Харди (1965b), они не нашли заметного изменения в цвете Плутона в зависимости от фазы вращения. Они сравнили три кривые блеска, полученные по наблюдениям 1954—1955 гг. (Уокер, Харди, 1955), 1964 г. (Харди, 1965b) и 1973 г. Постепенное ослабление среднего блеска и увеличение амплитуды в течение нескольких последних десятилетий (рис. 6.1) (Андерссон, Фикс, 1973) они объяснили изменением относительного положения планеты из-за ее орбитального движения и большого наклона оси вращения планеты *.

Разрабатывая более раннее предложение Андерссона (1973), Андерссон и Фикс (1973) сделали попытку определения ориентации оси вращения Плутона из анализа фотометрических данных. В этом анализе они следовали методике Рассела (1906) для общей задачи представления кривой блеска вращающегося тела в функции от распределения его поверхностной яркости. Они представили кривую блеска в виде

$$L = K_0 + K_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + K_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \ldots, \qquad (1)$$

где ω — синодическая скорость вращения Плутона, t — время, а K_1 и φ_1 — постоянные коэффициенты. Коэффициенты Фурье K_i сами являются функциями распределения альбедо по поверхности и угла θ между осью вращения Плутона и лучом зрения. Коэффициент K_0 — это средний блеск Плутона, K_1 — мера амплитуды кривой блеска Плутона, а K_2 описывает асимметрию кривой блеска. Андерссон и Фикс дали таблицу средней звездной величины и амплитуды кривой блеска Плутона на протяжении нескольких периодов наблюдения (табл. 16).

Величины, приведенные в табл. 16, отнесены к среднему противостоянию и к фазовому углу 1° с использованием фазового

* Ослабление блеска Плутона отмечается и в работе: Абраменко А. Н., Аврамчук В. В., Кучеров В. А., Лисина Л. Р., Прокофьева В. В. Ослабление блеска Плутона. Астрон. цирк., № 1100, 1, 1980. — *Прим. ред.*

коэффициента $0{,}05^m$ на 1°. Звездная величина, данная на период 1930 — 1933 гг., является средней из визуальных и фотографических оценок (приведенных к величинам V), выполненных различными исследователями вскоре после открытия Плутона. Различие в значениях V_0 между 1954 и 1955 г. Андерссон и Фикс

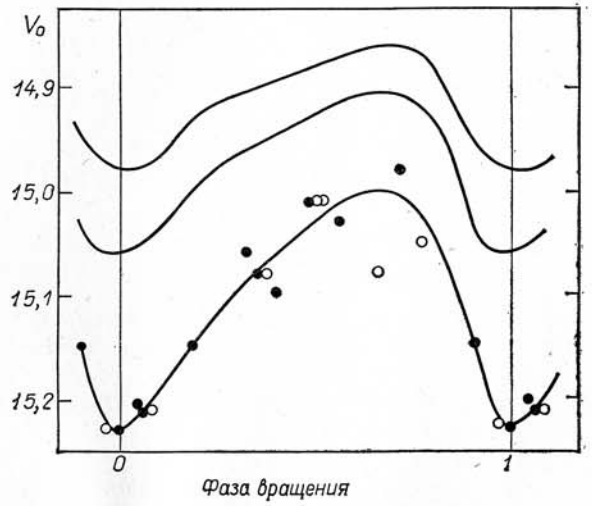


Рис. 6.1.

Кривые блеска Плутона в 1954—1955 гг. (вверху), 1964 г. (в центре) и 1972 г. (внизу). Кривые блеска отнесены к среднему противостоянию и фазовому углу 1°. Использовано значение периода 6,3867 сут. Приведены результаты отдельных наблюдений 1971—1973 гг.; наблюдения с малым весом показаны светлыми кружками, остальные — темными кружками (Андерссон, Фикс, 1973).

приписывают главным образом ошибкам калибровки. Они не смогли объяснить явное расхождение между результатами наблюдений Киладзе (1967) в 1966 г. и общим ходом других значений V_0.

Значение θ для данного наблюдения определяется ориентацией оси вращения Плутона. В соответствии с этим Андерссон и Фикс нашли прямое восхождение и склонение для положения полюса, которое в рамках принятой модели дало удовлетворительное согласие с существующими фотометрическими данными. Требования хорошего уравнивания (выполняемого методом наименьших квадратов) для K_0 и K_2 не налагали строгих ограничений, так что область возможных положений полюса почти целиком определялась уравниванием коэффициентов K_1 и представлением ранних наблюдений среднего беска Плутона. В силу ограниченной точности кривых блеска вычисления повторя-

Таблица 16

СРЕДНЯЯ ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА И АМПЛИТУДА КРИВОЙ БЛЕСКА ПЛУТОНА

Дата	V	Амплитуда	Источник
1930—33	14,75	—	Граф (1930), Никольсон и Мейолл (1930), Бааде (1931)
1953,3	14,92	—	Уокер и Харди (1955)
1954,2	14,92	0,11	Уокер и Харди (1955)
1955,3	14,88	0,11	Уокер и Харди (1955)
1964,4	14,99	0,15	Харди (1973*)
1966,5	14,90	—	Киладзе (1967)
1972,0 1972,4	15,12	0,22	Андерссон и Фикс (1973)

* Личное сообщение Андерссону и Фиксу.

лись для различных значений K_1, отличающихся от начальных значений на 5% для K_1 и K_2 и на 3% для K_0. Во всех случаях было найдено, что область возможных положений полюса близка к области, найденной при начальном поиске. Обобщенная конфигурация области возможных положений полюса показана на рис. 6.2. (Андерссон, Фикс, 1973).

Имеется, конечно, и другая область положений полюса, отстоящая на 180° от области, показанной на рис. 6.2. Андерссон и Фикс не смогли определить, является ли указанный ими полюс северным или южным. Они считают совершенно очевидным, что наклон оси вращения Плутона очень большой, вероятно больше 50°. По их мнению, было бы очень полезно повторить вычисления после новых измерений кривой блеска Плутона в конце 1970-х годов. Значительная часть области возможных положений полюса, изображенной на рис. 6.2, может оказаться несовместимой с новой кривой блеска, и, таким образом, станет возможным определение координат полюса Плутона со значительно большей точностью.

Килси и Фикс (1973) сообщили о результатах поляриметрических наблюдений Плутона, включавших в себя измерения линейной поляризации света, отражаемого полным видимым диском Плутона. В течение шести ночей в апреле 1972 г. было проведено несколько наблюдений с использованием поляриметра, откалиброванного по трем звездам сравнения и установленного на 1,3-метровом телескопе Национальной обсерватории Китт-Пик. Для каждого из этих наблюдений Килси и Фикс определяли в процентах степень поляризации (P) и ее вероятную ошибку. Кроме того, они определяли в градусах позиционный угол (θ) и его вероятную ошибку в соответствии с 6,3867-суточным периодом кривой блеска Плутона. Средняя степень поляризации составила 0,27% с вероятной ошибкой 0,02%, а средний

позиционный угол оказался равным 156° с вероятной ошибкой 2°. Во время наблюдений фазовый угол Плутона составлял 0,8°.

В силу малого, хотя и определенного крайне неуверенно, значения геометрического альбедо Плутона не было неожиданным, что Плутон обнаружил относительно большую степень поляризации при столь малом фазовом угле. Хотя экстраполяция от

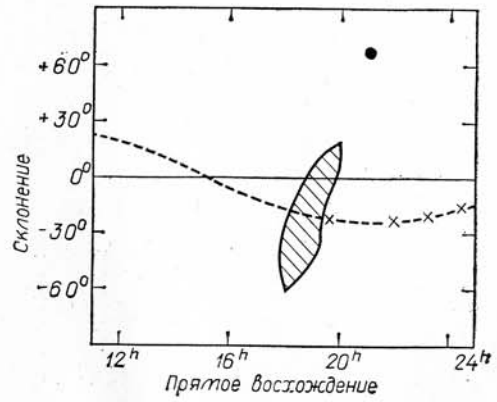


Рис. 6.2.

Область возможных положений полюса Плутона. Орбита Солнца (при наблюдении с Плутона) изображена прерывистой линией. Крестиками слева направо отмечены положения Земли и Солнца на 1932, 1954—1955, 1964 и 1972 гг. Полюс орбиты Плутона показан темным кружком (Андерссон, Фикс, 1973).

поляризации при фазовом угле 0,8° к минимальной поляризации P_{min} в окрестности фазового угла 10° не может быть произведена сколько-нибудь точно, Килси и Фиксу казалось ясным, что P_{min} для Плутона составляет по крайней мере 1%. Соотношение альбедо — P_{min} для тел без атмосферы (Веверка, 1971a, b, c; Дольфюс, 1961) указывает на то, что альбедо Плутона меньше чем 0,25; это предел, который согласуется со значениями альбедо Плутона, вычисленными по его яркости (Гаррис, 1961) и радиусу (Койпер, 1950; Холидей, Харди, Франц и Прайзер, 1966). Однако предположение об отсутствии атмосферы у Плутона может быть неоправданным (Харт, 1974; Голицын, 1975). Поляризационная кривая Плутона может указывать на неровную поверхность с областями интенсивной метеоритной бомбардировки.

Килси и Фикс исследовали также данные поляризации, пытаясь обнаружить свидетельства переменности, обусловленной вращением Плутона. Они не нашли таких свидетельств, возможно, в силу того, что изменения степени поляризации были очень незначительными и ограниченная точность данных не позволяла

их выявить. Однако Килси и Фикс предсказали, что наблюдения, сделанные в периоды, когда фазовый угол Плутона достигает своего максимума и степень поляризации Плутона становится соответственно большей, должны позволить определить, связано ли изменение яркости Плутона с изменением поляризации. При наблюдениях при малых фазовых углах позиционный

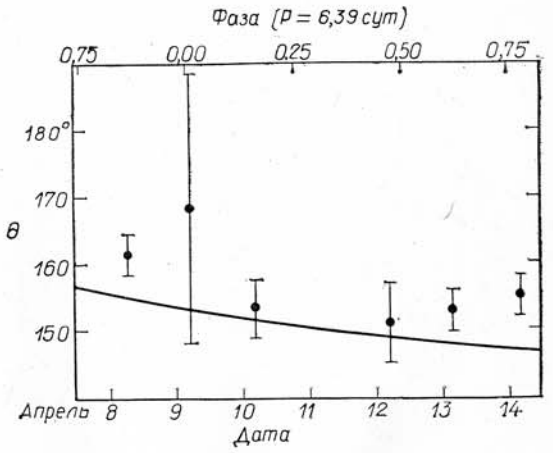


Рис. 6.3.

Ночные значения позиционного угла поляризации для Плутона в зависимости от даты и фазы в течение периода 6,39 сут. Сплошной линией отмечен позиционный угол экватора интенсивности во время наблюдений (Килси, Фикс, 1973).

угол поляризации для планеты с гладкой поверхностью будет равен позиционному углу экватора интенсивности для этой планеты. На рис. 6.3 показаны ночные значения позиционного угла поляризации, а также позиционный угол экватора интенсивности для Плутона во время наблюдений Килси и Фикса (1973). Эти авторы указали, что измеряемый позиционный угол для Плутона оказывается систематически больше значения, предсказанного для планеты с поверхностью без особенностей.

Ньюборн и Гулкис (1973) в своем обзоре внешних планет и их спутников суммировали известные в то время результаты, касающиеся Плутона. Они подчеркнули большие значения эксцентриситета и наклона орбиты Плутона, а также ее устойчивость, установленную Коэном и Хаббардом (1965) и Вильямсом и Бенсоном (1971). Такая устойчивость свидетельствует против гипотезы о Плутоне как о выброшенном спутнике Нептуна. Ньюборн и Гулкис снова обратили внимание на большие неопределенности в существующих оценках диаметра и массы Плутона. Они выразили единую с Эшем, Шапиро и Смитом (1971)

точку зрения, что «масса Плутона не может быть надежно определена из существующих данных». По их мнению, только полеты космических аппаратов когда-нибудь в будущем позволят точно определить массу планеты. Кроме того, Ньюборн и Гулкис рассмотрели возможность эксперимента по радиозатмению космического аппарата как наилучший путь обнаружения атмосферы Плутона. В то же время они отметили, что Плутон может не иметь атмосферы в силу малой массы и низкой температуры. Многие потенциальные составляющие атмосферы, такие, как CO_2, H_2O и NH_3, могли вымерзнуть, в то время как другие компоненты типа H_2 и He могли улетучиться. Более тяжелые инертные газы, как неон и аргон, способны образовать постоянную атмосферу, однако их присутствие очень трудно обнаружить с Земли спектроскопическим методом. По мнению Ньюборна и Гулкиса, поскольку радиус Плутона имеет столь неопределенное значение, «попытки вывести значение геометрического альбедо почти бессмысленны». Кроме того, поскольку значение плотности весьма неопределенно, вряд ли возможно построение модели внутреннего строения Плутона до выполнения достаточного числа измерений с помощью космических аппаратов. Существование магнитного поля Плутона маловероятно, поскольку планета невелика и вращается медленно.

Кианг (1973) исследовал предположение Брэди (1972) о возмущении движения кометы Галлея трансплутоновой планетой. Он попытался показать, что источником возмущений являются скорее негравитационные силы, на существование которых было указано Уипплом (1950), а не притяжение неизвестной планеты. После краткого упоминания о возможности негравитационной природы невязок в движении кометы Галлея Брэди показал, что невязки практически уничтожаются, если в вычисления орбиты кометы включен эмпирический член ε_6. Кианг заметил, что, хотя включение этого члена приводит к нужному результату, он привнесен в вычисления ad hoc и не имеет физической интерпретации. Как указал Кианг, этот член математически эквивалентен аномальному замедлению кометы Галлея, описанному в его предыдущей работе (Кианг, 1972). Кроме того, математическому эквиваленту этого члена можно дать правдоподобную физическую интерпретацию. Кианг (1973) показал, что величина соответствующей негравитационной силы вполне сравнима с величинами, найденными для других комет (Марсден, 1969, 1970, 1971; Йоманс, 1971). Брэди (1972) вместо этого попытался найти орбиту и массу трансплутоновой планеты, подобранные так, чтобы вызванные ею возмущения в движении кометы Галлея уменьшали невязки так же хорошо, как и вековой член ε_6. Кианг (1973) выразил скептицизм по этому поводу, поскольку Брэди пришлось в конце концов постулировать существование объекта с массой, равной массе Юпитера, движущегося по сильно наклоненной орбите в обратном направлении.

Роулинс и Хаммертон (1973) произвели анализ невязок в движении Нептуна, чтобы установить границы возможных значений массы и положений гипотетической десятой планеты Солнечной системы. Они указали на трудности, встречающиеся при любом исследовании возмущений от неизвестной внешней планеты и связанные, в частности, с большими неопределенностями значений масс некоторых известных планет. Поэтому они решили основываться на значении массы, определенном по движению самого внешнего из хорошо наблюдаемых спутников, а именно масса Сатурна — 1/3494 (по Япету), масса Урана — 1/22685 (по Оберону). Однако они отметили, что у Плутона нет наблюдаемого спутника (по данным того времени), а масса Нептуна, выведенная по его спутнику Нереиде, расходится с другими оценками. Поэтому Роулинс и Хаммертон включили массу Нептуна в качестве дополнительной неизвестной величины при анализе невязок в долготе Урана. Они произвели анализ невязок, используя классическую теорию возмущений со строгим уравниванием по методу наименьших квадратов.

Нептун использовался при этом, как основной источник данных, хотя позднее данные по долготе Урана были включены для контроля. Орбита гипотетической планеты предполагалась круговой. Роулинс и Хаммертон получили границы решений для долготы и радиуса орбиты, а затем решения для широты при нескольких значениях долготы и радиуса. Для различных комбинаций значений долготы от 0 до 360° и радиуса орбиты от 43 до 600 а. е. они дали таблицу вероятных верхних пределов для планет, движущихся по круговым орбитам в плоскости эклиптики. Они отметили, что любая планета, расположенная далее 600 а. е., должна была уже давно сойти со своей орбиты под влиянием проходящих звезд.

Затем Роулинс и Хаммертон произвели выборочное сравнение наблюдаемой и вычисленной долготы для хорошо уравненного положения $\alpha=0{,}5$, $\varepsilon'=330°$. Постулированная ими гипотетическая планета позволяла хорошо согласовать наблюдения Лаланда 1795 г. и вызывала лишь незначительные возмущения в данных, полученных после открытия Нептуна. Однако, по их признанию, такое согласие объясняется предположением, что гипотетическая планета располагалась очень далеко от Нептуна на большей части рассматриваемого интервала. В то же время они отмечают маловероятность того, что Лаланд дважды делал ошибки порядка 7″. Предполагаемая ими планета должна быть не слабее 17-й величины и, вероятно, имела малое склонение во время поисков Томбо (1961), что затруднило ее возможное открытие.

В попытке разрешить давно существующую неопределенность в значении периода вращения Плутона Неф, Лейн и Фикс (1974) проанализировали новые фотометрические наблюдения Плутона, выполненные с помощью 90-сантиметрового рефлектора обсерватории Китт-Пик в течение четырех последовательных ночей в апреле 1973 г. Хотя большинство исследователей, включая Уокера и Харди (1955), интерпретировали фотометрические данные как указывающие на 6,39-суточный период, более короткий период, равный 1,1819 сут, был также приемлем. Неф и его коллеги нашли, что наблюдаемая и предсказанная средние звездные величины при коротком периоде существенно различались в одну ночь, а наблюдаемый и предсказанный наклоны графической зависимости звездной величины от фазы значительно различались в три ночи. Для более долгого периода четыре из наблюденных звездных величин и три из наблюденных значений углов наклона были в хорошем согласии с предсказанными значениями на графике с теми же ординатой и абсциссой. В две ночи наблюдения показали одинаковую фазу и для короткого периода, а звездные величины отличались на $0{,}18^m$, что в восемь раз превышает среднее стандартное отклонение. Поэтому Неф и его коллеги пришли к заключению, что 1,1819-суточный период был ложным, и подтвердили значение 6,3867 сут для периода вращения. Их уточненное значение составило $6{,}3874 \pm 0{,}0002$ сут.

Коэн и Хаббард (1965) показали, что минимальное расстояние между Плутоном и Нептуном ограничено снизу значением 18 а. е. в силу резонанса, обусловленного тесной соизмеримостью $^2/_3$ в средних движениях Плутона и Нептуна. Обсуждая результаты Коэна и Хаббарда, Брауэр (1966) указал на необходимость исследования долгосрочной эволюции движения аргумента перигелия, чтобы можно было сделать обоснованное заключение об устойчивости системы Плутон — Нептун на существенно большем интервале времени. Это связано с тем, что если перигелий Плутона будет продолжать двигаться по орбите в прямом направлении, то радиус-вектор Плутона при прохождении через перигелий будет эпизодически оказываться в плоскостях орбит других внешних планет; это порождает возможность тесного сближения с планетами с последующим изменением эволюции движения Плутона. Если же перигелий Плутона будет совершать либрационное движение относительно среднего значения, оставаясь далеко от плоскостей орбит Нептуна и других планет, то устойчивость системы повысится и будет обеспечено отсутствие тесных сближений. Вильямс и Бенсон (1971) провели такое исследование долгосрочной эволюции движения Плутона на интервале в 4,5 млн. лет.

Накози и Диль (1974b) подтвердили и дали объяснение устойчивому характеру либрационного движения перигелия Плутона, найденному Вильямсом и Бенсоном. Никози и Диль показали, что эксцентриситет e и наклон i орбиты Плутона, а также две угловые переменные — первый критический аргумент δ_1 и аргумент перигелия ω — подвержены долгопериодической либрации вокруг стационарных значений. Они отметили, что в общем случае либрация координаты вокруг стационарного значе-

ния указывает на устойчивость этой координаты. Поскольку действительная орбита Плутона обнаруживает устойчивую либрацию относительно стационарной точки, Накози и Диль полагают, что решение Вильямса и Бенсона, охватывающее 4,5 млн. лет, может быть проэкстраполировано на гораздо более длительный период времени в прошлое и будущее.

Балди и Капуто (1974) указали, что по планетам с известными фундаментальными параметрами — массой M, экваториальным радиусом R, периодом вращения w и коэффициентом J_2 при второй гармонике гравитационного потенциала — можно получить интересную информацию относительно моментов инерции C Урана и Плутона, а также массы Плутона. Они выяснили, что вычисленное ими значение плотности углового момента, обусловленного вращением Cw/M [см²/с] для Урана очень хорошо ложится на прямую линию, полученную Мак-Дональдом (1964) в его графике зависимости величины Cw/M от M для планет, моменты инерции которых известны с хорошей степенью точности. Балди и Капуто применили затем критерий, даваемый прямой линией Мак-Дональда, к семи комбинациям значений Cw/M и M, полученных при радиусах 3200 км (Холидей и др., 1966) и 2700 км (Холидей, 1969) и значениях масс в интервале от 0,11 массы Земли (Сейделмен и др., 1971) до 0,004 массы Земли. Период вращения принимался равным 6,387 сут. Они нашли, что единственно приемлемыми моделями Плутона являются модели с радиусом 2700 км и значениями массы в интервале от 0,004 до 0,0138 массы Земли, а также с радиусом 3200 км и значениями массы от 0,0069 до 0,023 массы Земли. Остальные три модели приводят к значениям, лежащим или значительно выше, или значительно ниже прямой Мак-Дональда, графически изображающей зависимость Cw/M от M.

Хоредт (1974) провел численное интегрирование уравнений движения в плоской круговой ограниченной задаче трех тел для случая экспоненциального изменения массы тела с малой массой m (т. е. планеты), вокруг которой обращается спутник. Он нашел, что при уменьшении массы в 20 раз спутник выбрасывается по направлению внутрь орбиты тела m при условии достаточно медленной скорости потери массы. Применяя свои результаты к реальной Солнечной системе, Хоредт заключил, что любой спутник, выбрасываемый прото-Нептуном вследствие значительной потери его массы, будет после выброса двигаться, скорее всего, внутри орбиты Нептуна, а не снаружи, как это требуется в случае Плутона, если он образовался вследствие выброса. Поэтому кажется вероятным, что Плутон возник как независимая транснептуновая планета из протопланетной туманности.

Харт (1974) отмечает, что спектроскопические наблюдения Плутона не выявили присутствия атмосферы. Он придерживается той точки зрения, что все обычные газы или замерзли при

очень низкой средней температуре Плутона (~43 К), или улетучились из-за его слабой силы тяжести. В то же время Харт указывает, что неон обладает достаточно высоким молекулярным весом, позволяющим избежать утечки, и достаточно летуч, чтобы избежать замораживания. Поэтому Харт предполагает, что Плутон может иметь атмосферу из неона. Подобная атмосфера, даже если она очень плотная, не будет создавать никаких линий поглощения в видимой части спектра.

Принимая значения массы M Плутона равной 0,11 массы Земли (Сейделмен и др., 1971), радиуса $R=2900$ км (Койпер, 1950), эксцентриситета $e=0{,}246$ (Коэн и др., 1967), большой полуоси $a=39{,}53$ а. е. (Коэн и др., 1967), альбедо Бонда $A=0{,}17$ (Койпер, 1950), Харт вычислил количество солнечной энергии, поглощаемой Плутоном в произвольный момент времени. На основании этого и в предположении, что Плутон излучает в любой момент столько же энергии, сколько поглощает, Харт (1974) рассчитал его эффективную температуру на различных расстояниях от Солнца (табл. 17). Во втором столбце табл. 17 указана

Таблица 17

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ (ХАРТ, 1974)

Расстояние Плутона от Солнца	Дневная температура, К	
	При $T_{ночн}=T_{днев}$	При $T_{ночн}=0$ К
$a(1-e)$	49,0	58,3
$a(1-e^2)^{1/4}$	42,9	51,0
a	42,5	50,6
$a(1+e)$	38,1	45,3

эффективная температура в предположении, что температура дневной и ночной сторон Плутона одинакова. В третьем столбце табл. 17 приводится эффективная температура дневной стороны в предположении, что ночная сторона Плутона значительно более холодная. Давление пара жидкого неона в функции от температуры приведено в табл. 18. Тройная точка неона соответствует значениям $T=24{,}5$ К, $P=0{,}427$ атм. Критическая точка достигается при значениях $T=44{,}4$ К, $P=26{,}9$ атм. Если предполагать равенство температур дневной и ночной сторон Плутона, то из табл. 17 и 18 видно, что неон не замораживается. Если давление на поверхности Плутона достаточно высокое (около 21,5 атм при температуре 42,9 К), то на поверхности будет существовать жидкий неон.

Вполне возможно, что неон является единственным газом, присутствующим в достаточном количестве. Большинство обычных газов, таких, как двуокись углерода, аммиак и метан, затвердевают даже при самой высокой температуре, которая мо-

Таблица 18

ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ ЖИДКОГО НЕОНА (ХАРТ, 1974)

Температура, К	Давление, атм	Температура, К	Давление, атм	Температура, К	Давление, атм
30	2,2	36	7,5	41	16,8
31	2,7	37	9,0	42	19,5
32	3,35	38	10,8	43	21,9
33	4,1	39	12,5	44	24,5
34	5,1	40	14,5	44,4	26,9
35	6,2				

жет существовать на Плутоне. Второй наиболее обильный газ — это, вероятно, аргон; но даже при температуре 58 К аргон имеет давление паров менее 0,01 атм. Даже если имеется свободный азот, его давление паров составляет только 0,04 атм при 58 К и даже меньше при более низкой температуре. Бо́льшая часть имевшихся первоначально водорода и гелия, вероятно, уже давно покинула Плутон. По подсчетам Харта, независимо от того, изотермична атмосфера Плутона или нет, планета может без труда удерживать атмосферу из неона. Масса M_{Ne} неоновой атмосферы является основным параметром, определяющим условия на поверхности Плутона. В табл. 19 представлены оценки некоторых важных величин в функции от M_{Ne}.

Таблица 19

НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕОНОВОЙ АТМОСФЕРЫ (ХАРТ, 1974)

M_{Ne}, 10^{20} г	M_{Ne}/M^*, 10^{-6}	Давление на поверхности, атм	Имеются ли неоновые океаны?	$T_{днев} - T_{ночн}$, К	$\Delta T_{эфф}$, К (сезонное)
<2,14	<0,32	<0,1	Никогда	Вероятно, большая	<11,0
2,14—446	0,32—67,8	0,1—20,9	Никогда	<2,0	<11,0
446—461	67,8—70,1	20,9—21,5	Часть оборота	<0,4	< 0,6
>461	>70,1	21,5	Постоянно	<0,4	<0,06

* Для Солнца эта величина составляет $\sim 10^{-3}$.

Видно, что если масса M_{Ne} достигает $4{,}61 \cdot 10^{22}$ г, то поверхность Плутона полностью или частично покрывают океаны из жидкого неона. Если количество неона немного менее обильно, океаны будут существовать в течение некоторой части периода обращения Плутона, полностью высыхая во время «жаркого» сезона, когда Плутон ближе всего подходит к Солнцу. Если M_{Ne} имеет значение, меньшее $4{,}46 \cdot 10^{22}$ г, то океаны вообще не будут существовать.

Атмосфера, достаточно массивная для образования океанов, в силу повышенной отражательной способности на более коротких длинах волн, обусловленной рэлеевским рассеянием, привела бы к значению альбедо Плутона, значительно более высокому в ультрафиолетовой области, чем в красной. Однако Фикс, Неф и Килси (1970) нашли, что характер изменения альбедо Плутона совершенно противоположный. Сравнение теоретических значений монохроматического геометрического альбедо для различных значений атмосферного давления с результатами наблюдений альбедо Плутона показывает, что, хотя имеющиеся данные совместимы с давлением на поверхности в 1,0 атм, давление на поверхности порядка 3,0 атм, по-видимому, исключается. Поэтому Харт пришел к заключению, что неоновые океаны не могут существовать на Плутоне постоянно.

Голицын (1975) исследовал термические и динамические свойства неоновой атмосферы предложенного Хартом типа ($T_{средн} \approx 43$ К, $P \approx 1{,}0$ атм). Он вычислил, что скорость звуковых волн составляет 170 м/с, а характерное время охлаждения такой атмосферы будет порядка 200 лет. Так как Плутон обращается вокруг Солнца за 248,6 г., сезонные вариации температуры, вызванные большим эксцентриситетом его орбиты ($e = 0{,}246$) и возможным большим наклоном его оси вращения (Андерссон, Фикс, 1973), должны быть сильно ослаблены наличием такой атмосферы. Поэтому Голицын предполагает, что незначительные изменения температуры Плутона при его движении по орбите могут служить свидетельством существования такой атмосферы. По его вычислениям, характерное изменение температуры δT, вызывающее атмосферную циркуляцию, и скорость ветра U имеют значения $\approx 0{,}07$ К и ≈ 30 см/с соответственно. Такие незначительные колебания температуры являются следствием большой тепловой инерции атмосферы при низких температурах. Несмотря на низкую скорость ветра, это обеспечивает эффективный перенос тепла в области планеты, плохо обогреваемые Солнцем. Голицын предполагает, что атмосферная циркуляция должна быть симметричной, причем единственная циркуляционная ячейка простирается от экватора до полюса.

Голицын отмечает, что низкое значение альбедо Плутона исключает присутствие на поверхности планеты плотного замерзшего покрова, состоящего, например, из аргона или молекулярного азота. Это позволяет установить верхние пределы наличия этих веществ в атмосфере Плутона. Для того чтобы отсутствовали полярные шапки на полюсах Плутона, где $T \approx 42$ К, парциальное давление азота должно быть менее 0,4 мбар. Даже если предположить, что наблюдавшееся в период 1955—1972 гг. 20%-ное уменьшение альбедо (Андерссон, Фикс, 1973) было вызвано частичным таянием замерзшего азота на поверхности планеты по мере ее приближения к Солнцу, а не тем обстоятельством, что при орбитальном движении Плутона более темные экваториальные области планеты были обращены

к Земле, то верхний предел давления молекулярного азота в атмосфере все еще будет составлять 1 мбар. Даже столь разреженная атмосфера полностью определяла бы тепловые условия на поверхности Плутона и в принципе могла бы быть обнаружена по радиоизлучению планеты (Вебстер и др., 1972).

Харт (1974) предполагает, что неон является, по-видимому, единственным газом, образующим атмосферу Плутона. Другие газы, как водород и гелий, вероятно, улетучились, в то время как двуокись углерода, аммиак и метан могли образовать замерзший покров на поверхности Плутона. Голицын (1975) интерпретирует низкое геометрическое альбедо Плутона как свидетельство отсутствия такого покрова. Однако Крукшенк, Пилчер и Моррисон (1976) сообщили позднее об обнаружении следов замерзшего метана на Плутоне. Они полагают, что альбедо Плутона может быть больше, а его диаметр меньше, чем это оценивалось ранее.

Крукшенк и др. предложили простой наблюдательный тест для проведения различия между льдом или инеем из воды, аммиака и метана. Наличие инея на поверхности планеты приводит к существенному уменьшению отражательной способности с увеличением длины волны от 1 до 4 мкм. Крукшенк отметил, что измерения отражательной способности в диапазоне между 1,4 и 1,9 мкм могут позволить отличить CH_4 от H_2O или NH_3. Метан обнаруживает сильное поглощение на волне 1,7 мкм, в то время как замерзшие вода и аммиак проявляют максимум отражательной способности вблизи этой длины волны, а полосу поглощения — на волне 1,5 мкм. В свою очередь, вода и аммиак могут быть различимы по измерениям отражательной способности в интервале от 3,2 до 3,6 мкм, где H_2O фактически не отражает, а NH_3 имеет высокую отражательную способность.

Крукшенк и др. наблюдали Плутон с помощью 4-метрового рефлектора обсерватории Китт-Пик в марте 1976 г., измеряя отражательную способность планеты со стандартными *JHK*-фильтрами, а также с двумя специально изготовленными узкими фильтрами, центрированными на длинах волн 1,55 и 1,73 мкм (обозначаются *H*1 и *H*2 соответственно). Результаты широкополосной фотометрии для Плутона, выраженные в разностях звездных величин, составляли $J-H=0{,}2\pm0{,}1$ и $H-K=-0{,}4\pm\pm0{,}1$. Последнее значение близко к ожидаемому значению для инея, в то время как первое существенно более положительно, чем ожидавшееся значение для объекта, покрытого водяным инеем. Отношение отражательных способностей $H1/H2$ для Плутона не согласуется со значением для водяного инея и составляет $1{,}6\pm0{,}1$ по сравнению со значением $\sim0{,}5$ для лабораторных спектров инея H_2O.

На основе отношения $H1/H2$ для Плутона, его показателя цвета $J-H$ и других данных наблюдений и теории, приведенных в работе 1976 г., Крукшенк, Пилчер и Моррисон пришли к заключению, что иней CH_4 является, вероятно, основным отражающим материалом на поверхности Плутона. По их мнению, отношение $H1/H2$ для Плутона меньше значения, полученного при лабораторных исследованиях инея CH_4, поскольку поверхность Плутона либо содержит примеси пыли и других замерзших летучих веществ, как предполагал Койпер (1950), либо имеет иное распределение размеров зерен, чем лабораторные образцы. Они также указали, что 20%-ная вариация яркости, проявляемая Плутоном при его вращении, указывает на неоднородность его замерзшего покрова. Эти авторы представили два возможных объяснения происхождения метанового покрова Плутона. Наиболее прямолинейное объяснение состоит в том, что температура протопланетной туманности на расстоянии Плутона от Солнца опустилась ниже точки замерзания CH_4. Другой возможностью является то, что температура опустилась только до точки конденсации 70 К гидрата $CH_4\cdot8H_2O$. Этот гидрат в дальнейшем диссоциировал, оставив на поверхности слой более или менее чистого льда CH_4.

Крукшенк и его коллеги отмечают, что ранее принятое значение геометрического альбедо Плутона порядка 0,1 должно быть пересмотрено в сторону увеличения. Учитывая вероятную пятнистость замерзшего покрова, они предлагают пересмотренное среднее значение геометрического альбедо 0,4, которое приводит к новому значению диаметра Плутона, равному 3300 км, что несколько меньше диаметра Луны. Значение альбедо 0,6 привело бы к значению диаметра лишь 2800 км. Столь малый размер планеты в сочетании с разумной величиной средней плотности дает гораздо меньшее значение массы Плутона, чем это требуется для объяснения невязок в движении Урана и Нептуна. Поэтому Крукшенк и др. пришли к выводу, что открытие Томбо (1961) Плутона в 1930 г. было обусловлено скорее тщательностью поисков, чем справедливостью предсказаний существования планеты.

Фотометрические измерения Плутона в системе *UBVRI* (от 0,37 до 0,82 мкм), выполненные Харди, о которых сообщил Гаррис (1961), могут быть использованы для сравнения отражательной способности Плутона с отражательной способностью других объектов Солнечной системы. Лейн, Неф и Фикс (1976) отмечают, однако, что фильтр *I* Харди относился к длине волны, чуть смещенной в синюю сторону от линии поглощения 1,0 мкм, типичной для многих астероидов и метеоритов, так что измерения отражательной способности Плутона на немного более длинной волне были бы очень важны для сравнения Плутона с этими объектами. Поэтому Лейн и его коллеги провели измерения отражательной способности Плутона с интерференционным инфракрасным фильтром высокого пропускания с эффективной длиной волны 0,86 мкм. Наблюдения Плутона производились в течение четырех ночей в июне 1974 г. и двенадцати

ночей с января по март 1975 г. с помощью 60-сантиметрового рефлектора университета штата Айова. Среднее из ночных значений инфракрасной отражательной способности с весами, определяемыми их стандартными отклонениями, дает отношение отражательной способности на волне 0,86 мкм к отражению на волне 0,55 мкм, равное 1,33±0,04. Этот результат приведен вместе с измерениями Харди отражательной способности в табл. 20 и графически представлен на рис. 6.4 (Лейн и др., 1976).

Таблица 20

ИЗМЕРЕНИЯ ХАРДИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЛУТОНА

Фильтр	$\lambda_{эфф}$, мкм	Полная ширина, мкм	Относительная отражательная способность (в зв. величинах)
U	0,37	0,07	+0,30
B	0,44	0,09	+0,17
V	0,55	0,07	0,00
R	0,68	0,23	—0,18
I_H	0,82	0,16	—0,17
I_L	0,86	0,04	—0,31

Рис. 6.4 и 6.5 показывают характеристики отражательной способности Плутона в сравнении с характеристиками ряда астероидов и метеоритов, различающихся по отражательной способности. Это сопоставление показывает наличие в Солнечной системе объектов, которые по своей отражательной способности в интервале от 0,3 до 0,86 мкм сходны с Плутоном. Наилучшее совпадение достигается с астероидом 5 Астрея, железным метеоритом с низким содержанием никеля и железокаменным метеоритом. Корреляция между Плутоном и железными метеоритами интересна в свете более раннего наблюдения Мэннингом (1971) сходных общих и специфических черт в спектре отражения Плутона и спектрах поглощения земных силикатов с примесями железа.

Отмечая сходство Плутона и Тритона в отношении их размера, массы, яркости, расстояния от Солнца и равновесной температуры, Беннер, Финк и Кромвелл (1978) предположили, что можно ожидать одинаковых характеристик атмосфер (если они существуют) этих объектов. По мнению Беннера и его коллег, наличие метановой атмосферы наиболее вероятно, в частности, в свете результатов Крукшенка, Пилчера и Моррисона (1976), свидетельствующих о присутствии инея из метана на поверхности Плутона, что означает также существование минимальной метановой атмосферы, находящейся в равновесии с этим инеем. Поэтому они решили попытаться обнаружить та-

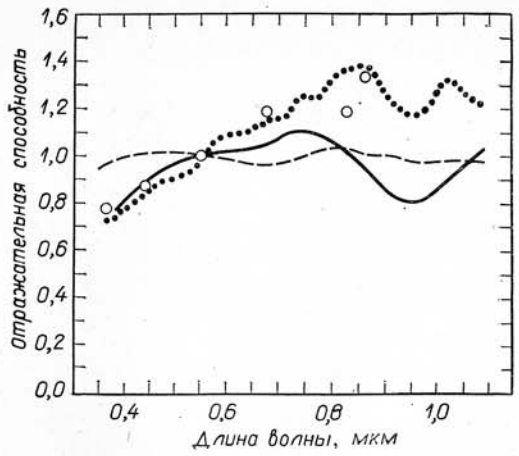


Рис. 6.4.

Отражательная способность Плутона (светлые кружки) по $UBVRI$-измерениям Харди и результатам Лейна и др. (1976) в сопоставлении с данными для следующих астероидов: Паллада (2) — штриховая линия, Веста (4) — сплошная линия, Астрея (5) — пунктирная линия. Сглаженные кривые для астероидов проведены на основе данных Чепмена, Мак-Корда и Джонсона (1973). Отражательная способность нормирована к единице при $\lambda=0{,}56$ мкм (Лейн и др., 1976).

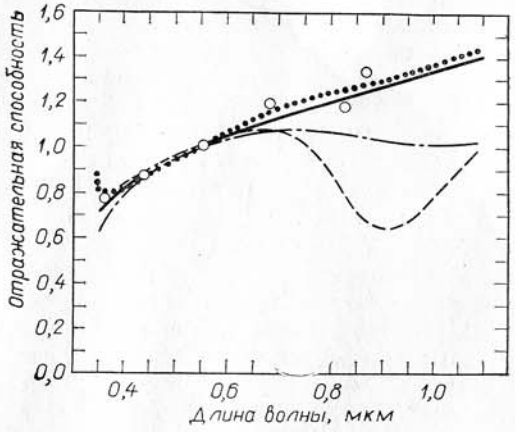


Рис. 6.5.

Отражательная способность Плутона (светлые кружки) в сопоставлении с данными для следующих метеоритов: железокаменный (Верамин) — пунктирная линия, железный (Кейзи Каунти) — сплошная линия, углистый хондрит типа С-30 (Кайнзац) — штрих-пунктирная линия, эвкрит типа 2 (Береба) — штриховая линия. Отражательная способность нормирована к единице при $\lambda=0{,}56$ мкм (Лейн и др., 1976).

кую атмосферу, получая новые спектры Плутона и Тритона в инфракрасной области с целью их сравнения с лабораторными спектрами метана.

Наблюдения Плутона, Тритона и четырех звезд сравнения типа Солнца были проведены 18 и 19 июня 1976 г. с помощью 229-сантиметрового телескопа обсерватории Стюарда на Китт-Пик. Использовался спектрограф с дифракционной решеткой 800 штрих/мм и дисперсией 100 Å/мм в сочетании с охлаждаемым трехкаскадным электронно-оптическим преобразователем Варо. Спектры регистрировались на спектроскопических пластинках Истмэн Кодак IIa — D. Спектральное разрешение комбинированной системы составляло ~5 Å и поле 25 мм обеспечивало охват спектрального интервала от 6800 до 9200 Å. Для калибровки длин волн использовались спектры сравнения неона и аргона, а также линии ночного неба. Излучение ночного неба оказалось неожиданно сильным, и оно исключалось из искомых спектров в два этапа. Сначала на входной щели употреблялась малая апертура (2″×3″), обеспечивающая получение только изображения объекта. Одновременно регистрировался спектр ночного неба. Затем производилось вычитание компонент спектра ночного неба из спектра объекта. Так как все спектры объекта располагались в электронно-оптическом преобразователе одинаковым образом, то можно было усреднить спектры и найти отношения без искажений, обусловленных неоднородностью чувствительности преобразователя на его входе. Среднее по двум спектрам Плутона, среднее из спектров звезд сравнения и их отношение показаны на рис. 6.6.

Заметная линия при 8410 Å в спектре Плутона обусловлена дефектом пластинки. Дополнительные линии со стороны коротких волн при 8410 Å и в окрестности 8540 Å слишком близки или к солнечным, или к теллурическим, или к линиям ночного неба и не позволяют прийти к окончательному заключению. Беннер и его коллеги нашли, что относительные спектры Плутона и Тритона в общем довольно похожи. В обоих случаях соответствующие кривые поднимаются примерно между 6800 и 7400 Å, а затем выравниваются и спускаются в окрестности 9000 Å. Тенденция к покраснению очень хорошо согласуется с результатами *UBVRI*-фотометрии, суммированными Гаррисом (1961). Однако эти данные не подтверждают измерений Лейна, Нефа и Фикса (1976), которые заявили о существенном возрастании альбедо при 8600 Å. Возможно, самая сильная и в конечном итоге самая главная линия проявляется при 8870 Å в спектре Плутона и с несколько меньшей уверенностью в спектре Тритона. Она совпадает с самой сильной линией в лабораторном спектре метана до 1 мкм (Дик, Финк, 1977; Финк, Беннер, Дик, 1977). Первоначальной целью исследования Беннера и др. (1978) было получение хорошего спектрального охвата этой линии при 8870 Å, обеспечивающего наилучший в области

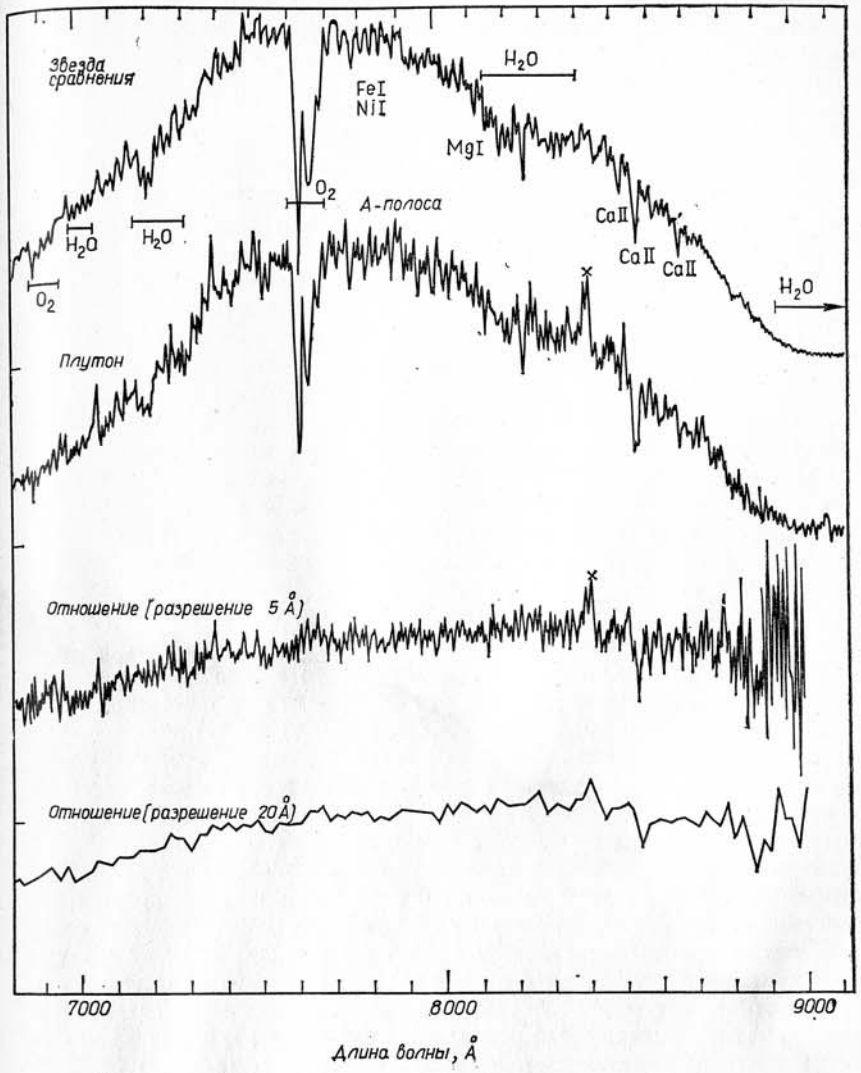


Рис. 6.6.

Спектр Плутона, средний спектр четырех звезд сравнения типа Солнца (вверху) и их отношения при наблюдаемом разрешении 5 Å и сглаженном разрешении 20 Å. Теллурические и солнечные линии поглощения отмечены на спектре звезд сравнения. Нулевые уровни смещены, как указано сбоку. Дефект пластинки отмечен крестиком (Беннер и др., 1978).

до 1 мкм наблюдательный критерий существования метановой атмосферы. К сожалению, резкое уменьшение сигнала в электронно-оптическом преобразователе на указанной длине волны вызывает определенные сомнения в реальности этой линии.

Поскольку эффект атмосферного давления может оказаться существенным при определении относительного содержания того или иного вещества, Беннер и его коллеги сначала анализировали свои данные в предположении, что давление велико, а затем рассматривали гораздо меньшее его значение. Один из принципиальных результатов их лабораторного спектрального анализа метана (Дик, Финк, 1977; Финк, Беннер, Дик, 1977) состоит в обнаружении незначительности эффекта сильного давления в линиях поглощения метана. На основании новых расчетов синтетических спектров они нашли, что давление выше 0,01 атм не влияет на поглощение, в то время как при давлении ниже этого значения поглощение заметно ослабляется. Поэтому при анализе спектра поглощения метана эффектом давления можно пренебречь, если вклад газа под давлением ниже 0,01 атм весьма незначителен. Более высокое общее атмосферное давление на Плутоне может быть обусловлено присутствием не проявляющих себя в инфракрасной области газов, таких, например, как неон. На рис. 6.7 показаны оптимально подобранные синтетические спектры для Плутона и Тритона при давлении 0,02 атм и эквивалентный спектр поглощения метана при 10 м-амага. Видно, что требуется гораздо более высокое относительное содержание метана для того, чтобы объяснить поглощение на Плутоне или Тритоне при учете эффекта давления. Как показывает исследование спектров, относительное содержание от 100 до 200 м-амага в предположении, что давление обусловлено только метановой атмосферой, позволяет хорошо объяснить возможное поглощение на Плутоне.

В предположении реального существования линии поглощения 8900 Å Беннер и его коллеги рассмотрели природу возможной метановой атмосферы на Плутоне. Они пришли к выводу, что метановая атмосфера вполне может поддерживаться возгонкой поверхностного метанового инея. В силу большого эксцентриситета орбиты Плутона и вытекающего отсюда изменения расстояния от Солнца значительная атмосфера может существовать только при прохождении Плутона через область перигелия. Они также исследовали возможность того, что поглощение на Плутоне обусловлено скорее слоем инея метана, чем метановой атмосферой. Их лабораторные исследования спектров поглощения твердого и газообразного метана в интервале от 1 до 4 мкм показали, что линии поглощения в газообразном и твердом состоянии проявляются на одинаковых длинах волн. Поэтому существует возможность того, что линии поглощения, открытые на Плутоне Крукшенком, Пилчером и Моррисоном (1976), указывают на наличие либо метановой атмосферы, либо инея из метана, либо на их комбинацию. Беннер и его коллеги считают, что, пока линии поглощения газообразного и твердого метана в области от 1 до 3 мкм не будут различимы, линия поглощения на волне 8900 Å представляет наилучшую возможность для выбора между этими двумя состояниями; конечно, должны быть предприняты дальнейшие спектральные исследования с новыми, создаваемыми в настоящее время инструментами. Они заключают, что если линия на волне 8900 Å окажется слабее или даже вообще будет отсутствовать, то их анализ

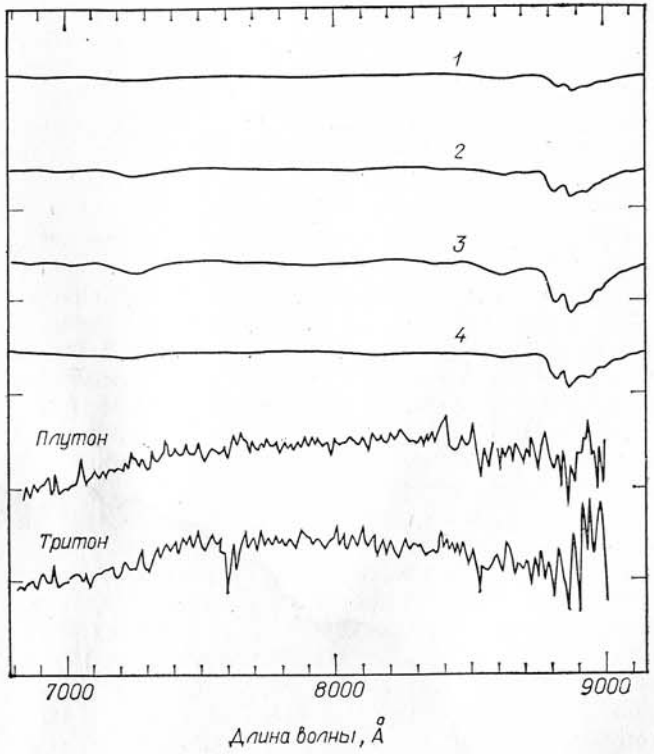


Рис. 6.7.

Сравнение вычисленного синтетического спектра метана и относительных спектров Плутона и Тритона при разрешении 10 Å. Три верхних синтетических спектра получены в предположении, что давление обусловлено только атмосферой из метана. Четвертый спектр предполагает давление >0,01 атм, так что эффектами давления можно пренебречь. Условия формирования синтетических спектров: *1* — 50 м-амага, p=0,0003 атм; *2* — 100 м-амага, p=0,0005 атм; *3* — 200 м-амага, p=0,001 атм; *4* — 10 м-амага, p>0,01 атм (Беннер и др., 1978).

будет применим для указания верхнего предела содержания метана на Плутоне *.

Накози и Диль (1978) построили полуаналитическую теорию, описывающую долгосрочную эволюцию движения Плутона. Они ввели новую модель, представляющую собой модифицированную круговую ограниченную задачу трех тел, где Солнце обладает сжатием, Нептун движется по круговой орбите в плоскости экватора Солнца, а масса Плутона пренебрежимо мала. Это была простейшая динамическая модель, которую они могли предложить для представления движения Плутона на большом промежутке времени, пренебрегая короткопериодическими членами, а также членами с очень большими периодами. На основе указанной модели было получено несколько решений, одно из которых учитывает резонансные эффекты Плутон — Нептун и Плутон — Уран, а также нерезонансные эффекты, обусловленные Юпитером и Сатурном. Это решение дает долгопериодическое либрационное движение эксцентриситета, наклона и перигелия орбиты Плутона. Либрация эксцентриситета происходит между максимальным значением 0,266 и минимальным значением 0,218. Максимальное и минимальное значения для наклона составляют соответственно 17,15 и 14,67° с центром либрации 16,03°. В отличие от центра либрации по эксцентриситету центр либрации по наклону имеет большее значение, чем среднее значение наклона.

Накози и Диль обнаружили, что долгопериодический либрационный характер изменения элементов Плутона не нарушается при добавлении малых гравитационных сил (например, при изменении эксцентриситета и наклона орбиты Нептуна) или очень малых негравитационных диссипативных сил (Уиппл, 1950; Кианг, 1973), а также при небольшом изменении начальных условий, масс и других параметров. Все это не сказывается и на отсутствии тесных сближений между Плутоном и Нептуном. Таким образом, еще раз подтверждается долговременная устойчивость движения Плутона **.

7 июля 1978 г. в Циркуляре № 3241 Центрального бюро астрономических телеграмм Международного астрономического союза сообщалось об открытии Джеймсом Кристи из Морской обсерватории США спутника Плутона. Это было одним из наиболее важных и долгожданных открытий в астрономии Солнечной системы нашего столетия. Теперь наконец открылся путь для вычисления массы Плутона с гораздо большей точностью,

* Об уверенном обнаружении метановой атмосферы на Плутоне сообщается в работе: Fink U., Smith B. A., Benner D. C., Johnson J. R., Reitsema H. J. Detection of a CH_4 atmosphere on Pluto. Icarus, 44, 62, 1980.— *Прим. ред.*

** Дальнейшая детализация этих результатов содержится в статье: Nacozy P. E., Diehl R. E. A discussion of the solution for the motion of Pluto. Celes. Mech., 17, 405, 1978. Обзор результатов по эволюции движения Плутона дан в работе: Nacozy P. A review of the motion of Pluto. Celes. Mech., 22, 19, 1980. — *Прим. ред.*

чем это позволяла теория возмущений или оценки диаметра и плотности. И действительно, менее чем через две недели после извещения МАС Хьюз (1978) произвел такое вычисление массы по классическому уравнению (1):

$$M_p = 4\pi^2 d^3/(GT^2), \qquad (1)$$

где d — среднее расстояние спутника от планеты, T — орбитальный период спутника, G — ньютоновская гравитационная постоянная; при этом спутник предполагается гораздо менее массивным, чем планета. Подставляя значения, опубликованные в Циркуляре МАС № 3241, Хьюз нашел для массы Плутона значение $1{,}56 \cdot 10^{22}$ г, что согласуется в пределах ошибок определения со значением, данным Крукшенком, Пилчером и Моррисоном (1976). Для нового спутника Хьюз предложил имя Персефоны, жены Плутона в подземном царстве.

Кристи (Кристи, Харрингтон, 1978) отметил удлиненную форму изображений Плутона на фотографических снимках, сделанных на 1,55-метровом астрометрическом рефлекторе Морской обсерватории США во время программы регулярных астрометрических наблюдений Плутона, начатых в 1978 г. При измерении этих пластинок на автоматической измерительной машине 22 июня Кристи заметил вытянутость изображений планеты, имеющих небольшой выступ с южной стороны на всех пластинках, снятых 13 и 20 апреля, и с северной стороны на всех пластинках, сделанных 12 мая. Ошибки гидирования не могли являться причиной этого, поскольку изображения звезд имели круглую форму, и после того как возможность присутствия слабых звезд поля была исключена путем сравнения с «Паломарским обзором неба», было заподозрено существование спутника. Затем был организован поиск удлиненных изображений Плутона на пластинках, снятых ранее на 1,55-метровом телескопе в 1965, 1970 и 1971 гг. для других программ. Так как размеры выступа, обнаруженного в 1978 г., составляли лишь 0,7″ на наилучших изображениях, было очевидно, что любая вытянутость изображения может быть обнаружена только при оптимальных условиях видимости. Тем не менее Кристи и Харрингтон смогли обнаружить вытянутость изображения и зафиксировать ее направление на двух пластинках, снятых в 1965 г. и пяти пластинках, снятых в 1970 г. Исследование пластинок 1970 г. привело к значению периода обращения спутника немногим более шести суток.

Вслед за этим начались наблюдения Плутона с помощью 1,55-метрового инструмента, выполняемые Даном, который использовал каждую подходящую ночь, хотя планета проходила через меридиан задолго до наступления темноты. Вытянутость изображения уверенно наблюдалась в две ночи, и 2 июля была получена еще одна оценка степени вытянутости. Оценки различных наблюдателей находились в пределах от 0,8″ до 0,9″

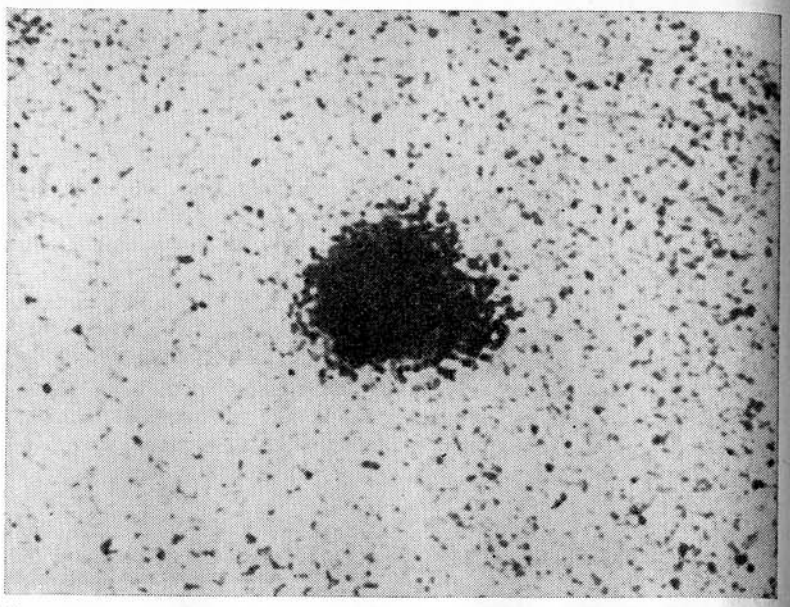


Рис. 6.8.

Изображение Плутона на пластинке, снятой 2 июля 1978 г. на 1,55-метровом астрометрическом рефлекторе Морской обсерватории США. Увеличение приблизительно в 100 раз. Спутник проявляется как выступ на изображении планеты вблизи положения $4^h\ 30^m$ (Кристи, Харрингтон, 1978).

при общем согласии, что наилучшей оценкой является более низкое значение.

На рис. 6.8 показано лучшее изображение, полученное 2 июля. Удлинение изображения на 0,8″ соответствует 17 000 км на расстоянии Плутона, что в три раза больше верхнего предела диаметра планеты, установленного ранее (Холидей, Харди, Франц, Прайзер, 1966). Это совершенно исключает возможность, что появление выступа обусловлено эффектом вращения Плутона или наличием каких-либо образований на поверхности планеты. На пластинках, снятых в главном фокусе 4-метрового рефлектора обсерватории Черро-Тололо 6 июля 1978 г., Грэхем (1978) обнаружил вытянутое изображение со средним диаметром 1,6″, отношением осей немногим меньше чем 2 : 1 и позиционным углом примерно 166°±5°. Малхолланд в обсерватории Мак-Дональд подобным же образом сфотографировал Плутон 6 июля и подтвердил реальность этого явления. В тот же день капитан Смит из Морской обсерватории США сообщил об открытии астрономической общественности и прессе.

В попытке первоначальной интерпретации Кристи и Харрингтон предположили, что 6,3867-суточный период, связанный с кривой блеска (Андерссон, Фикс, 1973), относится также и к

спутнику. Они приняли, что его орбита круговая с радиусом, равным максимальному наблюдаемому расстоянию от планеты, что момент и направление максимального удлинения изображения соответствуют прохождению спутника через узел. Наклон его орбиты достаточно велик, что приводит к ограничениям в отношении направления удлинения и в то же время не настолько большой, чтобы оказать влияние на кривую блеска. На основании всех этих соображений были получены элементы орбиты спутника, приведенные в табл. 21.

Таблица 21

ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ СПУТНИКА ПЛУТОНА

$a = 0{,}8''$ на расстоянии 30 а. е.	
$P = 6{,}3867$ сут	
$e = 0{,}0$	
$i = \pm 105°$	по отношению к картинной плоскости
$\Omega = 350°$	при $\alpha = 13^h30^m$, $\delta = +10{,}5°$

Наклон к эклиптике составляет примерно 115 или 55°. Полюс орбиты лежит вблизи точки $\alpha = 8^h$, $\delta = -5°$ или же точки $\alpha = 19^h$, $\delta = 35°$. Обе эти точки находятся в области вероятного расположения полюса вращения Плутона, указанной Андерссоном и Фиксом (1973). В первом случае прохождения спутника по диску планеты и затмения должны происходить в период 1983—1987 гг., а во втором случае — в период 1968—1972 гг. Используя эти элементы, Кристи и Харрингтон вычислили эфемериды на моменты всех результативных наблюдений (при которых было обнаружено удлинение изображения), а также на момент попытки Койпера (1950) измерить диаметр Плутона с помощью 5-метрового Паломарского рефлектора. Предвычисленные позиционные углы и угловые расстояния вместе с имеющимися наблюдательными данными приведены в табл. 22. Если принять во внимание трудности измерений, то согласие между вычислениями и наблюдениями надо признать отличным.

По значениям периода и среднего расстояния, приведенным в табл. 21, Кристи и Харрингтон вычислили значение массы Плутона со спутником, равное примерно 1/200 000 000 массы Солнца (около 0,0017 массы Земли). Со значением диаметра Плутона 3000 км (Крукшенк, Пилчер, Моррисон, 1976) средняя плотность планеты станет равной 0,7 плотности воды. Это означает, что Плутон, подобно спутникам других планет-гигантов, состоит в основном из замерзших летучих веществ. Если также предположить, что изменение блеска Плутона действительно обусловлено вращением планеты (спутник должен бы быть лишь на $1{,}6^m$ слабее, чтобы обусловить наблюдаемое изменение в общей звездной величине, составляющее $0{,}22^m$) то тогда период обращения спутника и период вращения планеты синхронны. Такое состояние является весьма устойчивым. Принимая, что

Таблица 22

ВЫЧИСЛЕННЫЕ И НАБЛЮДЕННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СПУТНИКА ПЛУТОНА

Дата	$P_{вычисл}$	$P_{набл}$	$D_{вычисл}$	$D_{набл}$
1950 март, 22,20	120°		0,21″	
1965 апрель, 29,16	167	160°	0,72	
1965 май, 1,15	8	10	0,46	
1970 июнь, 13,17	171	160	0,76	
1970 июнь, 15,17	23	20	0,31	
1970 июнь, 16,17	353	350	0,74	
1970 июнь, 17,16	338	340	0,58	
1970 июнь, 19,16	176	170	0,69	
1978 апрель, 13,31	172	170	0,79	
1978 апрель, 20,29	164	160	0,73	
1978 май, 12,22	350	350	0,80	0,7″
1978 июль, 1,20	14	10		
1978 июль, 2,17	352	350	0,80	0,8
1978 июль, 5,15	175	175	0,76	
1978 июль, 6,00	162	166	0,71	

разность звездных величин Плутона и его спутника более 2^m и предполагая, что альбедо и плотность аналогичны соответствующим характеристикам для Плутона, Кристи и Харрингтон вычислили, что диаметр спутника составляет около 0,4 диаметра Плутона, а его масса порядка 0,05—0,10 массы Плутона. Они считают, что подобие Плутона спутникам гигантских планет свидетельствует в пользу гипотезы о Плутоне как о выброшенном спутнике Нептуна.

Кристи предложил для спутника Плутона название Харон. Согласно классической греческой мифологии, Харон перевозил на лодке души умерших людей через реку Стикс в Аид, царство Плутона.

Лоутон (1978) дал детальное описание системы Плутон — Харон. Он отмечает, что Харон является еще более массивным по отношению к Плутону, чем Луна по отношению к Земле (1 : 81,4). Если его период обращения действительно равен периоду вращения Плутона, то Харон может быть единственным известным синхронным естественным спутником в Солнечной системе. Лоутон пишет, что Харон, наблюдаемый с поверхности Плутона, должен иметь весьма впечатляющий вид, обладая видимым диаметром, в 5 раз превышающим диаметр Луны на нашем небе, и видимой звездной величиной от —9 до —$9{,}5^m$, соответствующей яркости нашей Луны в первой четверти. Подобно нашей Луне, Харон также проходит через фазы с периодом 6,39 сут. Лоутон, кроме того, замечает, что Плутон не является «мрачным, темным миром», каким его часто рисуют. Солнце появляется на его небе как сверкающая звезда со средним блеском —19^m, в 1600 раз ярче полной Луны на Земле.

После открытия Харона Харрингтон и Ван Фландерн (1979) на основе своих вычислений предположили, что система Плутон — Харон могла произойти в результате сближения Нептуна с гипотетической десятой планетой, обладающей массой от 3 до 4 масс Земли. Такая планета при прохождении через систему Нептуна могла своим возмущающим действием перевести Тритон на его современную обратную орбиту и выбросить другой спутник (Плутон) на самостоятельную орбиту, которая постепенно преобразовалась в резонансную. Приливные силы могли также оторвать часть вещества Плутона, ставшую затем его спутником. В этом случае планета должна иметь неправильную форму, а ее яркость должна изменяться при вращении. Лоутон (1979) отметил, что если сближение по гипотезе Харрингтона — Ван Фландерна произошло вскоре после образования Солнечной системы, то имелось достаточно времени для стабилизации орбиты гипотетической планеты. Лоутон считает, что простейшей из таких стабилизированных орбит является орбита с соизмеримостью с Плутоном и Нептуном в отношениях 1 : 2 и 1 : 3 соответственно. Он указывает, что, хотя гипотеза Харрингтона — Ван Фландерна может подвергаться критике, она допускает возможность новой планеты, движущейся по очень эксцентричной орбите и позволяющей согласовать два наблюдения Нептуна Лаландом в 1795 г.* Простейшее и наиболее прямолинейное предположение состоит в том, что планета была близка к Нептуну в 1795 г. и оказывала возмущающее влияние. Лоутон предложил в высшей степени умозрительную систему элементов для орбиты планеты X. Он представляет себе планету с массой от 5 до 6 масс Земли, с диаметром от 15 000 до 18 000 км и с 11-й звездной величиной в перигелии. Большой эксцентриситет ($e=0{,}35$) орбиты планеты X с 495-летним периодом отражается в положениях ее перигелия (30 а. е.) и афелия (92.5 а. е.)**.

* Гипотеза Харрингтона — Ван Фландерна и обоснованность предположений о планете X обсуждаются в работах: Farinella P., Milani A., Nobili A. M., Valsecchi G. B. Some remarks on the capture of Triton and the origin of Pluto. Icarus, **44**, 810, 1980; Hughes D. W. Planet X; is it necessary? Nature, **291**, 613, 1981; Moore P. Some thoughts on planet X. J. Brit. Astron. Assoc., **91**, 483, 1981; Partusch P. Transneptun und Transpluto. Astron. und Raumfahrt, № 6, 168, 1980. — *Прим. ред.*

** Из недавних работ, посвященных вопросам происхождения Плутона и Харона, отметим: Dormand J. R., Woolfson M. M. The origin of Pluto. Mon. Not. R. Astron. Soc., **193**, 171, 1980; Mignard F. On a possible origin of Charon. Astron. Astrophys., **96**, L1, 1981. В связи с гипотезами происхождения Плутона следует упомянуть гипотезу Т. М. Энеева, согласно которой Плутон возник как астероид в предполагаемом занептуновом астероидном поясе, под влиянием возмущений от подобных себе астероидов сблизился с Нептуном, который и перевел его на современную орбиту: См.: Энеев Т. М. Новая аккумуляционная модель формирования планет и структура внешних областей Солнечной системы. Препринт ИПМ АН СССР № 166, 1979; Ипатов С. И. О приближенном методе исследования взаимного гравитационного влияния тел протопланетного облака. К вопросу об эволюции орбиты Плутона. Препринт ИПМ АН СССР № 43, 1980. — *Прим. ред.*

ГЛАВА 7

ПОЛНЫЙ ОБОРОТ

1980—2178

23 января 1979 г. Плутон, двигаясь по своей очень эксцентричной орбите, пересек орбиту Нептуна, так что обе планеты находились на одинаковом расстоянии от Солнца — 30,3 а. е. Плутон достигнет перигелия (29,6 а. е.) в сентябре 1989 г. Обе планеты вновь станут равноудаленными от Солнца 15 марта 1999 г., после чего Нептун утратит свою временную роль наиболее далекой планеты Солнечной системы.

Факультет астрономии университета штата Нью-Мексико в Лас-Круссе, США, запланировал проведение в феврале 1980 г. специального симпозиума по Плутону в ознаменование 50-й годовщины его открытия. Ко времени окончания работы над этой книгой — июль 1979 г. — список представленных там работ был еще неизвестен*.

Первые наблюдения Плутона, которые позволят выполнить непосредственные измерения его диаметра и углового расстояния Плутон — Харон, будут, вероятно, произведены с помощью Космического телескопа, запуск которого запланирован по программе «Спейс Шаттл» в 1983 г.** Полученные в результате этого уточненные элементы орбиты Харона должны позволить вычислить массу Плутона с точностью, сравнимой с точностью определения масс других внешних планет тем же методом. Однако выполнение задачи разрешения деталей на поверхностях Плутона и Харона должно быть отложено до будущих полетов автоматических космических аппаратов типа «Вояджер» или «Пионер». К сожалению, постановка этой задачи остается очень отдаленной перспективой, так как в настоящее время не планируются и не рассматриваются никакие полеты к Плутону. Космический проект «Большой тур», предусматривавший использование исключительно благоприятного расположения внешних планет, случающегося только один раз в 179 лет, серьезно рассматривался в начале 1970-х годов. Типичный полет по программе «Большой тур» включал бы в себя полет космического аппарата к Юпитеру с последующим полетом в различных возможных комбинациях к Сатурну, Урану, Нептуну и Плутону и с использованием гравитационного ускорения при сближении с каждой планетой для разгона аппарата в направлении к следующей планете. Первоначально намечалось, что космический аппарат, называемый TOPS (Thermoelectric Outer Planet Spacecraft — термоэлектрический космический аппарат для внешних планет) и обладающий системой самоуправления и самовосстановления, будет запущен в 1977 г. к Юпитеру, Сатурну и Плутону. Это позволило бы сократить время полета к Плутону от непомерно долгого, составляющего 41 год при самой экономичной траектории, до всего лишь 9 лет. Если бы такой аппарат был запущен, как планировалось, мы бы сейчас с нетерпением ожидали его прибытия в систему Плутон — Харон в 1986 г. К сожалению, из-за финансовых затруднений Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА) не смогло реализовать проект «Большой тур» в его первоначальном замысле и вместо этого ограничилось сокращенным вариантом. Этот новый проект, предусматривающий полеты двух космических аппаратов класса «Маринер» — «Вояджера-1» и «Вояджера-2», оказался чрезвычайно успешным и к моменту окончания работы над этой книгой принес множество научных данных по Юпитеру и его спутникам. Оба аппарата продолжают полет к Сатурну, используя гравитационное ускорение от Юпитера, позволяющее сократить время полета к Сатурну до всего лишь двух лет. В зависимости от успеха встречи «Вояджера-1» с Сатурном «Вояджер-2» может быть направлен для пролета вблизи Урана в январе 1986 г. с возможностью дальнейшего изменения направления для встречи с Нептуном в сентябре 1989 г.*

Первым космическим аппаратом, который пересечет орбиту Плутона в 1987 г., станет «Пионер-10», стартовавший с Земли в 1972 г. «Пионер-10» покинет известную к настоящему времени границу нашей Солнечной системы с остаточной скоростью 11,5 км/с и станет, в сущности, первым межзвездным космическим аппаратом. Однако ни «Пионер-10», ни последующие за ним «Пионер-11», «Вояджер-1» и «Вояджер-2» не пройдут достаточно близко от Плутона, чтобы получить какие-либо полез-

* Большинство работ, представленных на этом симпозиуме, опубликованы в специальном выпуске журнала «Икарус»: Icarus, **44**, № 1, 1980. — *Прим. ред.*

** Разрешение пары Плутон — Харон и определение диаметра Плутона было произведено недавно методами спекл-интерферометрии. См. работы: Bonneau D., Foy R. Interféromètrie au 3.60 m CFH. I. Resolution du systéme Pluton-Charon. Astron. Astrophys., **92**, L1, 1980; Harrington R. S., Christy J. W. The satellite of Pluto. II, III. Astron. J., **85**, 168, 1980; **86**, 442, 1981; Hughes D. W. Charon's diameter, Nature, **287**, 677, 1980; Henbest N. Pluto is a double planet. New. Sci., **88**, 20, 1980. — *Прим. ред.*

* Пролет «Вояджера-2» вблизи Сатурна оказался чрезвычайно плодотворным в научном отношении, и есть основания надеяться на успешное продолжение его полета. — *Прим. ред.*

ные данные, за исключением данных о характере межпланетной среды, в которой движется планета. При условии, что их энергообеспечение будет ухудшаться не быстрее, чем предусмотрено, а их антенны будут сохранять свою ориентацию, эти космические аппараты будут прослеживаться до орбиты Плутона станциями слежения сети дальней космической связи (DSN) и даже на еще больших расстояниях с помощью 300-метровой антенны в Аресибо или очень большой антенной решетки в Нью-Мексико.

Хотя возможность полета к Плутону за очень короткое время, предоставлявшаяся благоприятным расположением внешних планет, не была реализована, возможность полетов аппаратов типа «Пионер-10» с использованием поля тяготения одной планеты повторяется каждые 12 лет (период обращения Юпитера). Подобный полет к Плутону может быть осуществлен космическими аппаратами типа «Вояджер» или «JOP» (орбитальный спутник Юпитера) и займет около 15 лет времени полета. Однако требуемое время полета будет увеличиваться, после того как Плутон пройдет перигелий в 1989 г. и начнет удаляться в более далекие области космического пространства. Вполне возможно, что со временем будет выбран полет с выводом аппарата на орбиту спутника Плутона, а не простой пролет мимо планеты, так как такой полет принесет больше точной информации о массе, размере и форме Плутона и Харона, а также о деталях строения их поверхности. Поскольку образование системы Плутон — Харон было, вероятно, бурным событием, возможно связанным с выбросом из системы Нептуна, Харон может быть планетным осколком неправильной формы, подобно спутникам Марса Деймосу и Фобосу. Сам Плутон мог испытывать сильную метеоритную бомбардировку во время своего образования или последующей эволюции, поскольку такая бомбардировка является общей закономерностью, характерной для истории Солнечной системы, по крайней мере для истории внутренних планет и их спутников, а также галилеевых спутников Юпитера. Подобно внутренним планетам и Луне, Плутон может обладать асимметрией полушарий, когда одно полушарие в геологическом отношении радикально отличается от другого. Такое различие двух полушарий Плутона может быть ответственно за 6,39-суточную вариацию блеска при вращении планеты. Полет по орбите вокруг Плутона позволил бы провести эксперимент с радиозатмением для определения природы и состава атмосферы Плутона. С учетом длительного времени полета к планете простой пролет мимо нее был бы чрезвычайно расточительным. В то же время энергетические требования для вывода аппарата на орбиту вокруг Плутона кажутся вполне выполнимыми в силу довольно низкой остаточной скорости космического аппарата по его прибытии к Плутону.

Полет космического аппарата к Плутону, несмотря на его технологическую осуществимость, остается во время написания этих строк отдаленной перспективой, так как НАСА пока не планирует и не рассматривает никакого подобного проекта. Однако запуск такого аппарата, произведенный до конца 1980-х годов, мог бы еще дать нам детальную информацию о системе Плутон — Харон к концу этого столетия. В 2178 г. Плутон завершит свой первый полный оборот со времени его открытия в 1930 г.

Адамс, Скотт (Adams A. N., Scott D. K.), 1964-1968. U. S. Naval Observ. Circ., Nos. 103, 105, 115, 118.
Альтер (Alter D.), 1952. The story of Pluto. J. R. Astron. Soc. Canada, **46**, 1.
Андерссон (Andersson L. E.), 1973. The orientation of the rotational axis of Pluto. Bull. Amer. Astron. Soc., **5**, 36.
Андерссон (Andersson L. E.), 1978. Eclipse phenomena of Pluto and its satellite. Bull. Amer. Astron. Soc., 10, **586**.
Андерссон, Фикс (Andersson L. E., Fix J. D.), 1973. Pluto: New photometry and a determination of the axis of rotation. Icaruc, **20**, 279.
Бааде (Baade W.), 1930. Beobachtungen des Pluto. Astron. Nachr., **242**, 367.
Бааде (Baade W.), 1934. The photographic magnitude and color index of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **46**, 218.
Бакос (Bakos G.), 1965. Observations of asteroids and Pluto made with an image orthicon tube. Astron. J., **70**, 171.
Балде (Baldet M.), 1930. In: Report of the meeting of May 28, 1930. J. Brit. Astron. Assoc., **40**, 248.
Балди, Капуто (Baldi P., Caputo M.), 1974. The hydrostatic equilibrium and its implications on the mechanical properties of planets. Ann. Geofis., **27**, 235.
Банахевич (Banachiewicz T.), 1930a. Orbit of Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 246.
Банахевич (Banachiewicz T.), 1930b. Trans-Neptunian planet Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 248.
Банахевич (Banachiewicz T.), 1930c. Orbit of the trans-Neptunian planet. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 319.
Банахевич (Banachiewicz T.), 1936. Photographic observations of Pluto. Acad. Polonaise Sci. et Lettres, Bull., 1—2A, 23.
Барбиери, Капаччиоли, Ганц, Пинто (Barbieri C., Capaccioli M., Ganz R., Pinto G.), 1972a. Astrometric programs being carried out at the Padova and Asiago observatories. Mem. Soc. Astron. Ital., **43**, 635.
Барбиери, Капаччиоли, Ганц, Пинто (Barbieri C., Capaccioli M., Ganz R., Pinto G.), 1972b. Accurate positions of the planet Pluto in the years 1969—1970. Astron. J., **77**, 521.
Барбиери, Капаччиоли, Пинто (Barbieri C., Capaccioli M., Pinto G.), 1975. Astrometric positions of the planet Pluto in the years 1971—1974. Astron. J., **80**, 412.
Бауэр (Bower E. C.), 1931. On the orbit and mass of Pluto with an ephemeris for 1931—1932. Lick Obs. Bull., **15**, 171.
Бауэр (Bower E. C.), 1932. Ephemeris of Pluto for 1932—1933 — fourth paper. Lick Obs. Bull., **16**, 31.
Бауэр (Bower E. C.), 1933. Pluto — ephemeris for 1933—1934 — fifth paper. Lick Obs. Bull., **16**, 115.
Бауэр (Bower E. C.), 1934. Pluto — ephemeris for 1934—1935 — sixth paper. Lick Obs. Bull., **17**, 53.

Бауэр, Уиппл (Bower E. C., Whipple F. L.), 1930a. Preliminary elements and ephemeris of the Lowell Observatory object. Lick Obs. Bull., **14**, 189.
Бауэр, Уиппл (Bower E. C., Whipple F. L.), 1930b. Publ. Astron. Soc. Pac., **42**, 239.
Бауэр, Уиппл (Bower E. C., Whipple F. L.), 1931. Elements and ephemeris of the Lowell Observatory object (Pluto) — second paper. Lick Obs. Bull., **15**, 35.
Бело (Belot E.), 1930. Origin and formation of Pluto according to dualistic cosmogony. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 248.
Беннер, Финк, Кромвелл (Benner D. C., Fink U., Cromwell R. H.), 1978. Image tube spectra of Pluto and Triton from 6800 to 9000 Å. Icarus, **36**, 82.
Бессель (Bessel F. W.), 1818. Fundamenta astronomiae pro A. 1755 deducta ex observationibus viri incomparibilis James Bradley in specula astronomica Grenoricensi per A. 1750—1762 institutis, Regiomonti.
Бисбрук, ван (Biesbroeck G., van), 1957. The mass of Neptune from a new orbit of its second satellite Nereid. Astron. J., **62**, 272.
Бисбрук, ван (Biesbroeck G., van), 1963. Positions of planet Pluto. Astron. J., **68**, 738.
Бисбрук, ван, Весли, Марсден, Акснес (Biesbroeck G., van, Vesely C. D., Marsden B. G., Aksnes K.), 1976. Observations of comets, minor planets, Pluto, and satellites. Astron. J., **81**, 122.
Браун (Brown E. W.), 1930. Predictions of trans-Neptunian planets from perturbations of Uranus. Nat. Acad. Sci. Proc., **16**, 364.
Браун (Brown E. W.), 1931. Criterion for the prediction of an unknown planet. Mon. Not. R. Astron. Soc., **92**, 80.
Брауэр (Brouwer D.), 1955. The motions of the outer planets. Mon. Not. R. Astron. Soc., **115**, 221.
Брауэр (Brouwer D.), 1966. In: The Theory of Orbits in the Solar System and in Stellar Systems, G. Contopoulos, Ed., p. 227. Academic Press, New York.
Брауэр, Клеменс (Brouwer D., Clemence G. M.), 1961. In: Planets and Satellites, G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst, Eds., p. 63. Univ. of Chicago Press, Chicago [имеется перевод: Планеты и спутники. — М.: ИЛ, 1963].
Брэди (Brady J. L.), 1972. The effect of a trans-Plutonian planet on Halley's comet. Publ. Astron. Soc. Pac., **84**, 314.
Брэди, Карпентер (Brady J. L., Carpenter E.), 1971. The orbit of Halley's comet and the apparition of 1986. Astron. J., **76**, 728.
Бувар (Bouvard A.), 1821. Tables astronomiques publiées par le Bureau des Longitudes de France contenant les Tables de Jupiter, de Saturne et d'Uranus, construites d'après la théorie de la Mecanique Céleste. Paris.
Вальц (Valz J. E. B.), 1835. Letter. C. R. Acad. Sci. (Paris), **1**, 130.
Вебстер, Вебстер, Вебстер (Webster W. J., Webster A. C., Webster G. T.), 1972. Interferometer observations of Uranus, Neptune and Pluto at wavelengths of 11.1 and 3.7 centimeters. Astrophys. J., **174**, 679.
Веверка (Veverka J.), 1971a. The polarization curve and the absolute diameter of Vesta. Icarus, **15**, 11.
Веверка (Veverka J.), 1971b. Photopolarimetric observations of the minor planet Flora. Icarus, **15**, 454.
Веверка (Veverka J.), 1971c. In: Physical Studies of Minor Planets, T. Gehrels, Ed., p. 91. NASA SP-267, Washington, D. C.
Веронне (Veronnet A.), 1930. Determination of the orbit of the trans-Neptunian planet by three observations. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 24.
Вили (Wylie I. R.), 1942a. A comparison of Newcomb's tables of Neptune with observation, 1795—1938. Publ. U. S. Naval Obs., 15, pt. 1.
Вили (Wylie I. R.), 1942b. An investigation of Newcomb's theory of Uranus. Publ. U. S. Naval Obs., 15, pt. 3.
Вильямс, Бенсон (Williams J. G., Benson G. S.), 1971. Resonances in the Neptune — Pluto system. Astron. J., **76**, 167.

Гайо (Gaillot M. A), 1909. Contribution à la recherche des planètes ultra-neptuniennes. C. R. Acad. Sci. (Paris), **148**, 754.
Гайо (Gaillot A.), 1910. Théorie du mouvement des planètes Uranus et Neptune. Ann. Obs. Paris, **28**, 1.
Ганн (Gunn E. J.), 1970. Another planet? New Sci., **48**, 345.
Гарвардская обсерватория, извещения (Harvard College Observatory Announcement Cards), Nos. 112, 113, 115, 117, 118, 119, 120, 121, 133.
Гаррис (Harris D L.), 1961. In: Planets and Satellites, G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst, Eds., p. 286. Univ. of Chicago Press, Chicago [имеется перевод: Планеты и спутники. — М.: ИЛ, 1963].
Гершель В. (Herschel W.), 1781. Account of a comet. Phil. Transact. R. Soc. (London), **71**, 492.
Гершель Дж. (Herschel J. F. W.), 1849. Outlines of Astronomy. Longmans, Green and Co., London.
Голдрайх, Сотер (Goldreich P., Soter S.), 1966. Q in the solar system. Icarus, **5**, 375 [имеется перевод в сб.: Приливы и резонансы в Солнечной системе. М.: МИР, 1975].
Голицын Г. С., 1975. О возможной атмосфере у Плутона. Письма в Астрон. ж., **1**, № 1, 38.
Граф (Graff K.), 1930. Helligkeit des Pluto. Astron. Nachr., 240, 163.
Грэхем (Graham J. A.), 1978. In: Circular 3241, Internat. Astron. Union Central Bureau for Astron. Telegrams.
Данком, Клепчинский, Сейделмен (Duncombe R. L., Klepczynski W. J., Seidelmann P. K.), 1968a. Orbit of Neptune and the mass of Pluto. Astron. J., **73**, 830.
Данком, Клепчинский, Сейделмен (Duncombe R. L., Klepczynski W. J., Seidelmann P. K.), 1968b. Mass of Pluto. Science, **162**, 800.
Данком, Клепчинский, Сейделмен (Duncombe R. L., Klepczynski W. J., Seidelmann P. K.), 1970. Note on the mass of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **82**, 916.
Данком, Клепчинский, Сейделмен (Duncombe R. L., Klepczynski W. J., Seidelmann P. K.), 1971. A determination of the masses of the five outer planets. Celes. Mech., **4**, 224.
Дермот (Dermott S. F.), 1978. Pluto, Herculina, Mercury and Venus: Their real and imaginary satellites. Bull. Amer. Astron. Soc., **10**, 586.
Джексон (Jackson J.), 1930. Neptune's orbit. Mon. Not. R. Astron. Soc., **90**, 728.
Дик, Финк (Dick K. A., Fink U.), 1977. Photoelectric absorption spectra of methane (CH_4), methane and hydrogen (H_2) mixtures, and ethane (C_2H_6). J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **18**, 433.
Довилье (Dauvillier A.), 1951. The nature of Pluto and Triton. C. R. Acad. Sci. (Paris), **233**, 901.
Дольфюс (Dollfus A.), 1961. In: Planets and Satellites, G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst, Eds., p. 343. Univ. of Chicago Press, Chicago [имеется перевод: Планеты и спутники. — М.: ИЛ, 1963].
Жеховский (Jekhowsky B.), 1930. Orbit of the trans-Neptunian body. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 1049.
Загар (Zagar F.), 1930. Die Bahn Plutos mit Berücksichtigung der Störungen. Astron. Nachr., **240**, 335.
Йоманс (Yeomans D. K.), 1971. Nongravitational forces affecting the motions of pediodic comets Giacobini — Ziner and Borrelly. Astron. J., **76**, 83.
Камерон (Cameron A. G. W.), 1962. The formation of the sun and planets. Icarus, **1**, 13.
Каплан, Сейделмен, Смит (Kaplan G. H., Seidelmann P. K., Smith E.), 1972. Astrometric ephemeris of Pluto 1970—1990. U. S. Naval Obs. Circ., 139.
Каччиатори (Cacciatore N.), 1836. Letter. C. R. Acad. Sci. (Paris), **2**, 154.
Кианг (Kiang T.), 1972. The past orbit of Halley's Comet. Mem. R. Astron. Soc., **76**, 27.

Кианг (Kiang T.), 1973. The cause of the residuals of the motion of Halley's comet. Mon. Not. R. Astron. Soc., **162**, 271.
Киладзе (Kiladze R. I.), 1967. Physical parameters of Pluto. Sol. Sys. Res., **1**, 173.
Киладзе (Kiladze R. I.), 1968. What is the mass of Pluto? J. Brit. Astron. Assoc., **78**, 124.
Килси, Фикс (Kelsey L. A., Fix J. D.), 1972. Linear polarization measurements of Pluto. Bull. Amer. Astron. Soc., **4**, 321.
Килси, Фикс (Kelsey L. A., Fix J. D.), 1973. Polarimetry of Pluto. Astrophys. J., **184**, 633.
Килси, Фикс, Неф (Kelsey L. A., Fix J. D., Neff J. S.), 1972. Spectrophotometry of Pluto. Bull. Amer. Astron. Soc., **4**, 321.
Койпер (Kuiper G. P.), 1950. The diameter of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **62**, 133.
Койпер (Kuiper G. P.), 1953. Satellites, comets, and inter-planetary material. Proc. Nat. Acad. Sci., **39**, 1156.
Койпер (Kuiper G. P.), 1956. The formation of the planets, pt. III. J. R. Astron. Soc. Canada, **50**, 170.
Койпер (Kuiper G. P.), 1957. Further studies on the origin of Pluto. Astrophys. J., **125**, 287.
Колгров (Colgrove W. G.), 1937. Letter to the Editor. J. R. Astron. Soc. Canada, **31**, 55.
Коломбо, Франклин (Colombo G., Franklin F. A.), 1970. *In*: Periodic orbits, stability and resonances, G. E. O Giacaglia, Ed. D. Reidel, Dordrecht.
Кордылевский (Kordylewsky J.), 1956—1958. Acta Astron., **6**, 203; **7**, 156; **8**, 185.
Кохран, Лайт-Кохран (Cochran, W. D., Light-Cochran A.), 1978, Digicon spectroscopy of Triton and Pluto. Bull. Amer. Astron. Soc., **10**, 585.
Коэн, Хаббард (Cohen C. J., Hubbard E. C.), 1964. Libration of Pluto — Neptune. Science, **145**, 1302.
Коэн, Хаббард (Cohen C. J., Hubbard E. C.), 1965. Libration of the close approaches of Pluto to Neptune. Astron. J., **70**, 10.
Коэн, Хаббард, Остервинтер (Cohen C. J., Hubbard E. C., Oesterwinter C.), 1967. New orbit for Pluto and analysis of differential corrections. Astron. J., **72**, 973.
Коэн, Хаббард, Остервинтер (Cohen C. J., Hubbard E. C., Oesterwinter C.), 1979. On the stability of Pluto's orbit (личное сообщение).
Краник (Kranjc A.), 1963. Approximate elements for orbits of planets of the solar system. Mem. Soc. Astron. Ital., **34**, 295.
Краник (Kranjc A.), 1964. Calculations of the equatorial coordinates (1950.0) of the five outer planets, and of the nutation. Mem. Soc. Astron. Ital., **35**, 325.
Кристи, Харрингтон (Christy J. W., Harrington R. S.), 1978. The satellite of Pluto. Astron. J., **83**, 1005.
Кроммелин (Crommelin A. C.), 1931a. Pluto. J. Brit. Astron. Assoc., **41**, 116.
Кроммелин (Crommelin A. C.), 1931b. Examination of the perturbations produced by Pluto on Saturn and Jupiter. J. Brit. Astron. Assoc., **41**, 221.
Кроммелин (Crommelin A. C.), 1931c. The discovery of Pluto. Mon. Not. R. Astron. Soc., **91**, 380.
Крукшенк, Пилчер, Моррисон (Cruikshank D., Pilcher C. B., Morrison D.), 1976. Pluto: Evidence for methane frost. Science, **194**, 835.
Курганов (Kourganoff V.), 1941. La part de la mécanique céleste dans la decouverte de Pluton. Bull. Astron., **12**, 147.
Лау (Lau H. E.), 1914. La planete transneptunienne. Bull. Soc. Astron. France, **28**, 276.
Лацис, Фикс (Lacis A. A., Fix J. D.), 1972. An analysis of the light curve of Pluto. Astrophys. J., **174**, 449.
Леверье (Leverrier U. J. J.), 1845. Premier mémoire sur la théorie d'Uranus. C. R. Acad. Sci. (Paris), **21**, 1050.

Леверье (Leverrier U. J. J.), 1846a. Recherches sur les mouvements d'Uranus. C. R. Acad. Sci. (Paris), **22**, 907.
Леверье (Leverrier U. J. J.), 1846b. Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus — Determination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle. C. R. Acad. Sci. (Paris), **23**, 428, 657.
Лейн, Неф, Фикс (Lane W. A., Neff J. S., Fix J. D.), 1976. A measurement of the relative reflectance of Pluto at 0.86 micron. Publ. Astron. Soc. Pac., **88**, 77.
Лексель (Lexell A. J), 1781. Circular elements of Uranus. Acta Acad. Sci. Imperialis Petropolitanae, Mem., **4**, 307.
Литлвуд (Littlewood J. E.), 1957. A Mathematician's Miscellany. Methuen, London [имеется перевод: Дж. Литлвуд. Математическая смесь. — М.: Наука, 1978].
Литлтон (Lyttleton R. A.), 1936. On the possible results of an encounter of Pluto with the Neptunian system. Mon. Not. R. Astron. Soc., **97**, 108.
Лобкова Н. И., 1975. Метод построения аналитической теории движения Плутона. Письма в Астрон. ж., **1**, № 10, 39.
Ловелл Э. (Lowell A. L.), 1935. Biography of Percival Lowell, MacMillan, New York.
Ловелл П. (Lowell P.), 1915. Memoir on a trans-Neptunian planet. Mem. Lowell Observ., **1**, 1.
Лоутон (Lawton A. T.), 1972. Planets beyond Pluto. Spaceflight, **14**, 454.
Лоутон (Lawton A. T.), 1978. "Charon" — A companion to Pluto. Spaceflight, **20**, 428.
Лоутон (Lawton A. T.), 1978. "Charon" — A companion to Pluto. Spacefligth, **21**, 115.
Мак-Дональд (MacDonald G. J. F.), 1964. Tidal friction. Rev. Geophys., **2**, 467.
Мак-Корд (McCord T. B.), 1966. Dynamical evolution of the Neptunian system. Astron. J., **71**, 585.
Марсден (Marsden B. G.), 1969. Comets and nongravitational forces. III. Astron. J., **74**, 720.
Магсден (Marsden B. G.), 1970. Comets and nongravitational forces. III. Astron. J., **75**, 75.
Марсден (Marsden B. G.), 1971. Comets and nongravitational forces. IV. Astron. J., **76**, 1135.
Мессель (Messell K.), 1974. Pluto. Astron. Tidsskr., **7**, 31.
Миллер (Miller J.), 1930. Lowell Obs. Observation Circ., May 1.
Морган (Morgan H. R.), 1950. Definitive positions and proper motions of primary reference stars for Pluto. Astron. Papers Amer. Ephem., **11**, 505.
Мосли (Moseley T. J.), 1969. The magnitude of Pluto. J. Brit. Astron. Assoc., **79**, 129.
Мэннинг (Manning P. G.), 1971. Is Pluto an iron-rich planet? Nature, **230**, 234.
Накози, Диль (Nacozy P. E., Diehl R. E.), 1974a. A semi-analytical theory of the secular perturbations of Pluto. Bull. Amer. Astron. Soc., **6**, 205.
Накози, Диль (Nacozy P. E., Diehl R. E.), 1974b. On the long term motion of Pluto. Celes. Mech., **8**, 445.
Накози, Диль (Nacozy P. E., Diehl R. E.), 1978. A semianalytical theory for the long-term motion of Pluto. Astron. J., **83**, 522.
Неф, Лейн, Фикс (Neff J. S., Lane W. A., Fix J. D.), 1974. An investigation of the rotational period of the planet Pluto. Publ. Astron. Soc. Jac., **86**, 225.
Нэф (Naef R. A.), 1955. Orion, **4**, 484.
Николаи (Nicolai F.), 1836. Letter. Astron. Nachr., **13**, 94.
Никольсон, Мейолл (Nicholson S. B., Mayall N. U.), 1931. Positions, orbit, and mass of Pluto. Astrophys. J., **173**, 1.
Ньюборн, Гулкис (Newburn R. L., Gulkis S.), 1973. A survey of the outer planets Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, Pluto and their satellites. Space Sci. Rev., **14**, 179.

Ньюком (Newcomb S.), 1874. An investigation of the orbit of Uranus. Smithsonian Contr. Knowledge, **19**, No. 262.
Ньюком (Newcomb S.), 1899. Tables of the heliocentric motion of Neptune. Astron. Papers Amer. Ephem., **7**, pt. 4.
О'Лири (O'Leary B.), 1972. Frequencies of occultations of stars by planets, satellites, and asteroids. Science, **175**, 1108.
Опик (Opik J.), 1961. The survival of stray bodies in the solar system. Ann. Acad. Sci. Fennicae AIII, **61**, 185.
Параскевопулос (Paraskevopoulos J. S.), 1930. Note on South African photographs of Pluto. Pop. Astron., **38**, 416.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1909. A search for a planet beyond Neptune. Harvard Annals, **61**, 113.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1919. The trans-Neptunian planet. Harvard Annals, **82**, 49.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1928a. The next planet bleyond Neptune. Pop. Astron., **36**, 143.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1928b. The next planet beyond Neptune, Part II. Pop. Astron., **36**, 218.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1928c. The orbit of Uranus. Pop. Astron., **36**, 353.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1928d. The three outer planets beyond Neptune. Pop. Astron., **36**, 417.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1929. Planet O. Pop. Astron., **37**, 135.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1930a. The trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 285.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1930b. The trans-Neptunian planet (Supplementary note). Pop. Astron., 38, 293.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1930c. The trans-Neptunian comet. Pop. Astron., **38**, 341.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1931a. The mass and density of Pluto. Pop. Astron., **39**, 2.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1931b. Planet P, Comet 1930 III, Wilk, Number 590. Pop. Astron., **39**, 321.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1931c. Planet P, its orbit, position and magnitude. Planets S and T. Pop. Astron., **39**, 585.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1931d. The location of Planet P (continued). Pop. Astron., **39**, 583.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1931e. The discovery of Pluto. Mon. Not. R. Astron. Soc., **91**, 812.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1932a. Planet U, and the orbits of Saturn and Jupiter. Pop. Astron., **40**, 69.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1932b. First report on the search for Planet P. Pop. Astron., **40**, 351.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1932c. A reply to Professor Brown's criticism of my views on Pluto. Pop. Astron., **40**, 519.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1933. Pluto. A discussion of Dr. Jackson's orbit of Neptune. Pop. Astron., **41**, 556.
Пикеринг (Pickering W. H.), 1934. The difference between the discoveries of Neptune and Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **46**, 44.
Пирс (Peirce B.), 1848a. Investigation into the action of Neptune to Uranus. Proc. Amer. Acad. Arts Sci., **1**, 65.
Пирс (Peirce B.), 1848b. Perturbations of Uranus by Neptune. Proc. Amer. Phil. Soc., **5**, 15.
Путнам, Слайфер (Putnam R. L., Slipher V. M.), 1932. Searching out Pluto — Lowell's trans-Neptunian planet X. Scientific Mon., **34**, 5.
Пьеруччи (Pierucci M.), 1930a. Empirical law discovered in the solar system tested by the new planet. N. Cimento., **7**, 367.
Пьеруччи (Pierucci M.), 1930b. Orbit of the trans-Neptunian planet. Accad. Lincei, Atti, **11**, 1091.
Пьеруччи (Pierucci M.), 1930c. Orbit of the trans-Neptunian planet. Accad. Lincei, Atti, **12**, 103.

Рабе (Rabe E.), 1954. The Trojans as escaped satellites of Jupiter. Astron. J., **59**, 433.
Рабе (Rabe E.), 1957a . On the origin of Pluto and the masses of the protoplanets. Astrophys. J., **125**, 290.
Рабе (Rabe E.), 1957b. Further studies on the orbital development of Pluto. Astrophys. J., **126**, 240.
Рассел (Russell H. N.), 1906. On the light-variations of asteroids and satellites. Astrophys. J., **24**, 1.
Рассел (Russell H. N.), 1930a. Planet X. Scientific Amer., **143**, 20.
Рассел (Russell H. N.), 1930b. How Pluto's orbit was figured out. Scientific Amer., **143**, 364.
Рассел (Russell H. N.), 1930c. More about Pluto. Scientific Amer., **143**, 446.
Рассел (Russel H. N.), 1931. Refining Pluto's orbit. Scientific Amer., **144**, 90.
Рейли (Reilly T. H.), 1970. Scientific objectives for imaging experiments at the outer planets. NASA Report CR-109871, Washington.
Ремер, Лойд (Roemer E., Lloyd R. E.), 1966. Observations of comets, minor planets, and satellites. Astron. J., **71**, 443.
Ривс (Reaves G.,), 1951. Kourganoff's contributions to the history of the discovery of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **63**, 49.
Робертс (Roberts I.), 1892. Mon. Not. R. Astron. Soc.
Роулинс (Rawlins D.), 1970. The great unexplained residual in the orbit of Neptune. Astron. J., **75**, 856.
Роулинс, Хаммертон (Rawlins D., Hammerton M.), 1973. Mass and position limits for a hypothetical tenth planet of the solar system. Mon. Not. R. Astron. Soc., **162**, 261.
Рубашевский А. А., 1966. Метод определения диаметра Плутона из наблюдений покрытия звезд. Замечания к работе Холидея. Астрон. ж., **43**, 157.
Рур (Roure H.), 1934. Long period inequality in mean motion of Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **198**, 901.
Рур (Roure H.), 1935a. Perturbations of Pluto by Neptune. C. R. Acad. Sci. (Paris), **200**, 437.
Рур (Roure H.), 1935b. Mean mouvement of Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **201**, 1322.
Рур (Roure H.), 1939. Secular inequality in mean motion of Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **209**, 788.
Рур (Roure H.), 1940. Eccentricity of orbit of Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **210**, 136.
Сандерс (Sanders W. L.), 1965. A near occultation of a star by Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **77**, 298.
Сейделмен (Seidelmann P. K.), 1971. A dynamical search for a trans-Plutonian planet. Astron. J., **76**, 740.
Сейделмен, Клепчинский, Данком, Джексон (Seidelmann P. K., Klepczynski W. J., Duncombe R. L., Jackson E. S.), 1971. Determination of the mass of Pluto. Astron. J., **76**, 488.
Сигрейв (Seagrave F. E.), 1930. Circular orbit elements of the trans-Neptunian planet X. Pop. Astron., **38**, 355.
Сильва (Silva G.), 1931a. Il pianeta transnettuniano Plutone. Publ. R. Osservat. Astron. Padova, 19.
Сильва (Silva G.), 1931b. Il calcoli d'orbita e l'orbita di Plutone. Publ. R. Osservat. Astron. Padova, 21.
Слайфер (Slipher V. M.), 1930a. A trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 187.
Слайфер (Slipher V. M.), 1930b. The trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 415.
Слайфер (Slipher V. M.), 1931. Report of Lowell Observatory for 1930. Pop. Astron., **39**, 204.
Слайфер (Slipher V. M.), 1938. Trans-Neptunian planet search. Amer. Phil. Soc. Proc., **79**, 435.
Смарт (Smart W. M.), 1947. John Couch Adams and the discovery of Neptune. Occas. Not. R. Astron. Soc., **2**, 56.

Стойко (Stoyko N.), 1930a. Orbit of the trans-Neptunian body discovered at Lowell Observatory. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 1275.
Стойко (Stoyko N.), 1930b. Influence of 3rd and 4th order terms in using Esclangon's method to determine a planet's orbit. Application to the trans-Neptunian planet. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 1379.
Таффара (Taffara L.), 1930. Il nuovo pianeta ultranettuniano "Plutone" fotografato nel R. Osservatorio astrofisico di Catania... M. Ponzio, Pavia.
Тодд (Todd D. P.), 1880. Preliminary account of a speculative and practical search for a trans-Neptunian planet. Amer. J. Sci., **20**, 232.
Томбо (Tombaugh C. W.), 1961. In: Planets and Satellites, G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst, Eds., p. 12. Univ. of Chicago Press, Chicago [имеется перевод: Планеты и спутники. — М.: ИЛ, 1963].
Томсен, Эйбл (Thomsen B., Ables H. D.), 1978. Measurement of the angular separation and magnitude difference for the Pluto-Charon system. Bull. Amer. Astron. Soc., **10**, 586.
Уиппл (Whipple F. L.), 1950. A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. Astrophys. J., **111**, 375.
Уиппл (Whipple F. L.), 1964. Evidence for a comet belt beyond Neptune. Nat. Acad. Sci. Proc., **51**, 711.
Уокер, Харди (Walker M. F., Hardie R. H.), 1955. A photometric determination of the rotational period of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **67**, 224.
Файе (Fayet G.), 1931a. Orbits of comets and the planet Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), **192**, 1362.
Файе (Fayet G.), 1931b. Orbits of the planets Neptune and Pluto. C. R. Acad. Sci. (Paris), 193.
Фикс (Fix J. D.), 1972. Comments on the interior of Pluto. Icarus, **16**, 569.
Фикс, Неф, Килси (Fix J. D., Neff J. S., Kelsey L. A.), 1970. Spectroscopy of Pluto. Astron. J., **75**, 895.
Фиксмиллнер (Fixmillner P.), 1787. Berliner Astron. Jahrb., 249.
Финк, Беннер, Дик (Fink U., Benner D. C., Dick K. A.), 1977. Band model analysis of laboratory methane absorption spectra from 4500 to 10500 Å. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **18**, 447.
Фламмарион (Flammarion C.), 1884. L'Astronomie, **3**, 81.
Форбс (Forbes G.), 1880a. On comets. Proc. R. Soc. Edinburgh, **10**, 426.
Форбс (Forbes G.), 1880b. Additional note on an ultra-Neptunian planet. Proc. R. Soc. Edinburgh, **11**, 89.
Фосс, Шейв-Тейлор, Уитворт (Foss A., Shawe-Taylor J., Whitworth D.), 1972. Search for a trans-Plutonian planet. Nature, **239**, 266.
Харди (Hardie R. H.), 1965a. Pluto's rotation and diameter. Sky and Telescope, **29**, 141.
Харди (Hardie R. H.), 1965b. A re-examination of the light variation of Pluto. Astron. J., **70**, 140.
Харди (Hardie R. H.), 1969. Pluto's dimming not permanent. Sci. News, **95**, 285.
Харрингтон, Ван Фландерн (Harrington R. S., Van Flandern T. C.), 1979. The satellites of Neptune and the origin of Pluto. Icarus, **39**, 131.
Харт (Hart M. H.), 1974. A possible atmosphere for Pluto. Icarus, **21**, 242.
Хатанака, Кикучи, Конно (Hatanaka Y., Kikuchi S., Konno M.), 1973. An expected occultation of a star by Pluto. I. A photoelectric observation. Tokyo Astron. Bull., **226**, 2623.
Холидей (Halliday I.), 1963. A proposal for a new determination of the diameter of Pluto. J. R. Astron. Soc. Canada, **57**, 163.
Холидей (Halliday I.), 1965a. A possible occultation by the planet Pluto. Sky and Telescope, **29**, 216.
Холидей (Halliday I.), 1965b. Pluto's diameter. Sky and Telescope, **30**, 213.
Холидей (Halliday I.), 1969. Comments on the mean density of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **81**, 285.
Холидей, Харди, Франц, Прайзер (Halliday I., Hardie R. H., Franz O. G., Priser J. B.), 1966. An upper limit for the diameter of Pluto. Publ. Astron. Soc. Pac., **78**, 113.

Хоредт (Horedt G.), 1974. Mass loss in the plane circular restricted three-body problem: application to the origin of the Trojans and of Pluto. Icarus, **23**, 459.
Хьюз (Hughes D. W.), 1978. Pluto's satellite. Nature, **274**, 309.
Чаллис (Challis J.), 1846. Letter to the Editor. Athenaeum, 1300.
Шараф Ш. Г., 1955. Теория движения Плутона. Часть 1. Труды Ин-та теорет. астрономии, 4, 3.
Шараф Ш. Г., Будникова Н. А., 1964. Теория движения Плутона. Части 2—4. Труды Ин-та теорет. астрономии, 10, 3.
Шепли (Shapely H.), 1930a. Trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 189.
Шепли (Shapely H.), 1930b. Trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 296.
Шехтмэн (Shechtman D.). 1945. Pluto's advance of perihelion. Pop. Astron., **53**, 42.
Шютте (Schuette C. H.), 1949. Two new families of comets. Pop. Astron., **57**, 176.
Эйхельбергер, Ньютон (Eichelberger W. S., Newton A.), 1926. The orbit of Neptune's satellite and the pole of Neptune's equator. Astron. Papers Amer. Ephem., 9, pt. 3.
Эккерт, Брауэр, Клеменс (Eckert W. J., Brouwer D., Clemence G. M.), 1951. Coordinates of the five outer planets 1653—2060. Astron. Papers Amer. Ephem., 12, 3.
Эманюэль (Emanuelli P.), 1930. The cometary aphelia and the trans-Neptunian planet. Pop. Astron., **38**, 451.
Эри (Airy G. B.), 1832. Report on astronomy. Brit. Assoc. Advanc. Sci. Rep., 1832.
Эри (Airy G. B.), 1846. Account of some circumstances historically connected with the discovery of the planet exterior to Uranus. Mon. Not. R. Astron. Soc., **7**, 121.
Эсклангон (Esclangon E.), 1930a. Trans-Neptunian planet. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 834, 897, 957.
Эсклангон (Esclangon E.), 1930b. Determination of position and elements of a planet or distant star. Application to the Lowell celestial body. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 981.
Эсклангон (Esclangon E.), 1930c. Determination of the position and elements of a planet or comet by three corresponding observations of a small arc of the orbit. C. R. Acad. Sci. (Paris), **190**, 1085.
Эсклангон (Esclangon E.), 1930d. Orbit of the trans-Neptunian planet. C. R. Acad. Sci. (Paris), **191**, 629.
Эш, Шапиро, Смит (Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B.), 1971. The system of planetary masses. Science, **174**, 551.

СОДЕРЖАНИЕ

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2, изд-во «Мир».

Антони Уайт

ПЛАНЕТА ПЛУТОН

Научный редактор М. Ф. Путов
Мл. научный редактор Н. В. Саввон
Художник Т. И. Руденко
Художественный редактор М. Н. Кузьмина
Технический редактор Е. В. Ящук
Корректор Е. Г. Литвак

ИБ № 3267

Сдано в набор 11.11.82.
Подписано к печати 25.03.83.
Формат 60×90 1/16.
Бумага кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Объем 4 бум. л. Усл. печ. л. 8. Усл. кр.-отт. 8,23.
Уч.-изд. л. 8,42. Изд. № 27/2211. Тираж 30 000 экз. Зак. 1548.
Цена 40 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР».
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

40 коп.