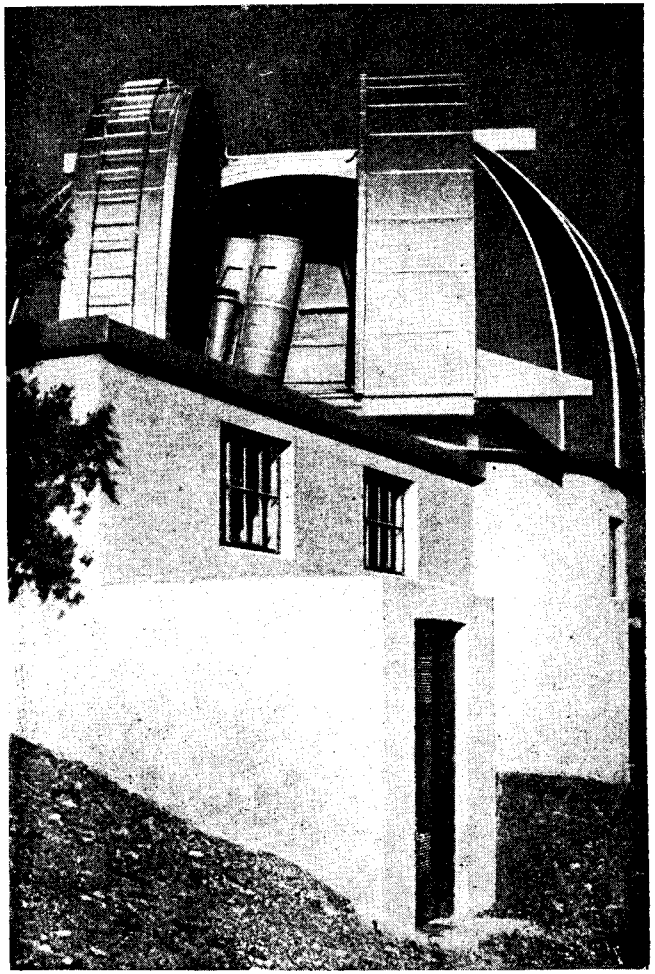
Г. ДИМИТРОВ и Д. БЭКЕР

# ТЕЛЕСКОПЫ

ОГИЗ-ГОСТЕХИЗДАТ-1947



Новый 20-дюймовый фотографический телескоп Росса (Ликская обсерватория).

Г. Димитров и Д. Бэкер

# ТЕЛЕСКОПЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ К НИМ

Перевод с английского М.С. НАВАШИНА

ОГИЗ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1947 ЛЕНИНГРАД

THE HARVARD BOOKS ON ASTRONOMY

Edited by

HARLOW SHAPLEY AND BART J. BOK

# TELESCOPES AND ACCESSORIES

BY

GEORGE Z. DIMITROFF

AND

JAMES G. BAKER

THE BLAKISTON COMPANY

Philadelphia

Редактор *И. Е. Рахлин*. Техн. редакторы: *Н. А. Тумаркина* и *С. Н. Ахламов*.

Подписано к печати 25/VII 1947 г. 19,25 печ. л. 16,5 уч.-изд. л. 34600 тип. зн. в печ. л. А-06385. Тираж 15000 экз. Цена книги 5 р. Переплёт 2р. Заказ № 82

3-я типография «Красный пролетарий» треста «Полиграфкнига» ОГИЗа при Совете Министров СССР. Москва, Краснопролетарская, 16.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СВЕТ КАК СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ . . . . . 5

Световые волны (7). Цвет (11). Поляризованный свет (13). Отражение и преломление (15). Кванты (18). Что такое свет? (19).

2. ВИЗУАЛЬНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ . . . . . 23

Зрение (24). Телескопические объективы (27). Рефлекторы (36). Окуляры (41). Типы окуляров (46). Сравнение линзовых объективов с зеркальными (49). Предельная визуальная звёздная величина (51). Разрешающая способность (52).

3. ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС . . . . . 55

Фотографический процесс (59). Фотохимическое действие света (60). Эмульсия (62). Проявление (66). «Мелкозернистые» проявители (71). Характеристика фотографической эмульсии (73).

4. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ . . . . . 82

Разрешающая способность (82). Поле зрения и масштаб пластинок (87). Рефлектор как фотографический инструмент (89). Ошибки изображения (92). Рефрактор как фотографический инструмент (98). Наилучше исправленные фотографические рефлекторы (103). Камера Шмидта (108). Видоизменения камеры Шмидта (114). Двузеркальные системы с коррекционной пластинкой (117). Фотографический дублет (122). Триплет Кука (124). Объектив Росса (125). Различные объективы (126). Предельная звёздная величина (127).

5. СПЕКТРОСКОПИЯ . . . . . 130

Диффракционная решётка (132). Астрономическая спектроскопия (139). Объективная призма (140). Объективная решётка (144). Бесщелевые спектрографы (146). Бесщелевой спектрограф Мак-Карти (148). Щелевой спектрограф (150). Разрешающая способность и эффективность щелевого спектрографа (157). «Резатель изображений» (165). Небулярные спектрографы (167). Тенденции в спектроскопии (174).

6. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТА . . . . . 177

Шкала звёздных величин (180). Визуальная фотометрия (182). Фотографическая фотометрия (189). Ослабление света звёзд атмосферой (193). Фотоэлектрическая фотометрия (198). Фотометры и денситометры (205).

7. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА . . 210

Спектрогелиограф (212). Спектрогелиоскоп (217). Обсерватория Мак-Мэз-Хулберт (219). Коронограф Лио (230). Кварцевый монохроматор (236).

8. ПОСТРОЙКА ТЕЛЕСКОПА . . . . . 241

Выбор оптических частей (246). «Труба» (252). Монтировка телескопов (260). «Часовой механизм» (267). Гидирование (272). Выгнутые пластинки; насадка против росы (276). Помещение для телескопа (277). Фотолаборатория (284). Будущее (286).

ПРИЛОЖЕНИЯ . . . . . 293

# 1
# СВЕТ КАК СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ

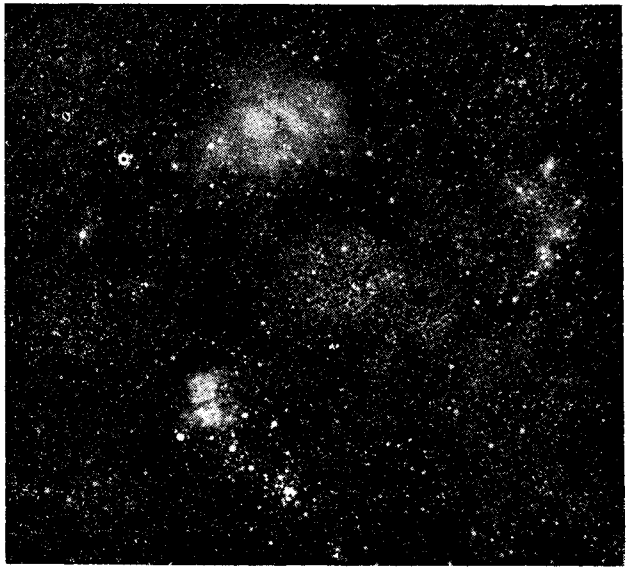
Природа наделила человечество на заре его эволюции способностью познавать окружающий мир при помощи света. Человеческий глаз не лучше глаза любого высшего животного, но интеллект человека позволил ему научиться истолковывать световые картины, создающиеся на сетчатке, и тем самым расширять свои опытные данные о мире.

Практические задачи занимали первобытного человека настолько, что заслоняли для него эстетические или моральные ценности. В то время нормального человеческого зрения было более, чем достаточно. Но с появлением первых философов, которые, живя в лучшем мире интеллекта, были выше своей среды, появилась нужда в усилении человеческого зрения.

Эта книга рассказывает о том, как современный человек научился посредством мощных приёмов и инструментов изучать мир, в котором он живёт. Гигантские телескопы еженощно «ощупывают» небо, собирая сведения, о которых без них нельзя было бы и подозревать. В многочисленных астрономических обсерваториях учёные заняты, даже в этот момент, когда вы читаете эти строки, переводом на научный язык фотографий неба, связыванием их содержания с прежними наблюдениями и с прежними теориями. Эти учёные изучают свет.

приходящий к нам от небесных светил. Вы увидите, как это делается.

Наша книга описывает главнейшие инструменты и приёмы исследования, применяемые при астрономических наблюдениях. Она предназначена для читателя, желающего знать, как астроном изучает мир, окружающий Землю. Кроме подробного описания телескопов со всеми



Фиг. 1. Мессье 8 и Тройная туманность.
Размытая туманность Мессье 8 (вверху) и Тройная туманность, сфотографированные 24-дюймовой камерой Брюса в Южной Африке.

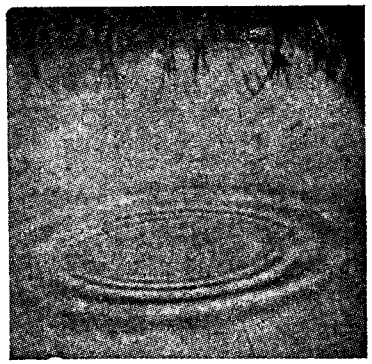
их увлекательными деталями, в книге уделяется много места также и вспомогательным инструментам, делающим телескоп столь высокоэффективным.

Прежде чем касаться устройства астрономических инструментов, мы приглашаем читателя короткое время задержаться на знакомстве с важным для нас вопросом о природе света.



## СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

В XVII в. Христиан Гюйгенс (1629—1695) много занимался вопросом о природе света. Посредством тщательного изучения явлений отражения и преломления Гюйгенс пришёл к убеждению, что свет есть энергия, распространяющаяся волновым движением, и что свет движется прочь от своего источника по прямым, перпендикулярным к некоторой поверхности, называемой *фронтом волны*. Все точки фронта волны находятся в точно одинаковой фазе колебания.



Фиг. 2. Водяные волны на поверхности пруда.

Проведём аналогию с водяными волнами на поверхности пруда (фиг. 2), вызванными каким-либо возмущением, например падением камня. Гребни волн распространяются во все стороны от источника. Движущийся гребень каждой волны очерчивает то, что мы назвали выше фронтом волны, а каждая волна движется вдоль линии, направленной под прямым углом к ней. Расстояние между соответственными точками последовательных волн называется *длиною волны*.

Волны на поверхности пруда трёхмерны. Во-первых, частицы воды движутся вверх и вниз по отношению к поверхности пруда. Во-вторых, каждая точка фронта волны движется прочь от источника. В-третьих, волновой фронт как целое движется всё расширяющимися кругами, всегда имеющими центром источник возмущения. Радиально-поперечный разрез поверхностной волны похож на двумерную волну колеблющейся струны.

Свет от малого источника распространяется сферическими волновыми фронтами. Отметим, что фронт волны колеблющейся струны есть лишь движущаяся точка, а фронт водяной волны — расширяющийся круг. Сферике-

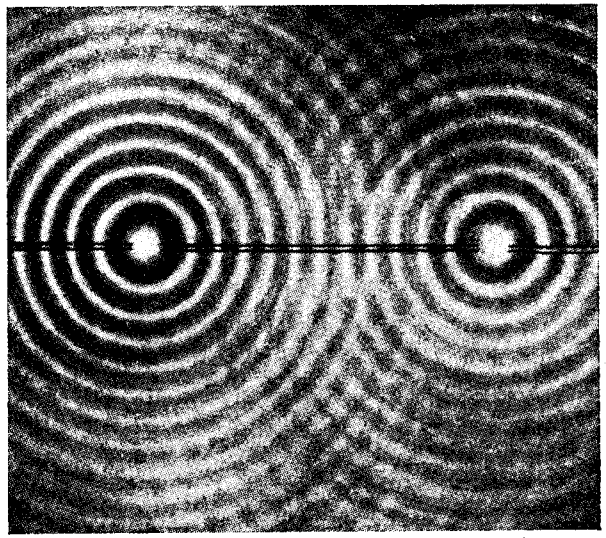
ский фронт волны есть просто расширяющийся шар с центром в источнике света. Идеальный сферический волновой фронт имеет источником света математическую точку. На практике источник никогда не бывает столь мал. Однако для всех практических целей за *точечный источник* света можно считать такой источник, который виден под очень малым углом с поверхности изучаемого фронта волны. Звезда является таким точечным источником. Хотя звёзды имеют огромные размеры, при рассматривании с Земли они видны под углом менее 0,07 секунды дуги; это меньше, чем угол, под которым представляется типографская точка с расстояния в один километр.

Свет, доходящий к нам от далёкого источника вроде звезды, есть часть сферического фронта волны такого гигантского радиуса, что тот участок его, который мы видим, является скорее плоскостью, чем сферической искривлённой поверхностью, и он называется поэтому *плоской* волной. Перпендикуляры к плоскому фронту волны практически параллельны между собою; их направление, после введения поправки на движение Земли, принимается за направление на звезду. Пучок света от столь удалённого точечного источника часто называют *параллельным* пучком.

Если свет проходит сквозь чрезвычайно узкое отверстие, он перестаёт распространяться первоначальным волновым фронтом. Вместо этого возникает новый фронт с кажущимся источником в этом отверстии. Представим себе совершенно светонепроницаемую комнату, в стене которой имеется небольшое отверстие со вставленной в него линзой; линза имеет такое фокусное расстояние, что солнечный свет, проходящий через неё, собирается в изображение Солнца на противоположной стене комнаты. Если эта линза имеет поперечник в несколько сантиметров, то она образует на стене отчётливое изображение Солнца. Более 99% солнечного света, проникающего в комнату, собрано в изображении Солнца. Начнём теперь уменьшать поперечник линзы и будем наблюдать, как это скажется на изображении Солнца. Мы заметим, что оно будет становиться всё менее и менее отчётливым. Наконец,



когда отверстие линзы станет едва заметным, небольшое количество света, которое ещё будет проникать сквозь неё, рассеется по всей комнате. Интенсивность света в комнате будет оставаться максимальной в том месте, где раньше был центр изображения Солнца, убывая по ме-



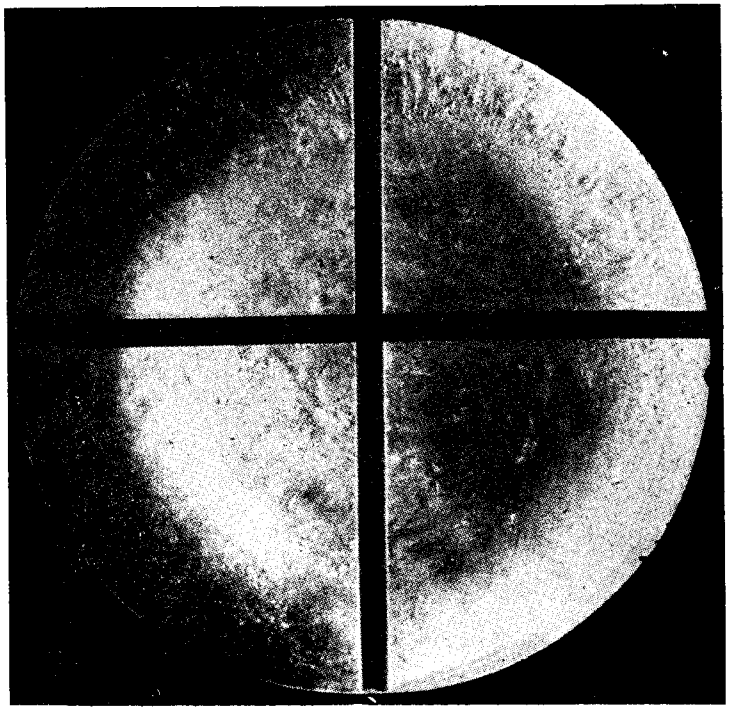
Фиг. 3. Интерференция водяных волн.
Источник возмущения—две маленькие бусины, колеблющиеся в вертикальной плоскости, касаясь поверхности воды.

ре увеличения угла к направлению солнечного света. При угле в 90° к направлению солнечного света напряжение падает до нуля. Распределение света в комнате теперь почти не обнаружит и следа первоначального изображения Солнца.

Загибание света у краёв отверстия называется *дифракцией*. Исследование описанного нами явления доказывает, что *любая* точка волнового фронта может рассматриваться как источник света, от которого свет распространяется во все стороны сферическими волновыми фронта-

ми. Наше описание показывает это лишь для очень малых отверстий. Как же нам приложить этот принцип к движению света в пространстве?

Мы можем вернуться к нашей аналогии с водяными волнами на поверхности пруда. Если два отдельных источника колебаний находятся в движении в одно и то



Фиг. 4. Фокограмма со старого астрономического зеркала, полученная при помощи фотокамеры, сфокусированной на зеркало и помещённой позади ножа Фуко.

Из двух непрозрачных полос, проходящих под прямым углом друг к другу через зеркало, одна, параллельная краю ножа, окружена диффрагированным светом, а другая резко очерчена. Ясно, что много света попало на неотчётливо видимую полосу вследствие диффракции; резко очерченная полоса—совершенно чёрная. Обратите внимание на вскрытые фокограммой дефекты алюминиевого фильма и поверхности стекла.



же время (например, два камня, одновременно брошенные на расстоянии нескольких метров друг от друга), волновые фронты от одного источника движутся сквозь волновые фронты от другого источника. Несмотря на то, что индивидуальность каждого волнового фронта сохраняется ещё долго после того, как две волны прошли одна сквозь другую, в месте пересечения каждой пары волновых фронтов происходит явление, называемое *интерференцией*. Всюду, где пересекаются два гребня волн, движение воды вверх и вниз усиливается, но там, где гребень одной волны попадает в углубление другой волны, обладающей такой же амплитудой, вода становится спокойной и волновое движение исчезает (фиг.3).

Можно принять, что каждая точка движущегося волнового фронта испускает ряд *вторичных* волн. Эти волны так интерферируют друг с другом, что энергия передаётся по перпендикулярам к первоначальному волновому фронту, но совершенно уничтожается в любом другом направлении «переднего» полушария. В «заднем» полушарии этих вторичных волночек нет; можно показать, что они там даже не возникают.

Явление диффракции заключается в неполной интерференции вторичных волночек у края светового пучка (фиг.4). Процент световой энергии, потерянной вследствие отклонения от первоначального направления светового пучка, незначителен, если поперечник пучка велик. Но если поперечник пучка мал, диффракция начинает преобладать, и уже бессмысленно говорить о направлении светового пучка, есть лишь переднее и заднее полушария.

## ЦВЕТ

В 1666 г. Исаак Ньютон своим классическим опытом показал, что белый свет состоит из многих цветов, составляющих то, что мы теперь называем *чистым спектром*. Ньютон поместил стеклянную призму на пути солнечного света, проходящего через малое отверстие в ставне. Он нашёл, что луч Солнца, выходящий из призмы, разлагается на стене в непрерывный ряд цветов, от тёмно-красного, через оранжевый, жёлтый, зелёный и синий

до тёмнофиолетового. Для того, чтобы выяснить, являются ли эти цвета свойством призмы или свойством светового пучка, он пропустил свет через вторую призму, перевёрнутую по отношению к первой. Сделав это, Ньютон нашёл, что свет снова собрался в белый пучок.

Столетием позже Вильям Гершель открыл, что термометр показывает более высокую температуру, будучи помещён за пределами тёмнокрасного цвета в спектре солнечного света; он правильно заключил, что спектр должен продолжаться в невидимую область. Фотография показывает, что спектр тянется в обе стороны далеко за видимые пределы красного и фиолетового цветов; в самом деле, дальнейшие исследования показали, что видимый спектр есть лишь одна октава в гораздо большей гамме излучений. Длина световой волны, если иметь в виду чистый спектр, имеет прямое отношение к физиологическому явлению цвета. Видимый свет имеет очень малую длину волны, если подходить к ней с обычной меркой. Зелёный свет, например, имеет длину волны около 0,0005 *мм*. Видимый свет обнимает диапазон длин волн между 0,0008 (тёмнокрасный) и 0,0004 *мм* (тёмнофиолетовый).

Полный спектр излучений начинается на длинноволновом конце с радиоволн. От *длинных* радиоволн (10000000 *мм*) через *короткие* радиоволны мы приходим к наиболее длинноволновым инфракрасным лучам; затем идут инфракрасные, красные, оранжевые, жёлтые, зелёные (0,0005 *мм*), синие, фиолетовые, ультрафиолетовые (0,0001 *мм*); далее мы переходим в область рентгеновских лучей и гамма-лучей (0,0000000001 *мм*). Астрономические наблюдения ограничены главным образом длиной волны, большей, чем 0,0003 *мм*, ибо наша атмосфера непрозрачна для лучей с более короткой длиной волны.

Для многих целей *ангстрем* (Å)—более удобная единица измерений, чем миллиметр. Один ангстрем равен 0,0000001 *мм*. Зелёный свет поэтому имеет длину волны около 5000 Å. Удобную единицу длины часто представляет *микрон* или 0,001 *мм*.



Интерференция и диффракция прямо зависят от длины волны света. Так, например, дырочка от булавочного прокола диаметром в 40 длин волн будет рассеивать (вследствие диффракции) пропускаемый ею свет, но для ультрафиолетового света отверстие диаметром в 40 длин волн будет иметь поперечник в 0,013 *мм*, а для длинных радиоволн оно должно быть размером в несколько километров. Обратно, если мы возьмём отверстие в 0,030 *мм* диаметром, то будет значительная диффракция видимого света, практически не будет диффракции далёких ультрафиолетовых лучей и полная диффракция далёких инфракрасных лучей. Длина волны рентгеновских лучей столь мала, что булавочное отверстие в 0,010 *мм* диаметром не производит заметной диффракции; поэтому рентгенограммы, полученные при помощи малого отверстия, ясно показывают детали размером в поперечник этого отверстия.

## ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

Вернёмся к водяным волнам на поверхности пруда. Пробка, плавающая на воде, будет качаться вверх и вниз на волнах, пробегающих под ней. Движение пробки происходит под прямым углом к направлению распространения волны. В случае колеблющейся струны узел на струне движется вверх и вниз, в направлении, составляющем прямой угол со струной. Такое движение называется *поперечным* колебанием.

Звуковые волны в газах, жидкостях и твёрдых телах имеют иной характер. Частица, участвующая в волновом движении, колеблется взад и вперёд в направлении движения волны. Среда как целое содержит области сжатия, разделённые областями разрежения; волновое движение в ней сопряжено с изменением давления. Такое волновое движение называется *продольным* колебанием.

Частицы, участвующие в продольных колебаниях, раскачиваются вдоль одной линии, идущей в направлении движения волны. Частицы, участвующие в поперечных колебаниях, движутся под прямым углом к направлению движения волны и для определения ориентации

плоскости, в которой происходит колебание, требуется ещё одна характеристика (т. е. «вверх и вниз» или «в стороны» и т. д.). В случае волн на поверхности пруда движение, несомненно, совершается вверх и вниз. Плоскость колебаний поэтому перпендикулярна к поверхности пруда.

В начале XIX в. Френель доказал, что световые колебания являются поперечными и что плоскость их можно ориентировать любым образом. Световой пучок, поперечные колебания которого происходят лишь в одной единственной плоскости, называется *поляризованным*. Обычный свет от электрической лампы состоит из различных волновых фронтов и различных длин волн, колеблющихся в различных плоскостях. Поляризованный свет состоит из светового пучка, колеблющегося в одной плоскости, хотя в этой плоскости могут быть различнейшие длины волн.

Самый известный теперь источник поляризованного света, это — *поляроид*, особый светофильтр, ставший уже легкодоступным. Проходя через слой поляроида, обычный свет со смешанным направлением колебаний поляризуется; в идеальном случае, при отсутствии всяких дополнительных потерь, 50% света поглощается поляроидом, а 50% проходит через него. Прошедшая часть света колеблется лишь в одной плоскости, которую можно назвать плоскостью колебаний поляроида. Если на пути этого пучка лучей, прошедшего через один поляроид, поставить другой поляроид, то мы натолкнёмся на поразительное явление. При вращении второго поляроида относительно первого интенсивность света, проходящего через оба поляроида, будет изменяться почти от нуля до 50% от интенсивности света, падающего на первый поляроид. Пучок света, проходящий через оба поляроида, при любой ориентации поляризован в плоскости колебаний второго поляроида, но интенсивность этого пучка целиком зависит от ориентации поляроидов друг к другу.

Такие наблюдения ясно показывают, что свет распространяется поперечными волнами, поскольку продольные колебания неспособны поляризоваться. Многие



природные кристаллы производят поляризацию. Поляроид есть не что иное, как собрание маленьких поляризующих кристаллов (например, герапатита или иодосульфата хинина), расположенных при помощи остроумного химического приёма так, что их плоскости поляризации совпадают.

Согласно электромагнитной теории света, развитой Максвеллом в прошлом веке, поперечные колебания, которыми мы занимались до сих пор, связаны с изменениями электрических и магнитных полей, меняющихся под прямым углом друг к другу.

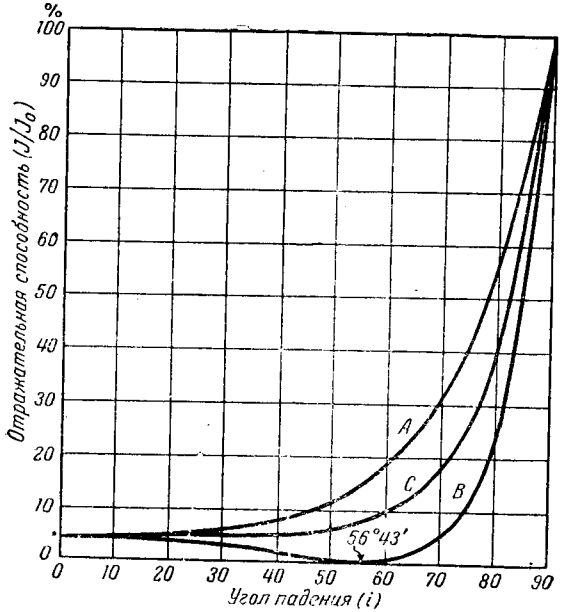
## ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ

Многими наблюдениями было доказано, что свет движется в пустоте по прямым с постоянной скоростью, *не зависящей* от его цвета или поляризации. Скорость света в пустоте, по определению Андерсона, равна $299\,776 \pm 14$ *км* в секунду. Красный и фиолетовый свет от удалённых небесных тел, проходящий через почти пустое межзвёздное пространство, доходит до нас, вероятно, в виде того же гребня волн, в каком энергия была излучена тысячи лет тому назад. Но в материальной среде скорость света не только уменьшается в различной степени, в зависимости от свойства среды, но она зависит ещё и от цвета. Показатель преломления ($n$) среды — удобная лабораторная мера замедляющего действия среды. Так

$$n = \frac{\text{скорость света в пустоте}}{\text{скорость света в среде}}.$$

Когда пучок света входит из одной среды в другую, отделённую от неё гладкой границей, он обычно разделяется на две части; одна из них отражается, другая преломляется. При помощи волновой теории можно вывести относительную интенсивность обоих пучков; результат этого расчёта хорошо согласуется с наблюдениями. Отражённый пучок возникает от появления *обратных* вторичных волночек, которых нет нигде, кроме области возмущения на пограничной поверхности.

На фиг. 5 представлена зависимость интенсивности света, отражённого чистой стеклянной поверхностью, от угла между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности; этот угол называется углом падения.



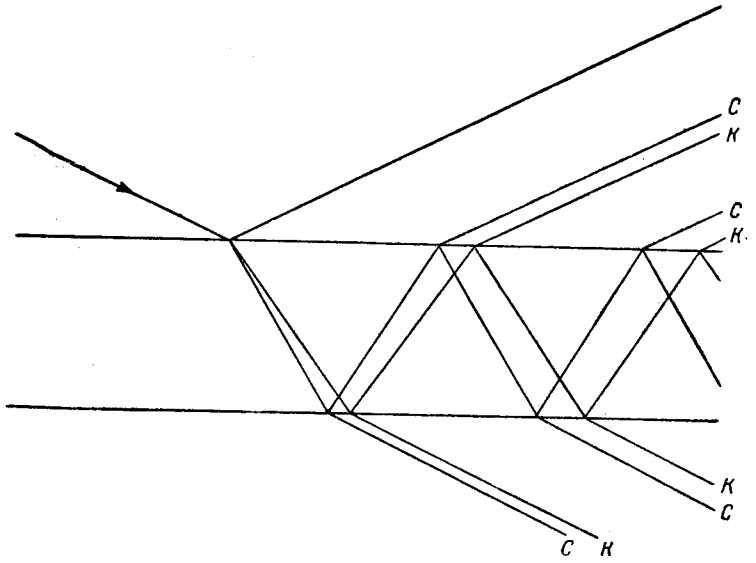

Фиг. 5. Изменения интенсивности отражённого света.

Изменения интенсивности отражённого света в зависимости от угла падения *A*—свет, поляризованный в плоскости падения; *B*—свет, поляризованный в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения; *C*— неполяризованный свет.

Фиг. 5 показывает, что для обычного стекла при угле падения около 57°(«угол Брюстера») способность отражать для одного рода поляризации (когда плоскость падения содержит электрическое поле) падает до нуля. Отражённый пучок весь поэтому оказывается второго рода поляризации (когда плоскость падения содержит магнитное поле). Таким образом, при отражении от стекла под углом в 57° смешанный свет превращается в поляризованный. На практике присутствие малейших



следов жира или просто пыли, осевшей из воздуха, мешает полной поляризации отражённого пучка. В пустоте или в течение какой-нибудь минуты, после того как поверхность стекла была химически очищена, наблюдается поразительно полная поляризация.




Фиг. 6. Преломление и отражение луча белого света толстой стеклянной пластинкой.

При отражении света от полированной поверхности угол отражения равен углу падения. При преломлении света угол преломления связан с углом падения законом Снеллиуса:

$$\sin i = n \sin r.$$

Показатель преломления $n$ зависит от длины волны (т. е. от цвета) светового пучка. Фиг. 6 показывает, что происходит, когда белый луч падает на толстую плоскопараллельную стеклянную пластинку. Пучок света разбивается на ряд преломлённых и отражённых лучей.

## КВАНТЫ

При помощи электрических методов можно наблюдать, что удар световой волны о чувствительную поверхность фотоэлемента выбрасывает поток электронов, который может быть притянут к положительно заряженному электроду, может быть усилен и может производить различную работу. Наблюдения показывают, что скорость выброшенного электрона совершенно независима от интенсивности падающего светового пучка.

Если мы заставим световой пучок одного цвета, например синего (монохроматический свет), упасть на фотоэлемент, электроны будут выбрасываться с одной и той же скоростью. Если световой пучок будет становиться всё более и более фиолетовым, электроны будут вылетать со всё большей и большей скоростью, но все электроны данной группы будут обладать одинаковыми скоростями. Если мы дадим пучку рентгеновых лучей упасть на фотоэлемент, электроны будут вылетать с чрезвычайно высокой, но определённой скоростью. Если мы опять возьмём пучок монохроматического синего света, но на этот раз будем изменять интенсивность пучка, мы не найдём изменения скорости вылетающих электронов, но лишь изменение их числа.

Отсюда следует, что число выброшенных электронов зависит только от интенсивности света, а скорость выброшенных электронов зависит только от длины волны света. Если пучок белого света, содержащий лучи различных длин волн, т. е. смешанный свет, падает на фотоэлемент, получается смесь электронов различной скорости, и число вылетающих электронов будет зависеть от распределения энергии по длинам волн в падающем свете.

Самый важный вывод, сделанный из наблюдений над фотоэлектрическим эффектом, состоит в том, что энергия светового пучка как бы разбита на порции или *кванты*. Если отвлечься от поправки, учитывающей работу отрывания электрона от поверхности фотоэлемента, то получается, что выброшенный электрон обладает энергией, равной той, которая получена от кванта падающего света. Так как различные монохроматические лучи создают различные скорости вылетающих электронов, надо принять, что энергия световых квант зависит от длины волны; далее, так как все электроны обладают точно одинаковой энергией, то кванты монохроматического света тоже должны обладать одинаковой энергией; было установлено, что эта энергия обратно пропорциональна длине волны.



Волновая теория света не даёт удовлетворительного объяснения фотоэлектрического эффекта. Мы приходим поэтому к выводу, что природа света заключается не только в простом волновом движении, но что свет должен иметь более сложное «строение». Другое явление, которое также не может быть объяснено волновой теорией, это обыкновенное фотографическое действие света. Хотя это действие менее изучено, чем фотоэлектрический эффект, тем не менее установлено, что почернение зерна фотографической эмульсии вызвано поглощением порций энергии или квант падающего светового пучка.

## ЧТО ТАКОЕ СВЕТ?

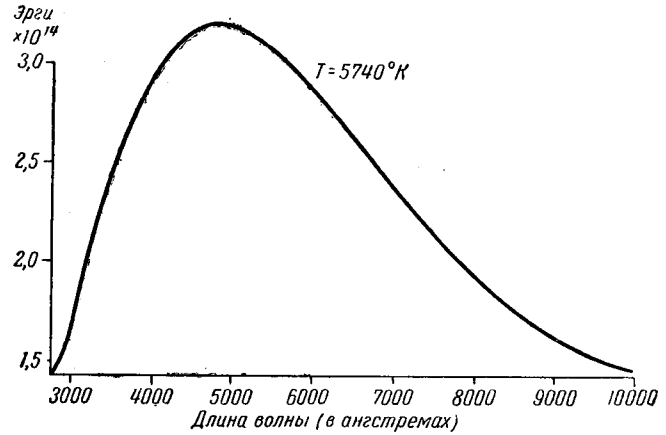
Никто ещё не дал вполне удовлетворительного объяснения природы света. У нас есть только очень точное описание его поведения. Повидимому, мы должны представлять себе световой пучок состоящим из элементарных волн энергии, называемых квантами, или фотонами. С каждым таким квантом связано определённое количество энергии. Каждый фотон совершенно независим от любого другого фотона в волновом фронте, поскольку дело касается потери энергии; но из явлений диффракции и интерференции мы должны заключить, что фотоны колеблются в поперечном направлении и поэтому поляризованы и что фотоны вполне способны интерферировать друг с другом, усиливая или ослабляя колебания, хотя энергия при этом не теряется.

В задачи этой книги не входит детальный разбор испускания или поглощения света атомами и молекулами *).

*) Это изложено в книге Л. Гольдберга и Л. Аллера «Атомы, звёзды и туманности».

Нам достаточно сказать, что квант света остаётся квантом с неизменным содержанием энергии, пока он не поглощён или не возмущён внутри или вблизи атома.

Мы получили бы очень мало сведений при помощи света от излучающего атома, если бы качество света не зависело от природы источника. Так, например, обычный электрический свет производит ряд спектральных цветов без всяких перерывов между ними. Распределение энергии света по длинам волн при данной температуре накала остаётся одним и тем же, независимо от того, будет ли сделан ламповый волосок из вольфрама, меди или какого-либо иного металла.

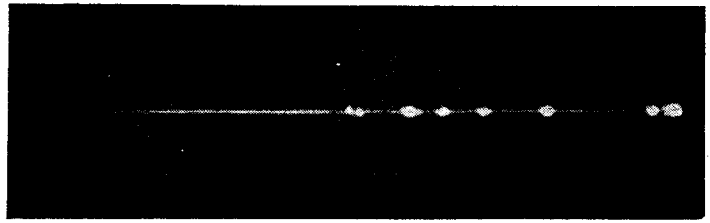



Фиг. 7. Кривая распределения по спектру световой энергии, испускаемой раскалёнными твёрдыми телами, жидкостью или газом, находящимся под давлением, при указанной температуре.

Кривая выведена теоретически с целью представить испускаемое Солнцем излучение. При более низких температурах максимум кривой перемещается вправо и становится ниже. Некоторые звёзды настолько горячи, что максимум кривой лежал бы влево за пределами чертежа.

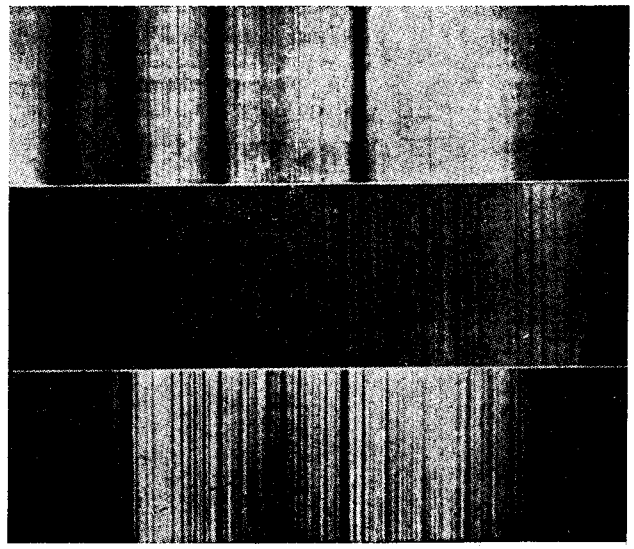
Спектр, подобный даваемому электрической лампочкой, называется *непрерывным*. Все раскалённые твёрдые тела и жидкости, а также и газы, находящиеся под высоким давлением, испускают непрерывный спектр. Распределение интенсивности света по различным дли-





Фиг. 8. Спектр планетарной туманности (NGC 6543).

Два налегающих друг на друга туманных диска справа находятся в зелёной области спектра. Последний растянутый диск слева — в ультрафиолетовой области и невидим для глаза. Горизонтальная узкая полоска — непрерывный спектр звезды в самом центре газового облака, составляющего туманность.



Фиг. 9. Спектры поглощения звёзд трёх разных типов.

Широкие полосы в верхнем спектре вызываются холодным водородом в звёздной атмосфере.

нам волн, как показано на фиг. 7, зависит почти целиком от температуры, а не от природы веществ.

В отличие от непрерывного спектра раскалённый газ под *низким* давлением испускает большое число монохроматических линий без промежуточных излучений. Рисунок спектра, образуемый этими линиями — единственная, неповторимая характеристика структуры атомов самого газа. Такой спектр, подобный изображённому на фиг. 8, называется спектром *испускания* или *линейчатым* спектром.

Если газ, находящийся между наблюдателем и источником непрерывного света, менее горяч, чем источник света, то непрерывный спектр оказывается пересечённым многими тёмными линиями. Расположение тёмных линий тождественно с расположением ярких линий в линейчатом спектре газа; это доказывает, что газ поглотил световую энергию именно этих длин волн. Такой спектр, изображённый на фиг. 9, называется спектром *поглощения*.

Спектр, это — ключ к познанию природы атома или небесного тела, часть которого составляет атом. Действительно, только свойства света — диффракция, интерференция, содержание энергии, поляризация и другие его качества, — заключённые в спектре, открыли нам путь к детальному изучению вселенной.

---

# 2

# ВИЗУАЛЬНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

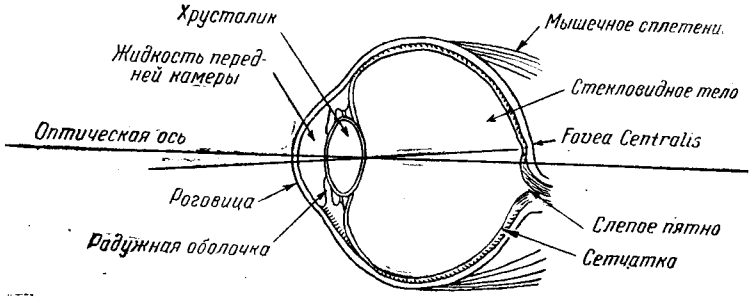
Телескоп — одно из важнейших изобретений всех времён. Столетия прошли с тех пор, как первый примитивный инструмент показал Галилею спутников Юпитера, — столетия, принесшие с собой большой прогресс. Фундаментальное значение телескопа, однако, не изменилось. Человеческий глаз, сам по себе слабый, становится с помощью телескопа могущественным.

До открытия фотографии астрономические телескопы предназначались исключительно для визуальных наблюдений. Даже и теперь, если не считать астрономов-профессионалов, телескоп попрежнему остаётся в первую очередь визуальным инструментом, пленяющим любителей неба. Многие астрономы-любители пользуются самодельными визуальными телескопами.

Визуальный телескоп выполняет две основные функции. Во-первых, он собирает свет звезды и передаёт его сетчатой оболочке глаза. Во-вторых, он должен создать на сетчатке отчётливое изображение наблюдаемого небесного тела, изображение, сильно увеличенное в сравнении с тем, которое образуется в невооружённом глазу. Визуальный телескоп обычно состоит из трёх частей: из собирающего свет объектива, из окуляра и из человеческого глаза. Так как именно человеческий глаз есть тот орган, к которому телескоп должен быть приспособлен, следует рассмотреть физическое строение глаза, прежде чем обращаться к телескопу.

## ЗРЕНИЕ

С физиологической точки зрения человеческий глаз есть сложный оптический инструмент, но для физика он сравнительно прост. Фиг. 10 представляет схему нормального человеческого глаза. Шесть мышц, расположенных вне глаза, прочно прикреплены к крепкому наружному слою; эти мышцы не только держат глаз в орбите, но также поворачивают его, давая ему любое нужное направление в пределах почти полусферы. В передней




Фиг. 10. Разрез человеческого глаза.

части глаза белый наружный слой переходит в прозрачный, называющийся *роговицей*. Роговица в значительной степени придаёт глазу свойства линзы. Если роговица отступает по своей форме от сферы, необходимой для получения резких изображений на сетчатке, возникают различные недостатки зрения, многие из которых можно исправить очками.

Внутри глаза, на пути входящего туда света, помещаются друг за другом: *жидкость передней камеры, хрусталик и стекловидное тело* и, самое важное, *сетчатка*. Жидкость передней камеры есть в основном слегка солоноватый раствор; стекловидное тело представляет собой водянистый студень. Хрусталик, это — волокнистое студенистое тело, более твёрдое в центре и более мягкое к краям. Мускулы, прикреплённые к хрусталику, могут так регулировать его форму, что образуемые глазом



изображения предметов, находящихся на различных расстояниях, отчётливо фиксируются на сетчатке. Вместе с возрастом человека хрусталик постепенно теряет эту свою способность к *аккомодации*; следовательно, человек постепенно становится устойчиво близоруким или дальнозорким, соответственно окончательной форме своей роговицы. Детали, которые может различить наилучший глаз, ограничиваются в большей степени строением сетчатки, чем недостатками его системы «линз». Мы можем считать, что для большинства целей средний глаз, снабжённый подходящими очками, может создать достаточно резкое изображение на сетчатке.

Сетчатка представляет собой поверхность мелкозернистого строения. Нельзя надеяться различить более мелкие детали, чем это позволяет строение сетчатки. Именно поэтому важно увеличение. Телескоп для глаза играет такую же роль, что и телеобъектив для миниатюрной фотокамеры. Увеличение телескопа растягивает изображение предмета на сетчатке, так что каждое маленькое зерно сетчатки получает меньшую часть изображения, чем без увеличения. Благодаря этому получается большее различение подробностей. Деталь близкого предмета невооружённому глазу кажется крупнее, чем та же деталь того же предмета, но с большего расстояния. Таким образом, увеличение, это — лишь особое выражение для обозначения кажущегося приближения предмета. Находится ли предмет *действительно* ближе или телескопический объектив заставляет его *казаться* ближе, — не имеет значения, поскольку дело касается сетчатки.

Глаз обладает одной необыкновенной способностью, состоящей в том, что область наиболее ясного зрения лежит не на его оптической оси, но примерно в трёх градусах в стороне от оси, если смотреть из центра роговицы. В этом месте ясного зрения в сетчатке есть лёгкое углубление. Поле отчётливого зрения человеческого глаза удивительно мало *). Поэтому глаз беспрерывно

*) Читатель может установить величину поля ясного зрения своего глаза. Посмотрите, на какое расстояние надо удалить эти два крестика (++), чтобы вы уже не смогли фиксировать один из них более внимательно, чем другой.

движется, осматривая поле зрения в поисках дополнительных подробностей; если возможности вращения глаза становятся недостаточны для осмотра предмета, движется голова, а за нею уже и всё тело.

Маленькая область ясного зрения на сетчатке называется *жёлтым пятном*. Анатомическое исследование показывает, что эта область содержит множество светочувствительных клеток, называемых *палочками* и *колбочками*. Колбочки преобладают в центральной части поля зрения и всё более и более вытесняются палочками во внешних зонах. Сетчатка за пределами жёлтого пятна состоит преимущественно из палочек или из кучек палочек. Самая центральная часть жёлтого пятна не содержит ничего, кроме колбочек; эта область называется fovea centralis (около 0,25 *мм* в диаметре). В этой фовеальной области размер колбочек варьирует от 1,5 микрона до 5,4 микрона. Колбочки не соприкасаются между собою, поэтому разрешающая способность или острота зрения сетчатки при фовеальном зрении соответствует расстоянию между колбочками, т. е. приблизительно 10 микронам для изображений точек или около 6—7 микрон для изображений линий. Импульсы, передаваемые в мозг по зрительному нерву, посылаются отдельными колбочками в каждый данный момент отдельно *).

Порог чувствительности сетчатки (способность видеть слабый свет) в громадной степени зависит от присутствия или отсутствия вещества, называемого *зрительным пурпуром*. В дневные часы зрительный пурпур отсутствует, и сетчатка относительно нечувствительна. Ночью, или в темноте, особенно, если глазам дать отдохнуть, зрительный пурпур восстанавливается, и глаза становятся чрезвычайно чувствительными. Кроме того, зрачок глаза способен изменять свой поперечник, регулируя

*) Читатель может произвести сам следующий опыт. Кусок красного целлофана, помещённый перед правым глазом, пропускает только красный свет к сетчатке правого глаза; кусок зелёного целлофана перед левым глазом пропустит в левый глаз только зелёный свет. Белый свет будет казаться наблюдателю либо красным, либо зелёным, или цвета могут чередоваться. Иными словами, один глаз слеп, в то время как другой действует.



свет, нужный глазу в соответствии с наличным количеством зрительного пурпура *).

Диаметр отверстия радужной оболочки может увеличиваться вчетверо, а его площадь, следовательно, в шестнадцать раз, но изменения в количестве зрительного пурпура расширяют изменчивость чувствительности до миллиарда раз и даже более. Глаз может без труда приспособиться к рассматриванию куска белой бумаги как освещённого солнечным светом, так и светом яркой звезды. Размах изменчивости яркости источника света может превосходить десять миллиардов раз **).

Колбочки каждая по отдельности соединяются со зрительным нервом и далее с мозговыми клетками. Следовательно, если две светящиеся точки на фовеа лежат так близко друг к другу, что свет той и другой падает на одну и ту же колбочку, мозг воспримет лишь одну точку, правда почти двойной яркости; но если светящиеся точки попадут на различные колбочки, мозг воспримет их как раздельные, и изображения точек будут разрешены.

## ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ

Самая важная функция объектива телескопа, это — собирание света для глаза или для фотографической пластинки. Для визуальных наблюдений другая важная функция объектива — увеличить наблюдаемый предмет, чтобы различение не ограничивалось структу-

*) Зрительный пурпур связан с витамином А. У нормальных людей имеется такой запас этого витамина, что требуется несколько месяцев недостаточного питания для исчерпания этого запаса; при отсутствии зрительного пурпура человека поражает куриная слепота, или пониженная чувствительность сетчатки.

**) Палочки более чувствительны к свету, чем колбочки. Наблюдатель звёзд скоро замечает явление *бокового зрения*. Изображения светящихся объектов, попадающие на сетчатку далеко от фовеа, хотя и не резки, но приходятся на кучки палочек, которые все разом посылают импульс в мозг. В то время как энергия, поглощённая одной палочкой, может быть недостаточна, чтобы послать в мозг импульс, энергия, собранная целой группой палочек, может оказаться для этого достаточной.

рой сетчатки. Для обеих целей основное состоит в том, чтобы изображение точкообразного предмета, вроде звезды, было насколько возможно более резким.

В настоящее время широко распространены два вида телескопов: отражательные телескопы-рефлекторы и преломляющие телескопы-рефракторы. На фиг. 13 и 14 представлены разрезы того и другого в их простейшей форме.

Простой преломляющий телескоп на одном конце трубы содержит линзу или объектив. Изображение, образованное линзой, находится у другого конца трубы, где увеличительное стекло, называемое окуляром, позволяет глазу рассмотреть его более точно.

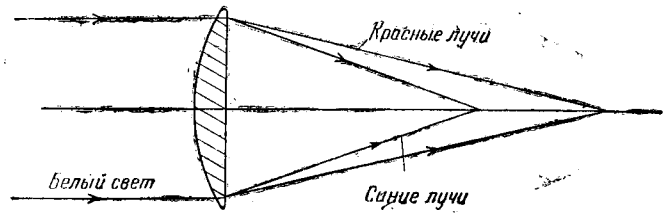
Рефлектор образует изображение при помощи вогнутого зеркала, называемого главным зеркалом; оно помещается в нижнем конце трубы, а изображение — у верхнего конца трубы. Свет должен поэтому дважды пройти через трубу, прежде чем соберётся в фокусе. Основное затруднение у рефлектора состоит в том, что изображение оказывается на пути падающего света. Чтобы привести фокальную плоскость в более удобное положение для наблюдателя, необходимо ввести маленькое плоское зеркало (или призму), называемое вспомогательным, в сходящийся пучок лучей. С его помощью фокальная плоскость сдвигается к стенке трубы телескопа.

Простая линза состоит из одного сорта стекла, и потому различные спектральные цвета собираются в различных точках вдоль оптической оси, как показывает фиг. 11. Поэтому в изображении звезды, наблюдаемой через такую простую линзу, происходит значительное разложение на цвета. Этот недостаток линзы, называемый *хроматической аберрацией*, а иногда *первичным спектром*, имеет то свойство, что величина изображения в любом цвете у некоторого положения наилучшей средней фокусировки на оси зависит только от диаметра линзы, но не зависит от фокусного расстояния. Если фокусное расстояние увеличивается при том же диаметре объектива, линейная хроматическая аберрация в фокусе не изменяется, но размеры фокального изображения



планеты или туманности при этом увеличиваются, и поэтому дефект, вносимый хроматической аберрацией, составляет меньшую часть изображения, и можно различить больше деталей предмета.

Если же принять во внимание волновую природу света, то надо учитывать фокусное расстояние. Длиннофокусная простая линза на деле даёт лучшее разреше-




Фиг. 11. Хроматическая аберрация простой линзы.

ние, чем можно было предполагать, исходя из чисто геометрического представления о лучах. Ньютон некогда участвовал в споре именно по этому вопросу. В самом деле, фокусное расстояние можно настолько увеличить, что искажение, вызываемое разложением на цвета, оказывается меньше диффракционного изображения. Фокусное расстояние простой линзы должно быть очень велико, чтобы хроматическая аберрация не вредила. С достаточной точностью оно определяется из формулы

$$f = 40\,D^2,$$

где $D$ — линейный диаметр объектива в сантиметрах. Если бы мы исходили из идеализированного представления о световых лучах, то пришли бы к приблизительному требованию

$$f = 400\,D^2,$$

которое, очевидно, чрезмерно строго. Эта формула основывается на максимальном полезном увеличении, равном 20 $D$, и на разрешающей способности глаза.

В XVII в. преломляющие телескопы часто делались чрезвычайно длинными для исправления хроматической

аберрации простой линзы. Во многих случаях астрономам приходилось отказываться от труб. Линза, насколько было возможно, устанавливалась по лучу зрения, а терпеливый астроном ловил изображение, находясь в нескольких метрах от неё.

Честер Мур Холл около 1733 г. открыл, что, комбинируя собирательное стекло, сделанное из кронгласса с рассеивающей линзой из флинтгласса, можно сделать ахроматическую (не дающую окраски) составную линзу. Первым изготовил такую ахроматическую линзу Джон Доллонд (около 1759 г.). До него преломляющий телескоп был не особенно полезен либо вследствие окраски изображений, либо из-за неуклюжих установок, которые были необходимы, чтобы справляться с невероятно длинными трубами. Для определённой цветовой ошибки телескопы Доллонда (при полном исправлении) были приблизительно в 20 раз короче телескопов с простой линзой, при одинаковой силе и увеличении.

Исаак Ньютон ошибочно полагал, что дисперсия света *) стёклами разных сортов должна быть *в точности* пропорциональна показателю преломления, уменьшенному на единицу (т. е. $n-1$), что привело бы к тому, что никакая комбинация из двух линз не могла бы дать бесцветное изображение. Ньютон был и прав, и неправ. Кривые дисперсии стёкол достаточно различны, чтобы можно было выбрать такие линзы из крона и флинта, чтобы комбинация из них была ахроматична на 95%. Остальные 5% (главным образом красные и синие лучи) составляют так называемый *вторичный спектр* **).

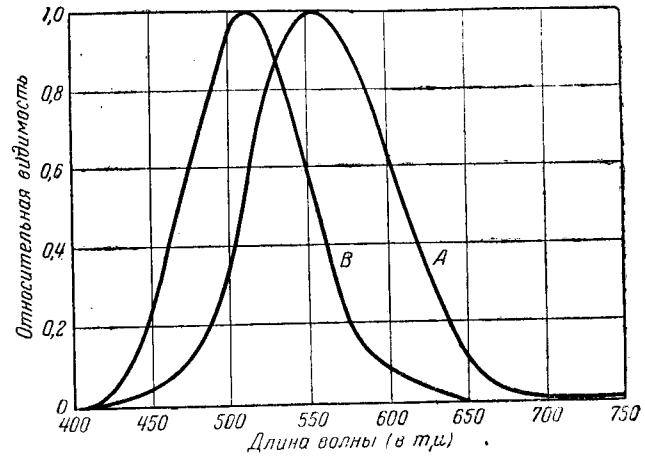
Однако, пользуясь оптическими стёклами обычных сортов, невозможно изготовить вполне ахроматический

*) Например, разность показателей преломления для красного и синего света.

**) Имея рефрактор, можно легко наблюдать влияние вторичного спектра, пользуясь способом Г. Стокса. Телескоп надо сначала навести на фокус по яркожёлтой звезде, а затем закрыть половину объектива. Красные и синие лучи, не наведённые на фокус, которые, проходя через окуляр, обычно сливаются, в этом случае отчётливо выступают отдельно.



двухлинзовый объектив. Существует несколько комбинаций стёкол, обладающих остаточной окраской, составляющей всего 1% от того, что даёт эквивалентная простая линза, но, как правило, такие объективы требуют очень большой кривизны поверхностей. Комбинации из некоторых природных кристаллов ещё более ахроматичны, но пока могут применяться лишь для изготовления линз очень малого диаметра.




Фиг. 12. Кривая чувствительности сетчатой оболочки глаза.
Кривая *A* представляет чувствительность при нормальном уровне освещения. Кривая *B* показывает чувствительность при низком уровне освещения. Кривые построены в таком масштабе, что максимум обеих равен единице.

Легко достигаемое в современных объективах 95%-ное исправление достаточно для небольших инструментов. Однако 5% остаточного хроматизма явятся некоторым недостатком при работе с большими рефракторами и будут очень вредны в фотографических камерах, применяемых для широкого диапазона длин волн. Если нет совершенного ахроматизма, то правильнее всего исправить объектив для самого важного цвета.

Фиг. 12 показывает изменение чувствительности сетчатки в зависимости от цвета. Максимальная чувствительность кривой *A* соответствует длине волны

5 500 Å. При слабом освещении максимум кривой сдвигается влево. Визуальные телескопы обычно исправлены для области зелёных лучей.

Отношение диаметра линзы к фокусному расстоянию называется *относительным отверстием*, или светосилой телескопа. Так как светосила есть мера собирания света, достигаемого посредством телескопа, это есть мера быстроты при фотографировании, а также мощности объектива. Визуальные телескопы, как правило, обладают фокусным расстоянием, превоеходящим их отверстие в 15 — 20 раз. На практике поэтому говорят о телескопах со светосилой 1/15 или 1/20.

Выбор светосилы порядка 1/15 влечёт ряд преимуществ для рефрактора. Прежде всего, нужно отметить, что визуальный рефрактор идеально подходит для изучения тонких деталей изображений планет. Линза во много раз менее чувствительна к изгибанию, чем зеркало рефлектора; небольшие ошибки поверхностей линзы, получившиеся при изготовлении, далеко не так важны, влияние колебания температуры не столь вредно, как в случае рефлектора. На практике линза поглощает и рассеивает меньше света, чем рефлектор с двумя зеркалами *) и, кроме того, её чистота в меньшей степени зависит от внешних условий. Так как обычно только первая поверхность объектива может загрязниться, рефрактор редко требует разборки для чистки. Кроме того, недостатки, присущие объективу и окуляру, исчезающе малы при относительном отверстии 1/15 (но не при 1/5).

*) Объективы небольших рефракторов состоят из кроновой и флинтовой линз, склеенных канадским бальзамом. Склеивание внутренних поверхностей крона и флинта, которые в этом случае по необходимости имеют одинаковый радиус кривизны, предотвращает потерю около 9% света вследствие отражения; кроме того, в склеенном объективе невозможны отблески или «духи». Большие рефракторы не могут выдержать натяжений при склеивании вследствие различий в расширении и сжатии крона и флинта при колебаниях температуры и благодаря резко увеличенному прогибанию. Поэтому у них четыре поверхности, отделяющие стекло от воздуха. Такой объектив пропускает около 82% падающего света (см., однако, Приложение I). Если не считать потерь от заслонения света, двузеркальный рефлектор со *свеже посеребрёнными* зеркалами даёт примерно то же самое.



Единственная важная аберрация или оптическое несовершенство хорошо сконструированного визуального рефрактора, это — *вторичный спектр*, 5%-ная остаточная окраска, о которой говорилось выше. Этот дефект важен, так как он ограничивает отчётливость изображений даже в самом центре поля зрения. Если у строителя рефрактора нет каких-либо особых целей, лучше всего держаться отношения 1/15. Для рефрактора, предназначенного только для изучения предельно тонких деталей планет, светосила 1/15 велика, лучше 1/20 (см. Приложение IV). Как правило, выбор светосилы 1/15 будет превосходным компромиссом. Вторичная хроматическая аберрация, подобно первичной цветовой ошибке простой линзы, выраженная в линейной ошибке изображения в фокальной плоскости, опять-таки независима от фокусного расстояния, но зависит от диаметра объектива. При увеличении фокусного расстояния, хроматическая аберрация, выраженная в секундах дуги, становится меньше *).

В силу волновой природы света, вторичный спектр, как он ни плох, всё же не так вреден, как это можно было предполагать, исходя из представления о свете, распространяющемся по геометрическим прямым. Фокусное расстояние ахроматического объектива, обладающего допустимой хроматической аберрацией, определяется с достаточной точностью формулой

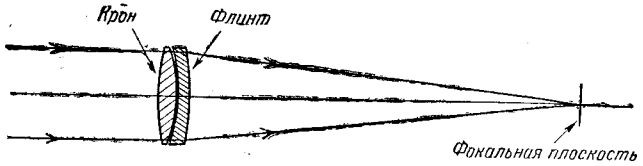
$$f = 2D^2.$$

Трёхдюймовый ($7^1/_2$ *см*) объектив при светосиле 1/15 отвечает этой формуле. Окраска изображения заметна у него лишь в случае яркого объекта на тёмном фоне.

Таблица 1 содержит список заслуживающих рекомендации сортов стекла и приближённые кривизны для склеенных и несклеенных объективов. Обыкновенный склеенный объектив из крона и флинта даёт несколько

*) В окуляр можно вставить жёлтый светофильтр. Назначение такого фильтра—пропускать только резко фокусирующиеся жёлто-зелёные лучи и поглощать синие и красные, фокусирующиеся неточно. Однако фильтры нужного типа относительно мало полезны, даже в жёлто-зелёных лучах. Они уменьшают интенсивность света и могут применяться лишь в том случае, если света достаточно.

худшие результаты вне оси, чем несклеенный объектив, имеющий четыре поверхности стекло — воздух. Есть четыре возможные формы таких объективов из кронгласса и флинтгласса, с плотно прилегающими линзами; все они исправлены примерно в одинаковой степени. Лучшая астрономическая комбинация называется *объективом Фраунгофера*; она изображена на фиг. 13. Так называ-




Фиг. 13. Объектив Фраунгофера.

емые объективы *Гартинга* склеены, но, тем не менее, столь же хорошо исправлены на оси и вне оси, как и объективы с четырьмя свободными поверхностями. Такое хорошее исправление оказалось возможным путём комбинирования стёкол иных сортов, чем обычный крон и флинт. Так, например, лёгкий баритовый крон и флинт дают подобный вполне исправленный объектив. Так как у больших склеенных объективов изображения портятся от прогибания и температурных изменений, объективы Гартинга полезны только для сравнительно небольших телескопов и вспомогательных инструментов.

Таблица 1

Перечисленные ниже объективы исправлены только для визуальных целей. Все они рассчитаны по данным о показателях преломления оптического стекла сорта BSC-2 и DF-2 из каталога фирмы Бауш и Ломб. Стекло BSC-2 выбрано для передней линзы из-за своей исключительной твёрдости и сопротивляемости старению. Сорт BSC-2 обладает показателем преломления для натриевого пламени 1,5170; сорт DF-2 имеет показатель преломления 1,6170. Величины $\nu$ (коэффициенты дисперсии) соответственно равны 64,5 и 36,6.

Все величины в таблице 1 даны в долях эквивалентного фокусного расстояния. Так, например, достаточно лишь умножить значения радиусов кривизны и толщин на длину фокусного расстояния в *см*, чтобы получить радиусы и толщины в *см*. Положительные радиусы обращены выпуклостью к предмету. отрицательные—к окуляру.

Все четыре объектива примерно одинаково хорошо исправлены в отношении хроматизма и рассчитаны на наилучшее исправление



сферической аберрации при светосиле 1/15. Применение точно сферических поверхностей вызывает при изготовлении небольшую остаточную сферическую аберрацию, известную под названием зональной аберрации. Обычные испытания по методу Фуко обнаружат её наличие, если объектив имеет большой диаметр. Небольшая зональная ретушь улучшит качество изображения, насколько это позволяет дифракция при светосиле 1/15 (см. главу 4, где объяснены эти термины).

a. Склеенный тип. Исправлена сферическая аберрация, но не кома.

b. Склеенный тип. «b» обладает лишь 40% зональной аберрации, свойственной «a». Кома по величине почти равна коме у «a», но противоположна по знаку.

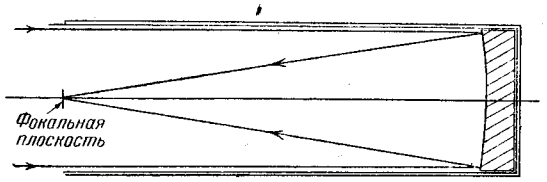
c. Фраунгоферовский тип. «c» обладает столь же хорошим исправлением сферической аберрации как «b» и, кроме того, имеет лишь незначительную кому. Желательно оставление очень небольшого промежутка между кроновой и флинтовой линзами во избежание соприкосновения.

d. Тип с воздушным промежутком. Промежуток составляет лишь четверть того, который был принят Кларком. Некоторое увеличение воздушного промежутка приводит к почти полному устранению зональной аберрации. Однако «d» обладает преимуществом равенства внутренних радиусов, так что крон и флинт могут шлифоваться друг на друге и испытываться при ретуши с помощью интерференции. Лёгкая регулировка расстояния между линзами готового объектива очень хорошо компенсирует небольшие отступления показателей преломления от величин, указанных в каталоге и небольшие ошибки выполнения. Тип «d» обладает лишь 40% зональной аберрации типов «b» и «c», а также незначительной комой.

| | Передняя линза | Задняя линза |
|---|---|---|
| a. Радиус передней поверхности | 1,0177 | —0,2877 |
| Радиус задней поверхности | —0,2877 | —0,7336 |
| Толщина в центре | 0,00699 | 0,00500 |
| b. Радиус передней поверхности | 0,4645 | —0,4314 |
| Радиус задней поверхности | —0,4314 | —5,214 |
| Толщина в центре | 0,00697 | 0,00498 |
| c. Радиус передней поверхности | 0,6083 | —0,3585 |
| Радиус задней поверхности | —0,3544 | —1,4936 |
| Толщина в центре | 0,00704 | 0,00503 |
| d. Радиус передней поверхности | 0,5814 | —0,3585 |
| Радиус задней поверхности | —0,3585 | —1,6189 |
| Толщина в центре | 0,00693 | 0,00495 |
| Воздушный промежуток на оптической оси | 0,00311 | |

## РЕФЛЕКТОРЫ

Простейшим типом зеркала для рефлектора является параболическое зеркало *), изображённое на фиг. 14. Математическая кривая, называемая параболой, имеет то важное свойство, что она сводит все лучи, падающие на неё параллельно оси параболы, в одну точку—фокус—на оси (ось симметрии кривой). Передней поверхности астрономического зеркала придаётся форма параболоида.




Фиг. 14. Параболическое зеркало и его главный фокус.

Так как стекло отражает лишь 4—5% падающего света, необходимо покрывать поверхность стекла очень тонким слоем какого-либо хорошо отражающего металла. Химический способ серебрения, введённый в употребление в середине прошлого столетия и широко применённый для множества зеркал, произвёл переворот в изготовлении рефлекторов. До открытия этого способа зеркала делались из зеркального металла (около 68% меди и 32% олова), отражательная способность которого составляет 60%.

Применяя современный метод испарения **), стеклянную поверхность можно покрыть слоем почти любого

*) Термин *параболический*, строго говоря, приложим только к плоской кривой. Зеркало, радиальное сечение которого представляет параболу, имеет поверхность *параболоида*. Астрономы, имея ввиду форму сечения, обычно называют его параболическим. Сходные замечания относятся к терминам *гиперболический* вместо *гиперболоидальный* и *эллиптический* вместо *эллипсоидальный*. Однако сферическое зеркало никогда не называют циркулярным или круговым.

**) Осаждение фильма испаряемого металла на стеклянном зеркале обычно производится в вакууме. С малыми зеркалами особых затруднений нет, но в случае больших зеркал очень трудно создать



металла; однако, наибольшей отражательной способностью обладают серебро и алюминий, причём последний — прочнее *). В связи с поисками наиболее прочного фильма в последнее время обратили внимание на родий, средняя отражательная способность которого составляет около 80%.

Толщина металлических фильмов обычно близка к длине световой волны. Так как любая неправильность хорошо осаждённого фильма, вероятно, составит лишь малую долю длины волны света, оптические качества зеркала не портятся заметным образом от серебрения или алюминирования.

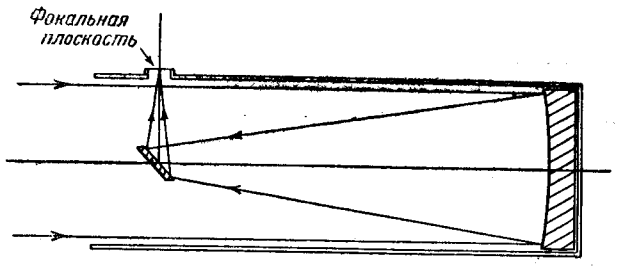
Телескоп с одним зеркалом имеет ряд преимуществ перед рефрактором. Так как он абсолютно ахроматичен, можно работать со светом любой окраски. Кроме того, ввиду полного ахроматизма светосила может быть больше с соответственным уменьшением длины трубы. Это практическое преимущество очень важно. Сооружение рефрактора с отверстием в 50 *см*, с трубой длиной в $7\frac{1}{2}$ *м* и большим куполом — крупное предприятие. Постройка 50-*см* рефлектора с трубой в $2\frac{1}{2}$ *м* сравнительно проста, и действительно эта работа выполнена многими любителями, которым, разумеется, приходилось работать при ограниченных возможностях. Для больших обсерваторных рефлекторов обычно выбирают светосилу 1/5 **), но для малых рефлекторов применимо почти лю-

высокий вакуум в большой камере. Несмотря на предстоящие трудности, даже 200-дюймовое зеркало будет *алюминироваться* таким же способом (см. главу 6). Разработка химического способа алюминирования была бы крупным достижением.

*) Астрономические зеркала во время наблюдения подвергаются действию воздуха. Отражательная способность зеркальной поверхности постепенно уменьшается по мере запыления, потускнения и образования дырочек в фильме; поэтому серебряный фильм должен обновляться примерно каждые полгода. Алюминиевый фильм устойчив и держится годами, если его должным образом сохранять; его можно мыть очищающими реактивами и дестиллированной водой. Когда отражательная способность фильма падает до 70%, его надо возобновить.

**) Чтобы сократить длину трубы 200-дюймового телескопа, ему придают светосилу 1/3,3. См. Приложение III, где приведены данные о зеркалах свыше 40 дюймов диаметром.

бое отношение. Большие практические преимущества рефлектора перед рефрактором состоят в дешевизне и в возможности изготовить телескоп большего размера. Так как свет не проходит *сквозь* стекло, последнее может быть плохого качества, но должно быть лишь хорошо отожжено. Такое стекло может быть отлито в диски огромного размера. Величайший в мире действующий *рефлектор* имеет в поперечнике 100 дюймов (252 *см*); все



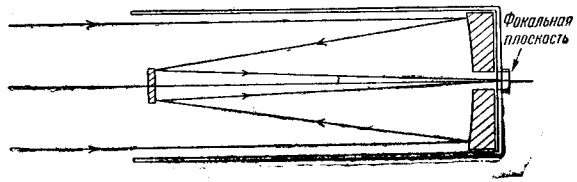

Фиг. 15. Телескоп системы Ньютона.

знают о сооружении 200-дюймового телескопа. Величайший же *рефрактор* в мире — 40-дюймовый телескоп Иерксской обсерватории.

Так как фокус параболического зеркала лежит на пути падающих лучей, то приходится жертвовать частью света, чтобы расположить в фокусе окуляр или диагональное зеркало, или фотографическую пластинку. При очень больших размерах инструмента наибольшая эффективность достигается при использовании главного фокуса на оси трубы. Двухсотдюймовый телескоп столь велик, что наблюдатель со всем своим снаряжением будет помещаться внутри трубы телескопа у главного фокуса на пути падающих лучей. При этом всего 10% падающего света будет потеряно при заслонении лучей наблюдателем с его снаряжением. Меньшие инструменты обычно имеют диагональное *плоское* зеркало вблизи главного фокуса, для того чтобы отклонить фокальную плоскость вбок, перенеся её в место, удобное для визуальных и фотографических наблюдений. Эта точка называется ньютоновским фокусом, так как подобная система предложена Исааком Ньютоном в 1672 г. При этом теряется через экранирование (заслонение) около 7% света и ещё 15% на второе отражение. Но эти потери не очень страшны для многих целей, если только оба зеркала не потускнели. При ньютоновской системе вспомогательные инструменты, вроде фотоэлемента или спектрографа, могут быть установлены сбоку трубы без дополнительных потерь света.



В другой системе отражательного телескопа употребляется выпуклое гиперболическое зеркало, расположен-



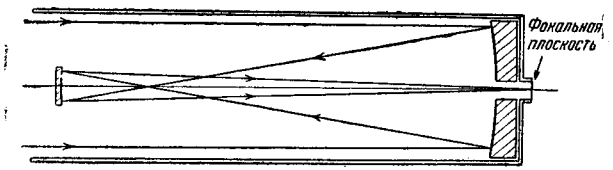

Фиг. 16. Телескоп системы Кассегрэна.

ное несколько ближе главного фокуса, которое создаёт новую фокальную плоскость на дне телескопа в отверстии главного зеркала *). Этот тип рефлектора, изображённый на фиг. 16, называется кассегрэновским по имени своего изобретателя, предложившего его в XVII в. Изображение образуется достаточно далеко за зеркалом телескопа, для того чтобы глаз или фотографическую пластинку можно было защитить от прямого света неба. Для употребления вспомогательных инструментов такое расположение фокуса даже удобнее, чем при системе Ньютона. Наблюдатель легко может достигнуть фокуса и может с удобством гидировать инструмент.

С кассегрэновским типом сходен тип Грегори (фиг. 17), названный в честь своего изобретателя (XVII в.) Вме-

*) В некоторых установках, например в 100-дюймовом рефлекторе, главное зеркало не имеет отверстия, но кассегрэновский фокус отбрасывается вбок при помощи плоского зеркала. Устройство поэтому сходно с системой Ньютона, но может с полным правом называться системой Насмита (предложена им в 1851 г.).

сто выпуклого гиперболического зеркала в системе Грегори применено вогнутое эллиптическое зеркало, располагаемое позади фокуса. По качеству изображений грегорианский телескоп несколько превосходит кассегрэновский, но имеет тот недостаток, что требует гораздо более длинной трубы. Поэтому система Грегори почти никогда не применяется. С другой стороны, вогнутое эллиптическое зеркало легче изготовить.

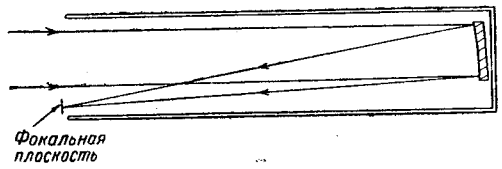



Фиг. 17. Телескоп системы Грегори.

Вильям Гершель пользовался столь длиннофокусными зеркалами, что было возможно наклонять зеркало и наблюдать *в стороне от оси* без заметной порчи изображения. Во времена Гершеля лишнее зеркало означало большую потерю света — его зеркальный металл отражал лишь 60% падающего света. Два зеркала плюс окуляр допускали до глаза наблюдателя лишь 30% света, падающего на главное зеркало. Рефлектор гершелевского типа (фиг. 18) при свежем серебряном слое, применяемый с однолинзовым положительным окуляром, представляет, несомненно, производительно действующий инструмент. Телескопы гершелевского типа иногда сооружаются любителями, но профессионалы почти никогда не пользуются ими из-за своих повышенных требований к инструменту. Даже любитель должен избегать изготовления рефлектора гершелевского типа с большой светосилой из-за сильного влияния аберраций при наблюдении вне оптической оси. Гершелевский телескоп должен иметь либо зеркало малой светосилы, наклонённое относительно оси трубы, либо его зеркало должно представлять собою внеосевую часть параболоида.

Чтобы расположить фокальную плоскость удобнее для наблюдения, можно добавить ещё зеркала. В чрезвычайно практичном типе, так называемом «кудэ» (в переводе означает «коленчатый»), используется плоское зеркало в месте пересечения оси склонения с часовой осью телескопа. Это зеркало отклоняет лучи от кассегрэновского зеркала внутрь полярной оси телескопа, образуя *неподвижный фокус*, где неподвижные инструменты почти






Фиг. 18. Телескоп системы Гершеля.

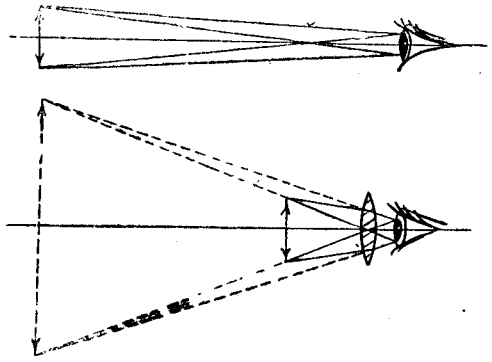
любого размера могут быть монтированы на прочном полу обсерватории и может производиться лабораторное изучение света звёзд. При визуальных наблюдениях наблюдатель может смотреть в окуляр, оставаясь всё время в одном и том же удобном положении. Поле зрения инструмента медленно вращается вокруг полярной оси, но при визуальных наблюдениях это почти не имеет значения. Хотя дополнительные зеркала и вызывают потери, преимущества этой системы часто перевешивают её недостатки.

## ОКУЛЯРЫ

Мы переходим к другой существенной части визуального телескопа — к окуляру. В своей простейшей форме окуляр есть просто увеличительное стекло, дающее глазу возможность отчётливо видеть изображение под увеличенным углом (фиг. 19). Нормальный глаз может свободно рассматривать изображение с расстояния около 250 *мм*.

Увеличительное стекло позволяет во много раз приблизить глаз к предмету. Глаз видит изображение под много бóльшим углом, и при этом оно оказывается таким же резким, как и далёкие предметы при непосредственном наблюдении.

Телескоп образует изображение удалённого предмета в фокальной плоскости. Окуляр, применённый как увеличительное стекло, позволяет глазу рассмотреть это изображение насколько возможно лучше. Сила телескопа, называемая *увеличением*, или угловым увеличением предмета, определяется отношением фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра ($m=F/f$). Для земных предметов наблюдение в телескоп при увеличении в 100 раз равносильно рассматриванию этого предмета невооружённым глазом с расстояния, в сто раз меньшего. Представление о доступных деталях можно дать следующим примером. Мальчик, видимый с расстояния в один километр, при увеличении в 100 раз кажется на расстоянии 10 *м*. Мальчик, находящийся на расстоянии 100 *м*, рассматриваемый в тот же телескоп, будет казаться таким же большим и отчётливым, как если бы он был на расстоянии одного метра. Но звёзды столь далеки от нас, что максимальное увеличение, допускаемое разрешающей способностью телескопа и прозрачностью атмосферы, всё ещё не может открыть нам звёздных дисков*). Планеты же и спутники могут быть значительно увеличены. Кратер на Луне, рассматриваемый в большой телескоп при увеличении в 2000 раз, кажется находящимся лишь на расстоянии 200 *км*.



Фиг. 19. Действие увеличительного стекла.



Диапазон увеличений, возможных для данного телескопа, зависит от фокусных расстояний применяемых окуляров. Иными словами, изображение, образуемое телескопом, можно рассматривать с сильными и слабыми увеличительными стёклами, получая соответственное увеличение предмета.

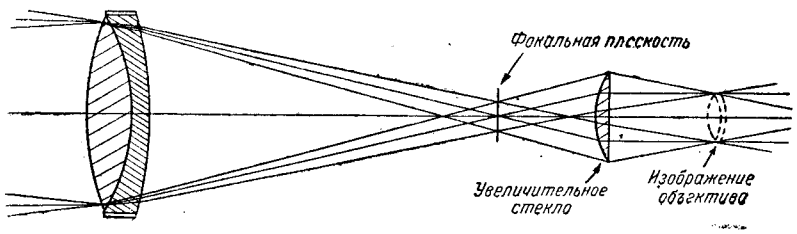
Так как основное назначение визуального телескопа состоит в том, чтобы собирать свет для глаза, то существенно, чтобы весь свет, собранный от звезды объективом, вошёл в глаз. Ночью отверстие зрачка глаза достигает 8 *мм*. Весь свет, собранный большим телескопом от звезды, должен быть сжат в 8 *мм* вблизи глаза и, для того чтобы сфокусироваться на сетчатке, должен входить в глаз почти параллельным пучком. К счастью, визуальный телескоп может выполнить это требование.

Окуляр получает лучи света, посылаемые к нему объективом и как отдельная оптическая система создаёт изображение объектива — малое по сравнению с самим объективом. Если фокусное расстояние окуляра равно 20 *мм*, а объектив имеет относительное отверстие 1/5, то изображение объектива, образованное окуляром, представляет кружок 4 *мм* в диаметре. Весь свет, посылаемый зеркалом или линзой телескопа и перехватываемый окуляром, должен где-то пройти через это четырёхмиллиметровое изображение. Но интересующий нас свет, это — свет звёзд. Следовательно, если мы фокусируем окуляр так, чтобы получить параллельные выходящие пучки от любой звезды в фокальной плоскости объектива, то

*) 200-дюймовый телескоп при идеальных атмосферных условиях может открыть маленькие диски у звёзд с достаточным угловым диаметром. Переменная звезда R Гидры, в то время когда её диаметр наибольший, имеет поперечник около 500 000 000 *км*, находясь на расстоянии около 1 500 000 000 000 000 *км*. Таким образом, её диаметр, наблюдаемый с Земли, стягивает угол в одну трёхмиллионную или 0″,065. Разрешающая способность (см. ниже) 200-дюймового телескопа для отдельных точек составляет 0″,023, если пренебречь неспокойствием атмосферы.

каждый пучок звёздного света, выходящий из окуляра, должен иметь 4 *мм* в поперечнике и поэтому может войти в глаз.

На фиг. 20 разъяснено действие окуляра. Если зрачок глаза поместить у четырёхмиллиметрового изображения объектива, то свет, собранный объективом и падающий на окуляр, должен войти в глаз. Поэтому изображение объектива должно быть позади окуляра, чтобы глаз мог достигнуть его. Галилеев телескоп (с отрицательной линзой, расположенной впереди фокуса объектива) не может образовать действительного изображения объектива, и следовательно, глаз нельзя поместить так, чтобы одновременно видеть все собранные объективом лучи. Поле зрения галилеева телескопа поэтому очень ограничено.

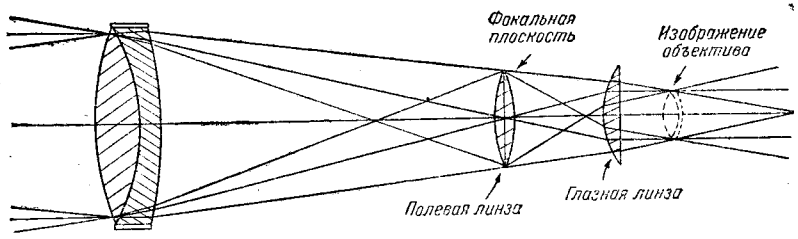



Фиг. 20. Увеличительное стекло в качестве окуляра.

Если мы поместим положительную линзу, называемую *полевой линзой*, точно в фокусе объектива, как на фиг. 21, то эта линза окажет лишь слабое влияние на увеличение. Но она перехватит гораздо более широкий конус лучей от объектива и направит их в *глазную линзу*, а следовательно, — в глаз. Таким образом поле зрения увеличится.

Полезный диапазон фокусных расстояний окуляров, применяемых с данным объективом, ограничен сверху величиной глазного зрачка, а снизу — либо неспокойствием атмосферы, либо ослаблением света, распределяющегося на слишком сильно увеличенное изображение. В самом деле, так как диаметр зрачка глаза ночью никогда не превосходит 8 *мм*, то минимальное полезное увеличение численно равно утроенному диаметру объектива в дюймах или диаметру объектива в сантиметрах, помноженному на $1^1/_4$ (при таком увеличении изображение объектива, образованное окуляром, приблизительно равно 8 *мм*). Таким образом, с шестидюймовым (15 *см*) телескопом не следует применять увеличение меньше 18, так как при этом уменьшится действующее отверстие телескопа. Исходя из этого принципа, у рефрактора со светосилой 1/15 для получения минимального полезного увеличения потребуется окуляр с фокусным расстоянием в 12,5 *см*. Высший






Фиг. 21. Действие полевой линзы.

предел полезного увеличения можно принять равным 20-кратному значению диаметра объектива в сантиметрах или 50-кратному значению диаметра объектива в дюймах. Так, с тем же шестидюймовым телескопом со светосилой 1/15 не следует применять увеличений выше 300, что соответствует окуляру с фокусным расстоянием 7,5 *мм*.

*Поле зрения* телескопа как целого зависит от фокусного расстояния объектива и фокусного рассстояния окуляра и, следовательно, от увеличения $m$. Если фокусное расстояние окуляра равно $f$, то диаметр поля зрения, рассматриваемого в фокальной плоскости окуляра, составит около $^1/_2\ f$. (Некоторые окуляры имеют бо́льшее поле зрения; однако едва ли стоит говорить, что окуляр имеет большое поле зрения, если изображения в наружных частях поля зрения столь плохи, что практически их нельзя использовать.) Линейное поле в фокальной плоскости, соответствующее некоторому углу $\vartheta$ на небесной сфере, равно $F\vartheta$, где $F$ — фокусное расстояние телескопа. Таким образом

$$F\vartheta = \frac{1}{2}f \text{ или приближённо } \vartheta = \frac{30^\circ}{m}.$$

Как и следовало ожидать, угловое поле зрения уменьшается с возрастанием увеличения. Сорокадюймовый рефрактор Иерксской обсерватории ($F=19$ *м*) при окуляре с фокусным расстоянием в $2^1/_2$ *см* имеет поле зрения на небесной сфере менее 3 минут дуги (30°/760).

## ТИПЫ ОКУЛЯРОВ

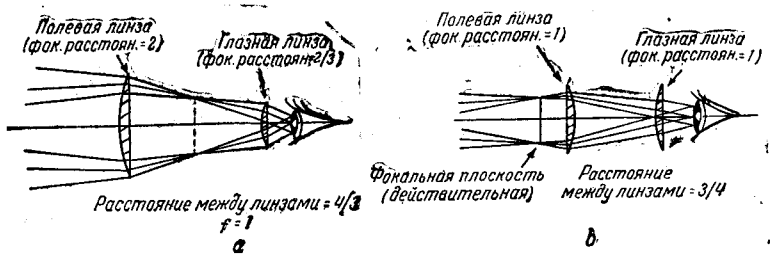
Помещать полевую линзу как раз в фокальной плоскости окуляра и объектива телескопа невыгодно, потому что всякая пыль и царапины на её поверхности становятся слишком заметны через глазную линзу и портят работу телескопа. Поэтому полевая линза должна быть поставлена либо перед фокальной плоскостью, либо позади неё.

Всякая линза может обладать цветной аберрацией двух видов. Одна из них состоит в том, что лучи каждого цвета собираются в фокус в различных точках оптической оси. Изображение звезды, образованное неисправленной линзой, будет точкой, окружённой цветным ореолом, причём ореол имеет сходный вид в любой части поля зрения. Этот недостаток мы можем назвать недостатком типа *A*, который соответствует *первичному спектру* объектива. Аберрация второго рода не связана с изменением фокусного расстояния в зависимости от цвета. Изображение звезды на краю поля зрения выглядит как короткий спектр или цветная полоска, направленная к центру поля зрения. Влияние аберрации почти пропорционально расстоянию звезды от центра поля зрения. Этот дефект можно назвать аберрацией типа *B*. В окулярах тип *B* серьёзнее типа *A*. Наличие типа *A* неважно в силу малости отверстия глаза. Наличие типа *B* нежелательно ввиду важности большого поля зрения.

В 1703 г. Гюйгенс предложил тип окуляра, который широко употребляется ещё и сейчас. На фиг. 22, *a* изображена схема этого окуляра. Так как фокальная плоскость лежит между линзами, то эта система не может употребляться как лупа. Окуляр Гюйгенса поэтому часто называется *отрицательным* окуляром. Хотя и возможно установить крест нитей в его фокальной плоскости между



линзами, нити будут казаться сильно окрашенными, особенно в наружных частях поля (тип *B*). Поэтому окуляр Гюйгенса никогда не применяется для точных измерений. Когда полевая линза находится в положении, показанном на фиг. 22, *a*, цветная аберрация (типа *B*) полевой линзы уничтожает аберрацию глазной линзы, в результате чего получается почти бесцветное изображение. Таким образом, звёзды во внешних частях поля



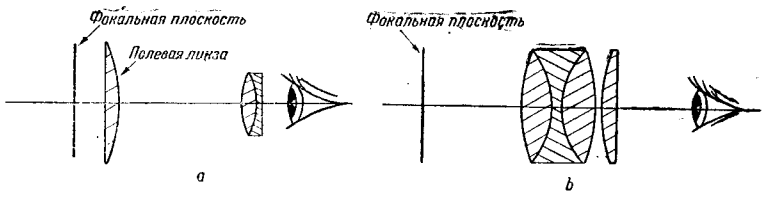

Фиг. 22. *a* — окуляр Гюйгенса; *b* — окуляр Рамсдена.

зрения не будут иметь вид коротких спектров, как в случае окуляра из простой линзы. С другой стороны, так как обе линзы — положительные, то цветные аберрации (типа *A*) на оптической оси складываются; при светосиле 1/15 окуляр Гюйгенса работает удовлетворительно, но при светосиле 1/5 его цветная аберрация типа *A* становится очень заметной.

В 1783 г. Рамсден предложил другой тип окуляра, который также широко распространён и поныне. Фиг. 22, *b* показывает схему этого полезного окуляра. Здесь фокальная плоскость лежит впереди полевой линзы. Следовательно, окуляр может действовать как лупа и потому называется *положительным*. Крест нитей, установленный в фокальной плоскости, кажется гораздо слабее окрашенным, чем в случае простой линзы той же силы (тип *B*). Однако окуляр Рамсдена не столь хорошо исправлен в отношении аберрации *B* для предметов, наблюдаемых в телескоп, как окуляр Гюйгенса. Ошибки в направлении оптической оси (типа *A*) меньше, чем у окуляра Гюйгенса, так как то же увеличение окуляра

достигается при помощи более слабых положительных линз. Поэтому при светосиле 1/5 окуляр Рамсдена работает лучше, чем окуляр Гюйгенса.

В 1849 г. Келльнер предложил несколько более сложный тип окуляра (фиг. 23, *а*). Чтобы преодолеть цветовые дефекты, он ахроматизировал глазную линзу, использовав комбинацию кронгласса с флинтглассом. Обращая флинтовую линзу к глазу, ему удалось получить хорошо исправленное и неокрашенное изображение. Хотя желательно ахроматизировать также и полевую линзу, этого почти никогда не делают. Компоненты глазной линзы ради сбережения света всегда склеивают.




Фиг. 23. *а* — окуляр Келльнера; *b* — ортоскопический окуляр.

Описанные три типа окуляров не столь удобны на практике, как этого хотелось бы. Опытного наблюдателя не затруднит поместить глаз достаточно близко к глазной линзе, чтобы достигнуть изображения объектива; но средний наблюдатель будет, как правило, держать глаз слишком далеко от окуляра, теряя таким образом часть поля зрения. Кроме того, если он носит очки, то не сможет придвинуть глаз достаточно близко к глазной линзе. Поэтому желательно, чтобы изображение объектива было на большем расстоянии от глазной линзы.

Такой тип окуляра, называющийся *ортоскопическим* окуляром Аббе (фиг. 23, *b*), фактически представляет собой одну сложную глазную линзу без полевой. Глазная линза, однако, настолько велика, что перехватывает очень большую часть лучей. Изображение объектива примерно столь же далеко от глазной линзы, как и фокальная плоскость телескопа по другую сторону от неё. Следовательно, при окуляре с фокусным расстоянием в 25 *мм* глаз может находиться на расстоянии около



18—20 *мм* позади глазной линзы, что вполне достаточно. Правильно сконструированный ортоскопический окуляр способен дать большое, в высокой степени исправленное, неокрашенное поле зрения. Его следует рекомендовать, несмотря на его высокую стоимость, как прекрасный окуляр для телескопов широкого применения.

## СРАВНЕНИЕ ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ С ЗЕРКАЛЬНЫМИ

Выигрыш в качестве работы линзового объектива в сравнении с зеркальным зависит от сложности конструкции и от отсутствия аберраций, вызываемых прогибами, но не от какого-либо преимущества линзы как таковой, поскольку дело идёт о сравнении ошибок преломляющей поверхности с ошибками поверхности отражающей. Одна преломляющая поверхность оптически нисколько не лучше зеркала и к тому же обладает цветными аберрациями. Сложная линза, обладающая тремя или четырьмя действующими поверхностями, может быть в значительной степени исправлена от недостатков изображения как на оптической оси, так и вне её. Но правильно сконструированная трёхзеркальная система даёт ещё лучшее действие, если не считать экранирования, обойти которое, в отличие от хроматической аберрации, невозможно. С другой стороны, если учесть практический вопрос о необходимой точности изготовления оптических поверхностей, мы найдём, что одна поверхность линзы вчетверо менее требовательна, чем зеркальная поверхность при одинаковом качестве изображения. Предположим, что мы имеем линзу и зеркало с одинаково точными поверхностями. Угловая ошибка в положении перпендикуляра в данной точке зеркальной поверхности удваивается при отражении луча; ошибка в положении перпендикуляра к любой точке поверхности линзы уменьшается вдвое или втрое, в зависимости от того, выходит ли свет из стекла или входит в стекло; в окончательном изображении в воздухе происходит уменьшение ошибок вдвое. Следовательно, для того чтобы дать столь же хорошие изображения, поверхность зеркала

должна быть вчетверо более точной, чем поверхность линзы.

Когда единственная поверхность зеркала изгибается, его оптические качества немедленно ухудшаются. Когда прогибается линза, то положительный выгиб с одной стороны в значительной степени компенсируется отрицательным прогибом с другой стороны. Поэтому линза очень мало чувствительна к изгибанию. Те, кто считает, что изготовление рефрактора слишком трудно для среднего любителя, ошибаются. Четыре сферические поверхности, изготовленные с определённой степенью точности, в комбинации дадут более резкие изображения звёзд на оси, чем одно параболическое зеркало, изготовленное с той же точностью. Кроме того, для рефрактора можно использовать сферические поверхности (хотя, конечно, и не произвольных радиусов), что повлечёт за собою выигрыш в точности и лёгкости изготовления. Бóльшая кривизна поверхностей линз рефрактора, поскольку они сферичны, обеспечивает бóльшую плавность и точность при минимальной затрате труда на ретушь.

Две основные трудности, с которыми встречаются любители при изготовлении хороших рефракторов, состоят в применении неподходящих кривизн линз и оптически плохого стекла. Кривизны, приведённые в таблице 1, хороши как первое приближение для указанных сортов оптического стекла. Более крупные линзы часто страдают от изменения показателя преломления в одном и том же диске. Поверхности стёкол больших рефракторов, изготовленных Кларком, сильно отступают (в микроскопическом масштабе) от сферы, чтобы насколько возможно компенсировать недостатки стекла.

Подводя итог, мы можем сказать, что для визуальных наблюдений большие преимущества отражательного телескопа состоят в отсутствии окраски, простоте монтировки и изготовления и, следовательно, в дешевизне. Резкость изображения, даваемого рефрактором, на практике обычно слегка превосходит отчётливость рефлектора благодаря нечувствительности к прогибам и температуре, точности изготовления и отсутствию дифракционных картин, вызываемых вторичным зеркалом,



помещающимся в пучке падающего света. Оптические аберрации окуляров, особенно типа Гюйгенса, сказываются сильнее при светосиле 1/5 (у рефлектора), чем при 1/15 (у рефрактора). Таким образом, превосходное зеркало 1/5 может казаться хуже столь же совершенного рефрактора 1/15 с одним и тем же положительным или отрицательным окуляром. Наконец, большее фокусное расстояние рефрактора позволяет получить большое увеличение без применения чересчур сильного окуляра. Но нельзя упускать из виду того, что правильно изготовленное и монтированное зеркало со светосилой 1/5 может дать в большинстве случаев достаточно хорошие результаты.

## ПРЕДЕЛЬНАЯ ВИЗУАЛЬНАЯ ЗВЁЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА

Часто задаётся вопрос, насколько слабые звёзды видны в телескоп данного отверстия. Максимальный диаметр глазного зрачка составляет около 0,8 *см*. Поэтому телескоп диаметром $D$ *см* производит выигрыш в количестве света по сравнению с невооружённым глазом примерно в отношении 1,5 $D^2$. Превращая это в звёздные величины (см. главу 6), мы найдём, что если невооружённый глаз видит звёзды 6,2 величины, то предельная звёздная величина, видимая в телескоп — $m$, может быть найдена по формуле

$$m = 7{,}5 + 5 \lg D.$$

Для небольших телескопов получаем:

| $D$ в *см* | $m$ | $D$ в *см* | $m$ | $D$ в *см* | $m$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,5 | 8,8 | 7,5 | 11,2 | 15 | 12,7 |
| 5 | 10,3 | 10 | 11,8 | 25 | 13,8 |

Эти величины верны лишь в случае хороших атмосферных условий; обычно они должны быть уменьшены на величину, зависящую от увеличения телескопа и

от состояния атмосферы, а также от качества телескопа. Стодюймовый телескоп, например, должен показывать звёзды до 18,8 звёздной величины, но при плохих изображениях граница может упасть до 16 и даже до более ярких звёзд. Иерксский рефрактор (40-дюймовый) при хороших условиях должен показывать звёзды до 16,8 звёздной величины.

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Изображение звезды, образованное безукоризненным телескопом, — не математическая точка, а имеет определённый диаметр, зависящий от отверстия и фокусного расстояния телескопа, точнее — от светосилы. Теория диффракции света даёт нам простую формулу для определения разрешающей способности системы линз. Если линейный диаметр объектива телескопа $D$ *см*, то для визуальных наблюдений

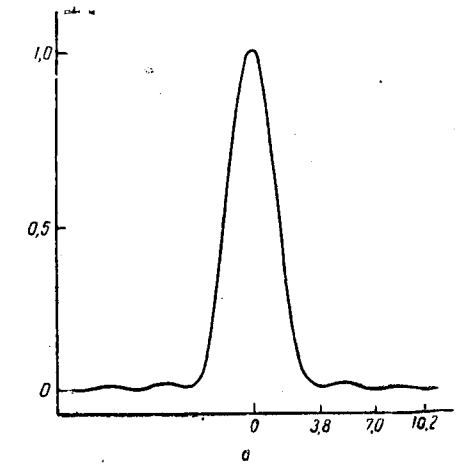
$$\text{разрешающая способность} = \frac{14{,}0 \text{ секунды дуги}}{D}.$$

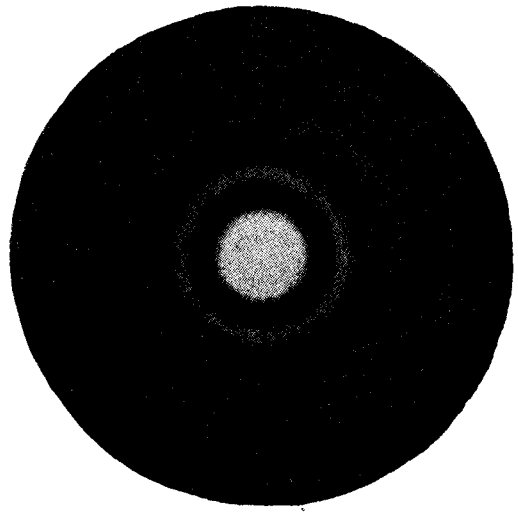
Разрешающая способность телескопа характеризует наименьшее угловое расстояние двух звёзд, при котором они ещё могут быть в него видны раздельно, не сливаясь. Если угловое расстояние между звёздами меньше того, которое определяется приведённой выше формулой, то общее изображение обеих звёзд может быть эллиптическим или даже круглым, а потому совершенно неразрешённым.

Диффракционное изображение звезды, образуемое безукоризненным телескопом при безукоризненных атмосферных условиях, показано на фиг. 24, *a* и *b*. Центральный светлый кружок называется диффракционным диском изображения; он окружён бесконечным числом диффракционных колец, интенсивность которых прогрессивно падает. Около 86% света звезды составляет диск, а остальное — диффракционные кольца.

Вышеприведённая формула показывает, что 40-дюймовый Иерксский рефрактор должен разрешать звёзды, находящиеся на расстоянии всего 0,11 секунды дуги одна от другой, — величина, подтверждаемая наблюде-






**Фиг. 24.** *a* — распределение яркости в диффракционном изображении точечного источника; *b* — сильно увеличенная фотография диффракционного изображения точечного источника.

ниями. Безукоризненно выполненный рефлектор того же диаметра при идеальных условиях должен разделять столь же близкие звёзды *).

Различные механические приспособления, применяемые для укрепления вторичного зеркала в ньютонианском или кассегрэновом телескопах, вызывают появление дифракционных лучей вокруг изображений ярких звёзд. Несмотря на то, что они бросаются в глаза, общая интенсивность этих лучей составляет лишь небольшой процент падающего света, собранного в изображении. Они обнаруживаются на фотографической пластинке только вокруг передержанных изображений звёзд, и такие изображения обычно не используются при исследовании. В некоторых случаях, однако, дифракционные лучи сильно мешают; например, при попытках открыть слабого спутника у яркой звезды. Приходится поворачивать всю систему растяжек, поддерживающих вспомогательное зеркало, пока слабая звезда не появится между дифракционными лучами. При наблюдении планет такие дифракционные изображения производят некоторое ослабление контрастов. Кудэ открыл, что если поддерживающим зеркало подпоркам придать определённую форму, получится дифракционная картина, сходная с даваемой круглым отверстием.

При прежних наблюдениях над прохождением Меркурия применялось простое диафрагмирование объектива телескопа с ущербом для этих наблюдений. Возникавшие в результате уменьшения отверстия дифракционные фигуры между Меркурием и краем солнечного диска мешали точному определению момента прохождения. Было бы гораздо лучше, если бы астрономы уменьшали яркость солнечного света путём отражения от несеребрённой поверхности, включённой где-либо в систему.

*) На практике разрешающая способность будет несколько зависеть от цвета, звёздных величин и разницы в звёздных величинах.

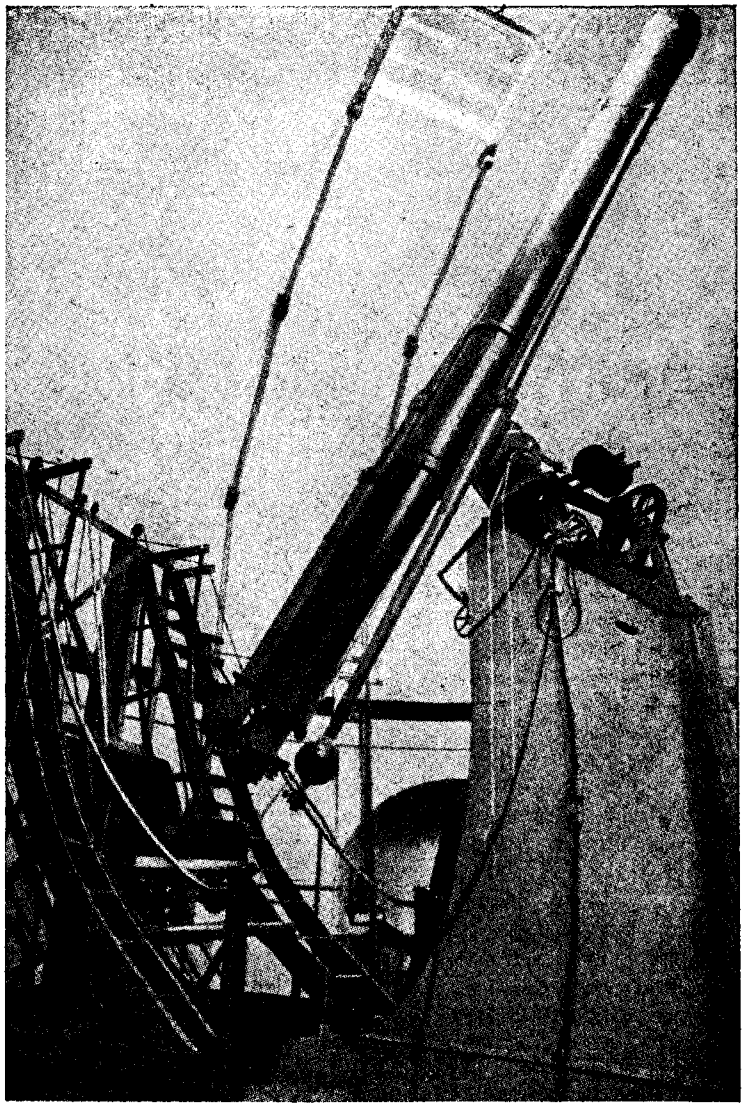
# 3

# ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Невозможно дать хотя бы краткий очерк развития телескопа без того, чтобы не посвятить некоторое место развитию фотографии. Применение фотографии к астрономии не только внесло изменения в технику наблюдений, но вызвало фундаментальные изменения в конструкции телескопа, открыло эру фотографического рефлектора большого отверстия, создало рефрактор с широким полем зрения, а в последнее время светосильный инструмент типа Шмидта, состоящий из комбинации линзы и зеркала *).

Первое удачное применение фотографии для астрономических целей было сделано в марте 1840 г. (через год после опубликования новооткрытой дагерротипии) д-ром Джоном Вильямом Дрэпером в Нью-Йорке, получившим дагерротипы Луны. Через десять лет (17 июля 1850 г.) Джордж Филлипс Бонд и Джон А. Уиппл получили первую фотографию звезды с помощью 15-дюймового телескопа Гарвардской обсерватории в Кембридже, шт. Массачузетс (фиг. 25). Хотя эти снимки были получены с большим трудом и было возможно фотографировать лишь более яркие звёзды, преимущество фотографического метода наблюдений над визуальным стало очевидным уже в этот ранний период. В письме от 6 июля 1857 г. Бонд, отец астроничe-

*) См. главу 4, а также Приложения III — VI, где дан список больших телескопов.



Фиг. 25. 15-дюймовый рефрактор Гарвардской обсерватории в Кембридже (США).

**С помощью этого телескопа Бондом и Уипплом в 1850 г. была сделана первая фотография звезды.**



ской фотографии, пишет следующее *): «Вы едва ли сможете составить себе правильное представление о красоте и удобстве фотографического процесса, не испробовав его сами... В хорошую ночь количество работы, которое можно выполнить совершенно без затруднений, мучений и усталости, неизбежных при обычных наблюдениях, просто удивительно. Пластинки **) после обработки могут быть отложены, чтобы исследовать их днём, не спеша. В них содержатся регистрации, не оставляющие места сомнению или заблуждению относительно их верности». Таково, действительно, великое преимущество фотографического способа наблюдений. Он даёт астроному средство сохранить свет звёзд до поры до времени, когда можно будет произвести тщательные, а, если нужно, то и повторные исследования.

Опыты Бонда и Уиппла продолжались, и, когда фотографическая техника улучшилась, Гарвардская обсерватория начала систематическое фотографирование неба. Таким образом, возникло большое собрание астрономических фотографий, содержащее в настоящее время около полумиллиона оригинальных негативов — неоценимые и незаменимые «записи» неба за прошедшую половину века.

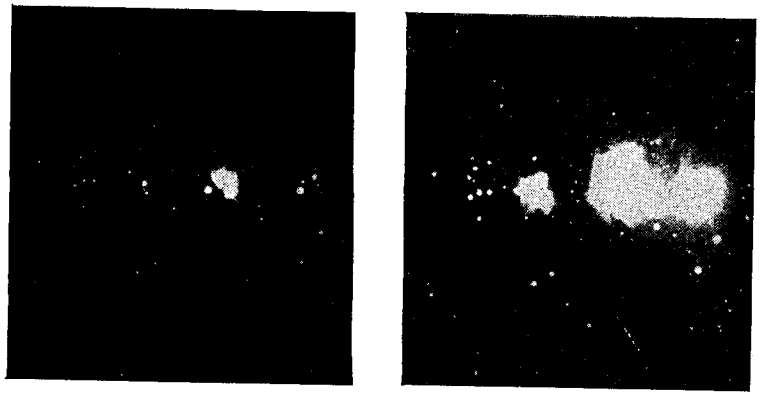
Успешное приспособление фотографии к астрономическим наблюдениям в значительной степени зависело от основательного изучения причин неудач, так же как и от изобретательности и настойчивости основоположников этой работы. Одной из главных трудностей, сопровождавших первые опыты, была необходимость в долгих экспозициях, даже для получения фотографий более ярких звёзд. Тогдашний фотографический материал был очень малочувствителен. Однако в противовес этому ограничению, всегда выступало громадное преимущество фотографического метода, состоящее в накопляющем действии светочувствительного материала. В то время как для глаза продолжительное наблюдение не делает

*) Личное письмо от Джорджа Бонда к Вильямсу Митчеллу (E. S. Holden, Bond Memorials, p. 154).

**) Астрономы всё ещё применяют пластинки вместо плёнок, так как они в некоторых отношениях удобнее в обращении.

объект более ярким или ясным, фотографический светочувствительный материал накопляет падающий на него свет, так что, чем продолжительнее экспозиция, тем сильнее отпечатывается изображение (фиг. 26).

В продолжение долгой экспозиции, однако, трудно держать телескоп точно направленным на звезду, совершающую видимое движение по суточному кругу вслед-



Фиг. 26. Фотографии туманности Ориона, снятые с экспозицией в 3 минуты (слева) и в 3 часа.

ствие вращения Земли. Введение хорошего движущего механизма (см. главу 8) было первым шагом, потребовавшимся для фотографического метода наблюдений. Но ещё более важным, чем устройство движущего механизма, было усовершенствование самой оптики телескопа. Визуальный телескоп с большим фокусным расстоянием (см. главы 2 и 4) не подходит для фотографических работ. Он обычно обладает малой светосилой и рассчитан так, чтобы хорошо сводить в один фокус жёлто-зелёные лучи, к которым глаз наиболее чувствителен. Однако обычный фотографический материал более всего чувствителен к синим и фиолетовым лучам. Таким образом, мы снова видим, что для фотографических работ требуется особая конструкция телескопа. Эти причины вместе со



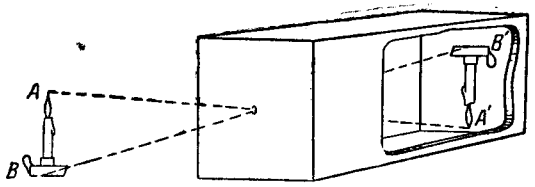
многими другими сильно ускорили развитие светосильных фотографических телескопов, которое следовало за совершенствованием фотографии, а во многих отношениях и опережало его.

## ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Фотографический процесс состоит из трёх главных частей: из *фотохимического действия света*, из *проявления* и из *фиксирования*. Фотохимическое действие света происходит, когда свет, собранный линзами телескопа или зеркалом, падает на фотографически чувствительный материал, оставляя на нём отпечаток. В случае нормальной экспозиции этот поглощённый свет не производит видимого эффекта и образует то, что носит название *скрытого изображения*. Проявление, это — химический или физический процесс, с помощью которого скрытое изображение делается видимым. Фиксирование есть последняя ступень, состоящая в придании проявленному изображению стойкости.

Прежде всего, конечно, нужно приспособление, создающее изображение, которое мы желаем сфотографировать. Для создания изображения проще всего воспользоваться камерой с дырочкой (фиг. 27). Светонепроницаемый ящик с булавочным отверстием в стенке, обращённой к предмету $AB$, вполне достаточен для этого. Лучи света от точки $A$ попадут лишь в $A'$; точно так же лучи от $B$ упадут только в $B'$. В результате на стенке образуется изображение предмета (в данном случае подсвечника со свечой), который мы желаем сфотографировать. Это изображение, как видно на фиг. 27, будет обратным (левая сторона — справа и верх — внизу). Такое изображение может легко быть наблюдаемо снаружи, если заднюю стенку, или фокальную плоскость ящика, сделать из матового стекла. Есть одно затруднение с такими камерами, состоящее в том, что отверстие слишком мало, чтобы пропустить достаточно света. и поэтому изображение очень бледно. Первое усовершенствование состоит в замене отверстия линзой, которая благодаря своему большему диаметру обладает боль-

шей собирательной силой. Современный фотографический телескоп есть именно такая камера, снабжённая объективом (линзовым или зеркальным). Так как большая часть работы производится ночью, труба, соответ-




Фиг. 27. Камера с малым отверстием (стеноп).

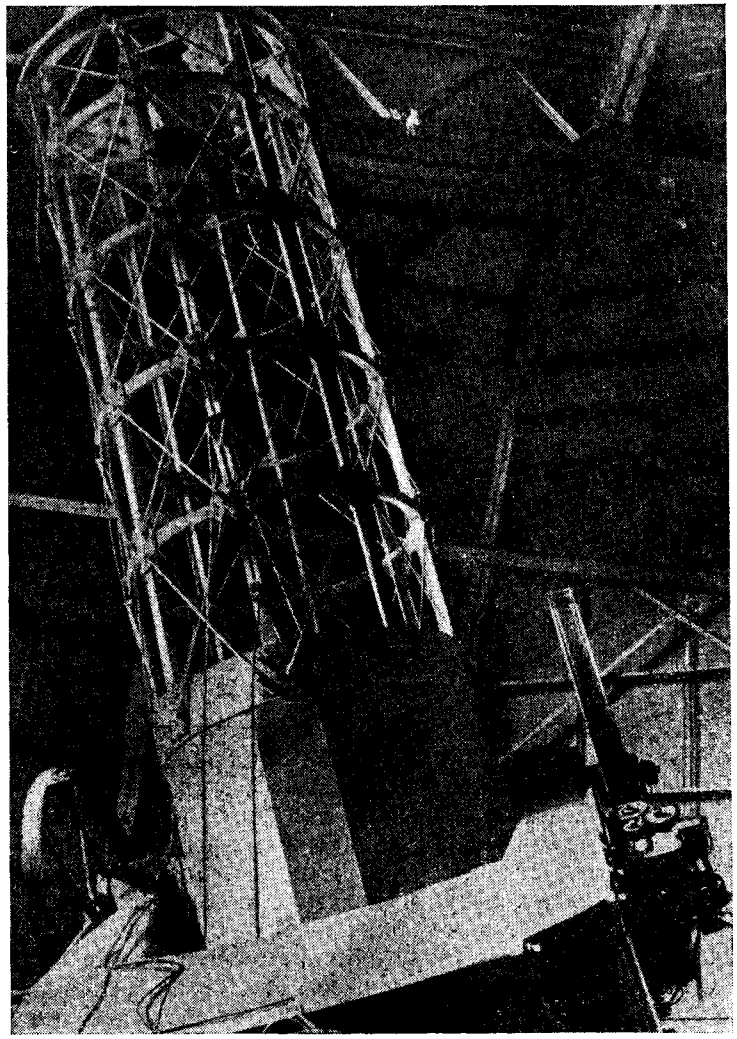
ствующая камере, делается не светонепроницаемой, но состоит из каркаса (фиг. 28), который держит фотографическую пластинку в фокальной плоскости на соответствующем расстоянии от поверхности зеркала.

## ФОТОХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА

Даже первобытный человек должен был заметить фотохимическое действие света, выражавшееся в белении, в выцветании красок или в появлении загара под действием солнечного света. Многие старинные авторы ссылаются на это, а Иоганн Генрих Шультце показал ещё в 1727 г., что соли серебра, представляющие теперь основной материал для фотографии, темнеют, если выставить их на свет. В начале XIX в. было произведено много настолько успешных опытов, что они заслуживают, чтобы их признали предшественниками фотографии. Тем не менее, честь открытия практического способа изготовления фотографий, достаточно верно воспроизводящих предмет, принадлежит французскому художнику Дагерру. Его способ — дагерротипия — был очень удачен и в то же время столь прост, что овладел всеобщим вниманием почти немедленно после опубликования его французским правительством в 1839 г.

Так как дагерротипия была первым фотографическим процессом, имевшим практическое значение и так как





Фиг. 28. 61-дюймовый телескоп станции Ок Ридж Гарвардской обсерватории.

на её примере можно очень ясно показать три главные стадии фотографической техники, будет полезно вкратце описать её.

Серебряная или медная пластинка, покрытая тонким слоем серебра, помещается в пары иода. Получающийся тонкий слой иодистого серебра чувствителен к свету; после экспонирования пластинки в камере на иодистом серебре появляются слабые отпечатки изображения. Открытие Дагерра состояло в том, что он обнаружил, что это слабое изображение может быть выявлено (проявлено), если держать экспонированную пластинку над парами кипящей ртути. Пары ртути осаждаются с большей легкостью на тех местах пластинки, где на неё действовал свет, так что получается серебристое изображение на слегка пурпурном фоне.

Конечная операция — *фиксирование*, имеющее целью оградить пластинку от дальнейшего действия света или проявителя. Это достигается промыванием пластинок в растворе обыкновенной соли или лучше в растворе тиосульфита натрия *), обычно называемого *гипосульфитом*. Подведём итог этому процессу: мы имеем, во-первых, экспозицию для образования скрытого изображения, во-вторых, проявление ртутью и, наконец, фиксирование.

## ЭМУЛЬСИЯ

Современный чувствительный материал уже не серебряная пластинка, покрытая солями серебра. Вместо этого кристаллы соли серебра удерживаются желатиной, вроде того как фрукты в желе, с той разницей, что кристаллы соли очень многочисленны и мелки; их средний размер составляет около 0,2 микрона. Эта суспензия кристаллов солей серебра в желатине, называемая *эмульсией*, приготовляется с величайшей аккуратностью и точностью, так как фотографические свойства конечного продукта зависят главным образом от состава, величины

*) Действие тиосульфита было открыто ещё в 1819 г. английским астрономом Джоном Гершелем, сыном великого астронома Вильяма Гершеля. Гершель полагал, что эта соль была гипосульфитом натрия, откуда название гипосульфит.



и состояния кристаллов соли серебра. В основном применяются галоидные соединения серебра: бромистое, хлористое и иодистое серебро. Бромистая эмульсия приготовляется путём медленного добавления раствора азотнокислого серебра к раствору бромистого калия с желатиной. Образующееся бромистое серебро удерживается во взвешенном состоянии благодаря присутствию желатины. Затем эмульсия подвергается так называемому процессу *созревания*, состоящему в выдерживании эмульсии при температуре порядка + 50° С с прибавлением к ней аммиака. При этом увеличиваются размеры кристаллов и чувствительность повышается в 100 — 1000 раз. Очувствляющее действие частично зависит от присутствия в желатине незначительных количеств серы, которая в течение процесса созревания образует маленькие частички сернистого серебра на поверхности зёрен бромистого серебра. Затем эмульсия остуживается, измельчается и промывается в холодной воде для удаления азотнокислого калия; остаются лишь светочувствительные галоидные соли серебра. Наконец, эмульсия разливается слоем на стекле, плёнке или бумаге, в зависимости от употребления, к которому она предназначается. Астрономы пользуются главным образом стеклянными фотопластинками, так как стекло твёрдо и в процессе работы не съёживается и не разбухает, допуская возможность точных измерений. Для обычной фотографии эмульсия наливается на плёнку из нитроцеллюлозы или ацетата целлюлозы, применяемой из-за гибкости, лёгкости и плотности *). Толщина стекла колеблется от 1,5 *мм* для обычной пластинки 20 × 25 *см* до 5 *мм* для пластинок 75 × 100, тогда как толщина плёнки бывает от 0,08 *мм* для обыкновенных до 0,2 *мм* для плоских плёнок. Киноплёнка

*) Так как эмульсия нелегко пристаёт к целлюлозной подложке, плёнка сначала покрывается промежуточным слоем или подслоем, содержащим клейкое и растворяющее вещество. Часто этот подслой слегка изменяет свойства эмульсии. Этим объясняется, что одна и та же эмульсия имеет различные свойства, будучи нанесена на стекло или на плёнку. Для стекла не употребляется никакого подслоя, но его часто моют содой, которая, слегка разъедая стекло, заставляет эмульсию лучше приставать.

имеет толщину около 0,15 *мм*. Слой чувствительной эмульсии бывает толщиной всего от 0,03 до 0,04 *мм*. Для некоторых специальных астрономических целей, когда пластинки предназначены для точного измерения положения небесных объектов, эмульсия наливается на зеркальное стекло толщиной более 1 *см* для уменьшения деформаций пластинки после высыхания эмульсии и после проявления. При проявлении эмульсия набухает от намачивания и снова сжимается при высушивании, производя натяжение, заставляющее стекло или плёнку изгибаться или скручиваться. Поэтому некоторые стеклянные пластинки и большинство плёнок покрываются с обратной стороны дублёной желатиной, сжатие которой после высыхания как раз уравновешивает съёживание эмульсии, чем достигается сохранение плоской формы плёнки.

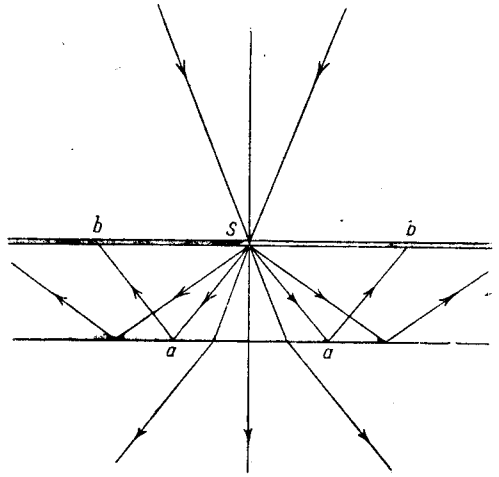
Часто эмульсия защищается предохранительным слоем, так как она очень чувствительна к механическим воздействиям. Таким покровным слоем обычно покрывается эмульсия плёнок в фильм-паках, где вероятность царапин довольно велика. Иногда эмульсия состоит из двух слоёв: нижнего слоя (ближайшего к плёнке), обычно менее чувствительного, чем наружный слой, и служащего двойной цели — для увеличения *широты* эмульсии или диапазона полезных экспозиций и для ослабления *ореолов*.

Когда пучок света падает на эмульсию (фиг. 29), он рассеивается внутри неё и встречает стеклянную пластинку или плёнку под различными углами падения. Все лучи, прошедшие через стекло и встречающие поверхность, отделяющую стекло от воздуха под углом, бо́льшим, чем некоторый критический угол, отражаются обратно и опять входят в эмульсию, производя ореол вокруг того места, где вступил в эмульсию первоначальный пучок. Чтобы избежать этих ореолов, пластинки с задней стороны покрываются окрашенным слоем, который обесцвечивается при проявлении. Действие окрашенного слоя состоит в поглощении лучей определённого цвета, к которым эмульсия чувствительна. Так, чувствительные к жёлтым лучам эмульсии (ортохроматические) снабжаются красным противоореольным слоем, поглощающим зелёный и синий свет; тёмнозелёный слой на оборотной



стороне пластинок, чувствительных к красным лучам (панхроматических), поглощает красные и синие лучи.

Изменения, происходящие в эмульсии, подвергнутой воздействию света (экспонированной), ещё не вполне понятны, но известно, что эффект зависит от количества света, упавшего на зёрна галоидных солей серебра. Зёрна, на которые подействовал свет, восстанавливаются в металлическое серебро, когда эмульсия, после экспозиции на свету, погружается в *проявитель*. Такие зёрна *проявляемы*. Соли серебра, не подвергшиеся действию света, не будут восстанавливаться в металлическое серебро. Таким образом, чёрные места будут соответствовать ярким местам предмета, и обратно. Наконец, пластинку купают в гипосульфите, который растворяет неизменённые соли серебра, делая прозрачными те части пластинки, которые не подвергались действию света. Получающееся изображение при рассматривании в проходящем свете




Фиг. 29. Возникновение кольцевых ореолов.

**Лучи, более близкие к оси, чем луч *Sa*, проходят примерно на 96% в воздух, а 4% их света отражается. Лучи вне *Sa* полностью отражаются, так как их угол падения больше угла полного внутреннего отражения, показанного прямой *Sb*. Изображение звезды *S* оказывается поэтому в центре светлого кружка $S_b$, резкого внутри и размытого наружу.**

представляет полнейшую противоположность предмету и называется негативом. Если теперь этот негатив поместить перед куском плёнки или бумаги, покрытым светочувствительной эмульсией, и выставить на свет, то тёмные места негатива отбросят тень, а прозрачные — пропустят свет, так что после проявления вторая плёнка будет обращённой копией первой и даст то же соотношение света и тени, что и первоначальный предмет. Эта вторая фотография называется позитивом. Преимущество современной фотографии в том, что с оригинального негатива можно изготовить сколь угодно большое число позитивов.

Как мы увидим, способность эмульсии правильно передавать лёгкие различия в первоначальном изображении зависит не только от самой эмульсии, но и от способа обработки на каждой стадии сложного фотографического процесса. Так, окончательный результат зависит от количества и цвета света, чувствительности эмульсии к различным цветам, типа проявителя, способа проявления, фиксирования и сушки, так же как и от физических условий (влажности, температуры и т. д.) во время экспозиции и проявления. Промежуточные стадии процесса печатания дают большой простор работающему и представляют большое преимущество в художественной фотографии, позволяя изменять по желанию окончательный отпечаток. Для точной фотометрии эти промежуточные стадии несут в себе и недостатки, так как при каждом повторении процесса возможно внесение дополнительных ошибок. Поэтому в астрономии измерения почти всегда производятся непосредственно на оригинальном негативе.

## ПРОЯВЛЕНИЕ

Хотя некоторые факты, касающиеся механизма проявления, и установлены, однако, многое ещё недостаточно ясно. Действие проявителя состоит в том, что он восстанавливает зёрна галоидного серебра, сделавшиеся проявляемыми, и оставляет неизменными остальные зёрна. Проявляющее вещество, выражаясь химически, есть восстановитель, т. е. оно окисляется в присутствии соединений металла, освобождая этот металл. Зерно состоит из положительно заряженного иона серебра и из галоида. Восстанавливающий агент отнимает отрицательный галоид от соли серебра и даёт отрицательный электрон положительному иону серебра, образуя металлическое серебро. Но в то время как все проявители — восстановители, не все восстановители — проявители, так как проявитель, это — восстановитель, «отличающий» экспонированные зёрна галоидного серебра от неэкспонированных. Это избирательное действие каким-то образом связано с наличием желатины, так как кристаллы галоидного серебра, полученные в отсутствии желатины, восстанавливаются обыкновенными проявителями, даже не будучи подвергнуты воздействию света. С другой стороны, действие проявителя — дело времени, так как если достаточно продлить проявление, то начинают проявляться и неэкспонированные части эмульсии, производя общее почернение пластинки, или *вуаль*. Проявители, следовательно, это — такие восстановители, которые восстанавливают экспонированные зёрна галоидного серебра быстрее, чем неэкспонированные.



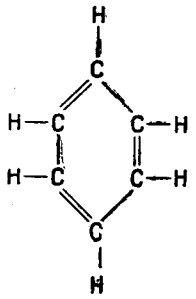
Существует два основных способа проявления, носящих названия *химического* и *физического* проявления. Изображения из металлического серебра, создающиеся в эмульсии тем и другим процессом, химически совершенно одинаковы, но разница заключается в способе восстановления. При химическом проявлении серебро готового изображения получается из галоидных солей серебра самой эмульсии, тогда как физический проявитель содержит соль серебра в растворе, и она восстанавливается до металлического серебра, осаждающегося на зёрнах скрытого изображения. Проявитель содержит следующие составные части:

1 — проявляющее вещество,
2 — предохраняющее вещество,
3 — ускоритель,
4 — замедлитель.

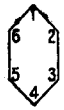
Большинство современных фотографических *проявляющих веществ* является производным анилиновых и фенольных красок, основу которых представляет бензол.

Фотографические проявляющие вещества суть *бесцветные* краски или *восстановленные* краски и промежуточные соединения, химическое строение которых не относится к предмету этой книги *).

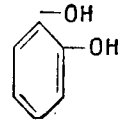
*) Происхождение некоторых из этих соединений можно иллюстрировать следующими примерами. Молекула бензола состоит из шести атомов углерода и шести атомов водорода и имеет следующую структуру:



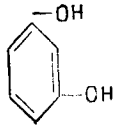
что изображают просто так:



Замещая один или более атомов водорода радикалами или гидроксильными группами, химики получили ряд проявляющих веществ. Так, замещение двух атомов водорода двумя гидроксильными группами (OH) в положениях 1—2, 1—3 и 1—4 даёт следующее:



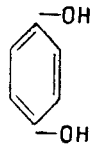
*Орто*гидроксибензол, или пирокатехин (нестойкое проявляющее вещество)



*Мета*гидроксибензол, или резорцинол (не проявляющее вещество)

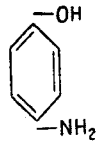


Проявляющие вещества довольно стойки в сухом виде, но в растворе они быстро окисляются и поэтому для повышения своей стойкости нуждаются в каком-либо *предохраняющем* веществе. Чаще всего применяется суль-



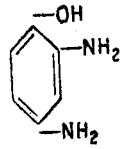
*Пара*гидроксибензол, или гидрохинон (проявляющее вещество)

Если вместо гидроксила вводится аминогруппа ($NH_2$), мы получаем



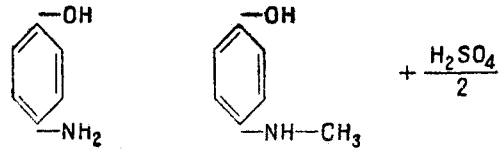
Параминофенол (основа родиналовых проявителей)

или



Диаминофенол, или амидоловый проявитель.

Примером более сложного соединения может служить проявляющее вещество, известное под названием метола. Если один атом водорода в аминогруппе параминофенола заменить метиловой группой ($CH_3$), мы получим монометилпараминофенол, сернокислая соль которого есть *метол*.



Параминофенол Метол

фит натрия, а в некоторых рецептах бисульфит или метабисульфит. Действие таких предохранителей во всех случаях одинаково. Сульфит быстро окисляется в сульфат (сернокислую соль), и, так как окисление сульфита совершается скорее, чем окисление проявляющего вещества, разложение проявителя замедляется. Количество предохранителя меняется от тройного до удесятерённого против количества проявляющего вещества (в зависимости от рецепта), но даже и небольшое количество сульфита способствует сохраняемости раствора. Существуют проявители, в состав которых входят два проявляющих вещества, причём присутствие одного из них способствует устойчивости другого. Обычно в состав подобных проявителей входит гидрохинон — проявляющее вещество, обладающее и предохранительным действием. Приготовленный без гидрохинона *свежий* проявитель не будет обнаруживать заметных особенностей в своём проявляющем действии. Однако он будет окисляться гораздо быстрее, чем при нормальном составе раствора, в который входит гидрохинон.

Кроме предохраняющего действия, сульфит также помогает проявляющему действию некоторых проявляющих веществ, которые не столь энергичны без него. Сульфит действует и как растворитель галоидных соединений серебра, тем самым увеличивая расстояния между зёрнами эмульсии и ослабляя слипание между собою соседних глыбок серебра. Это придаёт изображению *мелкозернистость*.

Действие проявителя обычно усиливается при повышении щёлочности; поэтому щёлочь в проявителе называется *ускорителем*. Обычно применяется как ускоритель углекислый натр, но иногда его заменяют боратами и фосфатами, особенно в проявителях, применяющихся при более высокой температуре. При этих условиях углекислая соль проявителя, перенесённая в кислую фиксажную ванну, будет реагировать с кислотой, образуя углекислоту в виде *пузырей*. Бораты и фосфаты при такой же обработке газов не образуют. Применение особых щёлочей зависит от рецепта, но, вообще говоря, лучше применять более слабую щёлочь в большей концентрации, чем сильную щёлочь в более разбавленном виде. Это даёт больше возможностей для управления щёлочностью и предупреждает изменения в щёлочности вследствие возможной реакции углекислоты воздуха с едкой щёлочью.

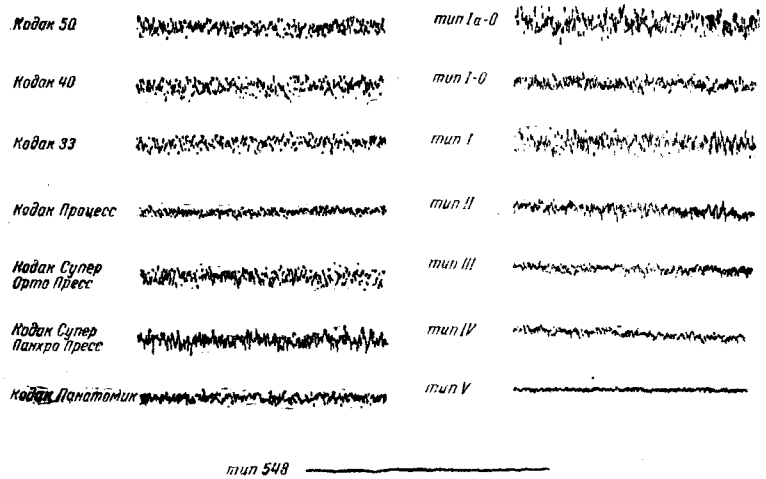


Действие проявляющего вещества, как мы видели, зависит от разницы в скорости проявления экспонированных и неэкспонированных зёрен галоидного серебра. Для увеличения разницы этих скоростей применяется *замедлитель*, например бромистый калий, хлористый и даже иодистый калий. Разница в поведении экспонированных и неэкспонированных зёрен галоидного серебра неясна, но опыт показывает, что вуаль фона (почернение массы неэкспонированных зёрен галоидного серебра) задерживается легче, чем почернение скрытого изображения; этим увеличиваются желаемые различия (контрасты) при проявлении.

## «МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ» ПРОЯВИТЕЛИ

В связи с распространением фотографирования с помощью малых камер в последнее время всё более и более говорят о мелкозернистых эмульсиях и мелкозернистых проявителях. Это качество, однако, не менее желательно и для научной фотографии и особенно в астрономии, так как одно из важнейших качеств готовой фотографии, безразлично негатива или позитива, состоит в разрешении на ней деталей. Если принять во внимание, что изображение состоит из отдельных зёрен серебра, станет ясно, что детали, более мелкие, чем зёрна серебра или чем группы зёрен, не смогут быть переданы эмульсией. Зернистость или наличие целых кучек зёрен серебра (эти кучки во много раз больше, чем первоначальные зёрна галоидного серебра) зависит прежде всего от исходного размера зёрен эмульсии. Так, у любой эмульсии размер кристаллов галоидных солей увеличивается в процессе созревания параллельно с возрастанием чувствительности, так что, чем чувствительнее эмульсия данного типа, тем грубее её зернистая структура. Но при

конечном восстановлении из соли в металлическое серебро зёрна серебра могут соединяться по нескольку вместе, образуя очень грубозернистую структуру изображения, особенно, если распределение этих групп зёрен неравномерно. Это соединение зёрен в кучки зависит от проявителя и от способа проявления.




Фиг. 30. Записи микроденситометра, показывающие зернистость некоторых стандартных эмульсий.

Исключительная трудность при разборе вопроса о зернистости состоит в отсутствии стандартного способа её измерения. Это ведёт к противоречивым результатам, даже в том случае, если два экспериментатора работают одинаково тщательно. Обычный метод состоит в увеличении негатива и визуальной оценке получившегося рисунка. Другой более объективный метод состоит в регистрировании зернистости с помощью микроденситометра (см. главу 6, где помещено описание микроденситометра), как показано на фиг. 30. Обычный метод уменьшения зернистости при проявлении состоит в добавлении к проявителю восстанавливающего вещества, которое растворяет поверхность зёрен галоидного серебра, не позволяя им, таким образом, слипаться между собой. Таков проявитель с бурой. Другой способ состоит в отыскании проявляющего вещества, которое само по себе обладает «мелкозернистым действием», как парафенилендиамин. Это проявляющее вещество, однако, требует длительного проявления и не даёт столь полного использования высокой чувствительности эмульсии, как обычные проявители. Для устранения медленности действия парафенилендиаминовый проявитель употребляется в соединении с другими проявляющими веществами, которые не вредят желательной мелкозернистости, но уменьшают продолжительность проявления и повышают использование чувствительности эмульсии.



## ХАРАКТЕРИСТИКА ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ

Если мы подвергнем часть фотографической пластинки*) действию света постоянной интенсивности в течение одной секунды, затем другую часть — в течение двух секунд, третью часть — в течение четырёх секунд и т. д., каждый раз удваивая экспозицию, то мы найдём после проявления, что количество осаждённого серебра возрастает вместе с экспозицией, или, как мы обычно говорим, *плотность* зависит от экспозиции **).

*) Употребляемое нами слово «пластинка» одинаково относится к стеклу, плёнке или бумаге, покрытой эмульсией.

**) Взаимоотношения между интенсивностью света, непрозрачностью, прозрачностью и плотностью определяются так.

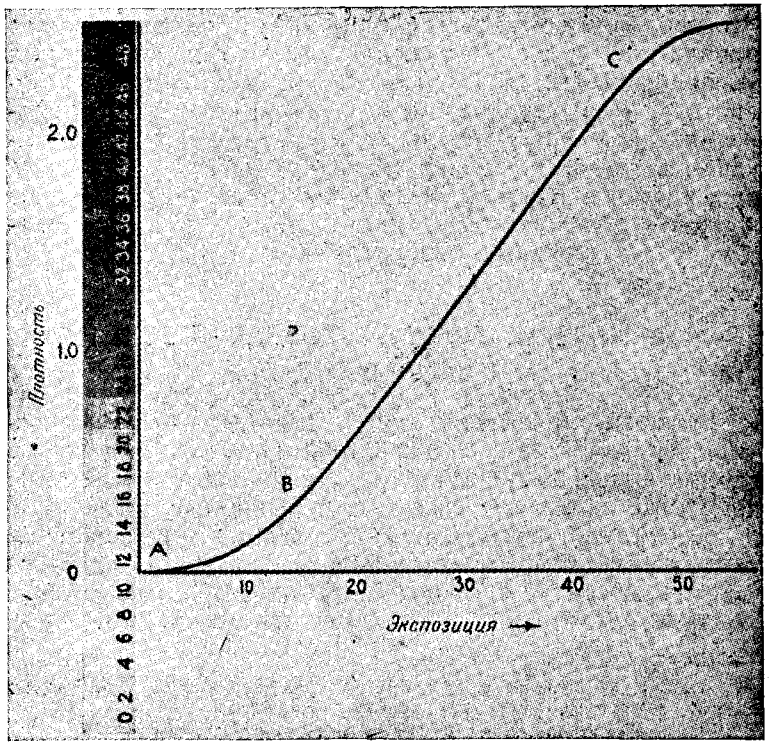
Если пучок света интенсивности $I$ падает на проявленное фотографическое изображение и если некоторая часть пучка $I_t$ проходит сквозь него, то мы имеем:

$$\frac{I}{I_t} = O \text{ (непрозрачность)},$$

$$\frac{I_t}{I} = \frac{1}{O} = T \text{ (прозрачность)},$$

$$\lg O = \lg \frac{1}{T} = -\lg T = D \text{ (плотность)}.$$

Зависимость между плотностью и экспозицией графически изображена на фиг. 31, на которой плотности отложены по вертикали, а продолжительность экспозиции

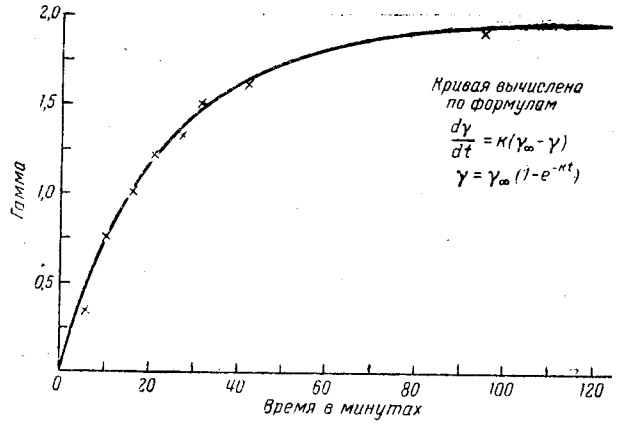



Фиг. 31. Фотография фотометрического клина и характеристическая кривая.

в секундах — по горизонтали. Мы видим, что экспозиция в две секунды даёт плотность 0,1, а экспозиция в 32 секунды — плотность 1,4 и т. д. Эта кривая, впервые построенная Хартером и Дриффилдом в прошлом веке, известна как *характеристическая* кривая эмульсии, так

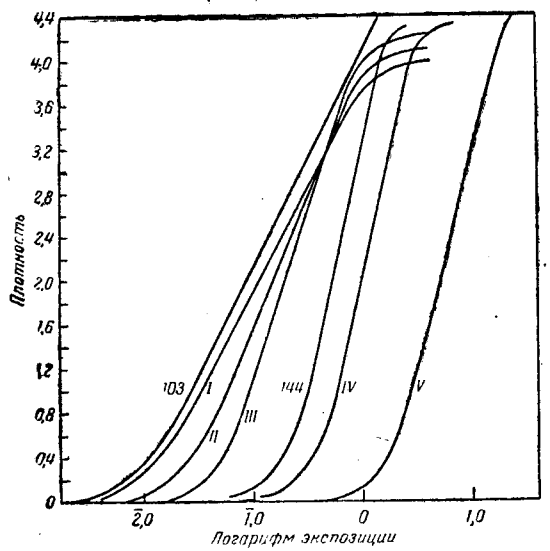


как она определяет отношение эмульсии к различной градации света и тени. Она также даёт средство непосредственно сравнивать одну эмульсию с другой. Мы говорим о подошве кривой применительно к её отрезку *AB*, о прямолинейной части кривой от *B* до *C* и о «плече» от *C* до *D* (*D* находится вправо за пределами фиг. 31). Наклон прямолинейной части, определяемый тангенсом угла, составляемого прямолинейной частью кривой и горизонтальной осью, называется коэффициентом контрастности, или *гаммой*. Эмульсия, прямолинейная часть кривой которой образует угол в 45° с осью абсцисс, обладает нормальными контрастами, или гаммой, равной единице ($\gamma = 1$), и наилучшим образом передаёт фотографируемый предмет. Эмульсия, обладающая бо́льшим значением гаммы ($\gamma = 2$), даёт более контрастное изображение, так как небольшое увеличение экспозиции создаёт относительно большую плотность. Эмульсия с гаммой, меньшей единицы, даёт менее контрастное изображение, чем при значении гаммы, равном единице. Гамма заметно зависит от продолжительности проявления, как показано на фиг. 32.




Фиг. 32. Кривая, показывающая отношение между гаммой и временем проявления для некоторых стандартных эмульсий.

Желательно работать, насколько это возможно, в области прямолинейной части кривой. Это — область нормальной экспозиции, а подошва и плечо, это — области недодержки и передержки. К сожалению, однако, в астрономии выбирать не приходится, так как в большинстве случаев интенсивность света звёзд очень мала. Приходится работать в области подошвы характеристической кривой. В этой части характеристической кривой

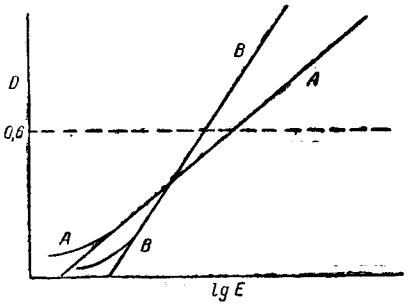



Фиг. 33a. Характеристические кривые для типичных материалов, проявленных до $\gamma = 0{,}8\,\gamma_\infty$.

приобретают особое значение все недостатки свойств эмульсии и их приходится принимать во внимание, особенно, если нужно получить количественное выражение интенсивности света, исходя из плотности отложенного серебра.

Фиг. 33a показывает различия контрастов у семи главных эмульсий, применяемых компанией Кодак для изготовления специальных спектроскопических и астрономических пластинок. Увеличение крутизны кривой от эмульсии 103 до V указывает на прогрессивное усиление контрастов, а перемещение по горизонтальной оси означает изменение чувствительности. Если мы сравним характеристические кривые двух эмульсий из числа представленных на рисунке, то мы заметим, что кривая эмульсии 103 слегка смещена влево по сравнению с эмульсией I; это означает, что эмульсия 103 чувствительнее. Необходимо подчеркнуть, что сравнение чувствительности может быть произведено здесь непосредственно, так как кривые в данном случае построены для одного и того же значения гаммы. Эта стандартизация необходима, так как характеристическая кривая изменяется не только от эмульсии к эмульсии, но также у одной и той же эмульсии в зависимости от способа обращения и хранения, от температуры и от влажности воздуха во время экспозиции, а также от типа проявителя, продолжительности проявления и от других физических условий во время работы.

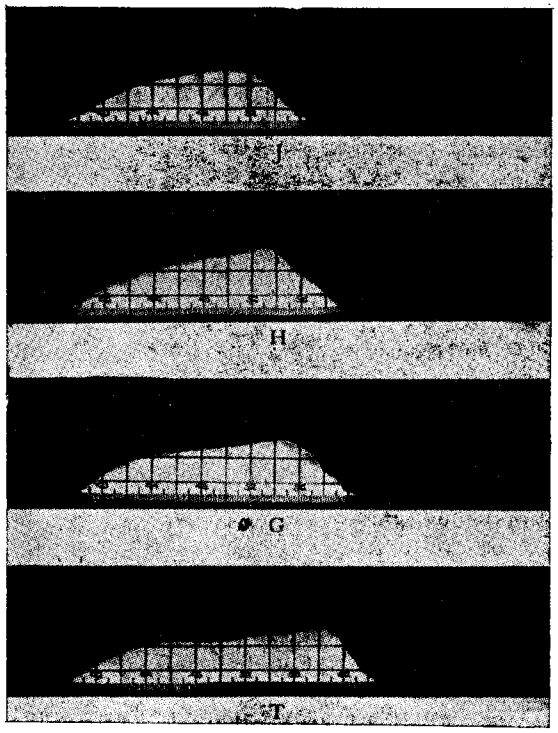





Фиг. 33b. Характеристические кривые, иллюстрирующие относительную чувствительность двух различных фотоматериалов.

Характеристические кривые представляют лишь один вид из целой семьи кривых, необходимых для полного определения всех качеств эмульсии. Невозможно характеризовать кривую одной цифрой или отношением, поскольку отношение представляет лишь одно качество или одну комбинацию качеств, указываемую фирмой. Такие характеристики часто выводятся при идеальных условиях, редко осуществляющихся на практике, и должны приниматься к руководству лишь при сравнении одной эмульсии с другой. Нужно заметить также, что, когда мы говорим о чувствительности эмульсии, мы подразу-

меваем вообще суммарную чувствительность, или, как обычно говорят, чувствительность к белому свету. В астрономической фотографии, однако, важнее чувствительность к узкой области спектра, чем общая




Фиг. 34а. Клиновые спектрограммы фотоматериалов, очувствлённых к зелёным лучам.

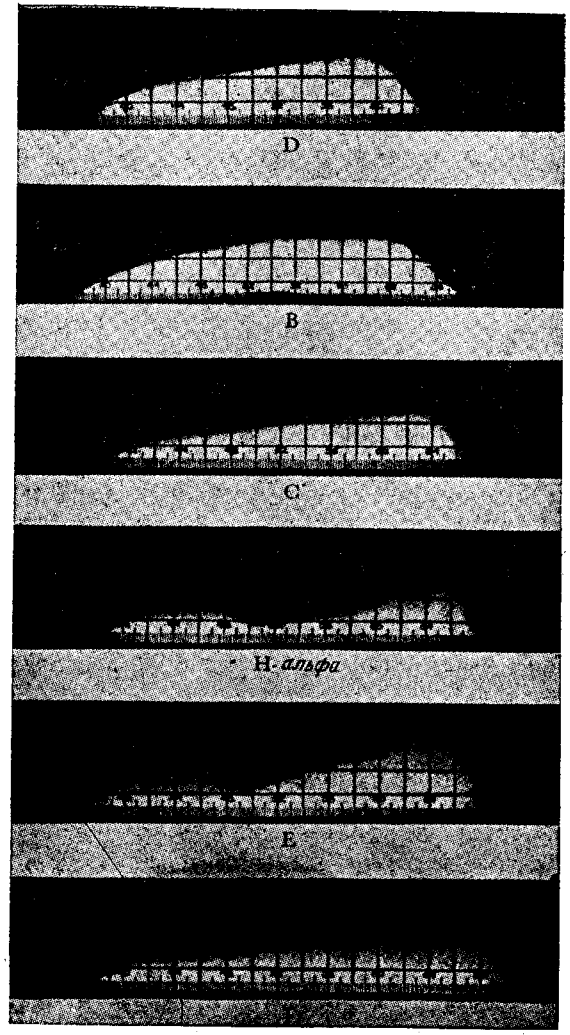
чувствительность. Считается, что панхроматическая эмульсия в пять раз более чувствительна, чем эмульсия, чувствительная к синим лучам; в действительности же, если её подвергнуть действию одних синих лучей (фиг. 33*b*), она в пять раз менее чувствительна. Увеличение



общей чувствительности эмульсий в течение последних пятидесяти лет зависело главным образом от распространения чувствительности на жёлтую, красную и, наконец, на инфракрасную части спектра. Как уже указывалось, обычные эмульсии (без применения окрашивания) чувствительны к сине-фиолетовому свету. Поэтому синий предмет для фотографической пластинки ярче, чем для глаза, тогда как жёлтый или красный предмет выходит на ней более тёмным. В 1873 г. Г. В. Фогель открыл, что нафталин-рот, анилин-рот, метилвиолет и другие краски делают зёрна серебра чувствительными к жёлтым и зелёным лучам. С начала XIX в. наиболее важными красками стали цианины, получающиеся из того же бензола, который является основой органических проявляющих веществ. Краска поглощается зёрнами галоидных соединений серебра, но не желатиной и вводится в эмульсию путём купания обычной пластинки в растворе краски после нанесения эмульсии или путём внесения краски в самую эмульсию. Фиг. 34 показывает влияние различных красок в различных областях спектра. Между химическим составом и сенсибилизирующим действием красок явной связи нет.

Ещё одно явление, связанное с чувствительностью, это — *нарушение закона обратной пропорциональности.* Закон обратной пропорциональности, провозглашённый в первоначальной форме Бунзеном и Роско, гласит, что почернение фотографической пластинки зависит просто от общего количества света, полученного зёрнами галоидного серебра, так что при уменьшении освещённости пластинки вдвое экспозиция должна быть удвоена, чтобы получить ту же конечную плотность. Но теперь известно, что это простое соотношение неверно и что в случае долгих экспозиций, с которыми приходится иметь дело в астрономической фотографии, отклонение от закона обратной пропорциональности становится весьма значительным.

На практике в астрономии руководятся приближённым правилом, гласящим, что надо увеличить экспозицию втрое для получения выигрыша одной звёздной величины (соответствующей уменьшению интенсивности

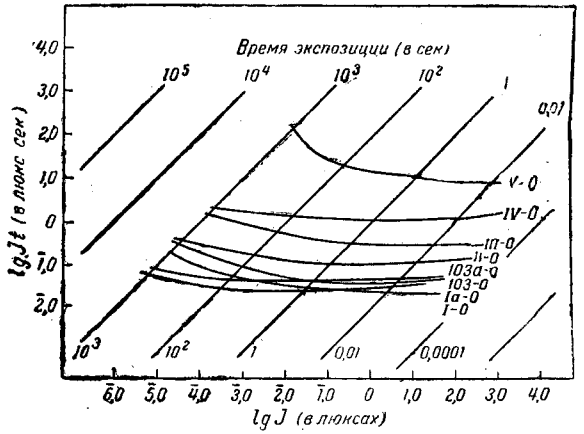



Фиг. 34b. Клиновые спектрограммы панхроматических фотоматериалов.



света в 2,5 раза). Так, например, если данная камера даёт звёзды четырнадцатой величины за десять минут, то потребуется экспозиция в 30 минут, для того чтобы достигнуть пятнадцатой величины.

На фиг. 35 показан ряд кривых нарушения закона обратной пропорциональности для нескольких эмульсий.




Фиг. 35. Нарушение закона обратной пропорциональности для спектроскопических пластинок Истмэна.

Эти кривые практически не обнаруживают *никакого* наклона в области экспозиций от 1/100 до 1 секунды, соответствующих интенсивности света и экспозиции при обычной фотографии, но при малой интенсивности света (при малой освещённости), которой соответствуют экспозиции продолжительностью в несколько часов или порядка $10^4$ секунд, кривые настолько загибаются кверху, что становится необходимым увеличить продолжительность экспозиции; отсюда увеличение произведения время × освещённость пластинки для получения одинаковой плотности.

# 4

# ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

С появлением фотографического метода перед астрономией открылись неисчерпаемые возможности новых открытий, несущих человечеству познание миров, невидимых иным способом. Человеческое зрение усилилось в сотни раз благодаря своеобразной способности эмульсии из галоидных солей серебра накоплять свет, слишком слабый, для того чтобы возбудить сетчатую оболочку глаза, или имеющий неподходящую для этого длину волны. Существование слабо светящихся газовых вуалей между звёздами стало известно лишь на фотографической пластинке. Пятнышки из зёрен серебра могут означать сверкающие звёздные галактики, находящиеся от нас на расстоянии миллионов световых лет.

Нетрудно предаваться размышлениям по поводу чудес фотографии; но наша задача требует более строгого подхода. Мы должны рассмотреть возможность применить фотографическую пластинку для астрономических целей и изучить фотографические инструменты.

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Для того чтобы измерить разрешающую способность фотографического инструмента, мы должны рассмотреть природу изображения звезды на фотографической пластинке. Разрешающая способность важна для фотографирования деталей на поверхности протяжённых объектов вроде Солнца и планет или для разделения близких изображений звёзд. Телескоп, сконструированный для такой фотографии, должен давать сколь возможно малые изображения звёзд.



Звёзды так далеки от нас, что даже самый большой из видимых диаметров звёзд стягивает угол всего в 0,065 секунд дуги, по существу представляя геометрическую точку. Гораздо больший размер изображения звезды на фотографической пластинке является результатом диффракции света, а также зависит от природы фотографической эмульсии, от качества инструмента и от земной атмосферы.

Мы видели во второй главе, что вследствие волновой природы света *изображение* звезды — не точка (фиг. 24); телескоп со светосилой 1/5, например, образует в главном фокусе диффракционный диск диаметром в несколько микронов*). Другой фактор, влияющий на окончательные размеры фотографического изображения, это — эффект диффузии света в фотографической эмульсии. Представим себе изображение звезды, точно сфокусированное на слегка молочной эмульсии фотографической пластинки. Свет от звезды проникает в эмульсию, пока он либо не поглотится в ней, либо не пройдёт насквозь, чтобы поглотиться противоореольным слоем на обратной стороне стекла. Для каждого сорта эмульсии и для каждой экспозиции существуют довольно определённые размеры ореола, вызванного рассеянием. Для средней эмульсии и нормальной экспозиции можно на основании наблюдений принять, что ореол от рассеяния равен 0,02 *мм*.

Волны тёплого воздуха над горячей поверхностью производят искажение вида далёких предметов, легко заметные даже невооружённым глазом, несмотря на его

*) Изображение звезды, образованное безукоризненной оптической системой, имеет фактический размер $11{,}6/D$ секунд дуги, где $D$ есть отверстие телескопа в сантиметрах (см. главу 2). Действительный линейный диаметр наведённого на фокус изображения звезды будет поэтому $\frac{F}{D} \times \frac{11{,}6}{206\,265}$ *см*, где $F$ есть фокусное расстояние телескопа в сантиметрах. Очевидно, линейный размер зависит только от светосилы телескопа ($F/D$). Величина 206 265 есть число секунд дуги в одном радиане.

малое отверстие. Сходным образом угловой диаметр изображения звезды увеличивается неспокойствием воздуха ещё до того, как свет от неё достигнет инструмента. В хорошую ночь, однако, мы можем с пользой употреблять телескопы с отверстиями до 5 *м*, глядя сквозь многокилометровую толщу волнующегося воздуха. Но при наилучшем состоянии атмосферы предельные полезные отверстия ещё больше.

Неспокойствие земной атмосферы заметно ухудшает качество изображений. Необходимо различать качество визуального и фотографического изображений. Визуальные изображения могут считаться превосходными, если изображение звезды настолько резко, насколько позволяет диффракция, хотя оно и может «прыгать» на небольшую долю поля зрения. Так как зрение почти мгновенно охватывает предмет, то глаз, следуя за небольшими передвижениями звезды, может рассмотреть много деталей. Визуальные изображения можно считать плохими лишь в том случае, если звезда кажется всё время размытым пятном, хотя бы и неподвижным. Качество фотографического изображения определяется суммой из расплывчатости изображения и его неспокойствия. Пульсация и движение изображения пунктуально передаются внимательной, но лишённой воображения фотографической пластинкой.

Среднее качество изображения чрезвычайно зависит от места наблюдения. К счастью, для американских астрономов существует большая область превосходных изображений в западной части США, особенно в поясе, проходящем через Техас, Аризону, южную и центральную Калифорнию. Хорошие изображения встречаются и в других местах земного шара*).

Последний фактор, могущий увеличить изображение звезды, это — качество телескопа. Хороший инструмент почти никогда не создаёт затруднений такого рода. Даже наибольшие параболические зеркала (см. таблицу 2, стр. 92) столь точно изготовлены и монтированы, что

*) Данжон и Кудэ указывают, что в Форкалькье (Forcalquier), во Франции, визуальные изображения имеют размер всего в 0″,03.



если не мешает состояние воздуха, они дают визуальное изображение звезды настолько малое, насколько позволяет диффракция.

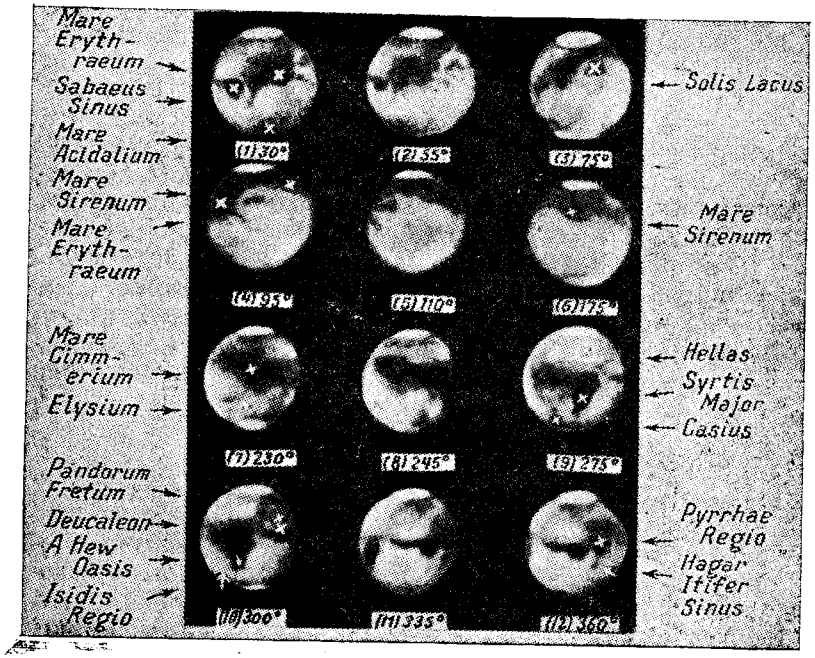
Наименьший размер изображения звезды на фотографической пластинке будет порядка суммы всех перечисленных четырёх факторов. Таблица 14 (стр. 129) содержит фактические диаметры изображений звёзд, которые должны получаться при указанных там размерах телескопов в случае их безукоризненного качества.

Угловая величина фотографического изображения звезды может быть названа *разрешающей способностью* фотографического телескопа. Разрешение есть мера деталей, различимых на светящихся поверхностях, вроде поверхностей планет; для таких работ безукоризненная отчётливость изображения составляет решающее условие. Так как зернистая структура высокочувствительных фотографических эмульсий грубее, чем структура сетчатки глаза, и так как глаз в состоянии использовать короткие моменты хороших изображений, визуальное разрешение пока превосходит фотографическое. При изучении поверхностей планет фотографическая пластинка может быть полезна лишь для проверки объективности человеческого зрения *).

Измерения положений звёзд на фотографической пластинке сильно облегчаются при инструменте с наилучшим разрешением. Даже небольшие отклонения изображений звёзд от круговой симметрии, вследствие недостатков оптической системы, вредят как точности, так и удобству измерений. Положение малого, но не симметричного изображения измерить труднее, чем большого, но круглого.

*) Снимки Марса, полученные летом 1939 г. Е. Слайфером при помощи 27-дюймового рефрактора на станции Ламонт-Хасси Мичиганского Университета, являются, вероятно, лучшей серией планетных фотографий. Фиг. 36 воспроизводит некоторые из этих фотографий (см. книгу Ф. Уиппла «Земля, Луна и планеты»). Прекрасные фотографии планет были получены недавно на обсерватории Пик-дю-Миди французскими астрономами Лио, Камишелем и Жентильи. Для увеличения разрешающей способности они печатали одно позитивное изображение с нескольких негативных изображений, полученных быстро одно за другим (*Прим. ред.*).]

Измерение общего количества света от небесного объекта на фотографической пластинке не требует особенно высокого качества изображения. Точность измерения даже повышается при плохих изображениях и при сильном рассеянии света в фотографическом слое.




Фиг. 36. Панорама Марса.
Эти фотографии Марса, сделанные в 1939 г. Слайфером, показывают планету в последовательных положениях вращения (поворот приблизительно через 30°).

В такой работе наибольший ущерб точности причиняют колебания в прозрачности нашей атмосферы, свет от неба и недостаточная однородность чувствительности одной и той же пластинки в разных её частях и у различных пластинок. Качество инструмента имеет значение в том отношении, что он не должен иметь хроматической аберрации, чтобы изображения звёзд различного



цвета были приблизительно одинаковы, а также должен давать изображения достаточно сходной структуры по всему полю. Хорошие наблюдения нередко производятся с довольно плохими средствами, но требующиеся при этом поправки зачастую бывают мудрены и ненадёжны. Очень часто их можно заранее избежать путём правильного выбора инструмента.

## ПОЛЕ ЗРЕНИЯ И МАСШТАБ ПЛАСТИНОК

Визуальные инструменты требуют лишь небольшого поля безупречной резкости. Если наблюдатель хочет осмотреть соседнюю часть неба, ему надо лишь повернуть телескоп. При фотографировании же к инструменту предъявляются более строгие требования. Фотографическая пластинка одинаково внимательна ко всему полю зрения одновременно. Поэтому необходимы инструменты, исправленные так, чтобы давать хорошие изображения звёзд на протяжении большого поля.

Выбор подходящего инструмента для данной исследовательской проблемы зависит от многих переменных величин. Некоторые из наиболее эффективных и теоретически идеальных инструментов до сих пор невозможно построить с достаточной точностью. Приходится выбирать инструмент, доступный при имеющихся денежных средствах, соответствующий месту наблюдения и типу работы. Мы должны также выбрать такой инструмент, который можно построить в течение приемлемого срока.

Важный вопрос в астрономической фотографии, это — *масштаб пластинок*. Под масштабом понимается линейное расстояние на фотографической пластинке, соответствующее определённому угловому расстоянию на небе. Должен ли один квадратный градус неба занимать на фотографической пластинке квадрат со стороной в один или в десять сантиметров? В случае изучения небольших далёких объектов масштаб имеет значение разве лишь для разделения изображений звёзд, насколько это позволяет атмосфера. Из различных величин, влияющих на линейный диаметр изображения звезды на пластинке, рассеяние в слое и диффракция не зависят

от фокусного расстояния. Поэтому их влияние уменьшается, коль скоро фокусное расстояние увеличивается настолько, что размер диска, обусловленный атмосферным дрожанием, приближается к размеру изображения звезды. Весь Млечный Путь был однажды умещён на фотографии размером с почтовую марку, но масштаб такой фотографии, конечно, настолько мал, что изображения звёзд на ней сливаются. Существуют, однако, прямые фотографии, сделанные в масштабе нескольких секунд дуги в одном миллиметре пластинки. Для точных измерений положений звёзд и для определения параллаксов совершенно необходим большой масштаб.

Выбор масштаба пластинки зависит, конечно, от того, сколько квадратных градусов неба желательно покрыть*), и от намечаемого размера инструмента. Большой масштаб пластинки обычно требует большого фокусного расстояния и большого действующего отверстия инструмента. Большое отверстие обычно связано с ограниченным угловым полем зрения. Патрульные камеры, напротив, покрывают на небе много квадратных градусов (около 2500 квадратных градусов на пластинке $20 \times 25$ *см*) вследствие своего малого фокусного расстояния и умеренной светосилы.

Если увеличить вдвое все размеры данной патрульной камеры, включая её объектив, то при данном угловом поле зрения вне оптической оси получатся изображения вдвое большего линейного размера. Если размер изображения у края пластинки был как раз на границе годности в исходной камере, то в этой увеличенной камере изображение на краю поля будет уже непригодно; чтобы остаться в границах допустимого размера изображений, пришлось бы ограничить угловое поле меньшей величиной. Такое уменьшение поля делает линейные размеры фотографической пластинки более или менее неизменными при увеличении размеров инструмента. Во всяком случае, если размер пластинки и увеличивается вместе с инструментом, то лишь очень медленно. Это можно хорошо проиллюстрировать на примере рефлектора. Если

*) Поверхность всего неба содержит 41 253 квадратных градусов.



наблюдатель пользуется пластинкой в $5 \times 5$ *см* с зеркалом, имеющим отверстие в 6 дюймов при светосиле 1/5, то получающиеся фотографии будут столь же резки или столь же размыты на краях, как и при том же размере пластинки с 60-дюймовым зеркалом того же относительного отверстия 1/5. При этом угловое поле, охватываемое большим зеркалом, будет в десять раз меньше, а площадь неба в 100 раз меньше, чем при меньшем зеркале. Для рефракторов и патрульных камер отношения сложнее, но имеют тот же характер. Мы видим, таким образом, что требования при фотографировании неба радикально отличаются по своему характеру и строгости от требований при визуальных наблюдениях.

## РЕФЛЕКТОР КАК ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ

Во второй главе мы рассматривали применение рефлекторов для визуальных наблюдений. Мы видели, что они обычно состоят из одного параболического зеркала со вспомогательными плоскими зеркалами. Так как большие инструменты дороги, возникает вопрос о качестве их фотографической работы. Несомненно, их светособирающая сила может быть больше, чем у фотографического рефрактора, и, кроме того, в своём главном фокусе большой рефлектор может дать масштаб до 15 секунд дуги в миллиметре, — масштаб, особенно ценный для критического изучения специальных объектов.

Когда фотография в фокусе большого телескопа сделана и проявлена, учёный может воспользоваться лупой или даже микроскопом для её изучения в лаборатории. Получится нечто вроде того, как если бы лупа была применена для визуального наблюдения в телескопах. Но в случае фотографии учёный имеет то преимущество, что может изучать картину в наиболее удобное для него время, в течение сколь угодно продолжительного времени и может сравнивать между собою отдельные части фотографии.

Параболические зеркала, особенно большие, применяются теперь почти исключительно для фотографирова-

ния. Вследствие простоты таких телескопов возможно достигнуть такого коэффициента полезного действия и таких размеров, которые едва ли возможны в случае более сложных инструментов. Телескоп легко держать в состоянии налаженности, поскольку единственное требование состоит в том, чтобы фотографическая пластинка была правильно отфокусирована на оптической оси зеркала.

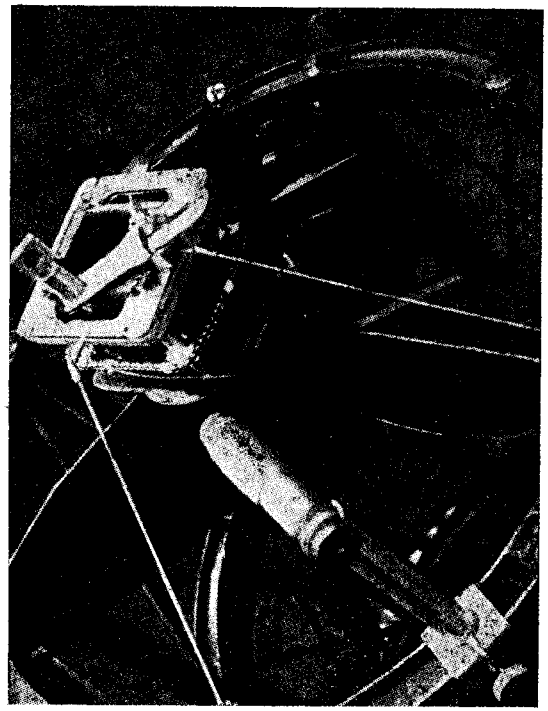
Параболический телескоп применяется преимущественно для фотографирования в главном фокусе или в ньютонианском фокусе. Прямые фотографии редко делаются в кассегрэновском фокусе или в фокусе «кудэ» (см. главу 2). Более длинный фокус при системе Кассегрэна или «кудэ» требует несколько более продолжительной экспозиции, что, в соединении с большим прогибанием трубы, делает гидирование более трудным. Кроме того, в случае больших телескопов с главным фокусным расстоянием 3,75 *м* и более, линейный диаметр фотографического изображения уже превосходит разрешающую способность эмульсии, так что более мелкомасштабные фотографии в главном фокусе вскрывают примерно столь же тонкие детали, как и доступные при большем фокусном расстоянии системы Кассегрэна. При инструменте меньшего размера, ещё не достигшем границ, поставленных условиями наблюдения, а также с большими инструментами, при идеальных изображениях от системы Кассегрэна получится некоторый выигрыш.

Фотографирование в главном фокусе требует, чтобы держатель кассеты находился на оси трубы телескопа, что непременно влечёт за собой заслонение части света, хотя, в большинстве случаев, и не такое значительное, как от ньютоновского вспомогательного зеркала. При больших размерах телескопа желательно гидировать путём движения фотографической пластинки и притом по звезде, находящейся у края поля. Для этого вполне годится маленькая зрительная труба, укреплённая на краю тубуса, фокусируемая с помощью вспомогательной призмы или зеркала на звезду в фокальной плоскости большого зеркала. Фиг. 37 показывает такое устройство на обсерватории Гёте Линк. Малый гид на краю трубы большого



телескопа ненадёжен, если только труба последнего не исключительно жестка, что не всегда достижимо.

Фотографирование в главном фокусе требует несколько более длинной трубы, чем в случае системы Ньютона. Кроме того, требуется несколько больший купол, и в результате стоимость телескопа увеличивается. В настоящее время бóльшая часть фотографических работ с большими рефлекторами производится просто в ньютоновом фокусе, причём кассета имеет вертикальные и боковые движения для гидирования.



Фиг. 37. Подвижная кассета (с двойными салазками) в главном фокусе и приспособление для гидирования (Обсерватория Гёте Линк).

## ОШИБКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Замечания, сделанные в первой части этой главы о размерах изображения звезды, приложимы, конечно, и к рефлектору. Мы предполагали, что инструмент оптически безупречен. Оптическая система, которая не даёт видимых изображений, настолько резких, насколько позволяет диффракция, обладает *сферической аберрацией*, величина которой может измеряться либо линейным размером изображения в фокальной плоскости, либо угловым диаметром круглого изображения. Термин происходит от неспособности сферической поверхности фокусировать в одно резкое точечное изображение все падающие на неё параллельные лучи. Поверхность зеркала может быть изготовлена с большим приближением к идеальному параболоиду, как показывает таблица 2. Другие факторы связаны с условиями наблюдения и с фотографической диффузией, о которых мы говорили раньше.

Таблица 2

Остаточная сферическая аберрация больших рефлекторов

| Телескоп и обсерватория | Размер изображения в главном фокусе | | Способ измерения |
|---|---|---|---|
| | в секундах дуги | в миллиметрах | |
| 82-дюймовый, Макдональд . . | 0,10 | 0,004 | Визуально |
| 74-дюймовый, Денлап . . . . | 0,40 | 0,018 | Визуально |
| 72-дюймовый, Виктория . . . | 0,24 | 0,011 | Визуально |
| 69-дюймовый, Перкинс . . . . | 0,28 | 0,010 | Визуально |
| 61-дюймовый, Гарвард . . . | 0,46 | 0,018 | Фотографически |
| | 0,13 | 0,005 | Визуально |

Хотя изображение звезды в случае хорошего параболического зеркала должно быть на оптической оси сколь возможно мало, вне оптической оси или вне центра поля зрения оно обязательно будет искажено. Параболоид имеет математическое свойство отражать падающие параллельные пучки света точно в фокус, если только пучок света точно параллелен оси симметрии или оптической оси зеркала; но параллельные пучки света, падающие под углом к оптической оси инструмента, уже не проходят через общий фокус. Порча изображения, по мере того как мы удаляемся от оси, не столь быстра, чтобы параболоид вовсе не имел поля зрения. При светосиле 1/5 его поле мало в сравнении с другими более сложными инструментами, но для многих целей большое поле и не нужно.



На фиг. 38 показан вид под микроскопом изображений звёзд, образованных параболическим зеркалом на некотором расстоянии от оптической оси. Увеличение изображения, принимающего несимметричный вид, происходит от дефекта, называемого *комой*.

Фиг. 38. Изображения звёзд, испорченные комой параболического зеркала.

Простота больших рефлекторов оплачивается ограниченностью допустимого поля. Нелегко точно определить размер *полезного* поля. Он целиком зависит от рода исследований. Так, например, для фотоэлектрических наблюдений изображения на краю поля столь же пригодны, как и центральные, просто благодаря тому, что в данном случае можно пользоваться чрезвычайно плохими изображениями*). При фотографических работах изображения звёзд становятся ненадёжными, коль скоро они заметно отступают от симметричной формы и когда, следовательно, наблюдатель может допустить серьёзные

*) Можно пользоваться изображениями величиной до сантиметра, но тут есть некоторые исключения. Иногда нужно отделить один объект от другого, близкого к нему, как, например, в случае определения абсолютного количества света от каждой из двух близко расположенных звёзд. Чаще, однако, приходится работать у порога фотоэлектрической чувствительности, и тогда нужно малое изображение звезды, чтобы оно могло пройти через узкую диафрагму, предназначенную для загораживания света от фона неба.

ошибки при измерении звёздных величин объектов, находящихся в разных местах пластинки. Мы можем принять за *полезное* поле площадку, ограниченную кругом, на котором сфотографированные изображения звёзд превосходят вдвое размер диска, определяемый качеством изображений, зависящим от атмосферных условий. Обычно фотографическая пластинка, применяемая с параболическим зеркалом, много больше, чем позволяет это условие, так что наблюдатель может свободно выбрать размер поля, наиболее подходящий для его специальных задач.

Таблица 3

Ошибки изображения параболического рефлектора

| Относительное отверстие | Расстояние от центра (в градусах) | Астигматизм (в секундах дуги) | Кома (в секундах дуги) | Астигматизм и кома (в секундах дуги) |
|---|---|---|---|---|
| 1/10 | 0,5 | 0,4 | 1,7 | 1,9 |
| | 1,0 | 1,6 | 3,4 | 4,2 |
| | 2,0 | 6,3 | 6,8 | 10,0 |
| | 4,0 | 25,2 | 13,6 | 26,2 |
| 1/3 | 0,5 | 1,3 | 18,7 | 19,3 |
| | 1,0 | 5,0 | 37,4 | 39,9 |
| | 2,0 | 20,0 | 74,9 | 84,9 |
| | 4,0 | 83,8 | 149,8 | 191,7 |

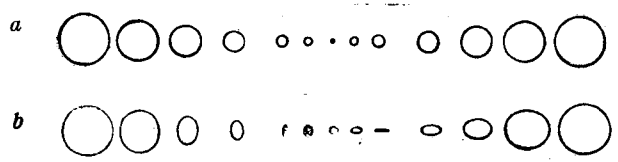
(Таблица из статьи K. Schwarzschild, Gött. Mitt., IX—XI, 1905.)

Таблица 3 даёт угловое радиальное протяжение комы обычного параболического рефлектора, на различных угловых расстояниях от оси, при различных фокусных расстояниях и отверстиях. Если для каких-либо особых целей желательно большее поле хороших изображений, можно уменьшить относительное отверстие объектива, так что кома станет менее серьёзной. Например, если телескоп с относительным отверстием 1/5 задиафрагмировать до 1/15, кома уменьшится в любой точке поля в 9 раз, так что при том же допуске для размеров изображения (т. е. удвоенный размер против определяемого



условиями наблюдения) поле можно увеличить в 9 раз по диаметру или в 81 раз по охватываемой площади неба.

Третий тип недостатков изображений, называемый *астигматизмом*, появляется на более значительных расстояниях от оси. Астигматическое изображение, как показывает самый термин, не есть точка, но и не асимметричная фигура, как при коме; оно вытянуто в светлую чёрточку. Предположим, что у нас есть система линз, единственной аберрацией которой является астигматизм. Падающий пучок параллельных лучей будет тогда фокусироваться в виде одной из двух прямых, лежащих перпендикулярно друг к другу на слегка различных расстояниях от линзы. Фиг. 39 показывает изменение вида такого изображения звезды, когда фотографическая пластинка помещается на различных расстояниях от объектива. На полпути между палочкообразными изображениями свет звезды образует круглое изображение, но не точку. Диаметр этого *кружка наименьшего рассеяния* на определённом угловом расстоянии от оси есть мера наличного астигматизма. В системе, свободной от астигматизма, диаметр изображения уменьшится до размера точки. Для удобства работы эти кружки наименьшего рассеяния должны лежать на плоской поверхности фотографической пластинки. Если бы эти кружки наименьшего рассеяния были расположены на искривлённой поверхности, то инструмент обладал бы аберрацией, называемой *кривизной поля*.




Фиг. 39. Последовательные поперечные сечения вполне исправленного и астигматического пучков лучей: *a*—вполне исправленный конус лучей, сходящийся к фокусу и расходящийся от фокуса; *b* — астигматический пучок лучей, сходящийся к кружку наименьшего рассеяния и расходящийся от него. Самое малое круглое изображение лежит на фокальной поверхности.

В случае малого относительного отверстия, когда кома мала, астигматизм может появиться первым при удалении от оси и останется бо́льшим, чем кома. Так, например, поле рефлектора с относительным отверстием 1/15 в одинаковой степени ограничено астигматизмом и комой. Таблица 3 показывает влияние астигматизма на качество изображения, выраженное в угловой длине астигматической линии на плоской фокальной поверхности (в радиальном направлении от центра поля).

Профессиональные астрономы применяют почти всегда рефлекторы с относительным отверстием более 1/15; поэтому можно сказать, что кома есть наиболее серьёзная аберрация вне оптической оси. Так как кома оказывается независимой от кривизны поля, то рефлектор с относительным отверстием 1/5 будет подчиняться одинаковым ограничениям, независимо от того, будет ли фотографическая пластинка плоской или изогнутой, чтобы соответствовать фокальной поверхности *).

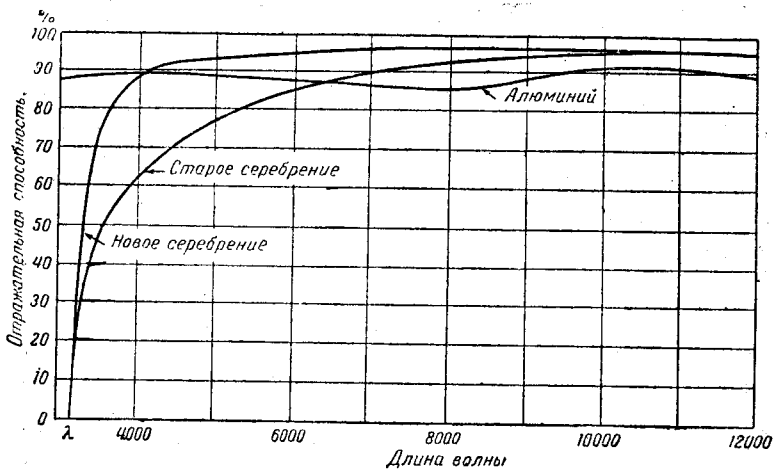
Для устранения комы обычного параболоида Ф. Е. Росс сконструировал специальную ахроматическую линзу нулевой оптической силы, помещаемую в сходящемся пучке отражённых лучей. Этот так называемый *нулевой корректор* обладает отрицательной комой, равной положительной коме параболоида. К сожалению, эта комбинация может иметь нулевую кому лишь ценою восстановления сферической аберрации. При светосиле 1/3 сферическая аберрация, вызываемая такой коррекционной линзой, совершенно недопустима; это положение привело к почти полной невозможности пользоваться некоторыми большими зеркалами со светосилой 1/3, изготовленными для европейских обсерваторий заводом Цейса. В то же время без нулевого корректора эти зеркала обладают чрезмерной комой.

Рефлекторы идеальны для сравнения света звёзд в лучах, сильно отличающихся друг от друга по цвету.

*) У многих инструментов, свободных от комы, искривлённая пластинка ещё улучшает их работу. Для Гарвардского 16-дюймового дублета Меткафа постоянно применяются слегка искривлённые пластинки. Фотографические инструменты по возможности следует конструировать с плоским полем.



С ними можно работать в ультрафиолетовых или в инфракрасных лучах, не меняя наводки на фокус. Единственное затруднение может возникнуть от изменения коэффициента полезного действия инструмента при переходе от одного цвета к другому; эта трудность в известной степени свойственна всем оптическим системам как линзовым, так и зеркальным.




**Фиг. 40.** Отражательная способность алюминиевого слоя, осаждённого путём испарения, и серебряного слоя, осаждённого химически.

Слой металла, осаждённый на зеркале, отражает лучи одних цветов лучше, чем других. Так, например, серебро лучше всякого другого металла отражает весь видимый спектр и к тому же значительную часть инфракрасных лучей. Но в ультрафиолетовой части спектра коэффициент отражения серебра падает; при длине волны менее 3300 Å серебряный фильм настолько прозрачен для света, что может употребляться в качестве фильтра, пропускающего далёкие ультрафиолетовые лучи. Так как эта область спектра

ещё проходит через атмосферу *), то алюминированные зеркала более пригодны, чем серебряные, для крайних ультрафиолетовых лучей (фиг. 40). Кроме того, коэффициент отражения у алюминия почти одинаков для лучей всех длин волн. Многие большие зеркала теперь покрываются алюминием посредством испарения.

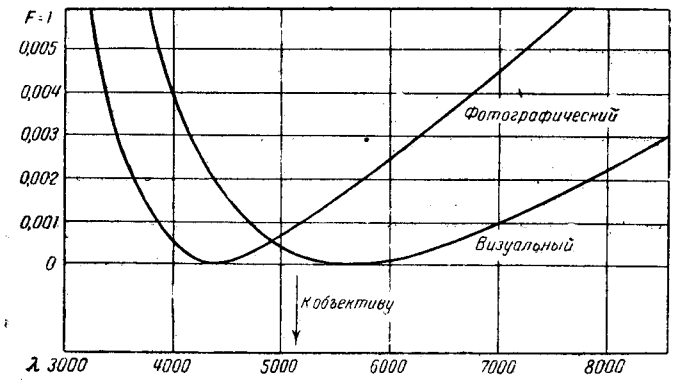
## РЕФРАКТОР КАК ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ

Величайшие современные рефракторы были построены в конце XIX в., когда визуальные наблюдения были ещё очень важны. По мере того как создавались большие рефлекторы и фотография начала вытеснять визуальные наблюдения, пытались превратить визуальные телескопы в фотографические инструменты. Это встретило целый ряд затруднений. Визуальный рефрактор является в полном смысле слова визуальным, так как лишь жёлтые и зелёные лучи собираются им точно в одном фокусе, а для остальных лучей хроматическая аберрация устранена не полностью. Мы уже имели дело с этим недостатком и назвали его вторичным спектром рефрактора. Кривая (фиг. 41) показывает расстояния между фокусами разных цветов на оптической оси для среднего визуального телескопа. У ярких звёзд виден пурпурный ореол, окружающий жёлтое центральное изображение. Эта пурпурная кайма происходит от того, что красные и синие лучи не сходятся в одном фокусе с жёлтыми, но пересекают оптическую ось дальше от линзы. Визуальные рефракторы исправлены для области максимальной чувствительности глаза.

В начале XX в. фотографирование по большей части производилось в сине-фиолетовой части спектра. Поэтому телескопы, построенные для визуальных наблюдений, не могли дать столь же резких изображений при фотографировании, какие получались бы, если бы их перестроить для лучей с длиной волны 4340 Å. Для преодоления этого препятствия было применено несколько способов. Первый и наиболее очевидный из них состоял в постройке системы линз, исправленной для фотографической области спектра. Это средство не особенно

*) Атмосфера полностью задерживает лучи длиной волны меньше, чем 2950 Å. Полная непрозрачность за этой границей зависит главным образом от наличия озона в верхних слоях атмосферы.






Фиг. 41. Вторичный спектр обыкновенного объектива из кронгласса и флинтгласса.

По вертикальной оси отложены расстояния фокусов лучей разных длин волн вдоль оси объектива (в долях фокусного расстояния); за нуль принят наименьший задний фокус. По горизонтальной оси отложены длины волн (в ангстремах).

годится для больших телескопов по причине высокой стоимости линз и неудобства замены одной линзы другой и, обратно. Иногда строились парные объективы с двумя трубами. Величайший из таких парных телескопов, это — 33-дюймовый (визуальный) и 25-дюймовый (фотографический) телескоп в Медоне (Франция) *).

Другой гораздо более приемлемый способ, это — помещение соответственным образом рассчитанной кор-

*) Довольно интересный инструмент был построен много лет назад для Гарвардской обсерватории. Тринадцатидюймовый рефрактор Бойдена имеет переворачивающуюся переднюю линзу. В одном положении он работает как обычный визуальный инструмент. Когда кроновая линза переворачивается и отодвигается от флинтовой, он становится фотографическим инструментом.

рекционной линзы в сходящемся пучке лучей внутри инструмента. Такая линза производит исправление в синих лучах, не влияя в то же время на качество изображений рефрактора*).

После введения чувствительных к жёлтым лучам (ортохроматических) пластинок визуальные рефракторы стали вполне пригодны для фотографии. Обычно пользуются жёлтым фильтром для исключения плохо сфокусированного синего света, к красному же свету ортохроматическая пластинка нечувствительна.

Поглощение проходящего света в стеклянных линзах рефракторов сильно зависит от длины волны. Кривая пропускания света типичного большого рефрактора, 36-дюймового Ликского телескопа, обнаруживает резкое падение в ультрафиолетовых лучах. Подобно посеребрённому рефлектору, большой рефрактор малоэффективен в ультрафиолетовых лучах. Потеря света увеличивается с толщиной линзы, при этом не пропорционально, а быстрее, потому что изготовление вполне прозрачных дисков большой толщины и большого диаметра представляет большие трудности. Крупнейшие рефракторы заметно теряют в звёздной величине предельно слабых объектов по сравнению с рефлекторами равного размера, особенно в синей и фиолетовой частях спектра. Ввиду этих больших потерь света от поглощения и вследствие заметного вреда от прогибания, связанного с трудностью укрепления больших стеклянных дисков за края, никогда не существовало астрономического линзового объектива более крупного, чем 40-дюймовый иерксский объектив.

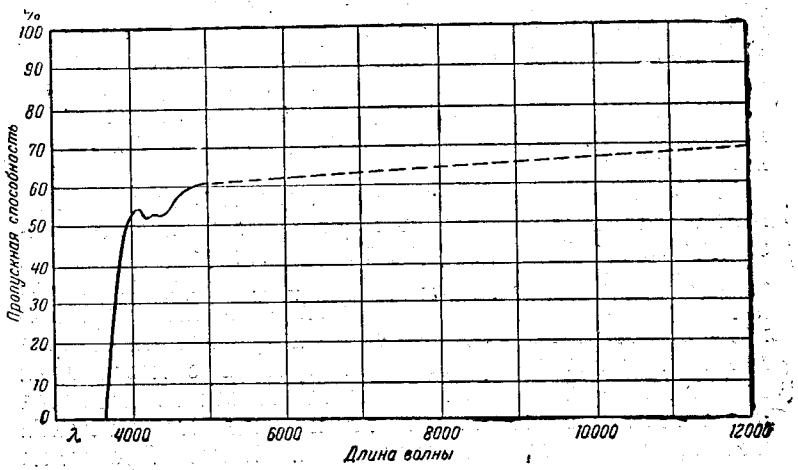
Двухлинзовый рефрактор, правильно сконструированный для астрономических наблюдений, не обладает ни сферической аберрацией, ни комой. Можно уменьшить эти ошибки до ничтожно малой величины и в то же время в значительной мере избавиться от хроматической аберрации путём подбора сортов стекла и кривизны

*) Е. Слайфер пользовался такой линзой для своих южноафриканских фотографий Марса. Такие вспомогательные линзы в комбинации с визуальными инструментами полезны для щелевой спектроскопии.



четырёх стеклянных поверхностей. Все эти исправления могут быть сделаны без отступления от сферической формы. Такой объектив часто называют объективом типа *Фраунгофера* *) (см. главу 2).

Отступая от сферической формы поверхностей линз, можно изготовить телескоп, исправленный за сферическую аберрацию более чем для одной длины волны, но при светосиле 1/15 такая дополнительная коррекция будет нужна только для самых больших объективов, и для них её следует рекомендовать**). Первый недоста-




Фиг. 42. Пропускающая способность 36-дюймового Ликского рефрактора и его фотографической коррекционной линзы.
Ср. с полезным действием рефлектора в главном фокусе (фиг. 40).

*) Первоначальный объектив Фраунгофера находится в немецком музее, в Мюнхене.

**) Альван Кларк применял эту коррекцию в своих крупнейших объективах не столько путём придания линзам асферической формы, сколько раздвигая линзы. Кроме того, раздвигание даёт возможность линзам скорее приходить в термическое равновесие, чем при их соприкосновении. Объектив с кроновой и флинтовой линзами, находящимися в контакте, называется гауссовым объективом и обладает чересчур большой кривизной, чтобы заслуживать рекомендации.

ток изображений, появляющийся в правильно сконструированном рефракторе, это астигматизм — ошибка, которую нельзя устранить при простой двухлинзовой конструкции.

Полезное поле рефрактора очень велико, особенно, если пластинка выгнута в направлении к объективу, при радиусе кривизны, равном 0,4 фокусного расстояния объектива. Затруднения, вносимые таким искривлением, не серьёзны, при условии, что работа носит фотометрический характер. Если пластинку оставить плоской, то изображения у краёв полезного поля будут не кружками, а эллипсами, вытянутыми в радиальном направлении.

Плоские пластинки предпочтительны для современных точнейших позиционных работ, где ошибка пластинок может быть доведена до 0,5 микрона. Большой рефрактор обладает рядом крупных преимуществ перед рефлектором для работы по определению параллаксов и собственных движений. При правильной сборке линзы никогда не приходится трогать с места в их первоначальной оправе. Свойства телескопа остаются постоянными в течение всего периода его полезной жизни, составляющего столетие и более. Программа исследований, посвящённых собственным движениям звёзд и звёздным параллаксам и рассчитанных на многие годы, может проводиться без всяких поправок, вносимых изменениями, происходящими в инструменте. Положения звёзд могут сравниваться год за годом. Другое преимущество для определения положений звёзд заключается в большом масштабе, даваемом рефрактором.

Почти все большие рефракторы делаются с относительным отверстием 1/15 и 1/20. Тогда толщина линз мало меняется от центра к краям и остаточный хроматизм не так сильно мешает большей части работ, как он мешал бы при относительном отверстии 1/5. Величайший рефрактор в мире — Иерксский — при относительном отверстии 1/19 имеет фокусное расстояние 19 *м*, уступая в этом отношении лишь 27-дюймовому рефрактору обсерватории Берлин-Трептов, с относительным



отверстием 1/31*). Ошибка измерения в 1 микрон на пластинке, снятой с Иерксским рефрактором, соответствует угловой ошибке на небе всего в 0,011 секунды дуги.

У читателя, естественно, возникнет вопрос о возможности исправления рефрактора для большого числа цветов. Решение этого вопроса зависит от стекловара и химика. Расчёт объектива, вполне исправленного для всех цветов и состоящего из линз с подходящими оптическими константами,—столь же лёгкое дело, как и расчёт частично исправленного объектива. В настоящее время существует несколько пар сортов стёкол германского производства, дающих частичное исправление в нужном нам направлении. Это означает уменьшение вторичного спектра. Затруднение состоит лишь в том, что эти сорта стёкол обладают слишком близкой дисперсией и поэтому требуют очень большой кривизны для данного фокусного расстояния. Положение может быть несколько улучшено применением трёх линз при распределении кривизны между шестью поверхностями, но если только не прибегать к раздвиганию линз, то лучшего монохроматического исправления достичь нельзя.

## НАИЛУЧШЕ ИСПРАВЛЕННЫЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ РЕФЛЕКТОРЫ

Никакой оптический инструмент не может быть исправлен в отношении всех возможных недостатков изображения, особенно, если эти недостатки ещё сложнее, чем описанные выше. Самое большее, что можно сделать, это — насколько возможно исправить инструмент для его специального назначения. Так, сконструировать камеру спектрографа, обладающую полем в 90°, при светосиле 1/30 не невозможно, так как при такой светосиле размер изображения ещё может оказаться не

*) Даже 200-дюймовый рефлектор будет иметь фокусное расстояние всего в 16,5 *м* (главный фокус). Фокусное расстояние в системе «кудэ» будет, конечно, во много раз больше.

чрезмерно большим. Точно так же можно довольно легко рассчитать камеру, кроющую 8 квадратных градусов с относительным отверстием 1/0,6 при удовлетворительной резкости изображений. При прямом фотографировании светящихся поверхностей вторая камера будет работать в 2500 раз *быстрее*, чем первая, но *поле* первой во много раз больше, чем у второй. Требования в этих случаях настолько различны, что конструктор должен действовать так, как если бы он имел дело с задачами, не имеющими почти никакого отношения друг к другу.

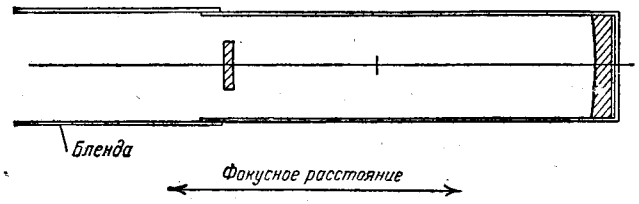
Простейшая модификация зеркального телескопа состоит в добавлении к системе ещё одного зеркала с кривой поверхностью. Кома может быть тогда устранена соответствующей деформацией поверхностей обоих зеркал. К сожалению, главное зеркало в такой системе по необходимости имеет непараболическую поверхность и потому не может применяться отдельно для вспомогательных инструментов, как в случае знакомого нам параболического рефлектора; само по себе главное зеркало не исправлено для того, чтобы давать резкие изображения. Такой двузеркальный телескоп, имеющий кому, равную нулю, и нулевую сферическую аберрацию, может применяться лишь как единое целое. Так как необходима довольно точная регулировка, чтобы удерживать зеркала в правильном положении друг относительно друга, монтировка зеркал должна быть долговременной и жёсткой.

Наиболее распространённый инструмент этого типа называется телескопом Шварцшильда, по имени изобретателя. Шварцшильд создал единственное физически возможное семейство таких двузеркальных телескопов, свободных от сферической аберрации и комы. Наилучший представитель этого семейства телескопов свободен от кривизны поля, но неизбежно страдает астигматизмом (фиг. 43).

Ввиду относительно большого размера вторичного зеркала система теряет около четверти света, падающего на главное зеркало, но эта потеря не столь важна. В настоящее время существует два телескопа этого рода: один в Индианском университете, другой — в Броунов-



ском университете. Таблица 4 содержит конструктивные данные этого инструмента. Так как оба зеркала — вогнутые, то длина трубы телескопа Шварцшильда значительно больше его эквивалентного фокусного расстояния *). Такому телескопу лучше всего подходит относительное отверстие 1/3. Для него необходима бленда, надевающаяся на конец трубы для защиты пластинки от прямого света неба (см. фиг. 43).




Фиг. 43. Рефлектор Шварцшильда.

Большое расстояние между зеркалами по сравнению с фокусным расстоянием и необходимость точной установки зеркал друг относительно друга требуют чрезвычайно жёсткой трубы. Бленда устраняет засвечивание пластинки прямым светом неба. Она может быть изготовлена из очень лёгкого материала, но её недостаток состоит в том, что она требует очень большого купола, если на щели последнего нет защитных ставень от ветра.

Таблица 4

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала . . . . . | 0,333 |
| Фокусное расстояние главного зеркала . | 2,500 |
| Расстояние между зеркалами . . . . . | 1,250 |
| Диаметр вторичного зеркала . . . . . | 0,167 |
| Фокусное расстояние вторичного зеркала | 0,835 |
| Расстояние фокуса от вторичного зеркала | 0,500 |
| Длина трубы . . . . . | 2,400 |

(Таблица из статьи K. Schwarzschild, Mitt. Gött., IX—X, 1905.)

*) Эквивалентное фокусное расстояние равно фокусному расстоянию простой линзы или простого зеркала при том же масштабе изображений.

Шварцшильд пожертвовал частью оптических качеств двузеркальной системы ради удобства, представляемого плоской фокальной поверхностью. Французский учёный Кудэ предпочёл пожертвовать удобством ради качества работы, уничтожив астигматизм, но оставив кривизну фокальной поверхности. Рефлектор типа Кудэ (фиг. 44)

Фиг. 44. Рефлектор типа Кудэ.
Труба должна быть ещё более жёсткой, чем у типа Шварцшильда, но бленда короче.

с двумя зеркалами даёт превосходные результаты при фокальной поверхности, радиус кривизны которой составляет около половины эквивалентного фокусного расстояния. Конструктивные элементы телескопа Кудэ даны в таблице 5. Подобно телескопу Шварцшильда, телескоп Кудэ наилучшим образом приспособлен для относительного отверстия около 1/3.

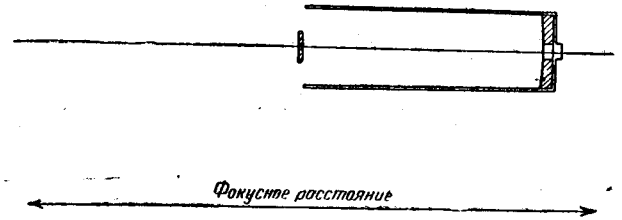
Таблица 5

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала . . . . . | 0,333 |
| Фокусное расетояние главного зеркала . | 3,250 |
| Расстояние между зеркалами . . . . . | 2,000 |
| Диаметр вторичного зеркала . . . . . | 0,163 |
| Фокусное расстояние вторичного зеркала | 0,555 |
| Расстояние фокуса от вторичного зеркала | 0,385 |
| Длина трубы . . . . . | 2,500 |

(Таблица из книги Danjon et Couder, Lunettes et Télescopes.)



Другим типом двузеркального телескопа, свободного от сферической аберрации и комы, является телескоп Ричи-Кретьена (фиг. 45). Этот тип обладает астигматизмом и кривизной поля и для получения наилучших результатов требует искривлённой пластинки. Большое




Фиг. 45. Рефлектор Ричи-Кретьена со светосилой 1/7.
Короткая труба и удобное положение фокальной поверхности более чем компенсируют малую (по сравнению с типом Шварцшильда) величину поля зрения.

преимущество этого телескопа состоит в том, что длина трубы у него много меньше фокусного расстояния; поэтому он пригоден для работ, не требующих относительного отверстия, большего, чем 1/6, но нуждающихся в крупном масштабе снимков. Конструктивные элементы этого телескопа даны в таблице 6.

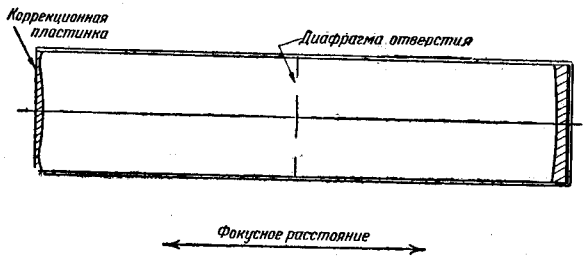
Таблица 6

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала . . . . . | 0,125 |
| Фокусное расстояние главного зеркала . | 0,761 |
| Расстояние между зеркалами . . . . . | 0,419 |
| Диаметр вторичного зеркала . . . . . | 0,056 |
| Фокусное расстояние вторичного зеркала | 1,436 |
| Расстояние фокуса от вторичного зеркала | 0,460 |
| Длина трубы . . . . . | 0,500 |

(Таблица из книги Danjon et Couder, Lunettes et Télescopes.)

## КАМЕРА ШМИДТА

В 1930 г. Б. Шмидт, сотрудник Гамбургской обсерватории в Бергедорфе, скромно сообщил о своём открытии, представлявшем самый значительный шаг на пути к усовершенствованию астрономических инструментов за много десятилетий. В кратких чертах его открытие состояло в конструкции камеры, дающей резкие изображения при относительном отверстии, считавшемся до того несовместимым с большим полем зрения.




Фиг. 46а. Камера Шмидта со светосилой 1/3.

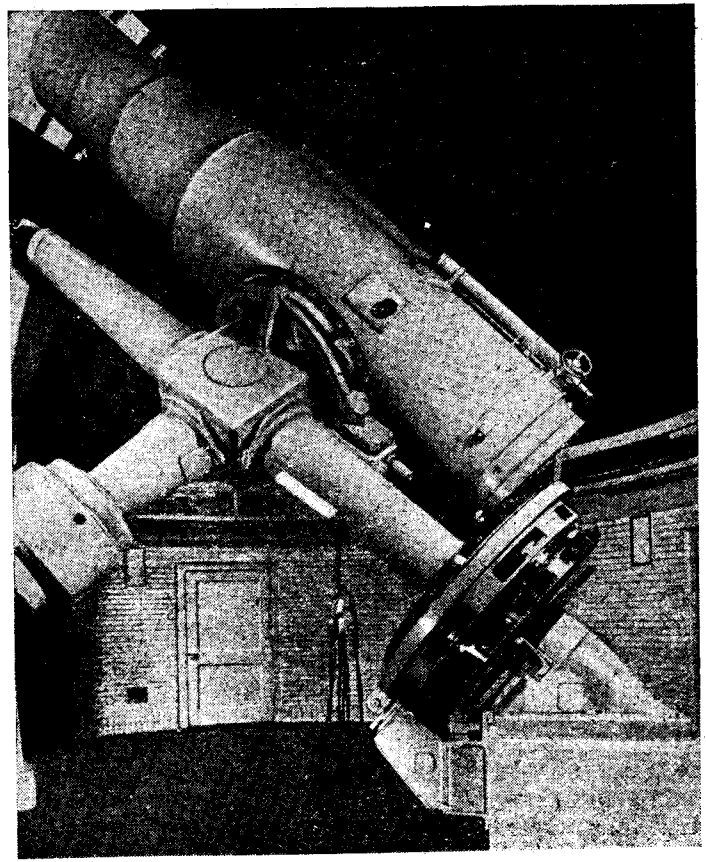
Положение диафрагмы даёт максимальное невиньетированное поле для данного отверстия и размера зеркала. Коррекционная пластинка имеет бо́льшие размеры, чем при диафрагме, расположенной у центра кривизны зеркала (и потому совпадающей с коррекционной пластинкой). При светосиле 1/3 это обстоятельство не имеет особого значения. Термин «виньетирование» означает потерю света, возрастающую по мере удаления от оси, вызванную недостаточными размерами зеркала или коррекционной пластинки.

Кроме того, камера состояла всего из двух оптических частей—из сферического зеркала, лёгкого в изготовлении, и из тонкой линзы, почти не обладающей оптической силой, но трудной в изготовлении, главным образом потому, что ничего подобного ей не пробовали делать раньше. На фиг. 46а показан схематический разрез камеры Шмидта.

Чтобы разъяснить действие этого типа камеры, попытаемся проследить за рассуждениями Шмидта, которыми он мог руководствоваться. Когда изготовляют зеркальный телескоп, главное зеркало которого—параболоид, то обычно сначала зеркало делают сферическим. Радиус этой сферы почти в точности равен удвоенному



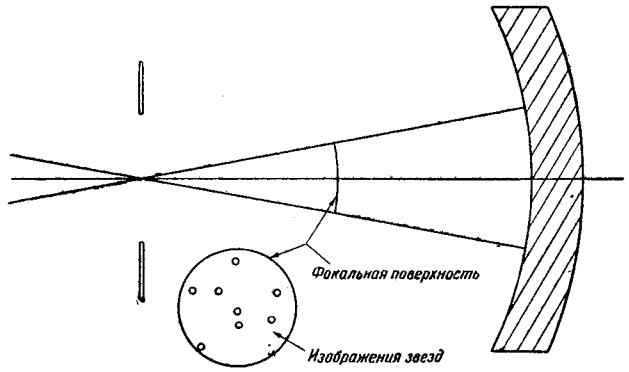
фокусному расстоянию параболоида. Затем мастер *параболизует* сферическое зеркало. Эта операция состоит в углублении сферы для превращения её в параболоид



Фиг. 46b. Телескоп Шмидта 24 — 36 дюймов обсерватории Уорнер и Суэзи (Институт прикладных наук, Кливлэнд).

Труба исключительно жёсткая, а весь инструмент настолько удобен для наблюдателя, насколько это вообще возможно для камеры Шмидта. 24-дюймовая призма, установленная на верхнем конце поверх коррекционной пластинки, даёт мелкомасштабные спектры слабых звёзд.

путём сполировывания центральной части поверхности стекла. Шмидту должна была притти в голову мысль, когда он параболизовал зеркало, что ретушь не обязательно должна производиться на самом зеркале. Вместо этого он предложил заменить небольшое изменение углубления зеркала небольшим изменением толщины тонкой стеклянной пластинки, расположенной на пути лучей. Так как параболизация обычного зеркала редко




Фиг. 47. Сферическое зеркало с диафрагмой.
В кружке показан характер изображений звёзд при таком устройстве.

требует удаления слоя стекла толщиною более, чем несколько длин волн света, отклонение поверхности стеклянной пластинки от плоскопараллельной должно быть совершенно незаметно невооружённому глазу.

Первоначально Шмидт, вероятно, предполагал поместить стеклянную пластинку в контакте со сферическим зеркалом, но такое расположение не даёт лучшего оптического действия, чем параболоид. Некоторое размышление должно было показать Шмидту, что лучшее место для расположения *коррекционной пластинки* находится у центра кривизны сферического зеркала.

Любой луч, проходящий через центр кривизны сферического зеркала и падающий на последнее, отражается назад по своему направлению. Каждый такой луч может считаться за оптическую ось сферического зеркала. Любой пучок лучей, параллельных такой оптической оси, будет сфокусирован сферическим зеркалом в пятно или кружок рассеяния примерно на полпути между центром кривизны и зеркалом. Независимо от направления оптической оси, это пятно будет одного и того же размера. Поэтому сферическое зеркало, применяемое в комбинации с простой диафрагмой у центра кривизны, обладает сферической аберрацией, постоянной на всём поле зрения, а также кривизной поля. Фиг. 47 показывает суть такого устройства.



Если мы заменим диафрагму (фиг. 47) тонкой плоскопараллельной стеклянной пластинкой, то в сферической аберрации не произойдёт никакого изменения; но если стеклянная пластинка будет соответственным образом ретуширована с какой-либо стороны (или с обеих сторон), то лучи, падающие параллельно любой из оптических осей, будут отклонены к одному и тому же точечному фокусу. Введение стеклянной пластинки почти не изменило симметрии всего устройства. Можно сказать, что сферическое зеркало было параболизовано во многих направлениях сразу. По этим причинам камера Шмидта обладает очень широким полем по сравнению с большинством астрономических инструментов. Так, при светосиле 1/5 поле резких изображений по диаметру превосходит коррекционную пластинку.

Так как поверхность коррекционной пластинки почти плоская, параболизация может производиться при очень больших относительных отверстиях. Не представляют ничего необыкновенного камеры Шмидта со светосилой 1/1, а некоторые достигают даже светосилы 1/0,6. Короткофокусная камера Шмидта с относительным отверстием 1/1 может иметь полезное поле в 25°. Параболоид же при такой светосиле будет иметь полезное поле, измеряемое минутами дуги.

У камеры Шмидта—два главных дефекта. Во-первых, длина трубы у неё вдвое больше, чем у параболического рефлектора с таким же фокусным расстоянием. Во-вторых, так как фокальная поверхность лежит на сфере, радиус которой как раз равен фокусному расстоянию системы, фотографическая пластинка или

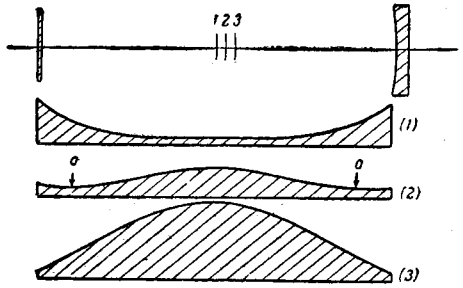
плёнка должна быть искривлена, чтобы очень точно соответствовать этой поверхности, а это вызывает большие неудобства при наблюдениях. Последнее затруднение устраняется несколькими остроумными способами. Кроме механических способов изгибания пластинки или плёнки, существует оптический способ, предложенный в 1873 г. Пиацци-Смитом; он очень эффективен при применении к камерам со светосилой меньше 1/2, но до сих пор ни к одной большой камере Шмидта он не применялся. Плосковыпуклая линза, диаметр которой равен линейному диаметру поля, помещается плоской стороной вплотную к фотографической пластинке. Сферическая выпуклая поверхность этой линзы имеет радиус кривизны, составляющий примерно одну треть фокусного расстояния камеры Шмидта. Утолщение к центру делает поле плоским. Такая линза может быть названа *выпрямителем поля*. Многие самостоятельно переоткрыли это приспособление. При светосиле 1/2 линза начинает производить заметную кому, а при большей светосиле уже становится бесполезной. Большая длина камеры Шмидта удорожает конструкцию, но не должна рассматриваться как очень важный недостаток, если не имеется в виду сооружение очень крупной камеры. Таким образом, оба главных недостатка камеры Шмидта не непреодолимы.

Тонкая шмидтовская линза не исправляет все цвета в одинаковой степени. Если камера вполне исправлена для жёлтых лучей, то синие лучи не попадут в тот же фокус, да и вообще не образуют какого-либо резкого фокуса, так как в данном случае мы имеем дело с переисправлением сферической аберрации, а не с первичным спектром, как у рефрактора. Причина этого заключается в том, что коррекционная пластинка обычно делается из одного сорта стекла. Она имеет такую кривизну, что способна исправлять лучи какой-нибудь одной длины волны, например жёлтые лучи. Вследствие изменения показателя преломления с длиной волны пластинка будет переисправлена для синих лучей и недоисправлена для красных. По счастью, хроматическая аберрация шмидтовской линзы так мала, что если



камера не обладает исключительной светосилой, вроде 1/0,6, то отчётливость изображений остаётся превосходной.

Возможно устройство больших камер Шмидта меньшей светосилы, у которых искажения изображений от хроматической аберрации в значительном интервале длин волн не превышают размера кружка рассеяния от неспокойствия атмосферы.




Фиг. 48. Три крайние формы шмидтовской коррекционной пластинки.

Для наглядности кривизна поверхности сильно преувеличена путём увеличения вертикального масштаба. Центральная выпуклость пластинки производит небольшое отодвигание фокальной поверхности в направлении зеркала. Несмотря на большие кажущиеся различия форм этих коррекционных пластинок, все они отступают от ближайшей сферы на одну и ту же величину и поэтому все примерно одинаково трудны в изготовлении. Форма 2 оптически наилучшая (см. текст). Максимальное отклонение поверхности коррекционной пластинки от ближайшей сферы составляет лишь несколько сотых миллиметра для камеры умеренной светосилы. Такое малое отклонение невидимо невооружённому глазу, если не считать лёгкого искажения изображения, заметного при отражении от поверхности.

Требующаяся форма поверхности коррекционной пластинки очень чувствительна к расстоянию фотографической пластинки от сферического зеркала. Фиг. 48 показывает три возможные формы, соответствующие трём положениям фокальной поверхности. Форма (2) приближается к конструкции, принятой почти всеми строителями камер Шмидта. Этот тип имеет свойство производить наименьшую хроматическую аберрацию изображения [у формы (2) вчетверо меньшая хроматиче-

ская аберрация, чем у формы (1) *)]. Таблица 7 содержит конструктивные элементы камеры со светосилой 1/3.

Таблица 7

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала . . . . . | 0,450 |
| Фокусное расстояние главного зеркала . | 1,000 |
| Диаметр коррекционной пластинки . . . | 0,450 |
| Расстояние коррекционной пластинки от главного зеркала . . . . . | 2,000 |
| Свободное отверстие . . . . . | 0,333 |
| Длина трубы . . . . . | 2,100 |

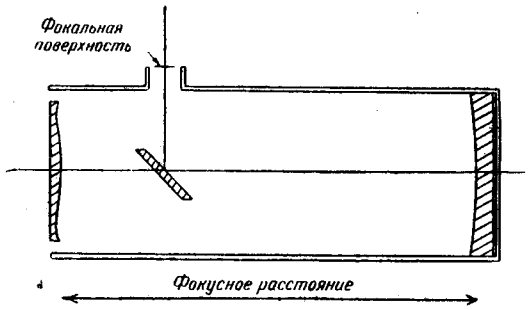
## ВИДОИЗМЕНЕНИЯ КАМЕРЫ ШМИДТА

Делался ряд попыток устранить главные недостатки камеры Шмидта. Ф. Б. Райт и И. Вейсела, независимо один от другого, подробно исследовали различные возможные положения коррекционной пластинки и форму главного зеркала. Оба нашли, что, изменяя эти величины, можно получить свободную от комы и сферически исправленную систему для любого положения коррекционной пластинки вдоль оптической оси. Один особенно полезный тип камеры, называемый в Америке типом Райта (хотя любая камера этого семейства может называться типом Райта), содержит главное зеркало, имеющее поверхность сплюснутого сфероида и коррекционную пластинку, установленную непосредственно за главным фокусом (фиг. 49); длина трубы поэтому вдвое меньше, чем у Шмидтовской камеры равного фокусного расстояния, и одинакова с длиной трубы у телескопа типа Ньютона. Кроме того, фокальная поверхность получается плоской. Вследствие отступления от шмидтовского принципа полной симметрии камера Райта обла-

*) У формы (2) на фиг. 48 зона нулевого отклонения (∗) имеет радиус около 0,87 радиуса свободного отверстия. Многие предпочитают, чтобы эта зона находилась немного ближе к центру пластинки. Центральное возвышение коррекционной пластинки, кроме того, улучшает монохроматическое действие камеры Шмидта.



дает астигматизмом. Её поле поэтому меньше по сравнению с камерой Шмидта. Хроматическая аберрация коррекционной пластинки вдвое больше, чем у камеры Шмидта той же светосилы. Камера Райта более подходит для фотографирования в крупном масштабе, чем камера




Фиг. 49. Камера Райта со светосилой 1/3.

Главный фокус становится вполне доступным, если коррекционную пластинку поместить немного дальше от главного зеркала; однако удобство устройства по системе Ньютона говорит само за себя, а при светосиле 1/3 потеря света не имеет большого значения.

Шмидта. Для наилучшего использования всех достоинств этой камеры светосила не должна превышать 1/3, что, однако, вполне достаточно для современных фотографических материалов. Таблица 8 содержит конструктивные данные для камеры Райта со светосилой 1/3.

Таблица 8

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала . . . . . | 0,380 |
| Фокусное расстояние главного зеркала . | 1,000 |
| Диаметр коррекционной пластинки . . . | 0,333 |
| Расстояние коррекционной пластинки от главного зеркала . . . . . | 1,000 |
| Свободное отверстие . . . . . | 0,333 |
| Длина трубы . . . . . | 1,100 |

Коррекционная пластинка как типа Райта, так и типа Шмидта может быть вполне ахроматизирована путём сложения из двух — кроновой и флинтовой, каждая из которых отступает от сферы. Такая система практически столь же свободна от хроматической аберрации, как и зеркало.

Некоторые исследователи предлагают делать коррекционную пластинку не в виде линзы, а заменить её наклонным эллиптическим зеркалом. Такое зеркало лишено симметрии и хуже, чем ахроматическая коррекционная пластинка.

В 1941 г. Д. Д. Максутов, сотрудник Государственного Оптического института в Ленинграде, открыл, что коррекционная пластинка камеры Шмидта может быть заменена так называемым ахроматическим мениском. Оказывается возможным рассчитать слабо отрицательную менисковую линзу, которая будет почти абсолютно ахроматична, хотя и состоит из одного куска стекла; кроме того, она будет ещё обладать сферической аберрацией, достаточной для того, чтобы исправить сферическую аберрацию главного зеркала. Максутов описал многочисленные варианты своих систем применительно к астрономическим инструментам в майском номере Журнала Американского Оптического общества за 1944 г., к которому мы отсылаем читателя за подробностями*).

В общем максутовские системы целиком достигают цели камеры Шмидта, давая большое высокоисправленное поле даже при большем относительном отверстии. Их непосредственные преимущества перед камерой Шмидта состоят в лёгкости изготовления и в малой длине трубы. Подобно камере Шмидта, системы Максутова обладают кривизной поля и, если состоят только из двух элементов, то страдают от той же трудности, состоящей в необ-

*) Теория системы Максутова изложена в Журнале технической физики (№ 3, 1943 г.) и в трудах Гос. Оптич. ин-та. (вып. 124, 1944 г.). Популярное описание этих систем см. в статьях Д. Д. Максутова («Наука и жизнь» № 9, 1944 г.) и Альтшулера («Техника молодёжи» № 10 — 11, 1945 г.). (*Прим. ред.*)



ходимости устройства внутри трубы приспособления для вкладывания пластинки.

Вследствие кривизны поля системы Максутова не достигают идеала. Следовательно, вопрос заслуживает дальнейшего изучения*).

## ДВУЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С КОРРЕКЦИОННОЙ ПЛАСТИНКОЙ

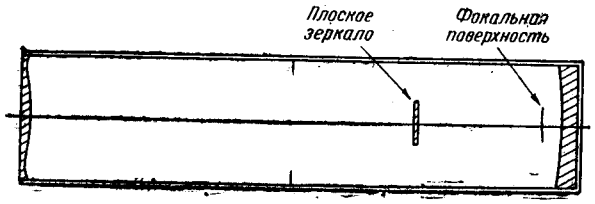
Выше мы разобрали практичные системы, состоящие из линзы и зеркала и выведенные путём полного анализа систем, содержащих только две оптические части. Никакие иные системы этого рода невозможны **). В поисках дальнейшего улучшения необходимо рассмотреть оптические системы, состоящие из трёх и более отдельных частей. Три зеркала с искривлёнными поверхностями, расположенные на одной и той же оптической оси, в большинстве случаев безнадёжно заслоняют фотопластинку от света. Существуют два довольно интересных исключения. В первом типе используется главное вогнутое параболическое зеркало, плоское зеркало у фокальной поверхности, назначение которого — отклонить лучи под прямым углом к первоначальной оптической оси, коллиматорный вогнутый гиперболоид и третье вогнутое сферическое зеркало. Комбинация трёх вогнутых зеркал даёт кривое поле, свободное от сферической

*) Применением линзы Пиацци-Смита полностью исправляется кривизна поля зрения. С помощью видоизменённой им линзы Пиацци-Смита Максутову удалось исправить не только кривизну поля, но и дисторсию и, таким образом, получить систему, практически свободную от всех аберраций (*Прим. ред.*).

**) Шварцшильд открыл непрактичную двузеркальную систему с нулевой сферической аберрацией, нулевой комой, нулевым астигматизмом и плоским полем. Главное зеркало у неё выпуклое, вторичное — вогнутое; к сожалению, фотографическая пластинка спрятана позади главного зеркала, где свет может попасть на неё лишь на очень маленьком участке вокруг оптической оси. Поэтому большого поля, математически свойственного этой системе, физически не существует. Соответственная толстая линза с двумя поверхностями, если не считать её хроматической аберрации, вполне исправлена и практична.

аберрации, комы и астигматизма. Можно также главное зеркало сделать сферическим, а третье параболическим, без изменения качества системы. Кроме прямого фотографирования, такая система может быть полезна для бесщелевой спектроскопии (см. главу 5).

Второй тип в своей простейшей форме использует три кривых зеркала, расположенных на одной оптической оси. Главное зеркало здесь—вогнутый параболоид с отверстием в центре; далее идёт коллиматорное выпуклое гиперболическое зеркало впереди фокуса и за-




Фиг. 50. Камера Шмидта с плоским зеркалом.

Плоское зеркало должно загораживать значительную часть отверстия, если надо избежать виньетирования. При таком устройстве лучше примириться с виньетированием.

тем сферическое вогнутое зеркало камеры. Другого расположения не существует. Эта система даёт плоское поле, свободное от сферической аберрации, комы и астигматизма. Сферическое зеркало помещается позади главного, которое должно иметь центральное отверстие, диаметра, приблизительно равного гиперболическому вторичному зеркалу. Гиперболическое зеркало должно быть деформировано сильнее, чем вторичное зеркало кассегрэновской системы. Такая система также может быть полезна для спектроскопии. Преимущества параболического главного зеркала очевидны.

Система из двух кривых зеркал и одной линзы возможна, но если линзовая система не сходна с коррекционной пластинкой или не помещается в сходящемся пучке, — система не может иметь очень большого диаметра. Мы поэтому должны рассмотреть свойства системы,



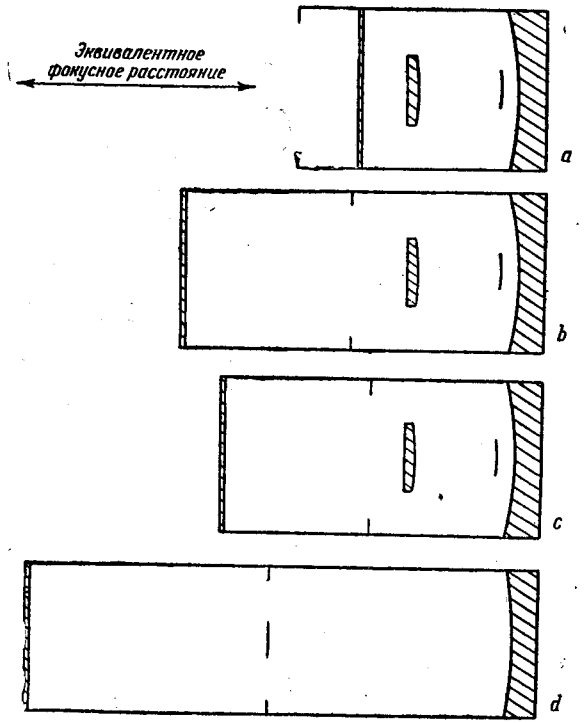
состоящей из коррекционной пластинки, главного вогнутого зеркала и вторичного зеркала.

Мы можем следующим образом притти к такой системе от камеры Шмидта. Поместим плоское зеркало в сходящемся пучке камеры Шмидта (фиг. 50). Фокальная поверхность будет отражена в направлении главного зеркала, как указано на рисунке, но качество изображения останется без изменения. Будем теперь держать на нуле сферическую аберрацию, кому и астигматизм, но постараемся, изменяя расстояния и кривизны зеркал, выпрямить поле. Мы найдём при этом, что вторичное зеркало будет становиться всё более и более выпуклым, пока поле не станет совершенно плоским.

Для каждого положения фотографической пластинки по отношению к вторичному зеркалу и для каждого расстояния коррекционной пластинки от главного зеркала существует такая высокоисправленная система. На фиг. 51 изображены три таких телескопа и камера Шмидта с одинаковыми эквивалентным фокусным расстоянием, светосилой и величиной поля. Камера *a* имеет то достоинство, что у неё очень короткая труба, но её зеркала отклоняются от сферы. Камера *b* имеет сферическое вторичное зеркало и почти сферическое главное зеркало. Отклонение от сферы при диаметре в 12 дюймов и относительном отверстии 1/2,3 составляет лишь 3/4 длины волны натриевого света, а потому может быть достигнуто без труда. Камера *c* имеет сферическое главное зеркало и почти сферическое вторичное зеркало. Наглаз она не отличается от *b*. Любая из этих камер даёт одинаково хорошие фотографии при большом поле.

Камера *b* наиболее практична, так как её главное зеркало можно ретушировать, пользуясь испытанием по зонам, а вторичное — путём накладывания на первичное как на пробное стекло, так как радиус кривизны центральной части главного зеркала равен или почти равен радиусу вторичного. Длина трубы умеренная и поле точно плоское при поперечнике в целых 10°. Расчёт показывает, что такая система при относительном отверстии 1/2,3 даёт плоское изображение, резкость которого превышает разрешающую способность высоко-

чувствительной фотографической эмульсии на поле в восемь градусов. Таблица 9 даёт конструктивные элементы камеры *b* при светосиле 1/3.




Фиг. 51. Двузеркальные камеры с коррекционной пластинкой и камера Шмидта.

*a* — очень короткая камера с астерическими зеркалами; *b* — камера средней длины с одним сферическим зеркалом и с другим почти сферическим; *c* — камера, свободная от дисторсии; *d* — камера Шмидта. Все четыре камеры имеют одинаковое фокусное расстояние, площадь пластинки и светосилу. Первые три камеры имеют плоскую фокальную поверхность.

Системы из двух зеркал и коррекционной пластинки, недавно разработанные в Англии Е. Х. Линдфутом (в развитие некоторых общих уравнений и идей, впервые



Таблица 9

| | |
|---|---|
| Эквивалентное фокусное расстояние . . | 1,000 |
| Диаметр главного зеркала и коррекционной пластинки . . . . . | 0,333 |
| Фокусное расстояние главного зеркала . | 0,650 |
| Расстояние между зеркалами . . . . . | 0,423 |
| Диаметр вторичного зеркала . . . . . | 0,167 |
| Фокусное расстояние вторичного зеркала | 0,650 |
| Расстояние фокуса от вторичного зеркала | 0,350 |
| Расстояние коррекционной пластинки от главного зеркала . . . . . | 1,394 |
| Длина трубы . . . . . | 1,500 |

(Таблица из статьи J. G. Baker, Amer. Phil. Soc., Vol. 82, № 3, 1940.)

предложенных Ч. Р. Бурчем), сходны с камерами, изображёнными на фиг. 51, с той лишь разницей, что и главные и вторичные зеркала у них точно сферические, а фокальная плоскость лежит как раз позади главного зеркала. Оптическое совершенство, однако, страдает от астигматизма, который примерно в полтора раза сильнее, чем у типа Шварцшильда, от хроматической аберрации, вдвое большей, чем у типа Райта, и от значительного заслонения вторичным зеркалом. Ньютонианское устройство типа Райта, если мириться с астигматизмом, осуществляется легко и даёт заметно лучшие результаты.

Х. Слефогт в 1942 г. опубликовал в «Zeitschrift für Instrumentenkunde» важный обзор различных систем, описанных выше; изменив тип *b* таким образом, что в нём снова появился астигматизм в относительно малой степени, он получил систему, у которой оба зеркала точно сферические.

В таблице 10 сравниваются все описанные выше системы по их эффективности. Все эти системы полезны при относительных отверстиях, указанных в таблице, и, вообще говоря, каждая из них имеет свои индивидуальные достоинства.

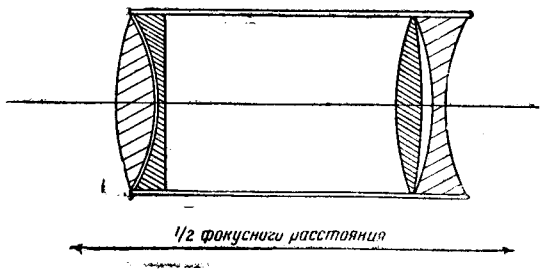
Таблица 10

| Тип камеры | Сферическая аберрация | Кома | Астигматизм | Кривизна поля | Среднее относительное отверстие | Длина трубы |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Параболоид . . . . . | 0 | * | * | * | 1/5 | средняя |
| Рефрактор . . . . . | 0 | 0 | * | * | 1/15 | средняя |
| Шварцшильд . . . . | 0 | 0 | * | 0 | 1/3 | длинная |
| Кудэ . . . . . | 0 | 0 | 0 | * | 1/3 | длинная |
| Ричи-Кретьен . . . . | 0 | 0 | * | * | 1/7 | короткая |
| Шмидт . . . . . | 0 | 0 | 0 | * | 1/3 | длинная |
| Райт . . . . . | 0 | 0 | * | 0 | 1/3 | средняя |
| Максутов . . . . . | 0 | 0 | 0 | * | 1/3 | от средней до короткой |
| Трёхзеркальная . . . | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/3 | от средней до длинной |
| Коррекционная пластинка и два зеркала . . . . . | 0 | 0 | 0 | 0 | 1/3 | от средней до короткой |

Звёздочка (*) означает, что данная аберрация существует в заметной мере.

## ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ДУБЛЕТ

Система линз типа, показанного на фиг. 52, успешно применялась в астрономии. Дублет впервые был применён для фотографии около ста лет назад Петцвалем




Фиг. 52. Астрографический объектив.
Телескоп с объективом этого типа имеет то преимущество, что его труба значительно короче, чем фокусное расстояние.



в Вене. Существует много форм линзовых систем, происходящих от его первоначальной конструкции. Комбинация, показанная на фиг. 52, называется *астрографическим* объективом. В отличие от первоначального типа Петцваля, его второй ахромат отрицателен, так что возможно почти полное исправление кривизны поля. Конструктивные элементы такого объектива даны в таблице 11.

Таблица 11

Эквивалентное фокусное расстояние 1,000

| | Первая линза | Вторая линза | Третья линза | Четвёртая линза |
|---|---|---|---|---|
| Показатель преломления . | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,5 |
| Коэффициент дисперсии ν . | 65,0 | 38,3 | 42,5 | 65,0 |
| Радиус кривизны передней поверхности . . . . . | 0,263 | — 0,214 | 0,333 | —0,264 |
| Радиус кривизны задней поверхности . . . . . | —0,207 | —17,7 | —0,678 | 0,194 |
| Толщина . . . . . | 0,045 | 0,007 | 0,027 | 0,014 |
| Расстояние до соседней линзы . . . . . | 0,000 | 0,259 | 0,014 | |

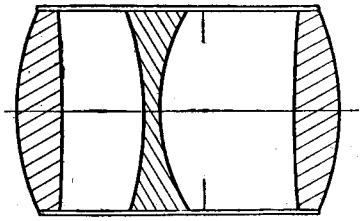
Рекомендуемое относительное отверстие 1/7. Таблица из диссертации A. Kohlschütter, Göttingen, 1908.

Астрографический дублет хорошо исправлен на сферическую аберрацию, кому, астигматизм и кривизну поля. Наиболее важная остаточная аберрация состоит во вторичном спектре. Вторичный спектр астрографического дублета больше, чем у обыкновенного объектива, и, так же как и там, не может быть устранён при помощи обыкновенных сортов стекла.

Длиннофокусный дублет даёт резкое поле около 10° на плоской пластинке и, следовательно, может быть полезен для систематического фотографирования неба. Другое достоинство дублета в том, что длина его тубуса много меньше его фокусного расстояния.

## ТРИПЛЕТ КУКА

Объектив *Кука* был сконструирован Д. Тэйлором для фирмы «Т. Кук и Сыновья» в конце прошлого века. Его появление было определённым достижением в конструкции объективов. Прежние исследователи либо не понимали возможностей, даваемых тремя отдельными простыми линзами, либо не могли извлечь из этой комбинации того, что она способна дать. Вероятно, первое предположение правильнее, так как в то время на рынке было уже много объективов более сложного устройства. Триплет нашёл широкое применение у астрономов. Конструктивные данные для типичного триплета Кука даны в таблице 12.



Фиг. 53. Типичный триплет Кука.

Таблица 12

Эквивалентное фокусное расстояние 1,000

| | Первая линза | Вторая линза | Третья линза |
|---|---|---|---|
| Показатель преломления | 1,5368 | 1,6245 | 1,4933 |
| Коэффициент дисперсии ν | 51,2 | 35,8 | 70,0 |
| Радиус кривизны передней поверхности | 0,267 | 0,368 | 1,221 |
| Радиус кривизны задней поверхности | 1,848 | 0,223 | 0,269 |
| Толщина | 0,050 | 0,015 | 0,050 |
| Расстояние до соседней линзы | 0,090 | 0,149 | |

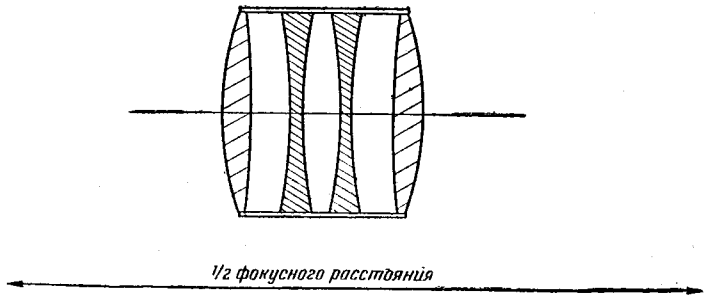
Рекомендуемая светосила 1/5,0. Рекомендуемая величина поля для короткофокусной камеры — 30°. Таблица из Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1916, 269—278.

Объектив Кука страдал на практике от того, что его средняя линза имела тенденцию децентрироваться. Но это не порок объектива, а качество, зависящее от изготовления и обращения с объективом. По качеству изображений триплет со светосилой 1/7, вообще говоря, одинаков с дублетом.

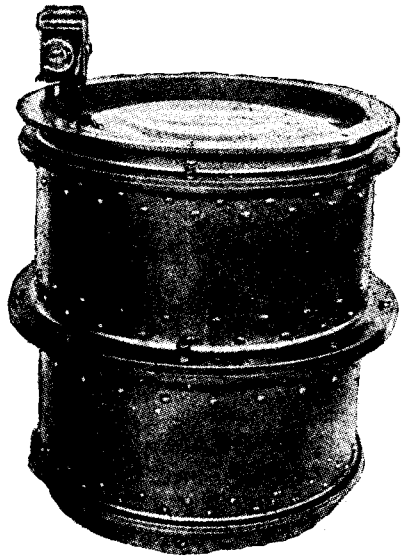


## ОБЪЕКТИВ РОССА

Этот тип системы линз, показанный на фиг. 54, сконструирован сравнительно недавно, но уже широко




Фиг. 54. Объектив Росса.



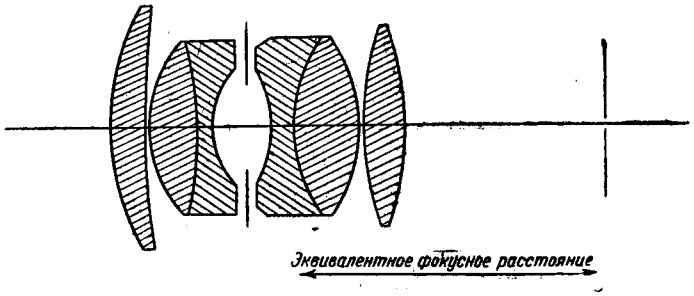
Фиг. 55. 20-дюймовый объектив типа Росса, изготовленный для Ликской обсерватории.

известен среди астрономов из-за больших размеров поля резких изображений при светосиле 1/7 и даже при 1/5.

Самый большой объектив типа Росса находится на Ликской обсерватории. Он имеет 20 дюймов (50 *см*) в диаметре и фокусное расстояние в 3,5 *м* (фиг. 55). Объектив Росса настолько хорошо исправлен монохроматически, что изображения звёзд пригодны до самых краёв поля в 20°. К сожалению, сильный вторичный спектр, хроматическая разница сферической аберрации и астигматизм, повидимому, составят препятствие для многих работ.

## РАЗЛИЧНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ

В настоящее время для профессиональной фотографии изготовляется большое число типов объективов, пригодных и для астрономических работ. Однако астрономы замечали, что часто эти объективы имеют тенденцию давать изображения звёзд, окружённые заметным плохо фокусированным ореолом, происходящим от чрезмерной комы, сферической аберрации или и от того и другого вместе. Многие объективы обладают такой сильной сферической аберрацией, что изображения, слегка выведенные из фокуса, скорее похожи на бублик, вместо того, чтобы представлять равномерные диски, как это




Фиг. 56. Биотар Цейсса.

Нормальная фотографическая светосила этого объектива 1/1,4, а поле — около 45°. Хорошие результаты для астрономической работы получаются при светосиле 1/2,5 на поле размером в 30°.



желательно. Единственное надёжное правило, это — испытать все имеющиеся объективы, прежде чем решиться на выбор. Таблица 13 содержит данные о 6-линзовом объективе проверенного качества.

Таблица 13

Биотар.
Эквивалентное фокусное расстояние 1,000

| | Первая линза | Вторая линза | Третья линза | Четвёртая линза | Пятая линза | Шестая линза |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Показатель преломления | 1,6424 | 1,6231 | 1,5757 | 1,6727 | 1,6424 | 1,6424 |
| Коэффициент дисперсии $\nu$ | 48,0 | 56,9 | 41,2 | 32,2 | 48,0 | 48,0 |
| Радиус кривизны передней поверхности | 0,836 | 0,448 | 11,50 | 0,385 | 0,505 | 1,060 |
| Радиус кривизны задней поверхности | 3,21 | 11,50 | 0,283 | 0,505 | 0,532 | 1,200 |
| Толщина | 0,108 | 0,156 | 0,051 | 0,051 | 0,212 | 0,139 |
| Расстояние до соседней линзы | 0,017 | склеены | 0,189 | склеены | 0,010 | |

Рекомендуемая светосила 1/2,5. Рекомендуемое поле — 30°. Короткофокусный объектив

## ПРЕДЕЛЬНАЯ ЗВЁЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА

Выбирая фокусное расстояние и отверстие телескопа, предназначаемого для фотографирования, нужно очень тщательно отдать себе отчёт в своих нуждах. Один из наиболее важных, связанных с этим вопросов — вопрос о *предельной звёздной величине* *). Независимо от продолжительности экспозиции нельзя сфотографировать протяжённый объект, поверхностная яркость которого составляет менее одной шестой яркости небесного фона. Видимый диск звезды можно рассматривать как малень-

*) О звёздных величинах см. главу 6.

кую поверхность, к которой приложимо то же правило. Звёздная величина самой слабой звезды, различимой на фотографической пластинке экспонированной достаточно долго, чтобы получилась умеренно плотная вуаль от фона неба, называется предельной звёздной величиной телескопа. Предельная звёздная величина независима или почти независима от продолжительности экспозиции.

Быстрота, с которой светящийся фон неба отпечатывается на фотографии, зависит от относительного отверстия камеры. Так, например, в камере со светосилой 1/1 пластинка средней чувствительности не может экспонироваться более 20 минут. В камере со светосилой 1/2 пластинка может, вероятно, экспонироваться $1^1/_2$ часа до получения вуали той же плотности. В камере со светосилой 1/5 такая же пластинка средней чувствительности может экспонироваться в течение многих часов. Предположим, что все эти камеры имеют одинаковое отверстие в десять дюймов. Если пренебречь влиянием неспокойствия изображений и диффракцией, то изображения звёзд во всех этих камерах будут чрезвычайно малы. Поэтому камера со светосилой 1/2 позволит снимать звёзды, которые на целую величину слабее доступных камере со светосилой 1/1; камере со светосилой 1/5 будут доступны звёзды примерно на 3 величины более слабые, чем камере со светосилой 1/1. Таблица 14 содержит достаточно данных для того, чтобы приблизительно определить предельную звёздную величину данного телескопа. Эти данные получены путём вычисления, с учётом неспокойствия изображений, рассеяния в эмульсии и яркости неба; они очень хорошо согласуются с наблюдениями.

Для большинства целей экспозиция в несколько часов, это — всё, что может требоваться при обычной работе. Экспозиция редко будет превосходить несколько часов, тем более, что фотографируемый участок неба должен быть близ небесного меридиана. Изменения прозрачности воздуха в течение более долгих экспозиций часто гибельны для точности фотометрических наблюдений. Поэтому камеры со светосилой от 1/3 до 1/5 вполне



подходящи для прямой фотографии. Вблизи городов, где фон неба особенно ярок, не следует пользоваться камерами со светосилой более 1/5.

Таблица 14

| Отверстие | | Светосила | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1/3 | | 1/5 | | 1/7 | |
| *См* | Дюймы | Диаметр изображения в *мм* | Предельная звёздная величина | Диаметр изображения в *мм* | Предельная звёздная величина | Диаметр изображения в *мм* | Предельная звёздная величина |
| 1 | 0,4 | 0,023 | 10,20 | 0,026 | 11,18 | 0,028 | 11,84 |
| 2,5 | 1,0 | 0,024 | 12,15 | 0,027 | 13,12 | 0,030 | 13,74 |
| 5,0 | 2,0 | 0,025 | 13,61 | 0,029 | 14,55 | 0,032 | 14,28 |
| 7,5 | 3,0 | 0,026 | 14,44 | 0,031 | 15,36 | 0,035 | 15,96 |
| 10,0 | 3,9 | 0,027 | 15,03 | 0,032 | 15,96 | 0,037 | 16,51 |
| 15,0 | 5,9 | 0,030 | 15,80 | 0,036 | 16,71 | 0,042 | 17,27 |
| 20,0 | 7,9 | 0,032 | 16,35 | 0,040 | 17,21 | 0,047 | 17,77 |
| 25,0 | 9,9 | 0,034 | 16,77 | 0,043 | 17,62 | 0,052 | 18,15 |
| 30,0 | 11,8 | 0,036 | 17,10 | 0,047 | 17,92 | 0,058 | 18,42 |
| 40,0 | 15,7 | 0,041 | 17,58 | 0,054 | 18,39 | 0,068 | 18,88 |
| 50,0 | 19,7 | 0,045 | 17,96 | 0,061 | 18,75 | 0,078 | 19,21 |
| 60,0 | 23,6 | 0,049 | 18,28 | 0,069 | 19,01 | 0,088 | 19,48 |
| 75,0 | 29,5 | 0,056 | 18,61 | 0,080 | 19,33 | 0,103 | 19,79 |
| 90,0 | 35,4 | 0,062 | 18,90 | 0,091 | 19,59 | 0,119 | 20,04 |
| 100,0 | 39,4 | 0,067 | 19,05 | 0,098 | 19,74 | 0,129 | 20,17 |

Таблица из статьи Whipple and Rubenstein, Pop. Astronomy, 1941.

# 5

# СПЕКТРОСКОПИЯ

Инструменты и техника, разобранные в предыдущих главах, составляют лишь часть количественных методов, применяемых при изучении физической природы вселенной. Сложные пучки световых лучей, доходящие до нас от различных небесных объектов, содержат ещё много сведений, которые становятся доступными нам с помощью прибора, называемого *спектроскопом*.

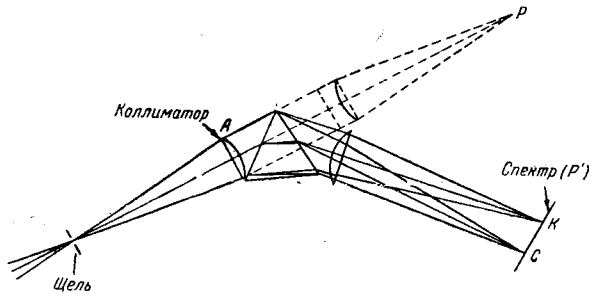
Классический опыт Ньютона (1666 г.), показавший, что белый свет слагается из составных цветов, был первым шагом в развитии спектроскопа — самого могущественного из орудий астрофизики. Этот инструмент в разнообразнейших формах служит для того, чтобы развернуть белый свет в ряд составляющих его компонентов. Спектроскоп для астрофизики — то же, что телескоп для астрономии. Без спектроскопа наши сведения о космической физике были бы очень ограничены; но с его помощью совокупная деятельность атомов в Солнце, звёздах и в пространстве становится доступной наблюдению.

Фиг. 57 показывает устройство типичного призменного спектроскопа. *Щель* (узкое щелевидное отверстие), которая расположена перпендикулярно к плоскости рисунка, заменяет дырочку в ставне, служившую Ньютону. Свет, войдя в щель, расходится, как если бы щель была источником света, и принимается линзой *A*, называемой *коллиматорной*. Она располагается так,



чтобы щель была в её фокусе, и свет, исходящий из щели, превращается поэтому, после преломления в линзе коллиматора, в параллельный пучок лучей.

Пучок лучей, выйдя из коллиматора, попадает в призму и снова выходит из неё, претерпев два преломления, сопровождающиеся изменением направления светового пучка. Синие лучи испытывают более сильное изменение направления, чем красные. Направление света, выходящего из призмы, зависит поэтому от его




Фиг. 57. Простейший щелевой спектроскоп.

цвета. Это действие призмы, состоящее в различном отклонении лучей разного цвета, называется *дисперсией*.

Свет, вышедший из призмы, входит в объектив (во вторую линзу) и фокусируется. Так как лучи разных цветов входят в линзу или объектив в разных направлениях, то в фокальной плоскости этого объектива образуется спектр. Обращаясь снова к фиг. 57, мы увидим, что красные лучи фокусируются в точке *K*, а синие — в точке *C*. Спектр можно рассмотреть с помощью окуляра; отсюда название спектроскоп. Если, для того чтобы запечатлеть спектр, поместить фотографическую пластинку в фокальной плоскости объектива, то спектроскоп будет преобразован в *спектрограф*.

Чтобы понять принцип действия этого инструмента, представим себе, что щель освещена лучами одного цвета. Такой *монохроматический* свет отклонится призмой, но не будет претерпевать дисперсии. Коллиматор-

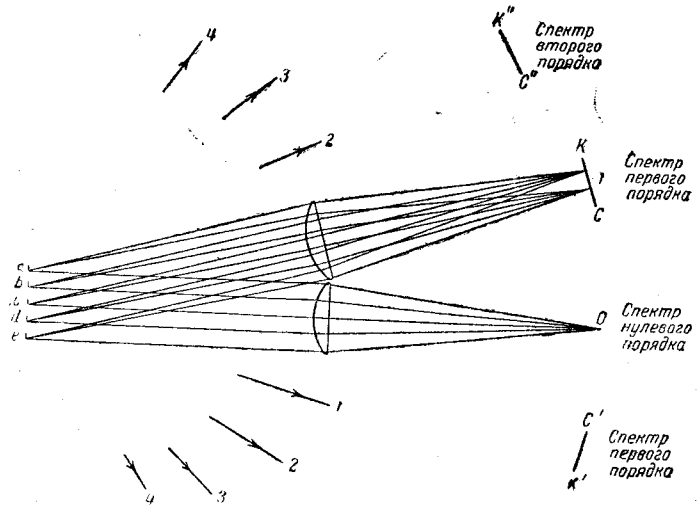
ная линза вместе со второй линзой дают изображение щели в $P'$ (фиг. 57). Если щель узка, изображение будет просто линией в $P'$ (и, подобно щели, будет перпендикулярно к плоскости чертежа). Положение этой линии в фокальной плоскости телескопа будет зависеть от того, какого цвета лучи мы выберем для наблюдения. Если мы выбрали красные лучи, то в $K$ упадёт красная линия; если синие лучи, то синяя линия окажется в $C$.

Теперь представим себе, что падающий свет состоит из многих отдельных цветов. До вхождения в щель эти цвета смешаны, но в фокальной плоскости спектроскопа они будут разделены на ряд узких изображений щели, положение которых в спектре будет зависеть от цветов, которые мы включим в состав падающего света. Если мы удалим призму и установим обе линзы на одной общей оси, все цвета соединятся в одну линию в фокусе $P$ (фиг. 57), без разделения. Следовательно, призма является главной частью спектроскопа.

## ДИФФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

Стеклянная призма — это не единственное приспособление, могущее развернуть свет в спектр. Действие призмы обусловливается связью преломления с цветом лучей. Характер этой связи зависит от взятого сорта стекла. Для получения спектра можно также воспользоваться принципом диффракции. Несколько тысяч узких параллельных линий наносятся на равных расстояниях одна около другой на подходящей прозрачной или отражающей поверхности. Получающаяся решётка называется, соответственно, пропускающей или отражающей *диффракционной решёткой*. Белый свет, падающий на исчерченную поверхность пропускающей решётки, как показано на фиг. 58, подвергается диффракции под действием нанесённых штрихов. В соответствии с законом Гюйгенса (глава 1) прозрачные промежутки между штрихами ведут себя как источники света. Из различных точек $a$, $b$, $c$ и т. д. свет распространяется сферическими волновыми фронтами, которые интерферируют между собой. Точки на волновых фронтах, движущихся в направлениях $aO$, $bO$, $cO$ и т. д., совпадают по фазе на плоской поверхности и представляют собой распространяющийся волновой фронт. Если этот движущийся вперёд волновой фронт сфокусировать при






Фиг. 58. Диффракционная решётка.

помощи линзы, то изображение получится в точке $O$. Резкость этого изображения будет зависеть от числа чёрточек, принимающих участие в его образовании. Световые волны, движущиеся по направлениям, иным, чем $aO$, $bO$ и т. д., интерферируя, уничтожают друг друга.

Точки на волновых фронтах, движущиеся в направлениях $a1$, $b1$, $c1$ и т. д., также находятся в одной фазе вдоль наступающего волнового фронта. Свет из $b$ оказывается на одну волну позади света из $a$; выходящий из $c$ — на одну волну отстаёт от $b$ и т. д. Направление $1$ зависит поэтому от длины волны. Наступающий плоский волновой фронт красного света отклонится больше, чем синий свет. Линза образует в фокусе

красное изображение в точке *K*, синее изображение в точке *C*. Различные спектральные цвета будут расположены в фокусе в той же последовательности, что и в спектре, полученном с помощью призмы.

Световые волны, распространяющиеся в направлении *a2*, *b2*, *c2* и т. д., опять-таки будут в одной и той же фазе вдоль плоского волнового фронта. Свет из *b* отстанет на полные две длины волны от *a*, свет из *c* будет на 2 длины волны позади *b* и т. д. Получающийся при этом спектр, образованный линзой, будет не только сильнее отклонён, чем направление *1*, но спектральные цвета будут раздвинуты примерно вдвое сильнее.

Световые волны, распространяющиеся из других точек внутри прозрачных промежутков, должны интерферировать вышеописанным способом с соответствующими точками других промежутков. В направлениях *O*, *1*, *2*, *3*, *4* и т. д. эти световые волны интерферируют, усиливая колебания. Во всех иных направлениях световые волны интерферируют, ослабляя колебания в степени, зависящей от числа линий и от направления. Изображение спектральной линии, образованное дифракционной решёткой и линзой, будет иметь резкость, повышающуюся с увеличением числа линий. Оптические решётки высшего качества могут иметь до 5000 и даже до 10 000 линий на 1 *см*, а в целом — до ста тысяч линий.

Изображение щели, освещённой белым светом, образованное в *O*, называется *спектром нулевого порядка* (фиг. 58). Ряд спектральных цветов, образованных в направлении *1K — 1C*, называется *спектром первого порядка*. Второй спектр первого порядка образуется по другую сторону от спектра нулевого порядка в направлении *1K′ — 1C′*. Сходным образом спектральные цвета в направлении *2K — 2C* и *2K″ — 2C″* называются *спектрами второго порядка* и т. д.

В спектрах первого порядка угловое отклонение света почти точно пропорционально длине волны света. В противоположность призме синий свет отклоняется меньше всего, а красный — сильнее всего. В спектрах



второго порядка цвета раздвинуты вдвое сильнее, чем в спектре первого порядка, в спектре третьего порядка — втрое и т. д. Красная часть спектра первого порядка накладывается на синюю часть спектра второго порядка. Длина волны 8000 Å первого порядка при отставании фазы на одну волну совпадает с длиной волны 4000 Å второго порядка с отставанием фазы на две волны. Длина волны 12 000 Å первого порядка совпадает с 6000 Å второго, 4000 Å третьего, 3000 Å четвёртого и т. д. Такое налегание оказалось важным при точном определении длин волн в спектрах с яркими линиями. На практике это смешение порядков ограничивается первым и вторым порядками. Два цвета, налегающие друг на друга при любой длине волны, могут быть разделены при помощи подходящего фильтра или фотографической пластинки. Так, например, красный фильтр, пропуская красные лучи (8000 Å) спектра первого порядка, задерживает фиолетовый свет (4000 Å) спектра второго порядка.

Непрозрачные части решётки служат для того, чтобы задерживать те гюйгенсовы «волночки», которые, отставая в фазе на $^1/_2$, $1^1/_2$, $2^1/_2$ длины волны и т. д., производили бы полное уничтожение колебаний во всех направлениях, кроме *O*, как при распространении непрерывного пучка света. Так как вторичные волны, распространяющиеся из прозрачных промежутков, обладают максимальной интенсивностью в направлении *O* и уменьшающейся интенсивностью по обе стороны от этого направления (см. главу 1), спектр нулевого порядка содержит бóльшую долю света, спектр первого порядка — много меньшую, спектр второго порядка — ещё меньшую и т. д.

Отражающие решётки обычно чертятся на полированной металлической поверхности вроде зеркального металла или на алюминиевом слое, покрывающем стекло. Иногда решётки делались на мягком стекле, которое можно повторно серебрить. Такие решётки, если они

хорошо сделаны, обладают высокой разрешающей способностью. Пропускающие решётки делаются путём покрывания отражающей решётки, служащей матрицей, каким-либо подходящим материалом вроде коллодиона или синтетических смол. После высушивания плёнка снимается и монтируется на стеклянной пластинке; такие решётки обладают низким качеством вследствие неравномерного высыхания плёнки, вытягивания или недостаточно точной монтировки. Наилучшие пропускающие решётки получаются при отделении влажной плёнки от матрицы и перенесении её в жидкости на стекло, служащее окончательной подложкой, на котором уже плёнка сушится при наилучших условиях.

Степень развёртывания пучка света в спектр в зависимости от составляющих его цветов (безразлично призмой или решёткой) называется *угловой дисперсией*. Угловая дисперсия, производимая призмой, неодинакова для разных длин волн; в фокальной плоскости телескопического объектива красный конец спектра сжат, а синяя часть растянута. Угловая дисперсия, производимая дифракционной решёткой, почти постоянна для всех длин волн. Поэтому говорят соответственно о *призматической дисперсии* и *нормальной дисперсии*.

Призматическая дисперсия обычно мало пригодна для изучения красной части спектра, и для таких целей призма часто заменяется решёткой. Призменные спектрографы часто состоят из двух и более призм, составляющих целую систему для увеличения угловой дисперсии. В инструментах, снабжённых дифракционной решёткой, применяется только одна решётка, так как иначе получилось бы безнадёжное налегание спектров, производимое разделением каждого порядка от одной решётки на новый ряд порядков после падения на другую решётку.

Величина, до которой спектр растягивается в фокальной плоскости объектива, называется *линейной дисперсией*. Линейная дисперсия обычно выражается в ангстремах на миллиметр. В силу особенности призматической дисперсии принято указывать линейную дисперсию призменного спектрографа для определённой длины волны



или указывать расстояние в миллиметрах между опорными линиями спектра. Чем меньше число ангстремов в миллиметре спектра, тем больше деталей может быть измерено на отчётливой фотографии спектра. Может показаться несколько необычным, когда мы говорим о низкой дисперсии, если число ангстремов в миллиметре велико; например, 300 Å/*мм* будет *низкой* дисперсией, тогда как 3 Å/*мм* считается *высокой* дисперсией.

Линейная дисперсия инструмента зависит и от угловой дисперсии и от фокусного расстояния объектива зрительной трубы или камеры. Легко видеть, что призма с очень малым преломляющим углом не может быть полезна для получения высокой линейной дисперсии; равным образом, призма с большим углом не может употребляться с объективом, обладающим малым фокусным расстоянием. На практике призмы имеют преломляющий угол около 60°, хотя точный выбор угла обычно согласуется с максимальной эффективностью инструмента при той длине волны света, с которой имеется в виду больше всего работать.

Угловая дисперсия, получающаяся при 60-градусной призме, зависит от сорта стекла. Кронгласс обладает гораздо меньшей дисперсией, чем тяжёлый флинтгласс; поэтому для визуальных работ применяются флинтовые призмы. Кронгласс более прозрачен для фиолетовых, а особенно для ультрафиолетовых лучей, чем флинтгласс. Для спектрографов, рассчитанных на фотографирование ультрафиолетовой части спектра, употребляется поэтому лёгкий кронгласс, очень прозрачный для ультрафиолетовых лучей. В силу свойств призматической дисперсии такая призма даёт в ультрафиолетовых лучах дисперсию, сравнимую с дисперсией флинтовой призмы в фиолетовых лучах. Во многих астрономических спектрографах, сконструированных для работы в ультрафиолетовых лучах, используется кварц ($SiO_2$) — довольно распространённое вещество, отличающееся черезвычайной прозрачностью для ультрафиолетовых лучей. Как правило, употребляется кристаллический кварц (в противоположность «плавленому» кварцу или кварцевому сте-

клу), так как он встречается в кусках, безукоризненных в оптическом отношении. Но кристаллический кварц обладает двойным лучепреломлением (см. главы 1 и 7) и даёт двойное изображение, если это свойство не компенсировать. Недостаток места не позволяет нам входить в подробности того, как эта компенсация достигается на практике. Плавленый кварц, имеющийся теперь в продаже, по существу дела изотропен, но до сегодняшнего дня и в Америке и в Англии он ещё недостаточно однороден для применения в точных приборах крупных размеров (см. главу 1).

Одна призма из тяжёлого флинтгласса с 60-градусным преломляющим углом, присоединённая к 12-дюймовой камере, даст линейную дисперсию в 60 Å/*мм* при длине волны 4340 Å*). При длине волны 6553 Å дисперсия падает приблизительно до 200 Å/*мм*. Дифракционная решётка с 6000 линиями на сантиметр, применённая с тем же 12-дюймовым объективом, обеспечивает дисперсию около 60 Å/*мм* по всему спектру первого порядка и примерно 30 Å/*мм* в спектре второго порядка.

Спектр, полученный при высокой дисперсии, обычно обнаруживает больше деталей, чем при низкой дисперсии; его спектральное разрешение, как принято говорить, будет лучше.

*Разрешающая способность* выражается в наименьшем расстоянии в ангстремах между двумя линиями, которые ещё могут быть различимы как отдельные. Например, инструмент, который едва способен разделить две натриевые линии 5890 и 5896 Å, обладает разрешающей способностью в 6 Å.

*) Длины волн 6563 ($H_\alpha$ или C), 4861 ($H_\beta$ или F) 4340 Å ($H_\gamma$ или G) и другие соответствуют почти монохроматическим спектральным линиям водорода, выделяющимся в спектрах звёзд и туманностей. Так как свет этих длин волны может быть получен в лаборатории, они часто применяются как опорные точки спектра.



# АСТРОНОМИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

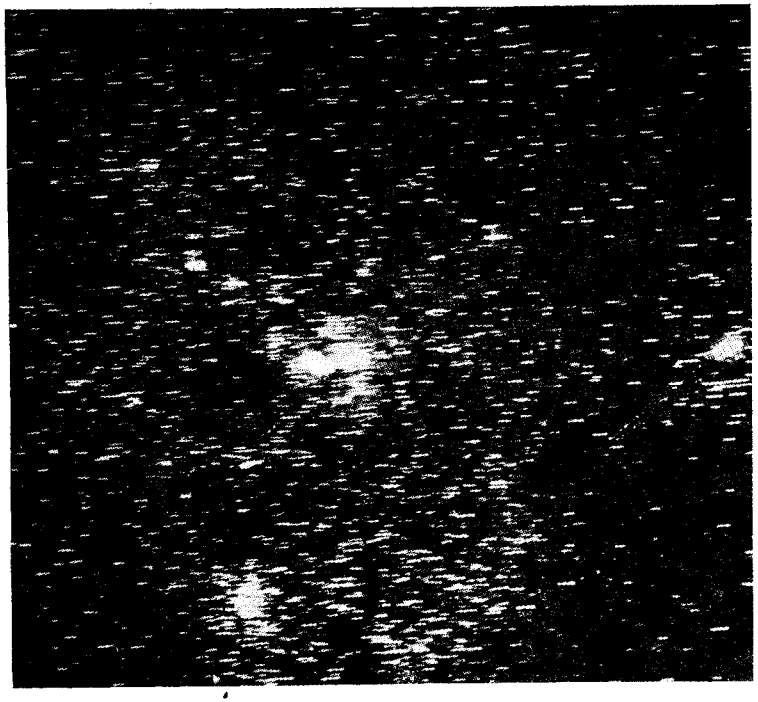
В начале XIX в. Волластон первым применил принцип спектроскопии к изучению Солнца. Он открыл семь тёмных линий в солнечном спектре, но не мог объяснить их значения. В 1814 г. Фраунгофер произвёл более обширное исследование, при котором было открыто около 600 таких тёмных линий. Положение 324 из них он определил, но их происхождение оставалось попрежнему непонятным.

В 1817 г. Фраунгофер обратился к сравнению света звёзд со светом Солнца. Тогда было возможно исследовать спектры только самых ярких звёзд, и результаты работы получились неопределёнными. Его наблюдения над Венерой и Марсом показали, что, насколько мог различить его глаз, свет, отражённый планетами, тождественен со светом Солнца. Наблюдения, произведённые им в 1823 г. с улучшенными приборами, показали, что звёзды отличаются друг от друга и что спектр некоторых из них похож на солнечный. Новое астрофизическое орудие открыло дорогу к совершенно новым областям исследования.

Первая крупная попытка применить спектроскоп для изучения звёзд принадлежит итальянскому астроному Секки. Около 1863 г. Секки получил в своё распоряжение спектроскоп сравнительно высокой эффективности и разрешающей способности. Главным нововведением Секки по сравнению с тем, чем располагал Фраунгофер и он сам вначале, был новый тип спектроскопа, в котором используется *призма прямого зрения*. Система призм в данном случае состоит из чередующихся кроновых и флинтовых призм, склеенных между собою. Такое устройство обеспечило прямолинейность оптической оси, сохраняя дисперсию. Склеенные поверхности не давали отражения, вызывающего потерю света. Работы Секки начались вскоре после провозглашения Кирхгофом основного закона спектроскопии, и потому он смог сделать некоторые выводы относительно истинной природы звёзд на основании наблюдения их спектров. После Секки стали определяться различные типы спектроскопов, которые лучше всего рассмотреть в их современной форме.

## ОБЪЕКТИВНАЯ ПРИЗМА

Во всех случаях, когда падающий свет уж параллелен, можно обойтись без коллиматора и щели спектрографа. Такому требованию отвечает свет звёзд до своего падения на объектив. Объективная призма — просто



Фиг. 59. Область вокруг η Киля, снятая через объективную призму.

призма, установленная перед объективом телескопа. Телескоп таким образом превращается в спектроскоп, не нуждающийся ни в щели, ни в коллиматоре. После прохождения сквозь призму свет звезды собирается в фокусе телескопа в виде узкого спектра в фокальной плоскости (фиг. 59).



Фокусное расстояние телескопа, применяемого с объективной призмой, обычно настолько велико, что преломляющий угол призмы должен быть мал, иначе дисперсия света звёзд будет больше, чем нужно. Зачастую преломляющий угол бывает порядка 3—5° и, кроме того, призма делается из кронгласса с относительно слабой дисперсией. Малая величина преломляющего угла призмы имеет важное практическое значение, так как делает возможным изготовление призмы из стеклянной пластинки сравнительно малой толщины, что обеспечивает и достаточную прозрачность, и уменьшение стоимости.

Объективная призма обеспечивает одновременное получение спектров всех звёзд в используемом поле зрения телескопа. Кроме того, призма становится приспособлением к обыкновенному фотографическому телескопу, съёмным и нетребовательным в отношении регулировки.

Свет от звезды, входящий в объективную призму, если не учитывать возмущений, вызываемых атмосферой, параллелен для лучей всех цветов, независимо от угла падения. Единственный недостаток призмы, это — различная дисперсия в разных частях поля пластинки. Но изменения невелики и для большинства целей не имеют значения. Объективная призма — инструмент очень полезный и широко применяемый для астрономических исследований.

Звёздный спектр, образованный в фокальной плоскости камеры с объективной призмой, представляет собой узкую полоску, ширина которой, если телескоп свободен от сферической аберрации, зависит от качества изображений. Чтобы спектр был достаточно широк для наблюдения спектральных линий, весь телескоп смещают взад и вперёд перпендикулярно к направлению дисперсии. Для этого призму устанавливают плоскостью дисперсии по склонению. Расширение спектра может быть тогда легко достигнуто путём искусственного расстройства движущего часового механизма, заставляющего его отставать или уходить так, чтобы за нужное время экспозиции получилась желаемая ширина спектра. Наблюдатель должен следить за тем, чтобы изображение звезды в телескопе тоже двигалось как можно точнее вдоль нити склонения, так как от точности гидирования за-

висит прямизна и резкость спектральных линий. Вследствие небольших неправильностей в ходе часового механизма и изменений в атмосферной рефракции, сопровождающейся атмосферным спектром, образуемым дисперсией в земной атмосфере, и зависящей от высоты звёзд над горизонтом, спектр может получиться с продольными полосами. Если желательно для целей фотометрии, чтобы спектр обладал равномерной плотностью по всей своей ширине, полезно проводить спектр взад и вперёд много раз в продолжение экспозиции. Для получения наибольшей отчётливости и разрешения, необходимых для классификации звёзд, желательно получить относительно широкий спектр посредством лишь одного продвижения.

Каким принципам должна удовлетворять конструкция хорошей камеры с объективной призмой? Нужно решить, какая дисперсия и какая ширина спектра требуются для данного рода исследований. Этим определяется площадь фотографической пластинки, покрываемая светом отдельной звезды. Для данной плащади, покрытой спектром, продолжительность экспозиции будет зависеть от того, сколько энергии может быть сконцентрировано на этой площади, и поэтому от количества света, собранного телескопом. Чем больше отверстие объектива при данной дисперсии и ширине спектра, тем слабее звёзды, спектры которых можно сфотографировать за определённое время, при определённой фотографической плотности. 24-дюймовая камера с объективной призмой будет давать спектры звёзд примерно на 4 звёздные величины более слабых, чем 3-дюймовый телескоп за то же время экспозиции и при идентичных спектрах.

Чтобы исключить влияние качества изображений на спектральные линии, желательно иметь камеру, обладающую сколь возможно малым фокусным расстоянием. Диск, обусловленный неспокойствием атмосферы в фокальной плоскости камеры данного отверстия, уменьшается пропорционально уменьшению фокусного расстояния. Как указано выше, для того чтобы собрать как можно больше света, отверстие должно быть увеличено насколько возможно (см., однако, ниже). После того как принято решение о конструкции камеры, выбирают



угол призмы и сорт стекла для получения желаемой дисперсии. Пока всё заставляет нас предполагать, что потребуется призма с большим углом и с высокой дисперсией перед очень короткофокусным объективом большого отверстия (например, камера Шмидта со светосилой 1/1). Но продолжительность экспозиции не может быть велика при светосильной камере по причине быстрого вуалирования фона неба. Звёзды, свет которых, развёрнутый в спектр, будет обладать меньшей яркостью, чем фон неба, не успеют отпечататься на пластинке, прежде чем последняя почернеет от вуали, создаваемой светом неба. Во избежание затруднения, создаваемого вуалью от неба, необходимо пользоваться камерой малой светосилы и призмой с малым углом. Таково печальное противоречие. Приходится искать компромисса, отыскивая наилучший наблюдательный пункт в отношении черноты неба и качества изображений, и пользоваться камерой со средним относительным отверстием.

Если принять максимальную продолжительность экспозиции равной двум часам, то следует рекомендовать относительное отверстие 1/5; за такое время телескоп не успеет заснять слишком густую вуаль на фоне неба. Более длительные экспозиции наталкиваются на серьёзные затруднения со стороны атмосферы, особенно при фотографировании вблизи горизонта. Для такой камеры при минимальной полезной ширине спектра (около 0,3 *мм*) достижимая предельная звёздная величина будет зависеть исключительно от дисперсии. Разрешение будет зависеть от качества изображения и от разрешающей способности фотографического материала. Камера с объективной призмой отверстием в 11 дюймов, дающая дисперсию около 100 Å/*мм* при 4340 Å (фиолетовые лучи), даёт на пластинках высшей чувствительности удовлетворительные спектры звёзд 10-й величины при экспозиции в 2 часа. При хороших изображениях разрешение на пластинке будет порядка 25 микрон, что приблизительно соответствует 2,5 ангстрема.

Большинство применяемых теперь объективных призм делается из кронгласса и имеет малый преломляющий

угол. Иногда призмы большого угла применялись с короткофокусными камерами, главным образом, для изучения метеорных спектров. Некоторые успехи достигнуты в изготовлении призм из стекла с относительно высокой дисперсией для наивозможного уменьшения угла призмы. Гарвардская обсерватория обладает двумя 24-дюймовыми объективными призмами, которые долгое время применялись на северной и южной станциях для изучения спектров звёзд до 12-й звёздной величины при низкой дисперсии. Теперь разрабатываются планы устройства ещё одной 24-дюймовой призмы для Гарвардской 24-дюймовой камеры Шмидта. 24-дюймовая призма из флинтгласса для 24—36-дюймовой камеры Шмидта обсерватории Уорнер и Суэзи только что закончена и даёт превосходные спектры с дисперсией около 250 Å/*мм*.

## ОБЪЕКТИВНАЯ РЕШЁТКА

Как и в случае простого спектроскопа с объективной призмой, описанного выше, можно получить желаемую дисперсию, применяя объективную решётку. До самого последнего времени объективные решётки достаточного размера и достаточной световой эффективности были неизвестны.

Р. В. Вуд за последние годы усовершенствовал технику изготовления пропускающих решёток высокого полезного действия. Посредством придания бороздкам отражательной решётки, служащей матрицей, определённой формы ему удалось сконцентрировать бо́льшую часть света от решётки — отпечатка (реплики) в один спектр первого порядка. Каждый штрих его решётки имеет форму очень вытянутой призмочки, преломляющей свет в общем направлении к спектру первого порядка. Некоторые из пропускающих решёток концентрируют до 80 % света в одном спектре первого порядка.

Ввиду малого размера Роуландовских делительных машин, на которых изготовляются эти превосходные решётки, решётки Вуда как отражающего, так и пропускающего типа были не более $4^1/_2 \times 6^1/_2$ дюймов.



Вуду удалось составить много таких реплик на одной стеклянной пластинке и получить большую составную или мозаичную решётку. Поскольку число линий в дюйме точно одинаково во всех составляющих решётках и линии различных решёток достаточно параллельны, спектр звезды, образуемый составной решёткой, сохраняет свою чистоту. Разрешающая способность мозаичной решётки вполне достаточна, но она не выше, чем у отдельной составляющей решётки; при этом получается только выигрыш в количестве света, и можно получить спектры более слабых звёзд. Прозрачные плёнки должны быть одинаковой толщины на всём протяжении, чтобы избежать образования клиновидности, которая создала бы нежелательные отклонения спектров отдельных решёток от среднего положения. Такие большие составные решётки обещают в будущем ценные результаты, особенно для исследования красной части спектра, до сих пор недоступной призмам ввиду их малой разрешающей способности при низкой дисперсии.

Большая часть спектральных исследований сейчас производится фотографическим способом. Как и при прямом фотографировании, этим достигается выгода получения прочного изображения спектра, допускающего количественное изучение. Интервал длин волн также далеко превосходит тот, который доступен визуальному наблюдению. Наиболее чувствительные сорта фотографических пластинок могут за 1 минуту дать слабое изображение того, что приспособившийся к темноте глаз едва замечает. Если свет воспринимается глазом сколько-нибудь легко, то одноминутная экспозиция уже зарегистрирует его с достаточной плотностью. Фотографическая пластинка обладает тем преимуществом, что она аккумулирует свет. При заданной плотности фотографического изображения увеличение экспозиции втрое соответствует выигрышу примерно на одну звёздную величину. Таким образом, за три минуты пластинка зарегистрирует звёзды примерно на 1 величину более слабые, чем способен видеть глаз; за 9 минут — на 2 величины, за 27 минут — на 3 величины, за 243 минуты — на 5 величин и т. д. Хотя при «щелевой» спектрографии и был

рекордный случай, когда экспозиция продолжалась около 80 часов, но вообще экспозиции редко превышают 4 часа. Поэтому фотографический метод может зарегистрировать объекты на пять величин более слабые, чем видимые глазом.

## БЕСЩЕЛЕВЫЕ СПЕКТРОГРАФЫ

Серьёзным практическим недостатком объективной призмы является то, что она не может быть изготовлена такой величины, какая требуется для гигантских телескопов. Мы указывали, что самые большие призмы имеют диаметр в 24 дюйма; но существует много телескопов значительно большего размера (см. Приложения). Есть возможность до известной степени преодолеть этот недостаток путём применения *бесщелевого спектрографа*.

В типичном бесщелевом спектрографе используется отрицательная коллиматорная линза, которая перехватывает свет от объектива до того, как он соберётся в фокус. Таким образом, коллиматорная линза делает свет снова параллельным. После коллимации свет может быть направлен через призму или решётку для разложения, а потом — через объектив камеры.

Если объектив камеры и коллиматор имеют одинаковое фокусное расстояние и изготовлены из одного и того же стекла, то нет нужды ахроматизировать их в отдельности. Кроме того, естественные недостатки простой коллиматорной линзы в значительной степени устраняются. Обе линзы, положительная и отрицательная, будучи соединены без призмы, вместе обладают оптической силой, равной нулю, и действуют как плоскопараллельная пластинка, помещённая в сходящийся пучок. Такая пластинка умеренной толщины производит сферическую аберрацию, но не столь большую, чтобы она мешала. Даже и при введении призмы аберрации каждой из линз почти в точности взаимно уничтожаются, при условии, что призма расположена так, чтобы наклон пучка света был одинаков по отношению к каждой поверхности. При таком устройстве нужны лишь простые недорогие линзы, а оптическая схема становится очень простой.



Бесщелевой спектрограф использует полное отверстие телескопа независимо от его размеров. Отрицательная линза коллиматора должна быть такого диаметра, чтобы не только вместить пучок, сходящийся к центру поля зрения, но также и краевые лучи. Бесщелевой спектрограф имеет поэтому примерно такое же полезное поле, как и телескоп при непосредственном наблюдении.

Каждый инструмент имеет недостатки. Земная атмосфера ограничивает эффективность бесщелевого спектрографа. Большинство крупнейших телескопов обладает большим фокусным расстоянием и поэтому даёт изображения, увеличенные неспокойствием атмосферы. Хотя это увеличение видимого диска и полезно для большей точности фотометрических оценок, оно уничтожает резкость спектральных линий. Удвоение фокусного расстояния ведёт примерно к удвоению диаметра изображения звезды. Поэтому для одного и того же разрешения телескоп с вдвое бо́льшим фокусным расстоянием требует удвоенной дисперсии. Больший из них обычно обладает вчетверо большей светособирательной силой; поэтому при данном спектральном разрешении и постоянной ширине спектра интенсивность света в спектре в фокальной плоскости увеличивается прямо пропорционально линейному отверстию телескопа. Телескоп с отверстием в 60 дюймов в среднюю ночь лишь вдвое сильнее 30-дюймового. Говоря об объективной призме, мы отметили, что для достижения наилучших результатов необходимо выбрать место наблюдения с максимальным спокойствием и прозрачностью воздуха. Тот же вывод, но ещё в большей степени, приложим к бесщелевому спектрографу, присоединённому к большому телескопу.

Бесщелевой инструмент может быть с пользой видоизменён таким образом, что простая линза камеры заменяется гораздо более светосильной камерой вроде шмидтовской. Такая комбинация телескопа и спектрографа будет вести себя в точности так, как если бы она обладала относительным отверстием, а следовательно, и быстротой камеры Шмидта. Так, например, телескоп с относительным отверстием 1/5 с камерой Шмидта с от-

носительным отверстием 1/1 будет давать фотографии неба с такой же быстротой, как телескоп с относительным отверстием 1/1. При этом произойдёт потеря в масштабе в фокальной плоскости, но, что часто ещё более серьёзно, вуаль от неба, запечатлённая более светосильной камерой, потребует сокращения экспозиции до нескольких минут. Последний недостаток столь значителен, что для большинства целей комбинация не должна иметь светосилу, бо́льшую, чем 1/3. Бесщелевой инструмент в этой форме должен иметь коллиматорную линзу вполне ахроматизированную и исправленную на сферическую аберрацию.

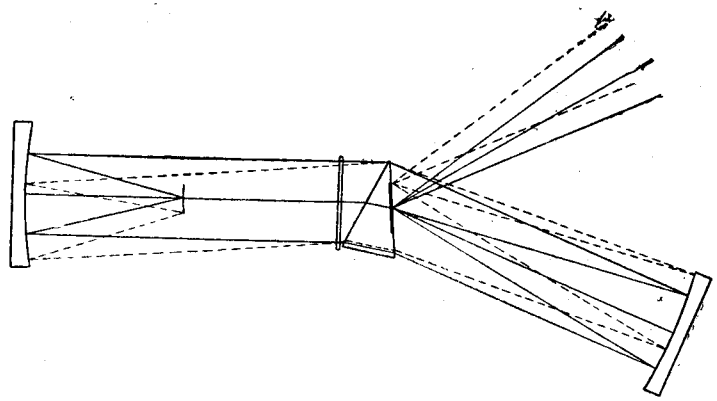
В другой модификации бесщелевого инструмента используется положительная коллиматорная линза позади фокуса телескопа. Такой инструмент сходен со щелевым спектрографом при убранной щели. Коллиматорная линза должна быть опять-таки вполне исправлена. Поле такого бесщелевого инструмента может быть значительно увеличено путём введения полевой линзы в фокусе или вблизи фокуса телескопа, образующей изображение объектива телескопа на коллиматорной линзе. Весь свет, падающий на объектив телескопа и на полевую линзу, будет тогда проходить через коллиматорную линзу и, следовательно, через спектральный фокус. Действие её будет идентично с действием полевой линзы окуляра.

## БЕСЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОГРАФ МАК-КАРТИ

Е. Л. Мак-Карти сконструировал для Мак-Дональдовской обсерватории новый тип бесщелевого спектрографа, обещающий оказаться очень полезным (фиг. 60). Коллимация производится при помощи параболического зеркала, фокус которого совпадает с фокусом телескопа (рефлектора). Кома первичного параболоида, которая имеет столь серьёзное значение, когда параболическое зеркало применяется для прямого фотографирования, уничтожается комой коллиматорного параболического зеркала. Пучок, входящий в призму, поэтому вполне исправлен на кому и сферическую аберрацию.



Призма установлена на угол наименьшего отклонения, хотя почти безупречная коллимация делает это менее важным, чем в случае простейшего бесщелевого спектрографа, описанного нами вначале. Позади призмы камера Шмидта с относительным отверстием 1/2 собирает различные лучи в фокус. Фокальная поверхность системы несколько сильнее искривлена, чем если бы та же самая камера Шмидта применялась для прямого фотографирования.



Фиг. 60. Бесщелевой спектрограф Мак-Карти.

Посеребрённая площадочка, нанесённая на одной грани призмы, пересекает фокальную плоскость главного зеркала. Такое положение фокальной плоскости по отношению к призме имеет тот небольшой недостаток, что дефекты в серебре, пыль и маленькие отверстия оказываются в фокусе окончательного изображения около линии пересечения посеребрённой поверхности призмы с фокальной плоскостью. Цель помещения серебряного слоя в фокальной плоскости состоит в получении максимального поля полного освещения при практически удобном размере коллимирующего зеркала.

Применение камеры Шмидта с относительным отверстием 1/2 оказалось возможным лишь благодаря превосходным условиям наблюдения в месте расположения

Мак-Дональдовской обсерватории. В более северных широтах пришлось бы пользоваться менее светосильной камерой, для того чтобы вуаль от фона неба не заставляла прекращать экспозицию раньше, чем успеют отпечататься спектры слабых звёзд.

Бесщелевые спектрографы, использующие полевую линзу и положительный коллиматор, могут быть приспособлены к длинным экспозициям путём заслонения большей части света от неба при помощи диафрагмы, расположенной в фокальной плоскости. Если данному участку звёздного неба придаётся важное значение, то можно изготовить тонкую металлическую маску по непосредственной фотографии участка, путём прокалывания дырочек около 0,1*мм* диаметром для каждой нужной звезды. После правильной ориентировки маски в фокальной плоскости инструмента большая часть света, достигающего пластинки, будет светом звёзд, но не небесного фона. Таким путём можно давать долгие экспозиции без серьёзного вуалирования пластинки. Пока ещё, повидимому, никто не применял этого метода. Тот, кто решит испробовать его, должен заранее иметь в виду необходимость хорошей регулировки и тщательного гидирования.

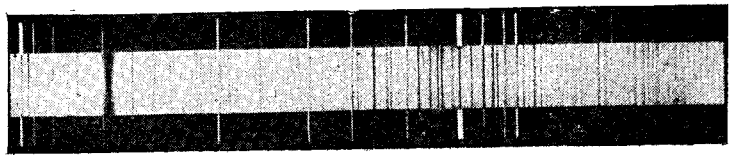
## ЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОГРАФ

Спектроскоп типа, описанного в начале главы, будучи приспособлен для фотографирования, называется *щелевым спектрографом*. Щель спектрографа этого типа служит двум существенным целям. Во-первых, она может повысить разрешающую способность спектрографа. Просвет щели может быть сделан много уже, чем видимый диск звезды. Движение изображения звезды по щели и пульсация его размера не могут повлиять на разрешение, хотя для экономии света наблюдатель должен всё время держать звезду на щели, чтобы в спектрограф входило как можно больше света.

Во-вторых, щель занимает неизменное положение по отношению к фотографической пластинке. Выше и ниже спектра звезды может быть сфотографирован *спектр*

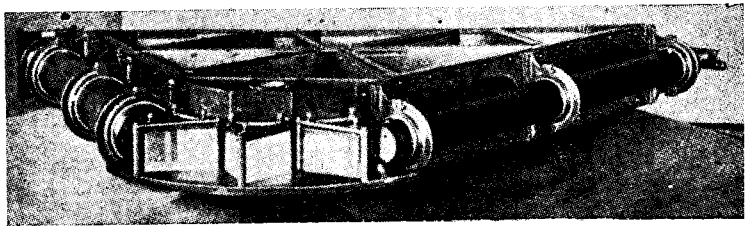


*сравнения*, состоящий обычно из ярких линий испускания от лабораторного источника света, например металлической дуги или искры (фиг. 61). Яркие линии, используемые в спектрах сравнения, имеют известные



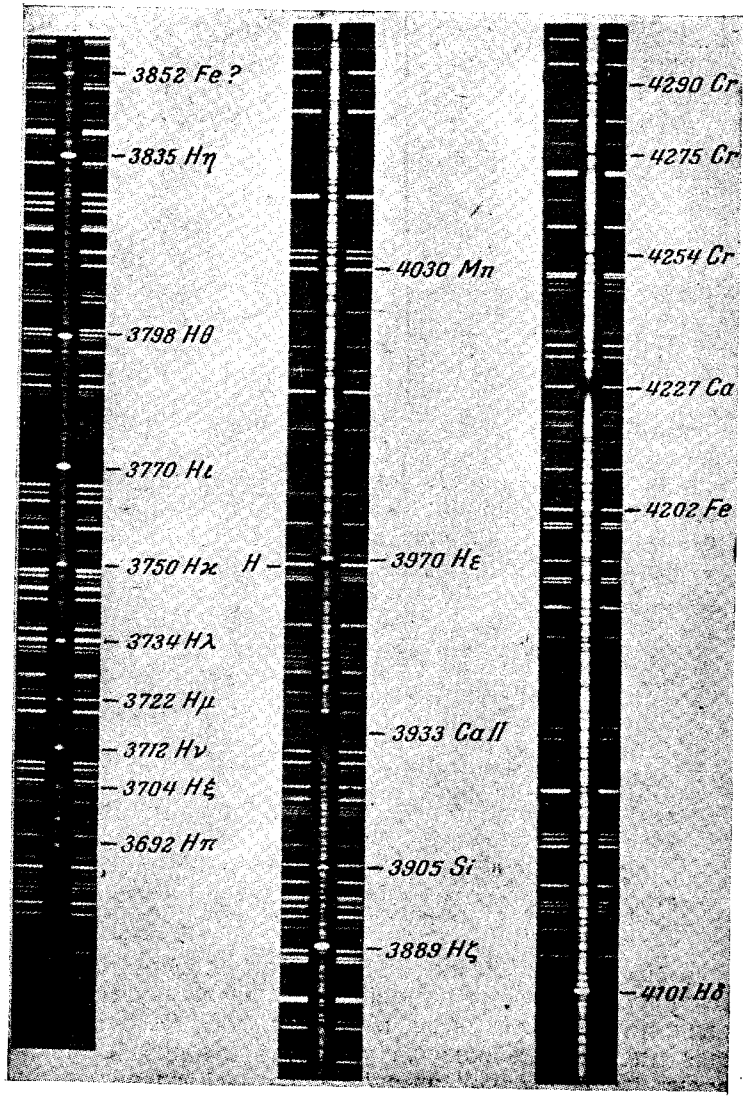
Фиг. 61. Спектр $\eta$ Льва. Сверху и снизу от спектра звезды впечатаны яркие линии спектра сравнения.

длины волн, с большой точностью определяемые в лаборатории с помощью спектральных приборов с высокой дисперсией. Измеряя положение спектральных линий звезды относительно линий лабораторного спектра, можно получить длины волн линий звезды.



Фиг. 62. Трёхпризменный щелевой спектрограф.
Коллиматор справа. Три призмы сделаны из лёгкого флинтгласса, для того чтобы они были прозрачны для фиолетовой области спектра.

Высокое разрешение, даваемое хорошим щелевым спектрографом, имеет величайшее значение для изучения физических свойств звёзд и туманностей. За это астрономы платят возможностью работать в каждый данный момент лишь с одной звездой и потерей значительного количества света на узкой щели.




Фиг. 63. Спектры высокой дисперсии, полученные на обсерватории Маунт Вилсон (сфотографировано со 100-дюймовым телескопом).



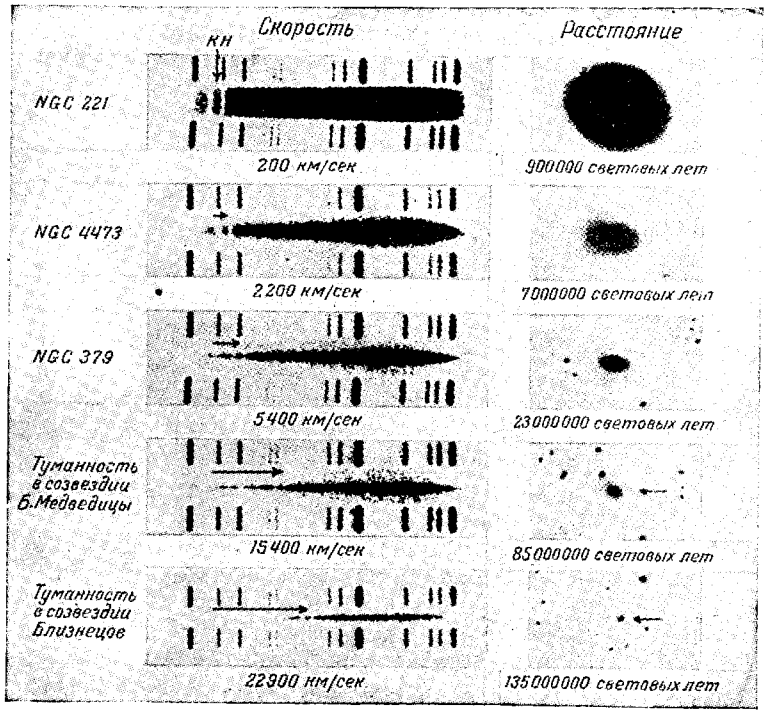
Щелевые спектрографы с высокой дисперсией применимы лишь к изучению более ярких звёзд. Для того чтобы расшифровать спектры более далёких или менее ярких объектов, нужны спектрографы с меньшей дисперсией. Спектрограммы с дисперсией около 100 Å на миллиметр, получаемые со светосильным спектрографом, установленным на большом рефлекторе, расположенном в хорошем наблюдательном пункте, играют значительную роль в современных исследованиях в области астрофизики и звёздной статистики.

Существующие астрономические спектрографы обладают дисперсией от 1,5 Å/*мм* примерно до 1000 Å/*мм*. Призменный спектрограф типа «кудэ» при 82-дюймовом телескопе Мак-Дональдовской обсерватории даёт дисперсию 1,5 Å/*мм*. С этим инструментом можно получить спектры звёзд до 4-й звёздной величины. Спектрограф, дающий 1000 Å/*мм* в соединении со 100-дюймовым телескопом, даёт спектры звёзд и галактик приблизительно до 16-й величины (фиг. 64). Разрешающая способность большего из этих спектрографов почти в триста раз выше, чем меньшего.

Первые щелевые спектрографы были приспособлены для работы с большими рефракторами в конце XIX в. Первый удачный крупный рефлектор — кросслеевский 36-дюймовый — обладает не большей светособирающей силой, чем рефракторы Ликской и Иерксской обсерваторий; его относительное отверстие 1/5,8 было слишком велико для спектрографов с высокой дисперсией. Сходящийся пучок у Ликского или Иерксского рефракторов имеет относительное отверстие около 1/18 и поэтому подходит для спектрографов высокой дисперсии. Однако вторичный спектр рефракторов приводит к тому, что на щели точно фокусируется лишь узкий интервал цветов, а все остальные оказываются вне фокуса; чтобы исправить этот недостаток, внутри трубы, на расстоянии нескольких метров от фокуса, помещается коррекционная линза, которая должна изменить хроматическую кривую

объектива и сделать его коррекцию не визуальной, а фотографической. Однако эта комбинация всё же далека от совершенства.

Щель спектрографа с высокой дисперсией столь расточительно расходует свет, что значительная часть от-




Фиг. 64. Спектры внегалактических туманностей, показывающие смещение линий к красному концу, возрастающее с увеличением расстояния до туманности. Спектры сильно увеличены.

верстия телескопа пропадает даром. Изображение звезды выглядит на щели как маленький, пляшущий неправильный диск, рассечённый надвое узкой тёмной линией



щели. Условия видимости, неравномерная атмосферная рефракция, атмосферная дисперсия—все эти факторы вместе заставляют наблюдателя гидировать по изображению звезды на щели, стараясь, чтобы звезда насколько возможно держалась на щели в течение всей экспозиции.

Обычный способ гидирования основан на том, что наружная поверхность щели полируется как плоское зеркало, слегка наклонённое к оптической оси телескопа. Таким образом, свет звезды, направленный на щель, частично отражается в телескоп-гид, находящийся на достаточном расстоянии, чтобы не заслонять света, идущего от объектива. Поверхность щели может освещаться слабым зелёным светом, чтобы быть видимой наблюдателю.

Как и в случае объективной призмы, спектр звезды, образованный в фокальной плоскости щелевого спектрографа, представляет собой узкую полоску. Поэтому столь же необходимо сделать спектр на фотографии шире. Как и в случае объективной призмы, этого можно достичь посредством соответствующего изменения хода часового механизма.

Многие щелевые спектрографы среднего и малого размеров могут поворачиваться вокруг оптической оси, чтобы щель можно было расположить в любой нужной ориентации поперёк диска туманности, или чтобы изолировать свет одной звезды от света её близкой соседки. Расширение спектра можно производить в этом случае при помощи микрометрических движений.

У некоторых щелевых спектрографов щель ориентирована таким образом, что, когда телескоп в меридиане, щель параллельна меридиану. Атмосферная дисперсия, которая при низком положении звезды над горизонтом производит спектр, своей длиной превосходящий ширину щели, действует при этом вдоль щели так, что лучи всех цветов попадают в щель. Такие спектры расширяют, двигая телескоп микрометрическим ключом по склонению. Программа наблюдений рассчитывается так, чтобы нужная звезда была в меридиане в середине экспозиции.

В случае спектрографов с наивысшей дисперсией, вроде спектрографа на Маунт Вилсон, дающего 2,9Å/*мм*, почти не нужно расширять спектр, передвигая изображение звезды вдоль щели. Видимое изображение звезды столь велико, что получающийся спектр имеет достаточную ширину. Спектры ярких звёзд лучше всё же расширять для уточнения измерений и лучшей видимости очень узких линий; звёзды 4-й и 5-й величины, находящиеся на пределе проницающей силы спектрографа, обычно не двигают по щели, так как передвигание вызвало бы сильное удлинение экспозиции (см. фиг. 63).

Свет от источника, используемого для спектра сравнения, обычно направляется в щель через маленькую призму (или призмы), помещённую над щелью. Так как желательно насколько возможно меньше трогать во время экспозиции механические части спектрографа, эти призмочки должны быть постоянно на поверхности щели. Щелевые спектрографы с такими призмами сравнения имеют установочный винт для распределения призмочек вдоль щели. Такая регулировка позволяет расположить спектры сравнения на желаемом расстоянии выше и ниже спектра звезды.

Для точного определения длин волн и лучевых скоростей желательно иметь на щели лабораторное освещение в течение всей экспозиции. Такой приём, однако, как правило, неудобен, особенно, если в качестве источника спектра сравнения пользуются искровым разрядом. Обычно бывает достаточно пропечатывать спектр сравнения пять или шесть раз, через равные промежутки времени, в течение экспозиции. Средние положения линий сравнения будут очень близки по своему масштабу к масштабу спектра звезды.

Лабораторный свет должен давать спектр из ярких линий, достаточно равномерно распределённых вдоль него и пропечатанных до умеренной, более или менее одинаковой плотности. Обычно удовлетворительна железная искра, но в ультрафиолетовой области с успехом применяют сплавы различных других металлов.



## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЩЕЛЕВОГО СПЕКТРОГРАФА

Ширина изображения щели, образованного в фокальной плоскости объектива камеры, определяет линейную разрешающую способность спектрографа. Для получения высокого разрешения при данной линейной дисперсии изображение щели не должно иметь ширины, превосходящей разрешающую способность фотографической эмульсии, т. е. практически около 0,020 *мм*. Разрешающая способность фотографических эмульсий обычно выражается максимальным числом белых линий (разделённых чёрными линиями той же ширины), которые могут быть раздельно сфотографированы на 1 *мм* пластинки. Разрешение сильно зависит от контрастов, плотности фона, характеристики эмульсии и от проявления. Изображение щели шириной в 0,020 *мм* соответствует разрешающей способности в 25 линий на миллиметр. Эта цифра лежит в пределах разрешающей способности чувствительных спектроскопических пластинок при обычной в астрономической практике плотности 0,2—1,0. С другой стороны, необходимо, чтобы сама щель была по возможности велика, пропуская в инструмент как можно больше света.

Так как отношение ширины щели к ширине её изображения целиком зависит от отношения фокусного расстояния коллиматора к фокусному расстоянию объектива камеры, желательно пользоваться камерой с большим относительным отверстием. Комбинация камеры со светосилой 1/1 и коллиматора со светосилой 1/18 производит восемнадцатикратное уменьшение щели. Если ширина изображения щели будет 0,020 *мм*, то сама щель может иметь ширину в 0,360 *мм*; при среднем качестве изображений весь свет от изображения звезды пройдёт без потерь через такую широкую щель. Камера со светосилой 1/1 будет иметь фокусное расстояние, примерно равное поперечнику пучка лучей, выходящего из призмы или дифракционной решётки. Неизбежно короткое фокусное расстояние означает от-

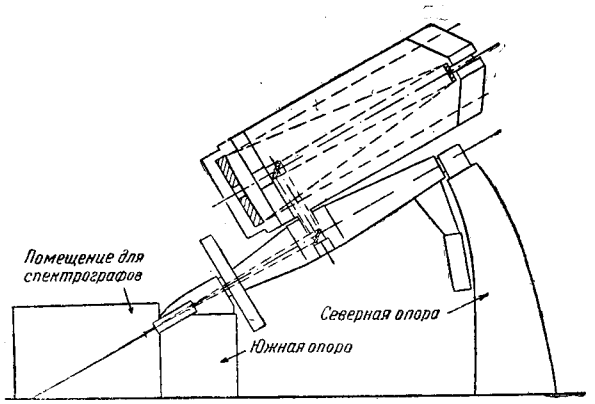
носительно малую линейную дисперсию такого спектрографа, хотя бы он и имел несколько призм с высокой угловой дисперсией.

Камера Шмидта с относительным отверстием 1/1 в соединении с решёткой диаметром в 6 дюймов, имеющей 6000 линий на сантиметр, даст дисперсию в 60 Å/*мм*, что соответствует примерно середине интервала дисперсий, дающих наилучшие результаты. Более высокую дисперсию можно получить без снижения эффективности лишь при увеличении фокусного расстояния камеры. Интенсивность света уменьшается пропорционально длине спектра и даже в более сильной степени, так как щель приходится суживать, чтобы её изображение, образованное более длиннофокусной камерой, оставалось не шире 0,020 *мм*. По этим двум причинам спектрографы, дающие очень высокую дисперсию, очень медленно работают. Чтобы эффективно работать, спектрографы с высокой дисперсией должны помещаться в пунктах с превосходными изображениями.

Узкая щель мало эффективна из-за потери света от диффракции на краях щели. Много света, подвергшегося диффракции на краях щели, проходит мимо объектива коллиматора и теряется. Для уменьшения этой потери конструкция телескопа должна благоприятствовать всякой возможности расширить щель. Желательно, чтобы объектив коллиматора имел такое же относительное отверстие, как и пучок света, собирающийся в фокус на поверхности щели. Щель будет тогда работать как камера с малым отверстием, образуя изображение отверстия телескопа на коллиматоре.

Спектрографы с высокой дисперсией, соединённые с рефлекторами, применяются в кассегрэновском фокусе, где коллиматор может иметь светосилу около 1/18 (ширина щели 0,060 *мм* при объективе камеры светосилой 1/6), а не в ньютоновом фокусе, где коллиматор должен иметь относительное отверстие около 1/5 (ширина щели 0,017 *мм* при объективе камеры светосилой 1/6). Кроме потерь от диффракции, никаких иных различий в количестве света в этих двух комбинациях нет. Хотя для получения одинакового разрешения коллиматор с относительным отверстием 1/5 требует щели в 3,6 раза более узкой, изображение звезды на щели, образованное при относительном отверстии 1/5, будет в среднем в 3,6 раза меньше, чем изображение при комбинации с относительным отверстием 1/18.





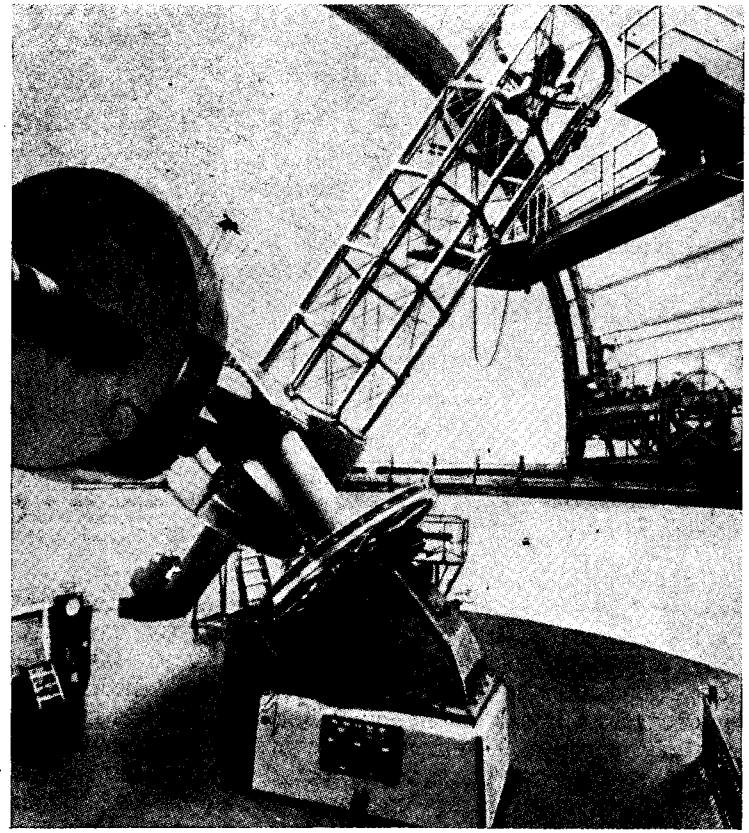

Фиг. 65. Фокус «кудэ».

Телескоп, монтированный иначе — на вилке или на двойной вилке (ср. фиг. 123, 124), — может иметь фокус «кудэ» с одним единственным плоским зеркалом. Однако северная часть неба становится недоступной для наблюдений.

Наилучшее положение для спектрографа высокой дисперсии, это — неподвижный фокус «кудэ» на полярной оси телескопа (фиг. 65). Фокус «кудэ» 100-дюймового телескопа находится в лабораторном помещении, в котором во время экспозиции поддерживается постоянная температура. Спектрограф с высокой дисперсией в фокусе «кудэ» неподвижен относительно пола и поэтому может быть совершенно свободен от прогибов. Только наибольшие телескопы имеют фокус «кудэ». Большинство крупных спектрографов висит на телескопе, обычно в кассегрэновской комбинации (фиг. 66). Спектрографы, применяемые с большими рефракторами, неизбежно должны присоединяться к нижнему концу.

Спектрографы малой дисперсии, использующие камеры со светосильными объективами, могут иметь столь ши-

рокую щель, что потери от диффракции становятся ничтожными. Поэтому спектрографы, предназначенные для работы при малых дисперсиях, обычно устанавливаются

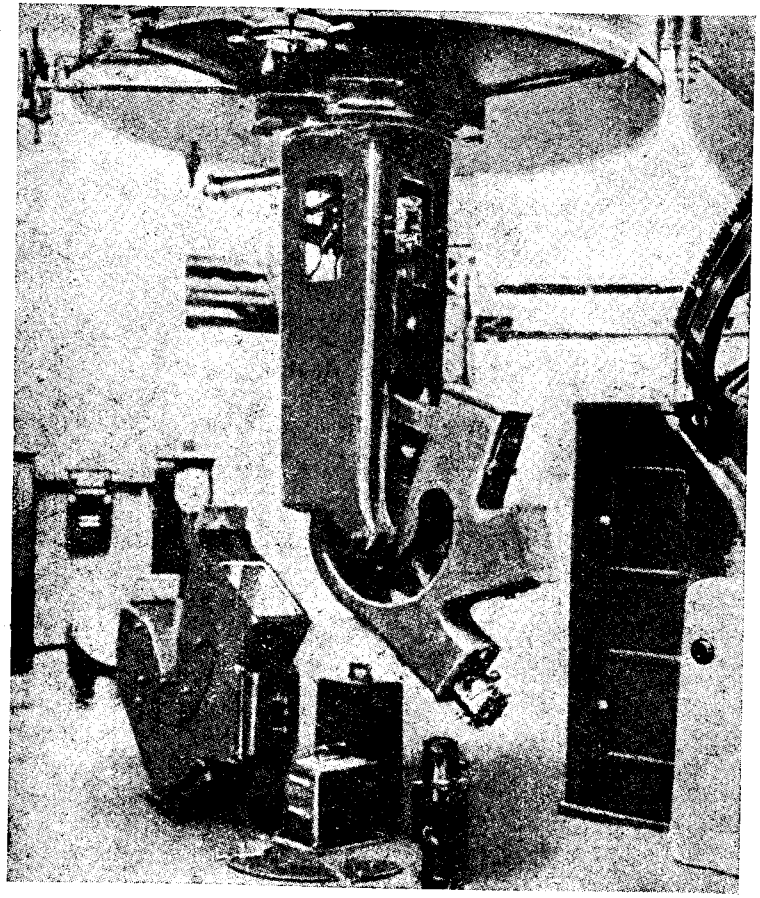


Фиг. 66a. 72-дюймовый рефлектор Астрофизической обсерватории в Виктории (Канада).

в ньютоновом фокусе или, ещё лучше, в главном фокусе рефлектора. Меньшее фокусное расстояние коллиматора позволяет уменьшить вес и размеры спектрографа.



В большинстве астрономических щелевых спектрографов применяется от одной до четырёх призм для полу-



Фиг. 66 b. Вид вблизи спектрографа, установленного в кассегрэновском фокусе 72-дюймового рефлектора, изображённого на фиг. 66a.

чения желаемой угловой дисперсии. Коллиматор и объектив камеры конструируются таким образом, чтобы

спектр получался в фокусе как можно более плоским. Хотя можно применять ахроматические линзы, но в большинстве камер объектив представляет собою простую линзу. Комбинируя хроматическую аберрацию линзы с призматической дисперсией, можно получить спектр, фокусированный на пластинке, поставленной наклонно к оси инструмента. Синие лучи фокусируются ближе к линзе, красные — дальше.

Бóльшая часть света, теряющегося при отражении от поверхностей призм, отражается от первых поверхностей системы призм. Преломляющие углы призм подбираются так, чтобы свет с длиной волны, соответствующей середине окончательного спектра, падал на поверхности призм под углом Брюстера (см. главу 1). Свет, входящий в первую призму, частично поляризован при преломлении (см. фиг. 5). Продолжая проходить через систему призм под теми же углами падения и преломления (наименьшего отклонения), световой пучок приближается к состоянию полной поляризации.

В идеале по крайней мере половина света, идущая от коллиматора, достигает объектива камеры, пройдя через такую систему из большого числа призм. На практике, однако, поверхности призм загрязнены соприкосновением с воздухом и пылью, в результате чего угол Брюстера становится не столь определённым. Кроме того, дисперсия, производимая призмой, вызывает отклонения от этого угла, зависящие от положения луча в спектре. Несмотря на эти второстепенные трудности, призмы, установленные под углом Брюстера, дают очень хорошие результаты. Различие в поляризации в разных частях спектра обычно не имеет значения.

Призменные спектрографы высокой дисперсии конструируются так, чтобы давать с хорошей фокусировкой определённый участок спектра, обычно фиолетовый или ультрафиолетовый. Призменные спектрографы, предназначенные для определения радиальных скоростей, должны покрывать малые участки спектра при максимальной резкости, насколько это достижимо для конструктора и изготовителя.



Даже астрономы иногда упускают из виду, что необходимо иметь наилучшую оптику для щелевого инструмента, предназначенного для измерения лучевых скоростей (см. Приложение II). Нужно помнить, что точность измерения положения спектральной линии зависит от распределения света внутри линии.

Так как точность измерений положения линии в спектре не может превосходить 0,02 ширины наиболее тонкой линии, даваемой эмульсией, то искажение линии, производимое расплывчатостью изображения, образованного несовершенными объективами, даже если его величина фотометрически не может быть обнаружена, вызовет заметную ошибку в определении лучевой скорости. Величина ошибки, вызванной дефектами инструмента, будет зависеть от интенсивности и от истинного контура линии.

Дисперсия в 10 Å/*мм* означает, что в одном микроне содержится 0, 01 Å. В мерах лучевых скоростей один ангстрем в синих лучах будет соответствовать примерно 80 *км/сек*. Сдвиг линий на один микрон вдоль спектра эквивалентен движению звезды в пространстве со скоростью 0,8 *км/сек* по отношению к наблюдателю. С помощью лучших современных спектрографов ошибки измерений в случае ярких звёзд доведены до 0,2 *км/сек* в фокусе «кудэ» и достигают 0,5 *км/сек* в кассегрэновском фокусе или с рефрактором. Для такой точности необходимо использовать много спектральных линий и произвести несколько независимых рядов наблюдений. Расхождения между измерениями различных спектральных линий часто достоверны и зависят от самой природы звёзд, а не от ошибок измерений или несовершенства инструмента.

Значительная часть инструментальных ошибок может быть устранена при обработке путём измерения положений сходных линий поглощения у стандартных звёзд; тем не менее, малые поправки обычно делаются более точно, чем большие. Единственный вполне верный путь, это — добиваться получения безупречного *диффракционного* изображения в фокальной плоскости вполне собранного спектрографа.

Визуальная резкость спектральных линий может быть недостаточна. Недостатки оптики сразу скажутся, если коллиматор будет неоднородно освещён светом сравнения или светом от звезды. Призмы сравнения и стандартный источник света должны быть налажены в первые же дни работы инструмента и оставаться уже дальше без изменения.

Положим, что надо построить спектрограф с диффракционной решёткой, обладающий дисперсией в 60 Å/*мм* в ультрафиолетовой части спектра второго порядка; мы должны остановиться на 6-дюймовой плоской решётке с максимальной эффективностью в ультрафиолетовой области спектра второго порядка; фокусное расстояние камеры нужно взять в 6 дюймов; камера поэтому должна иметь относительное отверстие 1/1; коллиматор должен иметь свободное отверстие около пяти дюймов; при применении такой светосильной камеры инструмент можно будет употреблять в главном фокусе рефлектора с относительным отверстием 1/5; ширина щели будет тогда 0,080 *мм*, что практически достаточно, чтобы пропустить весь свет от звезды.

Призмы и решётки со свободным отверстием свыше шести дюймов либо очень дороги, либо малоэффективны, либо и то и другое вместе. Наилучший эффект диффракционный спектрограф даёт, повидимому, при 6-дюймовом отверстии и концентрации света в спектре второго порядка; ширина щели поэтому имеет максимальную величину для данной дисперсии. Наилучшее действие системы призм получается, вероятно, при отверстии в три дюйма; более крупные призмы имеют слишком большую толщу стекла, так что потери света от поглощения чрезмерно велики. Наконец, дисперсионная система с большим свободным отверстием, в случае её применения для получения высокой дисперсии, требует инструмента таких больших размеров, что становится нелегко избежать прогибания, если не применена установка типа «кудэ». Спектрограф, применяемый для изучения лучевых скоростей, должен быть совершенно свободен от прогибов. Призменные спектрографы должны иметь термостатическую рубашку вокруг всего инструмента во избежание расширения или сжатия металлических частей и изменения угла наклона призм.

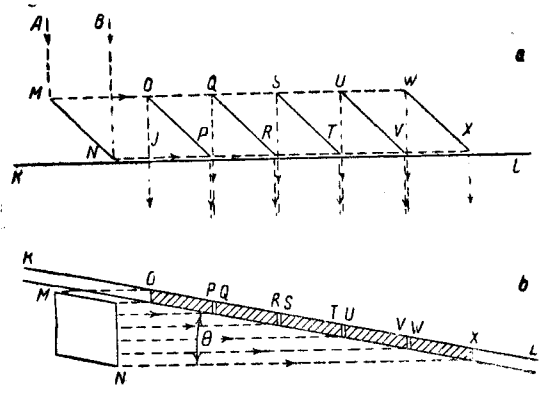


Спектрограф с высокой дисперсией, недавно построенный на Маунт Вилсон, обладает прямо идеальным оптическим устройством. В центре кривизны сферического зеркала помещается 6-дюймовая плоская решётка, изготовленная Вудом и рассчитанная для концентрации красного света в спектре первого порядка и фиолетового — в спектре второго порядка. Радиус кривизны сферического зеркала настолько велик, что коррекционная пластинка для улучшения изображения, как в камере Шмидта, не нужна. Сферическая аберрация при 6-дюймовом отверстии со светосилой меньше 1/9 уже не заметна. Поэтому лучи различных цветов, выходящие из решётки в любых направлениях, собираются в фокус, лежащий на сферической поверхности. Система идентична с изображённой на фиг. 47 с той лишь разницей, что здесь отверстие мало́ по сравнению с фокусным расстоянием. Кассеты, постоянно находящиеся в фокусе, могут быть расположены по всей сферической фокальной поверхности; они готовы к зарядке в любой момент. Пожалуй, единственное, чем можно было бы ещё дополнить инструмент, это — набор сменных решёток, допускающих получение максимальной эффективности в любой области спектра. Камера сравнительно мало светосильна, но при использовании максимальной дисперсии, как в данном случае, не существует иного способа для получения с помощью решётки желаемой большой линейной дисперсии (2,9 Å/*мм*).

## «РЕЗАТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ»

Боуэн предложил и удачно применил остроумное приспособление для направления света звезды в щель. Щель может вместить при среднем качестве изображений лишь около одной пятой части изображения звезды. Боуэн предложил поставить маленькие зеркальца, каждое шириною со щель, для отражения звёздного света в щель (фиг. 67). Изображение звезды таким образом разде-

ляется на много одинаковых полосок. Каждая полоска света падает на отдельное зеркальце. Зеркальца расположены вдоль щели и имеют такой наклон, что отражённые ими полоски света укладываются конец к концу вдоль щели. Хотя весь свет от звезды тогда войдёт в щель, изображение спектра сильно расширяется. Для компенсации этого Боуэн далее помещает сильную ци-




Фиг. 67. Боуэновский «резатель изображений».

*KL* — щель спектрографа; *MN* — зеркало, поставленное под углом 45° и предназначенное только для отклонения пучка света *AB*, идущего от телескопа под прямым углом; оно заставляет его скользить по поверхности щели. Зеркало *MN* может выключаться путём поворачивания самого спектрографа на прямой угол на трубе телескопа. *OP*, *QR* и т. д. — зеркальца, почти параллельные друг другу, расположенные таким образом, чтобы направлять свет от звезды через щель. Изображение звезды при плохих атмосферных условиях будет иметь диаметр, примерно равный *AB* или *JP*. Всё приспособление меньше кончика обыкновенного карандаша.

линдрическую линзу непосредственно перед фотографической пластинкой. Задача этой линзы — снова сжать растянутый спектр в узкую и более яркую полоску.

На практике «*резатель изображений*» Боуэна обеспечивает выигрыш в 2—7 раз в зависимости от качества изображений.

Приспособление особенно важно для фотографирования спектров слабых туманностей со значительной поверхностью. «Резатель изображений» полезен главным образом при относительном отверстии 1/15 или при ещё более



длинном фокусе при комбинациях вроде «кудэ» или Кассэгрена. При большем относительном отверстии зеркальца должны иметь ширину всего в несколько сотых миллиметра, так что почти невозможно будет как следует изготовить и отрегулировать их. Кроме того, такие малые зеркала вызовут серьёзные потери света из-за дифракции.

Боуэновский «резатель изображений» вовсе теряет смысл при наибольших относительных отверстиях. Камера Шмидта при относительном отверстии 1/0,6, работающая с чрезвычайно высокой угловой дисперсией, уже сосредоточивает столько энергии на единице площади эмульсии, сколько вообще возможно. Для работы с высокой дисперсией, однако, «резатель изображений» представляет единственное известное пока эффективное решение.

## НЕБУЛЯРНЫЕ СПЕКТРОГРАФЫ

Спектрограф, специально сконструированный для фотографирования туманностей, должен быть как можно более светосильным, так как поверхностная яркость этих объектов очень мала. Такой спектрограф обычно характеризуется очень низкой дисперсией, порядка 300 — 1 000 Å/*мм*. При конструировании наиболее быстро работающего небулярного спектрографа надо учитывать влияние многих факторов. Под термино м «наиболее быстро работающий» надо понимать спектр ограф, который допускает фотографирование спектра ночного неба за приемлемый промежуток времени. Ночное небо ставит предел небулярной фотографии. В случае звёзд и при наилучшем качестве изображений увеличение фокусного расстояния телескопа распределяет на боль шую площадь свет фона неба, без того, однако, чтобы распределять таким же образом свет звёзд, и потому световой контраст увеличивается; более слабые звёзды становятся доступными при простом удлинении экспозиции. Но туманности, будучи по существу светящимися поверхностями, подобно фону неба, будут распределяться на большую площадь наравне с фоном неба, становясь соответ-

ственно бледнее, и потому относительные контрасты останутся неизменными. Таким образом, при небулярной спектроскопии существует определённый предел проницающей силы спектрографа.

Если изображение галактики в главном фокусе телескопа имеет диаметр в 0,5 *мм* и если весь её свет превращается в спектр приблизительно такой же площади на фотографической пластинке, то спектрограф, при отсутствии потерь, вызываемых инструментом, конечно, зарегистрирует такую же плотность, как и при прямой фотографии. Величина туманности в лучах всех цветов будет сильно уменьшена камерой, но зато различные цвета будут развёрнуты в спектр.

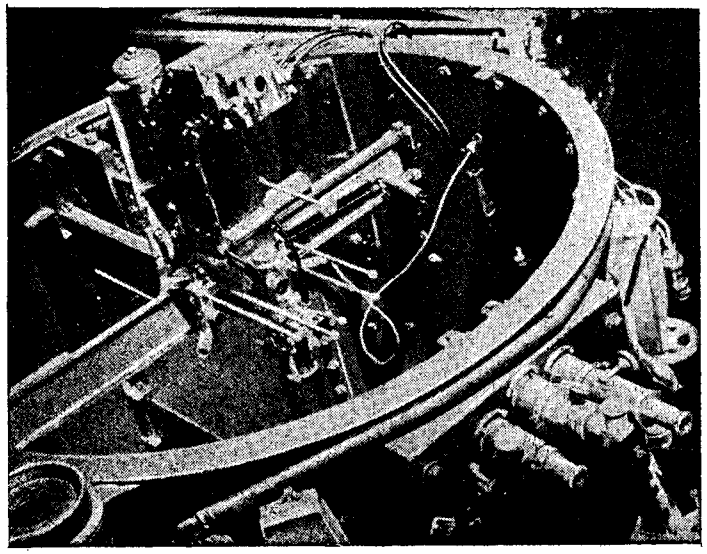
Переходя к более слабым галактикам, мы найдём, что их изображения становятся всё меньше и меньше в фокальной плоскости данного телескопа. Начиная с определённого момента, весь свет от туманности уже проходит через щель, и поэтому для более слабых галактик самые светосильные камеры не нужны. Так, например, небулярный спектрограф Мэйолла на Ликской обсерватории работает с объективом со светосилой 1/1,3, подходящей для более слабых звёздных скоплений и галактик (фиг. 68, 69). С другой стороны, для фотографирования протяжённых объектов, вроде светящихся волокнистых туманностей в Млечном Пути, или сходных туманностей в ближайших галактиках выгодно пользоваться ещё более светосильными камерами, для того чтобы стало возможно применение максимальной ширины щели, а следовательно, и получение большего количества света.

Туманности и галактики могут быть невидимы для глаза на поверхности щели; равным образом и слабые звёзды, спектры которых желательно сфотографировать, могут быть за пределами зрения. Поэтому инструмент обычно гидируется по видимым звёздам достаточной яркости. Мэйолловский инструмент ориентируется так, чтобы свет от предварительно подобранных опорных звёзд вошёл в щель, откуда прямоугольная призма и система линз направляют его в глаз. Чтобы быть уверенным, что невидимый предмет тоже на щели, нужно определить на непосредственной фотографии позиционный



угол ведущей звезды по отношению к объекту и линейное расстояние ведущей звезды от объекта.

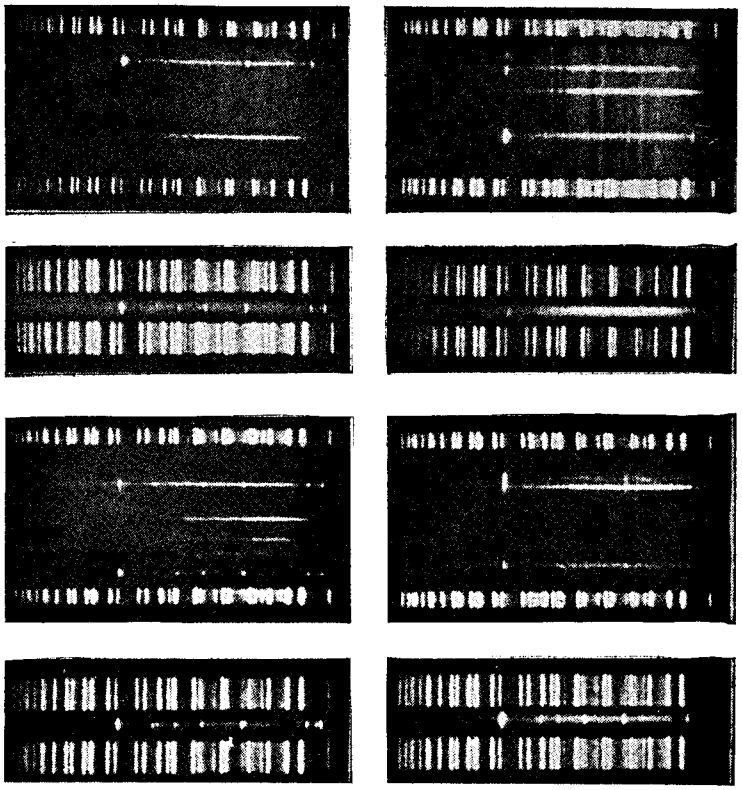
На Иерксской обсерватории применялся особый тип спектрографа, построенный специально для исследования туманностей и свечения ночного неба. Телескоп с постоянным относительным отверстием, независимо от своего



Фиг. 68. Небулярный спектрограф Мэйолла для ультрафиолетовой области, установленный в главном фокусе 36-дюймового рефлектора Кроссли на Ликской обсерватории.

размера, не может повысить концентрацию света туманности на щели спектрографа. Хотя телескоп с вдвое бóльшим диаметром отверстия и собирает вчетверо больше света, изображение туманности в его вдвое более удалённом фокусе будет распространено на вчетверо бóльшую площадь. В действительности концентрация света на фотографической пластинке спектрографа будет зависеть даже не от относительного отверстия телескопа,

а от относительного отверстия объектива камеры. Так, если спектрограф имеет относительное отверстие 1/1, а относительное отверстие телескопа 1/5, то комбинация будет работать с быстротой камеры со светосилой 1/1. У иерксского небулярного спектрографа объектив телескопа не



Фиг. 69. Типичные спектры эмиссионных конденсаций в спиральной туманности.

Увеличено в 11 раз с оригинальных негативов, на которых линейная дисперсия при λ 3950 Å составляла 304 Å/*мм*.

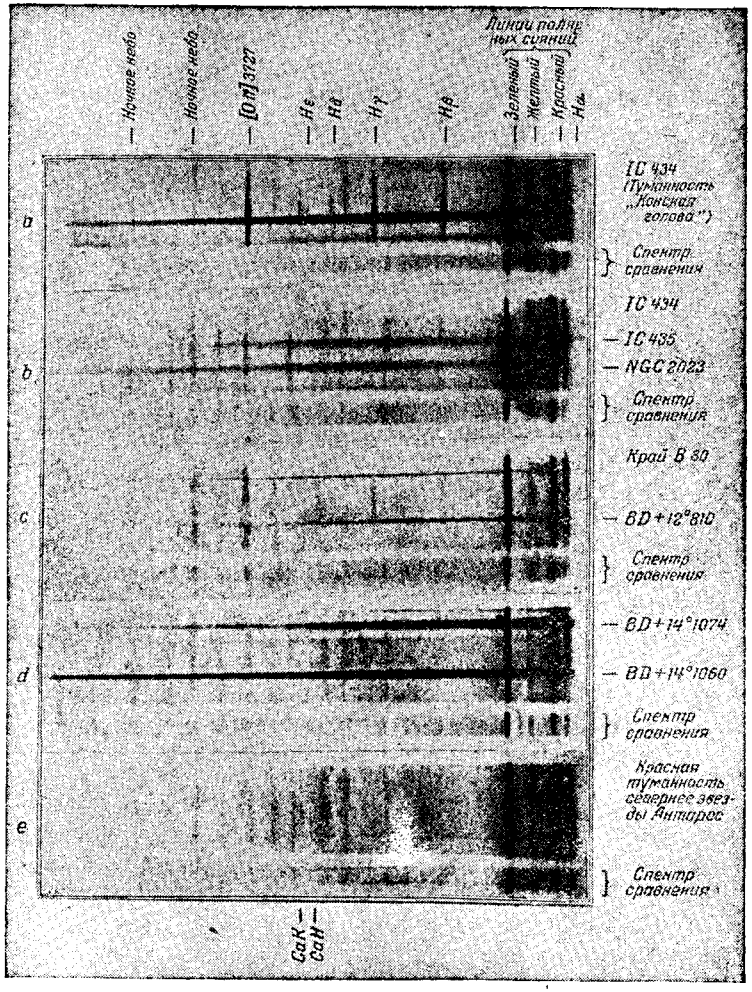


используется вовсе. Такими спектрографами без телескопа пользовался много лет назад В. М. Слайфер.

В первоначальном иерксском спектрографе щель помещалась у верхнего конца 40-дюймового рефрактора снаружи трубы, а призма была установлена на нижнем конце трубы перед светосильной камерой Шмидта. При таком удалении щели коллиматорный объектив не нужен для требующейся в данном случае отчётливости. Если спроектировать призму назад через щель, она покроет на небе определённую угловую поверхность. Обратно, весь свет, проходящий от этой поверхности через щель, входит в призму и в камеру и фотографируется. Быстрота работы всего приспособления зависит от ширины щели и от светосилы объектива камеры, если дело идёт о непрерывных спектрах; если же дело касается спектров испускания, то она будет определяться одной лишь светосилой объектива камеры. При помощи такого оборудования можно фотографировать чрезвычайно слабые туманности (фиг. 70).

Второй инструмент, основанный на том же принципе, был построен в 1938 г. на Маунт Лок, в Тексасе (фиг. 71). Небо отражается зеркалом $M_2$ кверху, на зеркало $M_1$. Второе зеркало отражает свет обратно в комбинацию призмы с камерой, помещающейся на полярной оси. Любая часть неба может быть приведена в поле зрения инструмента просто поворачиванием полярной оси по прямому восхождению и зеркала $M_2$ по склонению. Часовой механизм на полярной оси точно удерживает избранный участок в поле зрения в течение экспозиции, а мелкие исправления делаются с помощью небольшого телескопа-гида. Зеркало $M_1$ обращено к южной стороне неба. Щель инструмента находится приблизительно в 45 *м* от камеры в отличие от иерксского инструмента, где расстояние до щели составляет 17,5 *м*. Большая длина имеет то преимущество, что при ней выделяется меньший участок неба; она удобна для исследования меньших объектов (6 минут дуги).

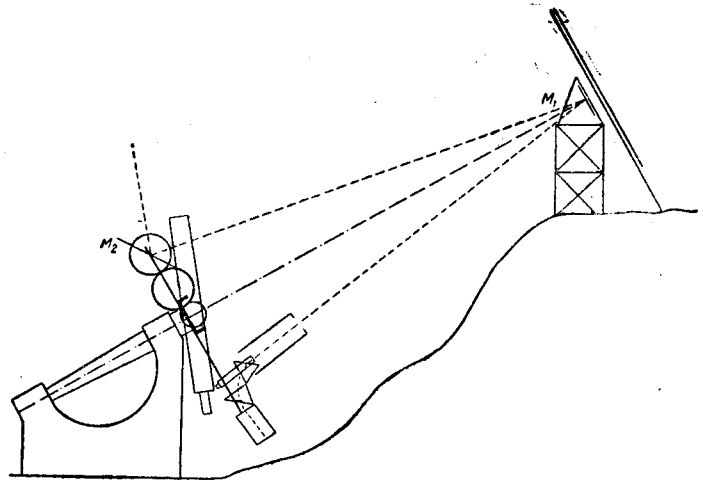
Мы несколько раз упоминали о нужде в светосильной камере. Такую камеру мы имеем в системе Шмидта (см. главу 4). Шмидтовская камера в воздухе может ра-




Фиг. 70. Спектры туманностей, сфотографированные с Мак-Дональдовским небулярным спектрографом.
Видны линии полярного сияния, возникающие в земной атмосфере.



ботать удовлетворительно при относительном отверстии до 1/0,6, а в сплошном стекле относительное отверстие может достигать 1/0,35 и даже более, в зависимости от состава стекла. Сплошная камера Шмидта, сделанная из алмаза, имела бы относительное отверстие 1/0,2 и работала бы почти вчетверо быстрее, чем любой из существующих инструментов. Сплошная камера Шмидта работает в $n^2$ раз быстрее (где $n$ — показатель преломления материала), чем самая светосильная камера Шмидта обычной конструкции, т. е. состоящая из корреционной пластинки и зеркала. Кроме того, несмотря на большую светосилу, сплошная камера Шмидта превосходит обычную камеру Шмидта отчётливостью изображений. Сплошная камера Шмидта может применяться только для спектроскопии, поскольку первоначальное преломление лучей, входящих в неё, сопровождается дисперсией. Это затруднение можно обойти путём более сложной конструкции. В сплошных камерах Шмидта фотографическая пластинка должна быть приклеена (иммергирована) к стеклу в течение экспозиции.




Фиг. 71. Схема Мак-Дональдовского небулярного спектрографа.

Для небулярной спектроскопии использованы путём переконструирования объективы микроскопов ввиду их большого относительного отверстия. Объектив Рейтона, это — объектив микроскопа, используемый как объектив камеры при относительном отверстии около 1/0,6; фотографическая пластинка почти касается линзы. Объектив Брейси, это — объектив микроскопа с масляной иммерсией, имеющий относительное отверстие 1/0,35. На время экспозиции фотографическая пластинка должна быть приклеена к поверхности объектива слоем кедрового масла или керосина.

## ТЕНДЕНЦИИ В СПЕКТРОСКОПИИ

До последних лет почти все спектроскопические исследования производились в синей и визуальной частях спектра. Лишь в последнем десятилетии начались систематические попытки распространить наши познания на инфракрасный конец спектра. Фотографические материалы для инфракрасных лучей гораздо менее чувствительны, чем панхроматические или ортохроматические материалы. Плёнки для близких инфракрасных лучей обычно более чувствительны, чем плёнки для далёких инфракрасных лучей. Сравнение чувствительности плёнок можно произвести с помощью стандартного источника, путём измерения абсолютной чувствительности по количеству энергии, поглощённой на один ангстрем спектра.

В некоторых случаях удалось продвинуться в инфракрасных лучах до 13 000 Å, но лишь при фотографировании Солнца. Имеются стандартные материалы, позволяющие снимать до 12 000 Å. Эмульсия типа *I* — *Z*, охватывающая интервал от 10 000 до 12 000 Å, менее чувствительна, чем обычные материалы, на целые 10 звёздных величин, т. е. приблизительно в 10 000 раз. Чувствительность материалов для фотографирования в инфракрасных лучах и чувствительность панхроматических материалов к красным лучам могут быть значительно повышены посредством гиперсенсибилизации. Путём купания инфракрасной эмульсии в аммиачной ванне и



последующего возможно более быстрого высушивания можно выиграть одну звёздную величину и даже более по сравнению с необработанной эмульсией.

В случае долгих экспозиций в синей части спектра, продолжающихся много часов, пластинки, считающиеся обычно малочувствительными, могут превзойти по общему фотографическому эффекту пластинки, обычно считающиеся высокочувствительными. Так, например, эмульсия «Истмен Процесс» — малочувствительный материал с высокой разрешающей способностью — в меньшей степени отступает от закона обратной пропорциональности, чем наиболее высокочувствительные пластинки для синих лучей. Поэтому, если на той и на другой эмульсии с многочасовой экспозицией снимается один и тот же слабый источник света, пластинка «Процесс» даёт бóльшую фотографическую плотность и гораздо более высокое разрешение.

При любых астрономических наблюдениях предел для слабых объектов определяется вуалью от неба, которая, в конце концов, заставляет нас прекращать экспозицию. Безнадёжно пытаться изучать объект, поверхностная яркость которого в лучах изучаемой длины волны менее одной шестой (или около того) яркости неба (при таком контрасте небо + объект практически перестают отличаться от одного только неба). Свет фона неба при отсутствии Луны и сумерек в главной своей части возникает от постоянного полярного сияния; остальное производится светом звёзд, зодиакальным светом и противосиянием. Можно принять, что яркость неба составляет 25,6 звёздной величины с квадратной секунды дуги, а его свет несколько синее солнечного.

Направление развития спектроскопии с введением более чувствительных фотографических материалов, более эффективных инструментов и методов наблюдения идёт в сторону достижения всё большего и большего спектрального разрешения при данной звёздной величине, или при данном разрешении, — в сторону получения спектров более слабых звёзд, чем раньше. Теперь мы открываем на звёздах явления, которые раньше могли наблюдать только на Солнце. Астрономы-спектроскописты

требуют телескопов всё большего и большего отверстия; завершение строительства 200-дюймового рефлектора будет означать поэтому эпоху в астрофизике.

Нанесение на оптические поверхности слоя, устраняющего отражение, скоро станет для астрономов совершенно обычным (см. Приложение I). Астрономы Ликской обсерватории уже достигли хороших результатов путём покрытия таким слоем объективов своих спектрографов. Астрономы могут также ожидать улучшения спектроскопических эмульсий и общего усовершенствования инструментов. Новые оптические материалы и новая техника обеспечат возможность получения для спектрофотометрических исследований больших участков спектров при достаточной их резкости.

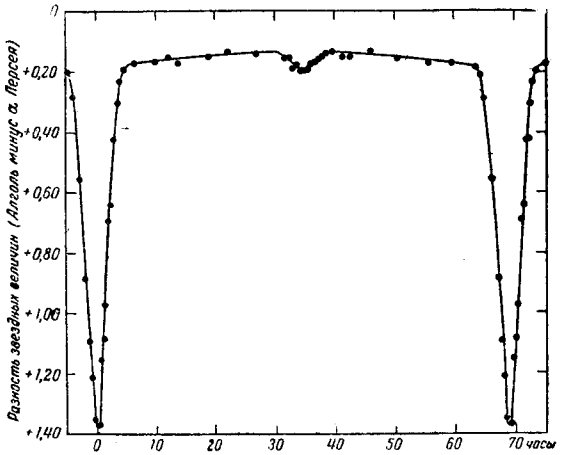
# 6

# ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТА

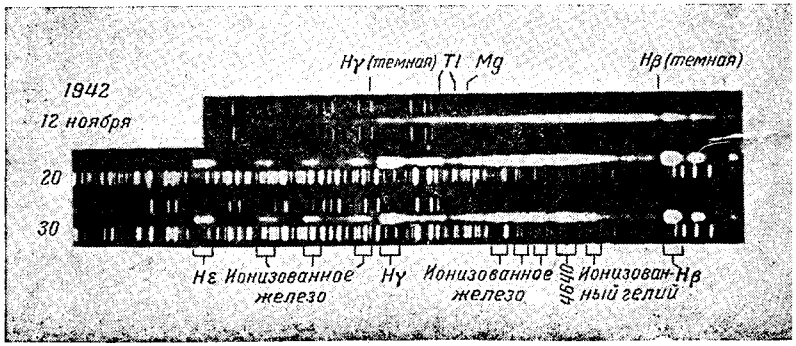
Точные измерения количества и качества света звёзд снабжают нас основными данными, помогающими выяснению размеров, массы, расстояний, температур и состава звёзд и их атмосфер. Так, например, изменение блеска звезды, кажущейся нам одиночной, может показать, что это в действительности система из двух звёзд, обращающихся друг около друга, светящих вместе в периоды максимума блеска, но располагающихся по лучу зрения и затмевающих одна другую в периоды минимума блеска. Если измерения интенсивности света отложить по одной оси, а время — по другой, то мы получим кривую изменения блеска переменной звезды, как на фиг. 72. Точное знание формы этой кривой скажет нам очень многое о природе и продолжительности затмения, а отсюда, при знании спектра, мы можем получить не только размеры и форму орбит, по которым две звезды обращаются вокруг общего центра тяжести, но с помощью законов динамики также и относительные массы и даже действительные размеры и форму каждой из составляющих системы.

Если мы измерим энергию, излучаемую данной звездой в лучах различного цвета или длины волны, можно будет определить температуру излучающей поверхности. При помощи простого сравнения знакомых лабораторных спектров отдельных элементов с линиями звёздного спектра (фиг. 73) мы можем открыть химический состав и физическое состояние атмосферы звезды. Более того,

зная состояние поверхности и делая некоторые теоретические предположения, мы можем довольно верно судить о физических условиях в недрах звезды. Во всех таких случаях надёжность конечных выводов зависит




Фиг. 72. Фотоэлектрическая кривая блеска Алголя.



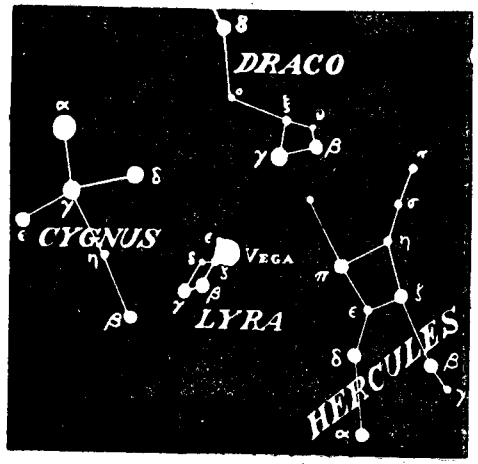

Фиг. 73. Спектр Nova Puppis.

**Три последовательных спектра показывают изменения в «новой» звезде с 1 до 30 ноября 1942 г. Яркие линии над спектром и под спектром—лабораторные линии сравнения.**



от точности, с которой мы можем измерить количество радиации, получаемой нами от звезды.

Измерение света звёзд, известное под названием звёздной фотометрии, несомненно, началось при первых попытках составления карты неба. Древние астрономы Гиппарх и Птолемей произвольно разбили звёзды, видимые невооружённым глазом, на шесть классов, или




Фиг. 74. Группа созвездий вокруг созвездия Лиры с обозначениями звёзд по системе Байера.

Приводим звёздные величины некоторых звёзд:

| | | | |
|---|---|---|---|
| α Cygnus | $1^m,3$, | γ Draco | $2^m,1$, |
| γ Cygnus | $2^m,3$, | β Draco | $2^m,8$, |
| δ Cygnus | $2^m,8$, | δ Draco | $3^m,0$, |
| γ Lyra | $3^m,2$, | ξ Draco | $3^m,7$, |
| | | ε Hercules | $3^m,8$, |
| | | ν Draco | $4^m,2$, |
| | | ο Draco | $4^m,6$. |

«звёздных величин», начиная с самых ярких, названных звёздами первой величины, и до самых слабых, едва видимых глазом, которые были отнесены к шестой величине. С 1603 г. астрономы пользовались системой номенклатуры Байера, в которой звёзды группируются в созвездия и обозначаются буквами греческого алфавита, приблизительно в порядке убывания блеска. Так, самая

яркая звезда в созвездии обычно обозначается греческой буквой альфа (α), следующая по яркости — бета (β) и т. д. (фиг. 74).

Позднее, когда было открыто, что многие звёзды не сохраняют всё время один и тот же блеск, был дан толчок к более точному определению звёздных величин.

Ещё позднее изучение цвета дало средство для определения температуры звёзд *). Наконец, появилась спектрофотометрия, или подробный анализ количества света в отдельных цветах, т. е. при различных длинах волн, и таким образом стало возможным изучать физические состояния небесных объектов на основе теорий строения атома. На каждой ступени развития вводили новые инструменты и более тонкие методы, стараясь точнее определять количество и качество света, получаемого от небесного объекта.

## ШКАЛА ЗВЁЗДНЫХ ВЕЛИЧИН

Грубые ступени блеска, принятые Гиппархом и Птолемеем, послужили основой для обозначения блеска звёзд, но шкала звёздных величин, применяемая ныне, была предложена лишь недавно. В 1830 г. Джон Гершель установил, что звезда первой величины по классификации Гиппарха и Птолемея примерно в 100 раз ярче звезды шестой величины; далее, он выяснил, что в принятом ими произвольном ряде довольно хорошо сохраняется постоянное отношение яркостей, именно, что звезда первой величины в 2,5 раза ярче звезды второй величины; звезда второй величины в 2,5 раза ярче звезды третьей величины и т. д. Это постоянное отношение не случайно; оно объясняется Фехнеровским законом ощущений, согласно которому различия в интенсивностях, составляющие одну и ту же часть исходной интенсивности, воспринимаются органами чувств как одинаковые,

*) Цвет тела, испускающего свет, связан с температурой излучающей поверхности. Так, например, при нагревании куска железа мы наблюдаем сначала тёмнокрасное каление, затем яркокрасное, жёлтое и т. д., до конечного голубовато-белого каления.



независимо от величины исходной интенсивности. Так, например, глазу столь же легко обнаружить 10-процентное изменение света светляка, как и 10-процентное изменение яркости Солнца.

Погсон предложил в 1850 г. принять «световое отношение» между звёздными величинами за 2,5119, т. е. за корень пятой степени из 100, и подогнать шкалу величин таким образом, чтобы принятый стандартный блеск звезды шестой величины соответствовал блеску звёзд шестой величины в лучших каталогах того времени *). Шкала звёздных величин теперь распространена

*) В настоящее время пользуются следующим соотношением:

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = -0{,}4\ (m_1 - m_2),$$

где $I_1$ и $I_2$ — блеск сравниваемых звёзд, $m_1$ и $m_2$ — их звёздные величины, знак «—» обозначает, что при уменьшении блеска звёздная величина увеличивается. Так, для некоторой звезды, в 40 раз более яркой, чем звезда шестой величины, мы имеем:

$$\lg 40 = -0{,}4\ (m - 6),$$

откуда

$$m = 2,$$

т. е. эта звезда относится ко второй звёздной величине.

Точно так же, если две звезды различаются на полвеличины, мы находим отношение их блеска следующим образом:

$$\lg \frac{I_1}{I_2} = -0{,}4\ (0{,}5)$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = 1{,}5849.$$

Это означает, что одна звезда на 58,49% ярче другой.

Так как сложение звёздных величин соответствует перемножению отношений блеска, мы можем написать:

Разница в 1 звёздную величину соответствует изменению блеска в 2,5 раза (2,5119).

Разница в 2 звёздных величины соответствует изменению блеска в 6,3 раза (6,3076).

Разница в 3 звёздных величины соответствует изменению блеска в 16 раз (15,849).

Разница в 4 звёздных величины соответствует изменению блеска в 40 раз (39,81).

на звёзды и планеты ярче первой величины и слабее шестой. Так, Венера бывает в 100 раз ярче звезды первой величины и относится тогда к минус четвёртой величине; звезда двадцать первой величины в миллион раз слабее звезды шестой величины.

## ВИЗУАЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Человеческий глаз — изменчивый инструмент. Он обладает способностью приспособляться к различным интенсивностям света, лежащим в широких пределах, и способностью обнаруживать малые колебания яркости при любой интенсивности освещения. Естественно поэтому, что глаз должен был стать первым инструментом, применявшимся в звёздной фотометрии. Без помощи телескопа и при наилучшем состоянии неба, вдали от света, пыли и дыма города очень хороший глаз может видеть звёзды даже слабее 6-й величины. С помощью величайших телескопов мы в состоянии видеть звёзды до 18-й величины. Это в самом деле замечательное достижение, если мы подумаем о том, что даже яркие звёзды светят очень слабо. Свет, получаемый нами от звезды первой величины, соответствует свету, получаемому от нормальной свечи, помещённой на расстоянии более 800 *м*, а свет от звезды 6-й величины соответствует той же свече на расстоянии почти 11 *км*. Такие звёзды считаются относительно яркими. Звёзды, с которыми имеет дело астроном, обычно во много раз слабее этого. Звезда 21-й величины — примерно фотографический предел проницающей силы 100-дюймового телескопа — соответствует по интенсивности своего света стандартной свече, находящейся на расстоянии 10 900 *км*. Для контраста укажем, что Солнце — ближайшая к нам звезда — относится к минус двадцать седьмой звёздной величине (—27). Наблюдаемый диапазон звёздных яркостей поэтому порядка 48 звёздных величин, что соответствует отношению в шестнадцать миллионов миллионов миллионов раз (16 000 000 000 000 000 000), или изменению блеска, получающемуся при удалении источника света, находящегося на расстоянии 1 *м* от наблюдателя, на расстояние в 4 000 000 *км*. Это огромное различие в блеске между нашим Солнцем и наиболее слабыми из наблюдаемых звёзд главным образом зависит от различия в расстоянии.

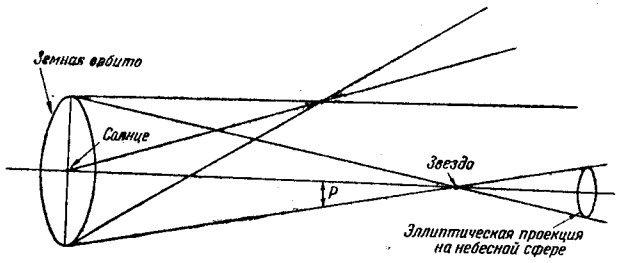
Солнце кажется ярче звёзд потому, что оно сравнительно близко к нам, а звёзды, гораздо более яркие, чем наше Солнце, но далёкие от нас, не видны простым глазом. Точно так же две звезды могут казаться одинаково яркими лишь потому, что одна из них, хотя в действительности и более яркая, дальше от нас, чем другая. Для того чтобы иметь возможность сравнивать истинный блеск звёзд, мы должны вычислить, какой они имели бы блеск, находясь от нас все на одинаковом расстоянии. По международному соглашению за та-

Разница в 5 звёздных величин соответствует изменению блеска в 100 раз (100,00).

Если звезда увеличивается в блеске, скажем, на 13 величин (от слабой звезды 12-й величины до звезды минус первой величины), мы имеем:

| Складывается | | | | Умножается |
|---|---|---|---|---|
| 5 зв. вел. | → | 100-кратное изменение | | |
| 5 » » | → | 100- » | » | |
| 3 » » | → | 16- » | » | |
| 13 зв. вел. | → | 160 000-кратное изменение блеска. | | |






Фиг. 75. Годичный параллакс.

При движении Земли по своей орбите вокруг Солнца звёзды описывают сходные орбиты-проекции, совершая видимое движение по небесной сфере. Максимальное смещение данной звезды есть мера её расстояния.

кое нормальное расстояние принято 10 парсек *). Звёздная величина, которую имела бы звезда, рассматриваемая с этого расстояния, называется абсолютной звёздной величиной.

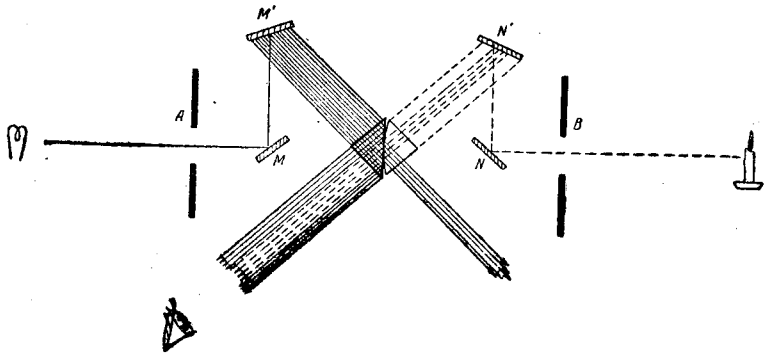
Измерения видимых звёздных величин принадлежат к числу самых основных и фундаментальных измерений во всей астрономии. Простейший способ состоит в определении относительной величины посредством визуального сравнения с данной стандартной звездой. При некотором навыке нетрудно заметить разницу между двумя звёздами, составляющую всего 0,1 звёздной величины. Много наблюдателей в разных местах земного шара ведёт обширные визуальные наблюдения над изменениями блеска переменных звёзд.

Точность таких наблюдений сильно возрастает, если глаз при оценке блеска пользуется помощью какого-либо *фотометра*. В своей лабораторной форме (фиг. 76) этот инструмент измеряет количество света, падающего на поверхность, помещённую перпендикулярно к пучку света. Оптическое устройство несколько изменяется в разных инструментах, но основной принцип остаётся одинаковым. На фиг. 76 свету от нормальной свечи, с одной стороны, и свету источника, интенсивность которого хотят измерить, —с другой, дают упасть на две поверхности, *A* и *B*. Обе эти поверхности наблюдаются одновременно при помощи отражающих зеркал *M* и *N* и особым образом изготовленного стеклянного кубика. Этот кубик состоит из двух стеклянных призм, склеенных в центре таким образом, чтобы свет от зеркала *N'* проходил через склеенный участок поверхности и далее в телескоп, служащий для наблюдения. Свет от зеркала *M'* попадает в телескоп после отражения от несклеенных участков ле-

*) Слово «парсек» обозначает расстояние, соответствующее параллаксу в одну секунду дуги. На расстоянии в десять парсеков параллакс будет равен одной десятой секунды дуги (фиг. 75); это расстояние составит 308 700 000 000 000 *км*. Парсек равен 206 265 астрономическим единицам или 3,258 светового года. Астрономическая единица есть среднее расстояние от Земли до Солнца (149 500 000 *км*). Световой год—9 460 000 000 000 *км*—расстояние, которое один квант света пройдёт в течение одного года, двигаясь со скоростью в 300 000 *км/сек*.



вой половины кубика. Поэтому глаз видит в телескоп поле, центральная часть которого освещена светом правого источника, а внешняя часть — светом левого источника. Когда освещение, даваемое обоими источниками, становится в точности одинаковым, резкая граница между двумя изображениями исчезает. В лаборатории свет от стандартного источника, в нашем случае от нормальной




Фиг. 76. Фотометр.

свечи, может поддерживаться постоянным путём сохранения неизменного расстояния до источника, тогда как расстояние до источника, интенсивность которого подлежит измерению, может изменяться до тех пор, пока обе части поля зрения не будут иметь одинаковой интенсивности. Если теперь измерить относительные расстояния от *A* и *B* до соответственных источников света, можно вычислить относительные интенсивности, так как интенсивность света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния до его источника *).

*) Если точечный источник света поместить в центре полой сферы, то внутренняя поверхность этой сферы будет освещена светом, интенсивность которого зависит от источника и радиуса сферы. Если источник остаётся неизменным, а радиус сферы удвоится, прежнее количество света распределится по поверхности вчетверо большей, так как поверхность шара пропорциональна квадрату его радиуса; поэтому количество света на единицу поверхности изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

При звёздной фотометрии этот метод должен быть изменён так, чтобы было возможно сравнение изображения звезды непосредственно в фокусе объектива телескопа с изображением искусственной звезды, обычно маленького отверстия, освещённого стандартным источником. Такое сравнение труднее, чем в случае поверхностного фотометра, описанного выше, так как трудно сравнивать интенсивность двух точечных источников, а также потому, что изображение искусственной звезды никогда не выглядит в точности так, как изображение настоящей звезды, образованное телескопом. В астрономической практике часто бывает не нужно сравнивать звезду со стандартным источником света; вместо этого может оказаться достаточным сравнивать звезду с другой звездой, величина которой установлена ранее, и таким образом определить относительную величину. Такая относительная фотометрия, с практической точки зрения, много проще, так как она не вносит ошибок, могущих произойти от изменений интенсивности стандартной лампы, а также потому, что она делает излишним сравнение между собою стандартных источников света, которыми пользуются различные наблюдатели. До некоторой степени она исключает влияние поглощения света в земной атмосфере.

Если две звезды, подлежащие сравнению, расположены не столь близко одна к другой на небе, чтобы видеть их одновременно в поле зрения телескопа, их свет может быть так отражён при помощи соответственным образом поставленных зеркал, чтобы они оказались в одном поле. Так как теперь мы не можем изменять расстояния до источника, как в лабораторном фотометре, мы должны уравнять оба изображения путём введения в пучок лучей одной звезды калиброванного клина, плотность которого изменяется либо непрерывно, либо ступенчато от полной прозрачности до полного поглощения. Клин может быть куском тёмного стекла, отшлифованного в форме настоящего клина, так что один конец его будет пропускать максимальное количество света, другой — почти на 100% непрозрачен. Он может состоять из куска стекла, на которое осаждён путём



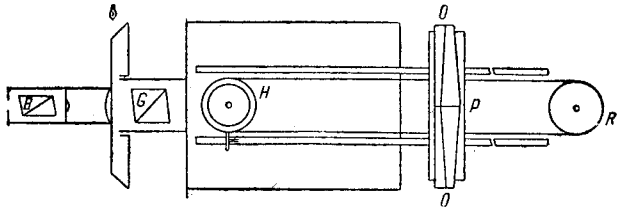
испарения или распыления какой-либо металл, таким образом, чтобы дать желаемое изменение прозрачности. Но всегда клин должен быть строго нейтрален, т. е. он должен изменять интенсивность так, чтобы нисколько не повлиять на цвет звёздного изображения при переходе от тонкого конца к толстому. Это условие выполнить нелегко.

Если такой клин предварительно калиброван, то можно определить относительную интенсивность одного источника в долях другого, просто подвигая клин в пучке света, идущем от более яркого источника, пока не будет достигнуто равенство освещения.

Другой способ уравнения интенсивности света от двух звёзд состоит в применении какого-либо поляризующего приспособления (см. главу 1). Свет одной звезды направляется через поляризующую часть инструмента и поэтому, пройдя её, обладает лишь одной плоскостью колебаний. Если второй поляризующий элемент поместить на пути этого поляризованного пучка, то количество света, которое пройдёт через второй элемент, называемый анализатором, будет изменяться от нуля до максимума при поворачивании одного поляризующего элемента относительно другого. Количество прошедшего света может быть калибровано в зависимости от угла поворота.

Если разница блеска между стандартом и звездой, звёздную величину которой мы желаем определить, велика, то удобно пользоваться промежуточным приспособлением для снижения блеска до некоторой постоянной величины. Можно уменьшить отверстие объектива телескопа для наблюдения более яркого объекта; можно ввести вращающийся сектор в конус лучей вблизи фокуса телескопа. Помещая диафрагму с меньшим отверстием на объектив телескопа, мы уменьшим фактическую светособирающую силу телескопа, а вращая сектор, мы путём прерывистого загораживания света уменьшим количество света, идущего в глаз или в фотометр на величину, определяемую отношением угла раскрытия сектора к 360°. Тем или иным способом приближённо уравняв интенсивности света звёзд, мы можем уже воспользо-

ваться клином или иным приспособлением для вполне точного уравнивания. Такие промежуточные методы, влияющие на свет лишь одного из сравниваемых объектов, должны применяться с величайшей осторожностью: как бы ни было удобно дополнительное приспособление, надо остерегаться потери преимущества, состоящего в том, что пучки света от источника сравнения и от не-




Фиг. 77. Т-образный фотометр Гарвардской обсерватории.

Призмы *OPO* движутся вдоль оптической оси при помощи бесконечной цепи, проходящей вокруг *H* и *R*. Этим прибором могут сравниваться звёзды, находящиеся друг от друга на расстоянии от 3′ до 40′.

известного источника проходят одним путём или хотя бы сходными путями.

Меридианный фотометр Пиккеринга и «Т-образный фотометр» могут служить примерами воплощения принципа сходства путей обоих пучков.

В меридианном фотометре свет от любой звезды, находящейся вблизи меридиана, направляется при помощи зеркала в один из двух объективов одинакового отверстия и одинакового фокусного расстояния. Другое зеркало передаёт свет Полярной звезды во второй объектив. Оба пучка проходят через поляризующую призму, через окуляр и через призму Николя, служащую анализатором. При поворачивании анализатора обыкновенный луч от одной звезды и необыкновенный — от другой уравниваются, и отношение блесков определяется путём измерения угла между двумя установками на равенство. Этим способом более 45 000 ярких звёзд, распределённых по всему небу, было сравнено с Полярной звездой; они составляют сеть опорных звёзд, с которыми теперь можно сравнивать другие более слабые звёзды.



Для звёзд, которые отстоят одна от другой менее чем на полградуса, весьма удовлетворительные результаты дала модификация инструмента, известная теперь на Гарвардской обсерватории как «Т-образный фотометр». Лучи от двух звёзд после прохождения через объектив большого телескопа сближаются или раздвигаются при помощи двух ахроматических призм (фиг. 77, *OPO*). Два пучка света проходят затем призму двойного лучепреломления *G*, образуя по два изображения звезды; одно из них обыкновенное, другое необыкновенное. Как и в случае меридианного фотометра, обыкновенное изображение одной звезды сравнивается теперь с необыкновенным изображением другой. Анализатор вращается, пока яркость обоих изображений не сравняется; угол, на который повёрнут анализатор, указывает относительный блеск обеих звёзд. Для проверки можно сравнить вторую пару изображений, а потом повторить весь процесс, перевернув телескоп. Можно также поменять местами оба сравниваемых изображения звёзд, чтобы устранить возможное влияние склонности глаза постоянно видеть левое или правое изображение более ярким.

## ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Мы уже видели в главе 3, что плотность фотографического изображения в первую очередь зависит от продолжительности экспозиции и от интенсивности света, падающего на данную фотографическую пластинку. Поэтому можно определять относительные звёздные величины, измеряя плотность соответственных фотографических изображений. Когда нужны только относительные величины, можно просто сравнить почернение, размер или общий вид изображения нужной звезды со многими изображениями звёзд сравнения, сфотографированных на той же пластинке. Оценка производится визуально, и наблюдатель может после некоторого упражнения оценивать различия между изображениями звёзд с точностью до 0,1 звёздной величины. Если нам известны звёздные величины звёзд сравнения, то величина изучаемой звезды может быть легко вычислена по найденным путём такой

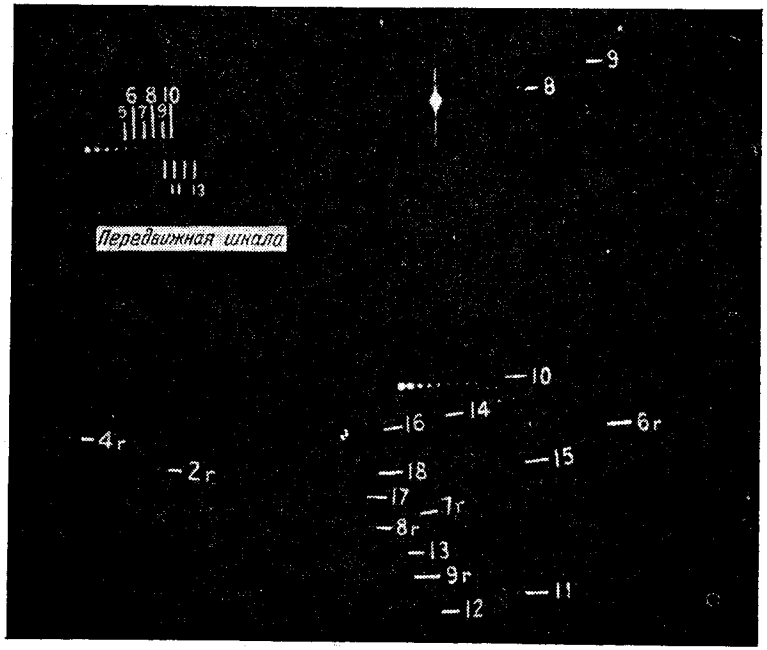
оценки различиям изображений на фотографической пластинке. Если изображения двух сравниваемых звёзд находятся на фотографической пластинке слишком далеко друг от друга, то удобнее прибегнуть к вспомогательной ступенчатой шкале. В этом случае изображение одной звезды сравнивается с одним из изображений ступенчатой шкалы. Затем ступенчатая шкала переносится ко второй звезде и такое же сравнение производится для её изображения. Таким образом сравнение всех изображений производят, расположив их бок-о-бок. Шкала изготовляется путём последовательного ряда экспозиций на одной пластинке; продолжительность экспозиций изменяют в избранном отношении и пластинку слегка передвигают в промежутках между экспозициями. Если изображения шкалы прокалибровать (фиг. 78) по ряду звёзд с известными величинами, то любая неизвестная звёздная величина может быть непосредственно отсчитана по калибровочной кривой. Желательно, чтобы ступенчатая шкала была изготовлена из эмульсии того же сорта и тем же телескопом, что и исследуемые фотографии, для того чтобы качество всех изображений было одинаково.

Основной опорный ряд звёзд, служащий для сравнения всех звёздных величин, расположен вблизи северного полюса неба и называется Северным полярным рядом. Эта область неба расположена в течение всего года благоприятно для наблюдателей северного полушария. Установление величин звёзд Северного полярного ряда потребовало долгого и трудного процесса взаимных проверок, в большинстве своём произведённых на Гарвардской обсерватории и на обсерватории Маунт Вилсон. Звёздные величины, установленные для этой группы звёзд, приняты международным соглашением как стандарт, с которым сравнивают величины всех звёзд.

Для удобства установлены многие вторичные ряды. Они находятся в так называемых избранных областях и гарвардских стандартных областях. Эти участки удобно распределены по всему небу, так что всегда найдётся такой участок вблизи любой области неба, где намечены новые определения звёздных величин,



Обычный путь установления стандартных звёздных величин на некотором участке неба таков. Делается снимок этого участка; непосредственно до или после этого на той же пластинке фотографируется северная полярная область неба. Таким образом фотографии звёзд, под-




Фиг. 78. Переносная ступенчатая шкала, прикладываемая к фотографической пластинке.

Калибрование ступенчатой шкалы производится путём сравнения со звёздами известной величины, каковы, например, нумерованные звёзды Северного полярного ряда на этом рисунке.

лежащих определению, получаются рядом с фотографиями стандартных звёзд Северного полярного ряда. Если избранный участок не слишком изобилует звёздами, то легко распознать стандартные звёзды среди прочих. Иногда оказывается более удобным произвести две после-

довательные экспозиции с полярной области или с участка звёзд, подлежащих определению. Такой приём помогает различить звёзды обеих областей, так как одна из групп звёзд будет представлена двойными изображениями. Фотографирование обоих полей на одной и той же пластинке гарантирует абсолютно тождественную обработку при всех процессах, производимых в фотолаборатории.

Этот способ был бы вполне удовлетворителен, если бы ночное небо было действительно чёрным. Однако на деле это не так, и поэтому фотографические эффекты, вызванные предварительной или последующей засветкой фоном неба, вносят дополнительные ошибки. Когда изображения звёзд, принадлежащих к двум областям неба, получаются последовательно на одной и той же пластинке, слабый свет неба накладывается при второй экспозиции на изображения звёзд той области, которая сфотографирована первой. Повышение плотности изображений звёзд не таково, как повышение плотности фона. Это называется эффектом последующей экспозиции. С другой стороны, изображения второй области создаются на фоне неба, заснятом при первой экспозиции, и поэтому подвергаются влиянию последней. Во избежание вносимых таким образом ошибок, вообще говоря лучше производить экспозиции исследуемого участка и полярной области на двух разных пластинках, особенно когда этот участок очень богат звёздами. При производстве таких сравнительных снимков пластинки должны браться из одной и той же коробки, экспонироваться в одном и том же инструменте в одну и ту же ночь; желательно производить вторую экспозицию непосредственно после первой *). Пластинки должны обрабатываться в фотолаборатории одновременно, как если бы были одной пластинкой, а измерение плотностей должно производиться совершенно одинаковым способом. Даже в этом случае необходимо принимать во внимание изменчивое влияние

*) Предполагается, что пластинки в одной и той же коробке изготовлены из одной и той же партии эмульсии и политы, обработаны и упакованы при совершенно одинаковых условиях.

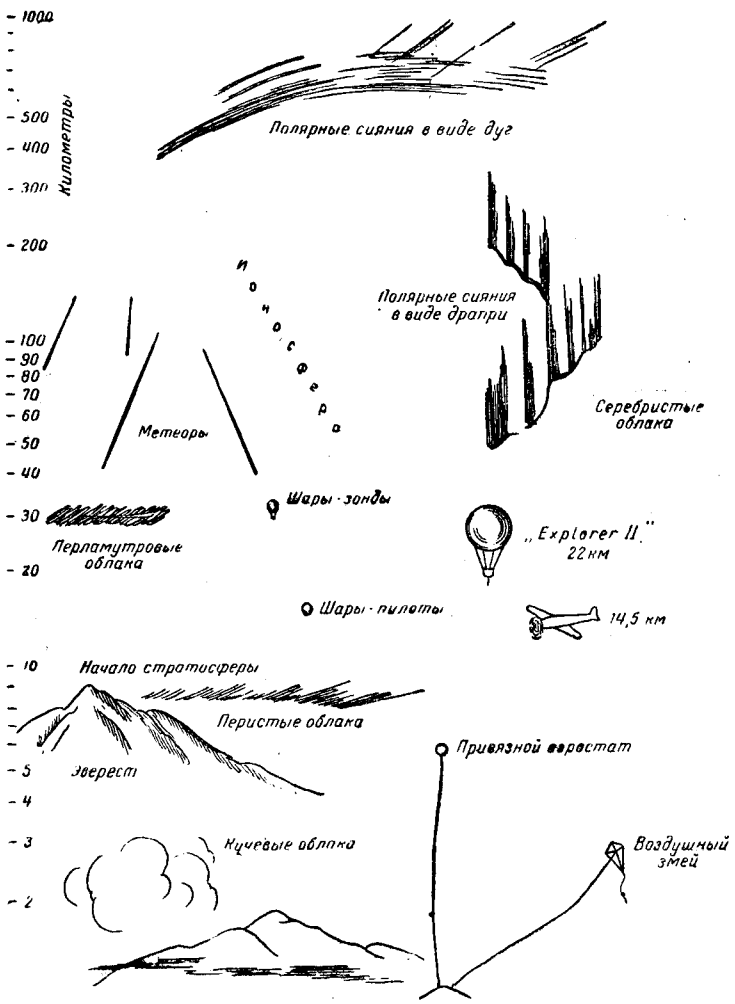


качества изображений, метеорологические условия во время экспозиции (температуру, влажность, ветер) (см. главы 3 и 4), а особенно рассеяние и поглощение света атмосферой.

## ОСЛАБЛЕНИЕ СВЕТА ЗВЁЗД АТМОСФЕРОЙ

Земная атмосфера является в фотометрии как сравнительной, так и абсолютной фактором огромного значения, не поддающимся какому-нибудь влиянию со стороны наблюдателя. Астроном, живущий и работающий на дне атмосферы, с её изменчивым содержанием пыли и влаги, вынужден производить свои наблюдения через эту неспокойную оболочку, действующий слой которой беспрерывно изменяется, по мере того как звезда поднимается к меридиану или опускается к горизонту. Что понимать под высотой атмосферы — дело чисто условное. Известно, что 99% всей массы атмосферы находится в слое толщиной в 20 *км* над земной поверхностью, называемом тропосферой; но разрежённая материя верхних слоёв атмосферы или стратосферы обнаруживает своё существование присутствием полярных сияний (фиг. 80), наблюдаемых до высоты более 1000 *км*. Даже когда нет заметных облаков, свет от небесных тел рассеивается в атмосфере и, кроме того, поглощается её составными частями, которые вырезают не только узкие полосы земных (теллурических) линий, но даже целые участки спектра (фиг. 81). Многие из этих полос поглощения производятся молекулами, разбросанными по всей толще атмосферы, а другие возникают в строго определённых и часто очень тонких слоях. Общее ослабление света звёзд при его прохождении через толщу атмосферы, вызванное и рассеянием и действительным поглощением, называется атмосферной экстинкцией или просто атмосферным поглощением.

В первом приближении атмосферное поглощение изменяется как секанс углового расстояния от зенита. Так, например, если мы начинаем наблюдения над звездой у зенита, то по мере приближения звезды к горизонту свету придётся проходить всё более и более

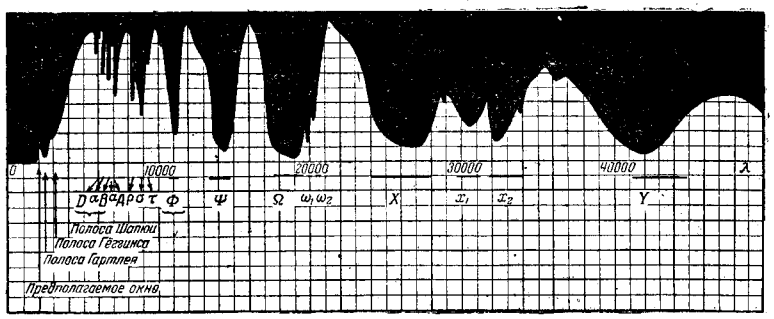



Фиг. 79. Земная атмосфера.

Фиг. 80. Полярное сияние.
Полосы света обычно зелёные, но иногда содержат яркокрасные пятна.

длинный путь через атмосферу. У горизонта действующая толща атмосферы в двадцать раз больше, чем в зените.

Для более точного изучения поглощения мы наблюдаем блеск звезды, сравнивая её время от времени с искусственной звездой сравнения, имеющей постоянный блеск. На основании теоретических соображений мы должны ожидать, что ослабление блеска звезды, выраженное в звёздных величинах, должно быть пропорционально длине пути лучей звезды через атмосферу. Это действительно подтверждается наблюдениями. При-



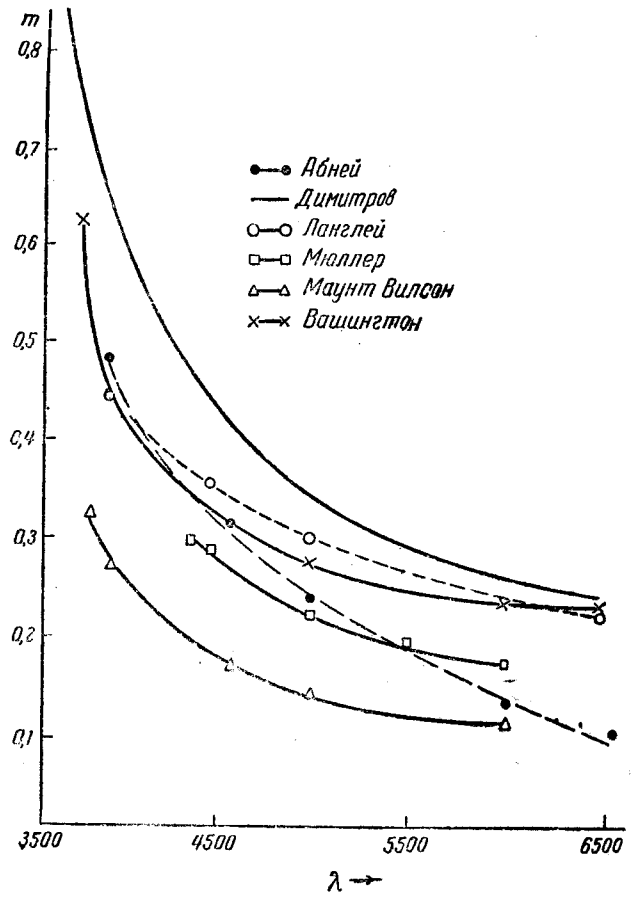

Фиг. 81. Поглощение в земной атмосфере.

нято представлять результаты ряда наблюдений над поглощением в виде графика, на котором найденные измерениями видимые величины звезды откладываются по одной оси, а путь лучей её света через атмосферу — по другой. Легко показать, что длина этого пути пропорциональна секансу зенитного расстояния звезды. Результаты наблюдений обычно располагаются по прямой; наклон этой прямой представляет *коэффициент поглощения*.

С помощью наблюдённой зависимости мы можем исправить любой ряд определений звёздных величин, сделанных без учёта поглощения, путём введения поправки, зависящей от различия зенитных расстояний исследуемого участка и участка звёзд сравнения. Таким путём мы можем исключить большую часть влияния поглощения, конечно, при условии, что прозрачность атмосферы заметно не отклоняется во время экспозиции от средней величины.



Коэффициент поглощения значительно изменяется от одной части спектра к другой (фиг. 82). Его значение




Фиг. 82. Изменения поглощения в зависимости от длины волны.
Приведены результаты, полученные разными наблюдателями на различных обсерваториях.

для фотографических лучей почти вдвое больше, чем для визуальных. Так как обычная фотографическая пла-

стинка чувствительна к широкой области спектра, не вполне правильно применять одну и ту же поправку для звёзд различных температур. К сожалению, невозможно применять различную поправку в зависимости от распределения энергии в каждом спектре. В точной фотометрии это затруднение преодолевают путём использования лишь очень узкой части спектра, применяя специально подобранные пластинки и светофильтры.

После введения поправки на поглощение всё ещё остаётся трудная проблема исключения эффектов, вызываемых обработкой пластинок и отклонениями эмульсии от закона обратной пропорциональности. С того момента, как световые лучи упадут на фотографическую пластинку, температура, влажность и пр. становятся важными факторами, определяющими конечную плотность пластинки. Возраст эмульсии, проявление, фиксирование, промывание и сушка столь же важны для создания определённой плотности готового фотографического изображения, как и химический состав проявителя.

Измерение плотности производится с помощью измерительных инструментов, которые родственны фотометру. Когда они специально приспособлены к измерению плотности на фотографической пластинке, они называются *денситометрами*. Так как во многих из них используется фотоэлектрический метод измерений, мы отложим их описание до того, как познакомимся с фотоэлектрической фотометрией.

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Предельная точность, с которой мы можем фотографически измерять интенсивность света, определяется свойствами, присущими фотографической пластинке; обычно она бывает порядка сотых долей звёздной величины. Кроме того, при фотографировании слабых объектов необходим некоторый промежуток времени, чтобы действие света перешло порог чувствительности и оказало воздействие на эмульсию.

Фотографический процесс не даёт той высокой точности, которая необходима при некоторых фотометрических исследованиях. Для точной звёздной фотометрии и для наблюдений над быстрыми колебаниями блеска переменных звёзд ныне широко применяется *фотоэлемент*. Реакция фотоэлемента мгновенна, а точность, с которой он регистрирует малые различия звёздных величин, много выше точности фотографической пластинки.



Каков принцип устройства фотоэлемента? Когда свет поглощается некоторыми веществами, особенно щелочными металлами, внутри них происходят электрические изменения и из них вылетают электроны, которые создают слабый электрический ток. Сила тока, возбуждённого таким способом, пропорциональна числу квантов света, падающих на чувствительную поверхность или, другими словами, возникающий ток пропорционален интенсивности света (см. главу 1).

Обычный фотоэлемент состоит из стеклянной колбы, из которой выкачан воздух и внутренняя поверхность которой покрыта слоем щелочного металла. В колбе находится вспомогательный электрод, соединённый с положительным полюсом батареи. Отрицательный электрод батареи соединён со слоем щелочного металла. При освещении металлической поверхности создаётся облако выброшенных электронов, которые притягиваются к положительному электроду и захватываются им, замыкая таким образом цепь. Возникающий ток может быть измерен различными способами. Этот тип фотоэлементов называется *вакуумным фотоэлементом*. Для некоторых целей оказались удобнее фотоэлементы, наполненные газом.

Некоторое применение нашли два других типа фотоэлементов. *В селеновом фотоэлементе* фотоэлектрический эффект выражается в изменении проводимости. *Фотоэлемент с запирающим слоем*, лучше всего известный по своему применению в люксметрах, состоит из слоя металла и полупрозрачного полупроводника. Одно из достоинств этого типа элемента состоит в том, что электрический ток возникает в нём без помощи батареи.

При астрономических работах интенсивности света обычно очень малы и сила тока в цепи фотоэлемента также весьма незначительна. Так, например, энергия,

полученная от звезды 6-й величины, приблизительно соответствует 9000 квант в секунду на квадратный сантиметр. Принимая, что каждый квант даёт один электрон, мы получим для фотоэлектрической поверхности в один квадратный сантиметр ток силой в $10^{-15}$ ампер. Хороший гальванометр может измерять ток до $10^{-12}$ ампер, который всё ещё в тысячу раз сильнее тока, вызываемого светом звезды 6-й величины. Но с помощью электрометра мы можем измерять слабые токи до $10^{-18}$ ампер.

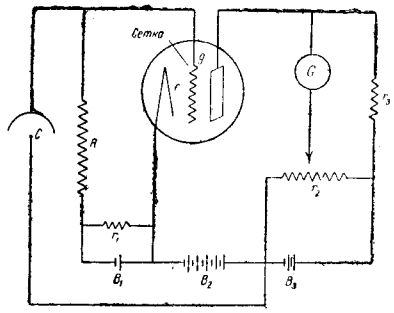
Очевидно, что необходимо применить телескоп для собирания света звезды на фотоэлементе. Однако хороший телескоп для этой цели не нужен. Предположим, что мы работаем с плохим зеркалом. В его фокусе световые лучи от звезды образуют кружок рассеяния, быть может, значительной величины. Фотоэлемент будет работать удовлетворительно пока среднее освещение на всём кружке рассеяния наиболее слабой изучаемой звезды не станет ниже освещения от неба.

Гальванометры и электрометры наивысшей чувствительности могут употребляться лишь в специальных лабораторных условиях. Для работ у телескопа необходимо иметь очень устойчивый инструмент или же достаточно сильный ток, для того чтобы ошибки измерений свелись к минимуму. Некоторые типы электрометров обладают конструкцией, не боящейся толчков, и могут поэтому применяться в главном фокусе телескопа. В этом случае один из электродов фотоэлемента соединяется с парой квадрантов электрометра, а другой — через батарею соединяется с землёй. Когда заземление включается, индикатор электрометра начинает двигаться со скоростью, пропорциональной току от фотоэлемента.

В устройстве более удобном, чем электрометр, применяется усилитель с электронными лампами. Этот тип усилителя ограничен в своём действии нестабильностью, присущей радиолампам, и тем, что колебания первоначального тока фотоэлемента, вызванные «улавливанием» атмосферных помех, также усиливаются вместе с током, который хотят измерить. Другое затруднение при методе усиления состоит в невозможности получить точное и постоянное сопротивление.



Фиг. 83 показывает обычный способ усиления. Батарея $B_1$ накаливает нить $f$ электронной лампы, образуя облако электронов вокруг нити. Эти электроны притягиваются к положительно заряженной пластинке, соединённой с положительным полюсом батареи $B_2$, дающей анодный ток, измеряемый гальванометром $G$. Пока фотоэлемент $C$ находится в темноте, т. е. заслонён от света, этот ток может быть уравновешен вспомогательной батареей $B_3$ и сопротивлением $r_3$, так что гальванометр показывает нуль. Когда свет упадёт на фотоэлемент, возникший фотоэлектрический ток подводится к сопротивлению $R$, а падение потенциала в этом сопротивлении в свою очередь передаётся на сетку $g$, вызывающую изменение в анодном токе. Ввиду того что сетка производит сильный эффект благодаря своей близости к нити, небольшое изменение потенциала сетки соответствует очень большому изменению анодного тока. Так как потенциал сетки зависит от падения света на фотоэлемент, анодный ток служит мерой интенсивности света, падающего на фотоэлемент. Чувствительность цепи зависит от чувствительности гальванометра и от величины сопротивления $R$.

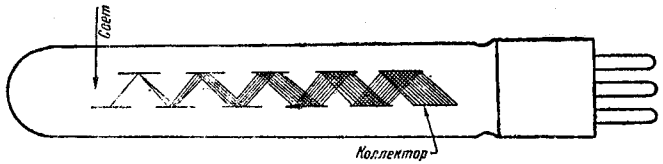



Фиг. 83. Усилитель для фототока.

Продажные гридлики высокого сопротивления делаются до $10^8$ *ом*, но величина сопротивления ограничивается сопротивлением между нитью и сеткой электронной лампы, которое в лампах особого типа достигает $10^{15}$ *ом*. Проволочные реостаты непостоянны и лучшие сопротивления изготовляются путём распыления металлического слоя на кварце, при помощи начерчивания на бумаге тонких линий тушью или карандашом или, наконец, применяя проводящее стекло и даже жидкости, как, например, смеси ксилола со спиртом. Самые строгие

требования, предъявляемые к таким сопротивлениям: свойство сохранять постоянную величину в течение долгого времени, отсутствие поляризации, низкий температурный коэффициент, отсутствие отклонений от закона Ома. Если бы удалось изготовить сопротивления в $10^{15}$ *ом*, то было бы возможно измерять с усилителем столь же слабые токи, как и с лучшими электрометрами, т. е. до $10^{-18}$ ампер.

Для измерения слабых токов нужно исключить все возможные колебания в батареях и защититься от блуждающих помех в фотоэлектрической цепи. На практике в звёздной фотометрии соединения между фотоэлементом




Фиг. 84. Схематическое изображение электронного умножителя.

Электроны, освобождённые светом на первой светочувствительной поверхности, фокусируются при помощи электрического и магнитного полей и разгоняются от одной поверхности к другой, так что конечный выход в несколько миллионов раз превосходит начальный ток, возбуждённый фотоэлектрическим действием светового пучка.

и сеткой усилителя защищают кожухом, из которого выкачан воздух. Но даже такие предосторожности часто бывают недостаточны, так что ламповый усилитель всё ещё оставляет желать лучшего.

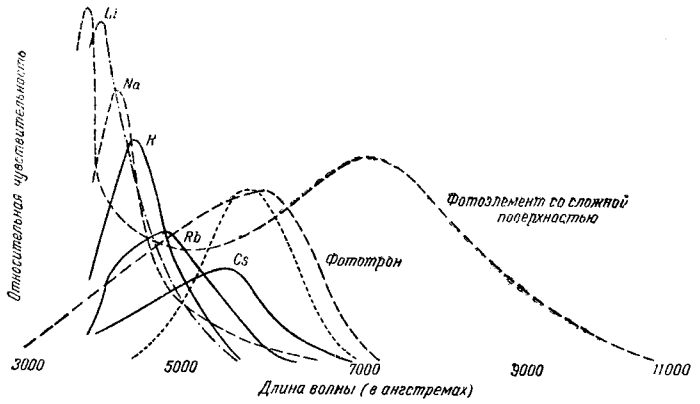
Шаг вперёд на пути устранения блуждающих помех представляет создание электронного умножителя, который изображён на фиг. 84. Первичные электроны, вылетающие под действием света из чувствительной поверхности, фокусируются посредством электрического и магнитного полей на второй поверхности, специально очувствлённой к вторичному излучению. Первичные электроны, ударяясь о вторую поверхность, освобождают вторичные электроны, и первичный ток усиливается, начиная с небольшого приращения и до десятикратного против первоначальной величины. Покинув вторую поверхность, электроны снова фокусируются на третьей поверхности, где число электронов опять увеличивается, и т. д. После десяти и более таких последовательных процессов электроны поступают в коллектор, дающий уже ток, усиленный в очень много раз. Самое важное преимущество этого устройства заключается в том, что оно допускает гораздо более совершенную защиту, так как все описанные десять ступеней могут быть заключены в одну трубку, из которой выкачан воздух. Преимущество простоты и малого размера аппарата немного теряется от того, что этот именно тип чувствительной поверхности обладает очень высоким коэффициентом термоэлектронной эмиссии, так что небольшое изменение температуры сопровождается большими изменениями фона или спонтанной эмиссии, даже когда трубка не подвергается действию света. Это затруднение частично устраняют, держа весь аппарат при очень низкой температуре.



Умножитель Гарвардской обсерватории имеет чувствительную поверхность, состоящую из слоя цезия поверх слоя окиси цезия на основном слое серебра. Эта поверхность из Cs—CsO—Ag обладает максимальной вторичной эмиссией в случае электронной бомбардировки при 400—600 вольтах. Усиление на одну ступень составляет при этом от 8 до 10 раз. Необходимо поэтому, чтобы электроды были присоединены ко всё более и более высоким потенциалам.

Так как полный разбор вопроса о светочувствительных поверхностях выходит за пределы этой главы, заметим лишь, что изготовление хорошей чувствительной поверхности представляет нечто вроде особого искусства и что успех зависит от состава слоя металла, от его толщины и от очувствления слоя тлеющим разрядом в присутствии водорода или паров других веществ. Спектральная чувствительность, например, изменяется в зависимости от употреблённого щелочного металла, от ультрафиолетовой области в случае лития и до жёлтой области в случае цезия (фиг. 85). По мере смещения максимума эмиссии выход электронов в области максимума снижается, а область чувствительности рас-

пространяется по всё более широкой полосе спектра. В смешанных поверхностях чувствительность увеличивается по сравнению с чистым металлом, а спектральный диапазон увеличивается настолько, что в некоторых случаях не только охватывает видимую часть спектра, но и распространяется в инфракрасную область.




Фиг. 85. Спектральная чувствительность различных фотоэлементов.

В последние годы фотоэлемент стал очень распространённым инструментом в астрономии. Это, однако, не единственнный тип приёмника, способный дать фотометрические результаты очень высокой точности. Исключительно чувствительные *термоэлементы* также применялись в фокальной плоскости больших рефлекторов для измерения радиации звёзд и планет. Правильно сконструированный термоэлемент регистрирует всю энергию, испускаемую во всех длинах волн, пропускаемых атмосферой.

Звёздные величины, измеряемые с помощью термоэлемента, называются *радиометрическими звёздными величинами*. Они имеют большое значение как основные данные для изучения недр звёзд. В отличие от термоэлемента фотоэлемент ограничен более узкой частью звёздного спектра.



## ФОТОМЕТРЫ И ДЕНСИТОМЕТРЫ

Астроному часто желательно точно измерить в лаборатории относительные звёздные величины для изображений звёзд, зарегистрированных на его фотографиях. В другом случае ему может быть нужен правильно прокалиброванный спектр звезды, на основании которого он намерен определить со всей возможной точностью распределение энергии по спектру. Искусственная шкала изображений звёзд или фотометрический клин дадут лишь приближённые результаты. Для действительно точных работ ему придётся опять обратиться к фотоэлементу или термоэлементу. И тот, и другой применяются с поразительным успехом для измерений фотографических пластинок. Мы опишем здесь некоторые типичные инструменты, в состав которых входит фотоэлемент. Ясно, впрочем, что термоэлемент может заменить фотоэлемент без коренных изменений в общей конструкции аппарата.

Прежде всего рассмотрим тот вид инструмента, который особенно подходит для измерения изображений на фотографической пластинке. Электрическая лампа, питаемая аккумулятором, посылает свой свет через маленькое круглое отверстие в объектив микроскопа. Назначение последнего — сфокусировать это отверстие на фотографической пластинке. Прошедший сквозь пластинку свет собирается вторым микроскопическим объективом и направляется на светочувствительную поверхность фотоэлемента. Возникающий фотоэлектрический ток усиливается и затем измеряется чувствительным гальванометром.

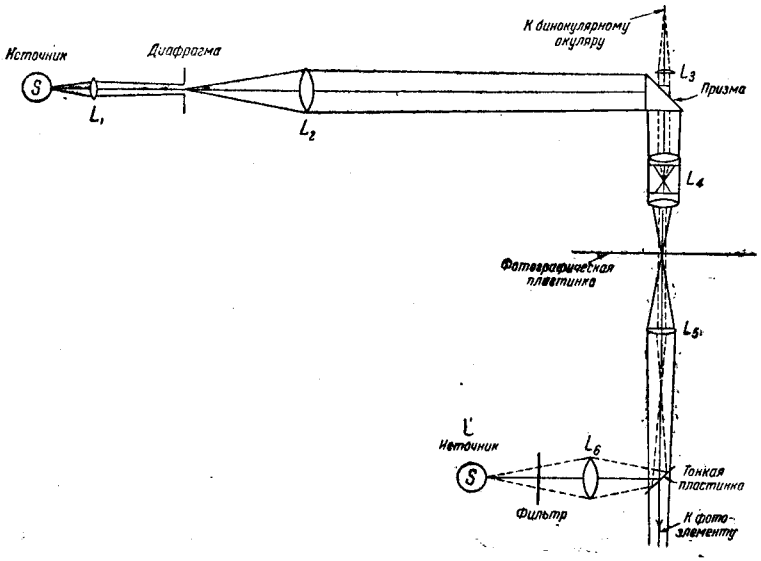
Вуаль на пластинке, или фон неба, будет пропускать некоторое количество света и будет зарегистрирована соответственным отклонением гальванометра. Если подвинуть пластинку таким образом, чтобы в световой пучок попало изображение звезды, наложенное на постоянный фон неба, то зёрна серебра, составляющие изображение звезды, поглотят, а также рассеют падающий свет, так что на этот раз будет исключена бóльшая часть его. Как только изображение звезды вступает в световой пучок, отклонение гальванометра регистрирует ослабление фототока. Очевидно, изменение в интенсив-

ности света и соответствующее изменение показания гальванометра будут зависеть от размера и плотности изображения звезды, а последнее в свою очередь зависит от звёздной величины звезды. Разница в показаниях гальванометра для средней вуали фона пластинки и для изображения звезды будет мерой поглощения света, вызванного наличием изображения звезды. На практике отклонения гальванометра для многих изображений звёзд известной звёздной величины регистрируются и используются для калибровки, подобно тому как звёзды известной величины используются для калибрования изображений ступенчатой шкалы.

Без вспомогательных приспособлений очень трудно объективно точно измерять различия в интенсивности света. Переводя интенсивности в электрические токи, мы упрощаем нашу задачу: нам остаётся лишь точно измерить маленькие различия электрических токов. Хорошим примером такого аппарата может служить счётная машина для звёзд Мак-Каски-Скотта (фиг. 86), которая работает почти автоматически. В этой машине фотографическая пластинка медленно передвигается закономерным образом так, что каждая её часть поочерёдно попадает в «щупающий» пучок света. Свет от освещённого места пластинки затем падает на фотоэлемент. Производимый последним ток передаётся в усилитель, причём различные импульсы, производимые звёздами различных звёздных величин, будут заставлять срабатывать только соответствующие реле усилителя. Всякий раз как реле срабатывает, это регистрируется счётчиком. Таким образом, число звёздных изображений, величины которых укладываются в определённые заранее установленные пределы, автоматически регистрируется, по мере того как пластинка подвигается через пучок.

Мы упоминали выше, что фотоэлемент или термоэлемент могут применяться также для регистрации изменений интенсивности в зависимости от длины волны на сфотографированном спектре. Инструмент, применяющийся для этой цели, называется микроденситометром или микрофотометром. В этом инструменте фотографическая пластинка, на которой снят спектр звёзд, медленно передвигается через обследующий её щелевидный пучок света при помощи точного винта. К этому винту системой шестерён присоединён барабан или вал, покрытый светочувствительной бумагой, так что при каждом передвижении пластинки барабан поворачивается на со-

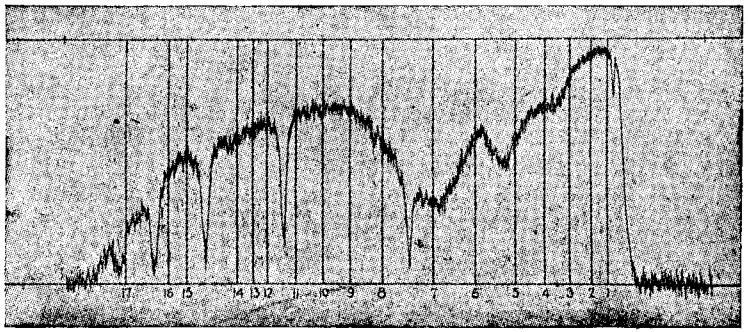





Фиг. 86. Оптическая система машины для автоматического подсчёта звёзд.

ответственную долю окружности. При передвижении спектрограммы интенсивность проходящего света меняется в зависимости от плотности той части спектра, которая находится как раз под изображением щели. Соответственно этому меняется и ток, даваемый принимающим фотоэлементом. Опять-таки при помощи усилителя ничтожно слабые токи от фотоэлемента усиливаются и передаются в гальванометр, отклонения которого показывают соответственные изменения в плотности спектра. Вспомогательный пучок света отражается от колеблющегося зеркальца гальванометра и фокусируется на светочувствительную фотографическую бумагу на вращаю-

щемся барабане. Таким путём непрерывные изменения плотностей спектра регистрируются в виде записи, показанной на фиг. 87. Путём изменения передачи шестерён между винтом, движущим фотографическую пластинку, и барабаном, несущим на себе чувствительную фотографическую бумагу, можно в любой степени увеличить длину регистрограмм для данного спектра. При подходящем подборе увеличения малейшие изменения в плотности спектра или в распределении яркостей в спектральной линии могут быть точно изучены во всех подробностях.



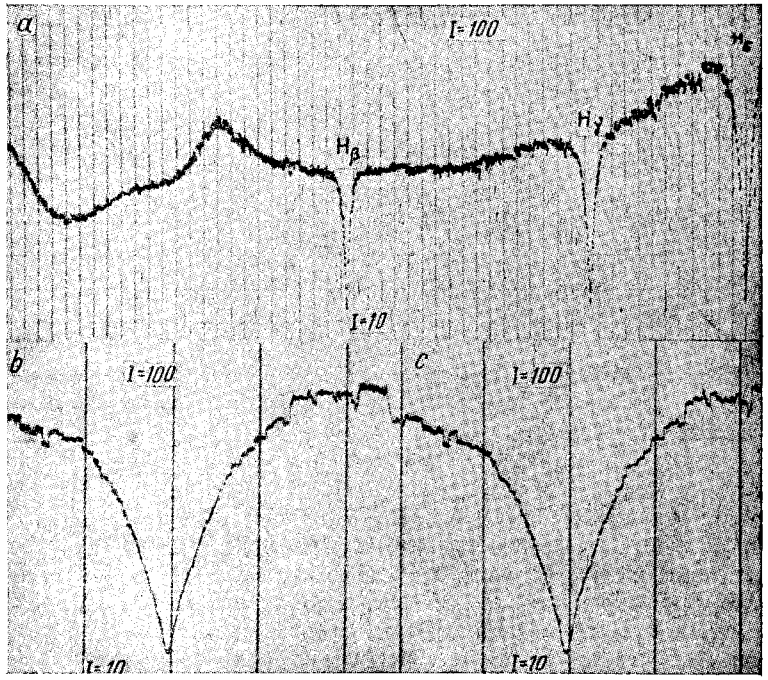
Фиг. 87. Запись звёздного спектра, полученная с помощью микроденситометра.

Хотя и фотоэлемент и термоэлемент применялись успешно, нужно отметить, что в общем фотоэлемент обещает в будущем больше. Более медленная реакция термоэлемента мешает быстрому «ощупыванию» спектра.

После того как получены записи микроденситометра, ещё остаётся трудная задача — перевести все изменения фототока в изменения интенсивности света. Это требует тщательной стандартизации пластинок, различных характеристических кривых и значительного труда. Хороший тип микроденситометра, работающего теперь в Мичиганском университете, пользуется сбалансированной



цепью между «ощупывающей» щелью на спектре и второй такой же щелью на стандартизующем фотографическом клине. Поперечное движение клина определяет движу-




Фиг. 88. Запись, полученная с помощью микрофотометра, непосредственно показывающего интенсивность.

щуюся точку света на записи и регистрирует на бумаге изменения интенсивности (фиг. 88). Спектр таким образом рассказывает всю свою историю, уже понятную астрофизику без какого-либо дальнейшего перевода.

# 7

# ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

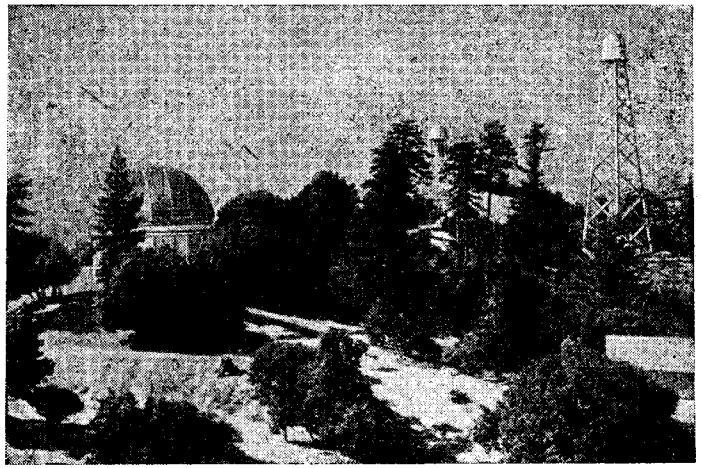
Изучение Солнца столь важно для астрофизики, что на устройство наиболее эффективных инструментов для этой цели положили много сил. Современное развитие этой области столь интересно, что мы посвятим всю последующую главу методам изучения поверхности и атмосферы Солнца. Полное изложение предмета здесь невозможно, но мы всё же получим из этого краткого обзора некоторое представление о специальной технике исследований Солнца.

Систематическое изучение явлений на Солнце иногда целиком занимает всю программу целой обсерватории. Аббот в Смитсонианском институте в течение многих лет изучал суммарную радиацию Солнца в разных пунктах Америки и заграницей. Специальные солнечные обсерватории работают на Обсерватории Мак-Мэз-Хулберт Мичиганского университета, в Медоне (Франция), на Пик-дю-Миди в Пиринеях, в Кодайканале (Индия) и в Канберре (Австралия). Изучение Солнца составляет большую часть программы работ на Маунт Вилсон, в Гринвиче, Утрехте, Гарварде и в других местах. Поэтому Солнце находится под почти постоянным наблюдением.

Можно наблюдать Солнце непосредственно при помощи визуального или фотографического телескопа, с соблюдением разумных предосторожностей. Ни в коем



случае нельзя пытаться наблюдать Солнце глазом, без применения специальных окуляров, которых существует несколько типов. Изображение Солнца, образованное, например, 12-дюймовым зеркалом с фокусным расстоянием в 2,5 *м* имеет приблизительно 2,5 *см* в диаметре. Полевая линза окуляра с фокусным расстоянием в 2,5 *см* соберёт большую часть этой энергии, которая с помощью

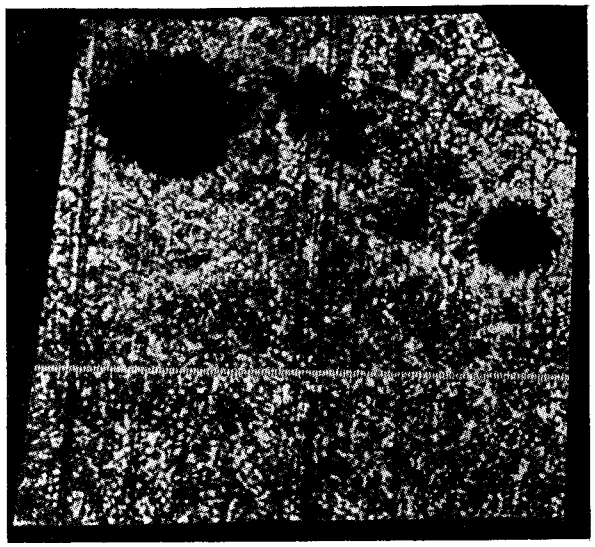


Фиг. 89. 18-метровый и 45-метровый башенные телескопы обсерватории Маунт Вилсон.

глазной линзы сконцентрируется в выходном зрачке около 3 *мм* диаметром. Кусок дерева, поднесённый к выходному зрачку, легко загорается.

Применяя окуляр как проекционный объектив, можно получить превосходные фотографии Солнца. При этом получается двойная выгода — увеличение изображения и удлинение экспозиции. Профессиональные астрономы часто производят этим способом фотографирование Солнца для систематической регистрации солнечных пятен. Иногда прямые фотографии делаются в фокальной плоскости

зеркала или линзы с очень большим фокусным расстоянием. Малое относительное отверстие объектива делает



Фиг. 90. Фотография участка солнечной поверхности с пятнами (в крупном масштабе).
Снято на высококонтрастной эмульсии Кодалит.

продолжительность экспозиции приемлемой при употреблении мелкозернистых пластинок.

## СПЕКТРОГЕЛИОГРАФ

Спектрогелиограф послужил средством для обогащения физики Солнца подробными наблюдениями над Солнцем в монохроматических лучах водорода и кальция, а в последнее время — и гелия. Газы в верхних слоях солнечной атмосферы холоднее, чем солнечная поверхность (фотосфера), но и они на нашу земную мерку чрезвычайно горячи. Эти газы можно фотографировать, используя их

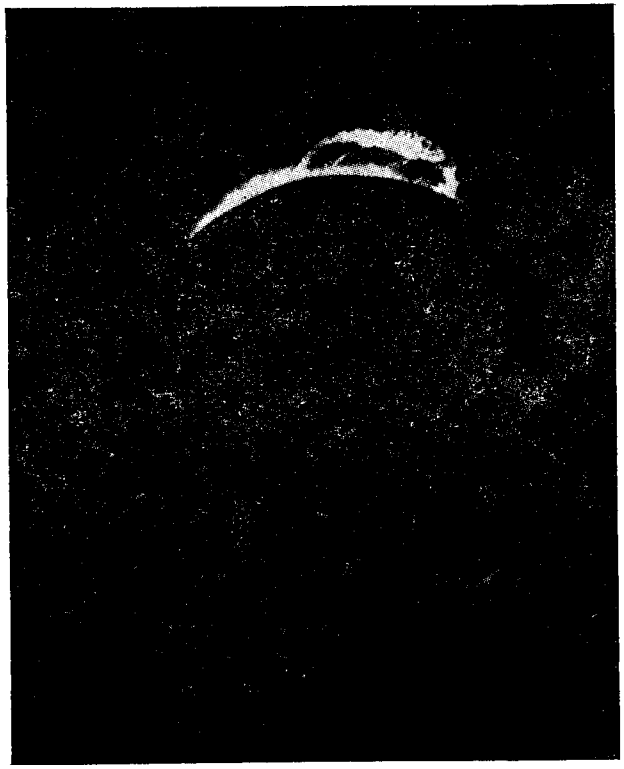


собственный свет. Задача инструмента сводится к тому, чтобы сильно ослабить свет фотосферы, не ослабляя заметно свет солнечной атмосферы. Чтобы подойти к этой проблеме, надо знать, что излучение верхних слоёв солнечной атмосферы в основном состоит из монохроматических линий излучения, расположенных тут и там по всему спектру. Так, например, свет солнечных протуберанцев состоит из лучей, имеющих длины волн: 6563 Å ($H_\alpha$, или фраунгоферова линия C), 4861 Å ($H_\beta$, или фраунгоферова линия F), 4340 Å ($H_\gamma$, или фраунгоферова линия G), кальциевых линий H и K и т. д. В то же время фотосфера Солнца испускает непрерывный спектр. Поэтому интенсивность излучения массы водорода, висящей над поверхностью Солнца, можно колоссально увеличить по отношению к фотосфере просто, если дать доступ к фотографической пластинке только лучам с длиной волны, близкой к одной из наиболее сильных водородных линий.

Такой отбор достигается путём получения спектра части солнечной поверхности и пропускания через вторую щель нужного узкого участка этого спектра. Таким путём можно видеть лишь узкую полоску солнечной поверхности. Остаётся лишь задача получения фотографии целого солнечного диска в свете избранной маленькой части спектра. Эта проблема была разрешена Хэлом и Деландром в 1890 г., когда они, независимо один от другого, изобрели спектрогелиограф.

При помощи целостата и объектива свет от Солнца собирается в фокус на щели, располагающейся поперёк круглого изображения Солнца. Следовательно, только свет от узкой части изображения поверхности Солнца может в каждый данный момент пройти к остальным частям инструмента. Свет от щели коллимируется первым вогнутым зеркалом и попадает на отражающую дифракционную решётку. Свет от решётки падает на второе зеркало и фокусируется в спектр на второй щели. Решётка наклонена таким образом, чтобы направить на вторую щель определённый цвет. Свет, прошедший через

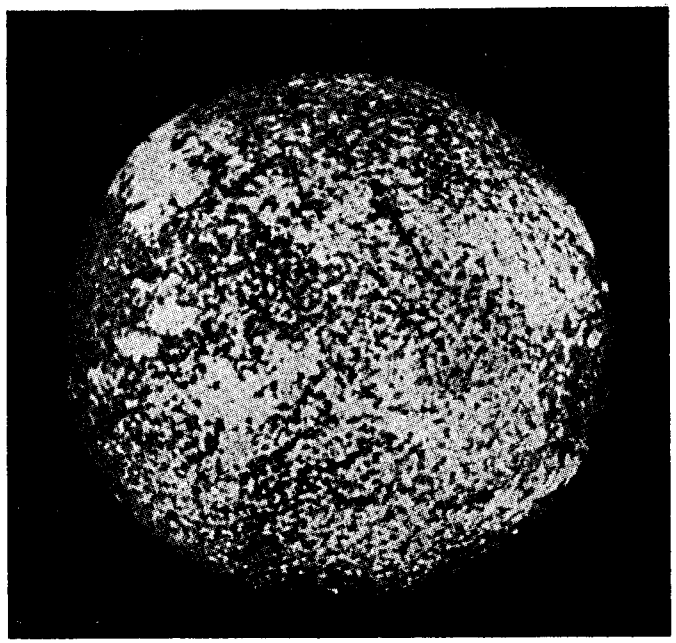
вторую щель, есть не что иное, как изображение исходной части солнечной поверхности, созданное очень узким участком спектра. В спектрогелиографе фотографическая



Фиг. 91. Протуберанец, сфотографированный во время полного солнечного затмения.

пластинка помещается очень близко за второй щелью, имеющей обычно ширину около 0,1 *мм*, где она регистрирует полоску солнечного изображения. Для того чтобы построить всё круглое изображение Солнца, в современном спектрогелиографе первая и вторая щели передвигаются поперёк солнечного диска. На неподвижной фотографии ряды полосок прилегают друг к другу, образуя полное изображение Солнца в монохроматических лучах избранной длины волны. Заслоняя солнечное изображение чёрным диском, можно получить фотографию сравнительно слабых протуберанцев вне солнечного диска.

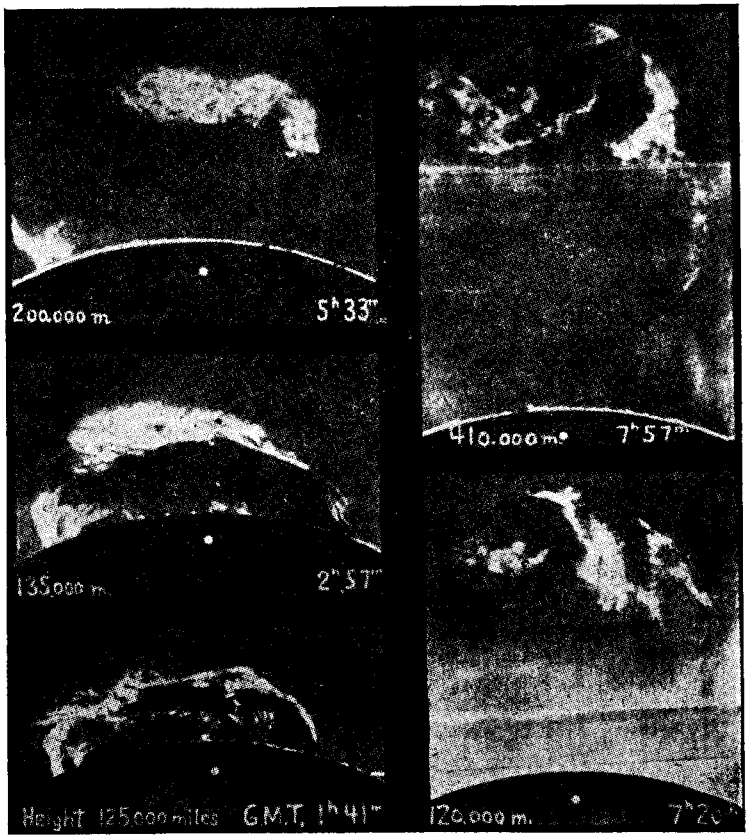




Фиг. 92. Солнце в лучах кальция.

Ни одна из фраунгоферовых линий поглощения в солнечном спектре в действительности не является совершенно тёмной. Даже самая тёмная часть линии поглощения только кажется тёмной рядом с прилегающим непрерывным спектром. Поэтому можно предполагать, что спектрогелиограммы возможны в монохроматических

лучах любого элемента. На практике, однако, обычно лишь линии водорода и кальция достаточно широки и




Фиг. 93. Эруптивный протуберанец в различные моменты своего подъёма над солнечной поверхностью.
Белое пятнышко показывает размер Земли.

ярки, чтобы дать удовлетворительный результат. Но в самые последние годы Д'Азамбужа в Медоне получены удачные фотографии в лучах инфракрасной линии гелия.



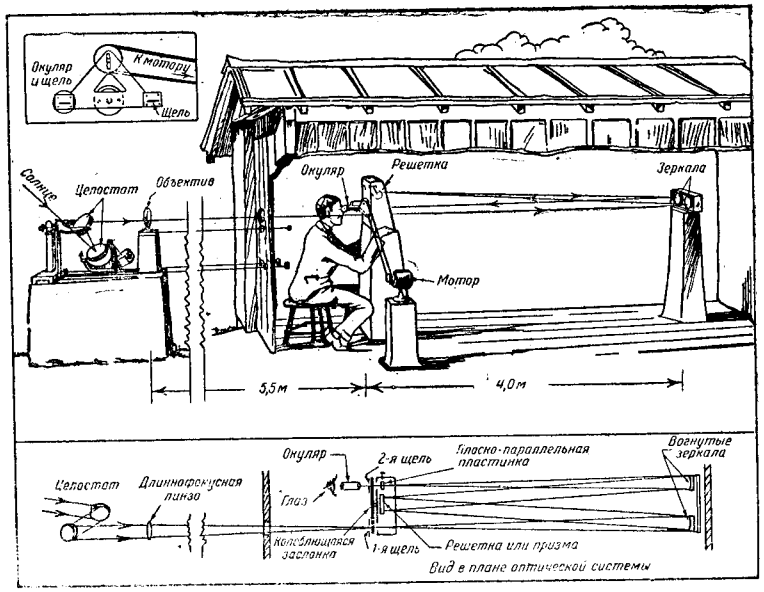
Многие солнечные протуберанцы находятся в сильнейшем движении, если судить по земным масштабам. Некоторые процессы на Солнце оканчиваются в несколько минут. Другие протуберанцы чрезвычайно спокойны. Газовые массы, находящиеся в сильном движении, в направлении от нас или к нам, производят допплеровское смещение в спектре, получающемся в спектрогелиографе (см. Приложение II). Поэтому, если вторая щель установлена, например, на середину красной водородной линии, некоторые газовые массы движутся столь быстро, что смещаются со щели и становятся невидимыми.

## СПЕКТРОГЕЛИОСКОП

В 1924 г. Г. Э. Хэл открыл возможность визуальных наблюдений над протуберанцами и большими участками солнечной поверхности с помощью спектрогелиоскопа (фиг. 94). Вместо фотографической пластинки наблюдатель пользуется окуляром. Наблюдатель едва ли смог бы восстановить в уме изображение всего Солнца, следя за полоской изображения, медленно проходящей через поле зрения. Но общеизвестно, что если глаз получает не менее двадцати световых впечатлений в секунду, то он уже перестаёт различать их в отдельности. Этот принцип используется в спектрогелиоскопе. Первая и вторая щели быстро колеблются взад и вперёд. Наблюдатель видит через окуляр воссозданное целое изображение Солнца и может непосредственно следить за солнечной деятельностью.

В том типе спектрогелиоскопа, который предложен Хэлом, применяются призмы Андерсона. Свет заставляют проходить через квадратные призмы из оптического стекла, помещённые за каждой щелью. При быстром вращении призм изображение Солнца и изображение в спектрогелиоскопе колеблются взад и вперёд. Таким путём колебательное движение заменяется вращением. Простой мотор, допускающий регулировку числа оборотов, может быть использован для вращения призм.

Спектрогелиоскоп позволяет наблюдателю точно и удобно измерять движения протуберанцев по лучу зрения. Положение второй щели инструмента относительно первой указывает длину волны. Если вторая щель имеет тонкую установку с помощью разделённой головки



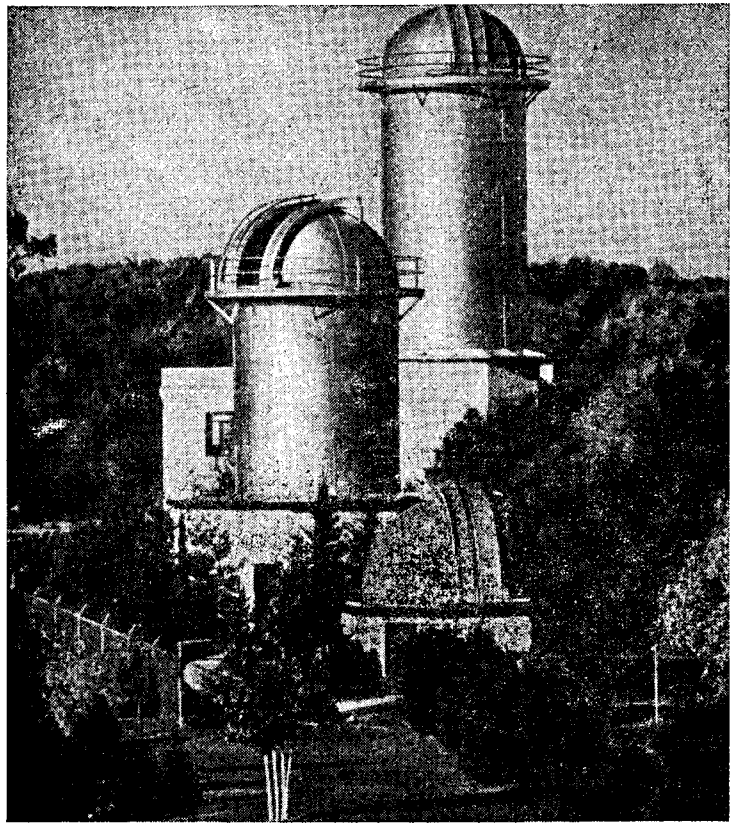

Фиг. 94. Один из типов спектрогелиоскопа.

или же движется оптически при помощи промежуточной стеклянной пластинки, поворачивающейся вокруг вертикальной оси, то наблюдатель может прокалибровать это устройство в ангстремах или лучше в километрах в секунду. При наблюдении протуберанца наблюдатель устанавливает газовое волокно водорода на наилучшую видимость, вращая разделённую головку. Лучевая скорость отсчитывается при этом на шкале головки. Ряд последовательных измерений прямо даёт передвижение газа во времени.



## ОБСЕРВАТОРИЯ МАК-МЭЗ-ХУЛБЕРТ

Принцип спектрогелиографа наиболее широко и разнообразно применяется на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт



Фиг. 95. Общий вид обсерватории Мак-Мэз-Хулберт.

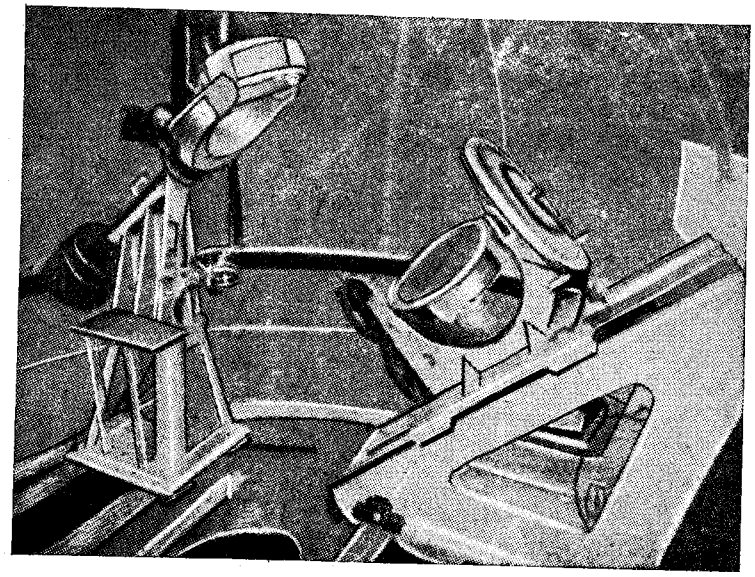
Мичиганского университета. Обсерватория, спроектированная и построенная д-ром Р. Мак-Мэзом, состоит из трёх главных строений, показанных на фиг. 95. Малая

башня на переднем плане, построенная в 1929 г. и первоначально вмещавшая $10^1/_2$-дюймовый экваториальный рефлектор, послужила для пионерской работы по применению кинематографии к изучению Солнца, Луны и планет. Спектрогелиограф, применённый с помощью экваториального рефлектора для кинематографии, получил название спектрогелиокинематографа. Киносъёмка с этим инструментом открыла много эффектных солнечных явлений, о которых астрономы раньше и не подозревали. Скоро стало ясно, что в спектрогелиокинематографе наука получила новое важное орудие для изучения Солнца, могущее лучше служить при наличии более крупной обсерватории. Останавливаться на описании усилий, потребовавшихся для создания обсерватории, не входит в наши намерения. Первый из двух новых солнечных телескопов, седьмой по счёту башенный телескоп в мире, был в основном построен между июлем 1935 г. и июлем 1936 г. — время, удивительно короткое для такого выдающегося инструмента!

50-футовый (15-метровый) башенный телескоп предназначен для регистрации движений протуберанцев и подробностей на диске Солнца в лучах любого цвета. Фотографии проекции Солнца на небесную сферу показывают, конечно, лишь две координаты движения. Первый год наблюдений с башенным телескопом показал, что фотография в двух измерениях недостаточна и что отсутствие радиальной скорости, или, иными словами, компонента движения по лучу зрения, маскирует истинный характер движений протуберанцев. В связи с этим в 1937 г. были предприняты попытки сконструировать инструмент, который мог бы автоматически и непрерывно регистрировать движения по лучу зрения. Этот инструмент — стоуновский спектрогелиограф для лучевых скоростей — был установлен в 15-метровой башне в 1939 г. Его совместная работа с главным спектрогелиографом сделала возможным определение движений солнечных газов в пространстве. В 1940 г. $10^1/_2$-дюймовый экваториальный рефлектор был заменён 24-дюймовым кассегрэновским рефлектором, сконструированным Перкин-Эльмером для киносъёмок Луны и планет.



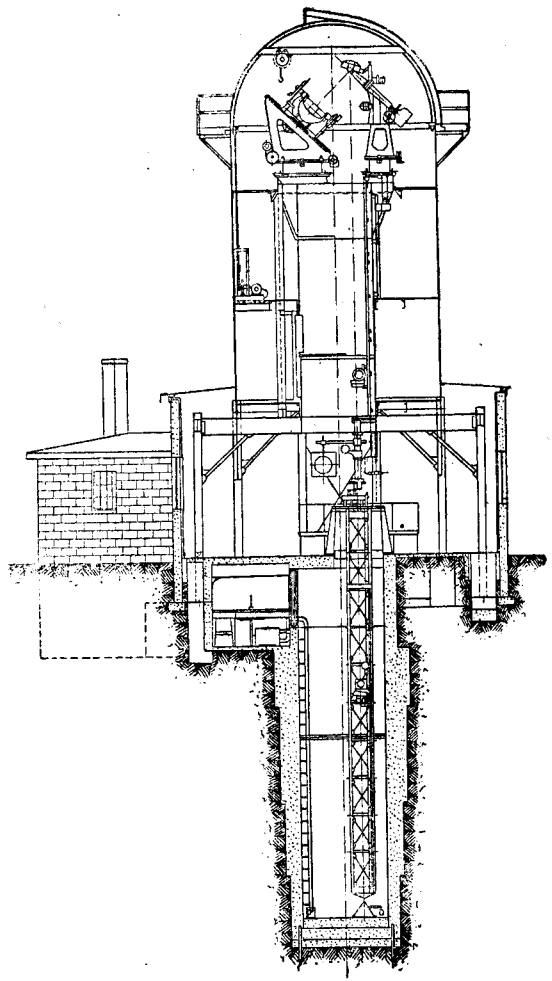
Изучение движений поверхностных газов Солнца говорит лишь о части явлений, происходящих на нём. В конечном счёте астрономы стремятся узнать, почему и как совершаются движения, и эта цель, повидимому, может быть достигнута в результате наблюдений над лучистой энергией, выделяемой протуберанцами, солнеч-



Фиг. 96а. Целостат башенного телескопа на Мак-Мэз-Хулберт.

ными пятнами и т. д. Для этой цели на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт в 1940 г. прибавили третье сооружение — 70-футовую (21-метровую) башню Мак-Грегора. Совместная работа обеих башен позволяет производить полное изучение физического поведения протуберанцев и извержений в течение их существования.

Обе башни состоят из внутреннего и наружного каркаса. Наружный служит для защиты нежных оптических инструментов, помещающихся внутри, от ветра,



**Фиг. 96b.** Башенный телескоп обсерватории Мак-Мэз-Хулберт.
Схема башни и колодца спектрогелиографа.

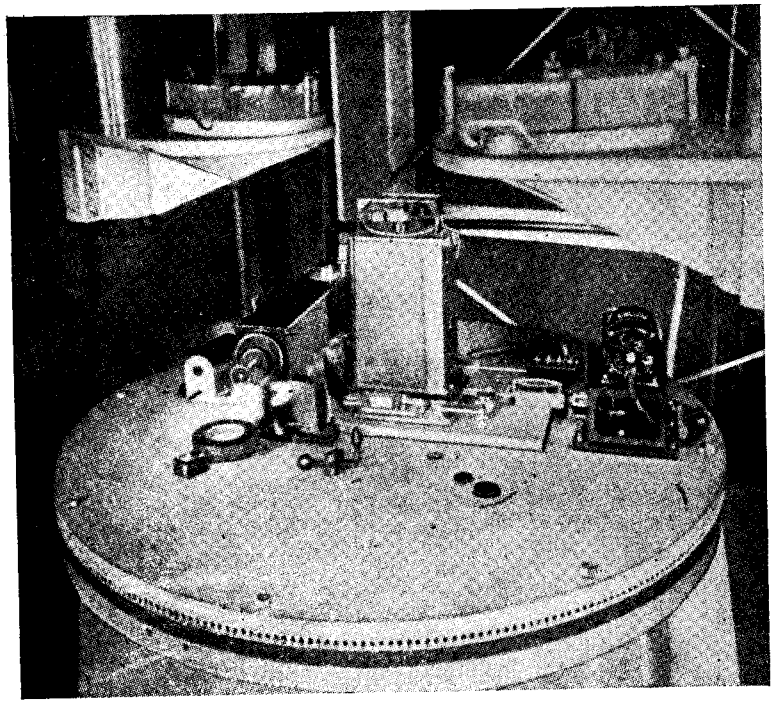


непогоды и жары, а также поддерживает купол. Внутренняя часть башни построена очень прочно, чтобы удерживать оптические части в неизменно правильном положении друг относительно друга.

Схематическое изображение башенного телескопа дано на фиг. 96b. Целостат у вершины башни направляет параллельные лучи Солнца вниз, на внеосное параболическое зеркало, которое в свою очередь посылает вверх пучок лучей на плоское зеркало, отражающее его снова вниз, где находится фокус у основания поворотного столика спектрогелиографа. Вместо этого пучок лучей от целостата может быть направлен и в объектив, которым может быть заменено третье плоское зеркало. Этот объектив фокусирует его на щели спектрогелиографа. Параболических зеркал имеется два: одно в 16 дюймов поперечником и с фокусным расстоянием в 12 *м*, т. е. оно даёт изображение Солнца поперечником в 11 *см*; второе диаметром в 12 дюймов и с фокусным расстоянием в 6 *м*. Атмосферные условия в Лэйк Анжелас близ Понтиака (местонахождение башенного телескопа) столь хороши, что бóльшую часть времени изображение Солнца в 12-метровом фокусе бывает резко и спокойно. В остальных своих частях аппарат соответствует схеме спектрогелиографа со многими остроумными усовершенствованиями, обеспечивающими удобство и быстроту работы. Спектр получается от решётки, дающей дисперсию в 3,5 Å/*мм*. Возможно получение и иных дисперсий.

Обе щели инструмента в головной части спектрогелиографа движутся в параллельных бороздках, вместо обычного крепления их на концах колеблющегося стержня. Для достижения полного совершенства в работе необходима высшая степень точности механических деталей. Обсерватория Мак-Мэз-Хулберт в этом отношении достигла наилучших результатов. Так как инвар обладает чрезвычайно малым коэффициентом расширения, для значительной части конструкций применён именно этот сплав. Губки щели сделаны из карболоя из-за его чрезвычайной твёрдости и прочности. Позади второй

щели спектрогелиографа специально приспособленная кинокамера автоматически регистрирует спектрогелиограммы через желаемые промежутки времени. Щели движутся взад и вперёд со скоростью один раз в секунду.



Фиг. 96с. Лицевая плита спектрогелиографа с установленной камерой.
Решётка находится внизу в колодце.

Поэтому в продолжение экспозиции, длящейся несколько секунд, щели пробегают взад и вперёд по изображению Солнца соответственное число раз.

Кинокамера работает при любой длине волны, обычно в лучах водородной линии $H_\alpha$ или в лучах кальциевой

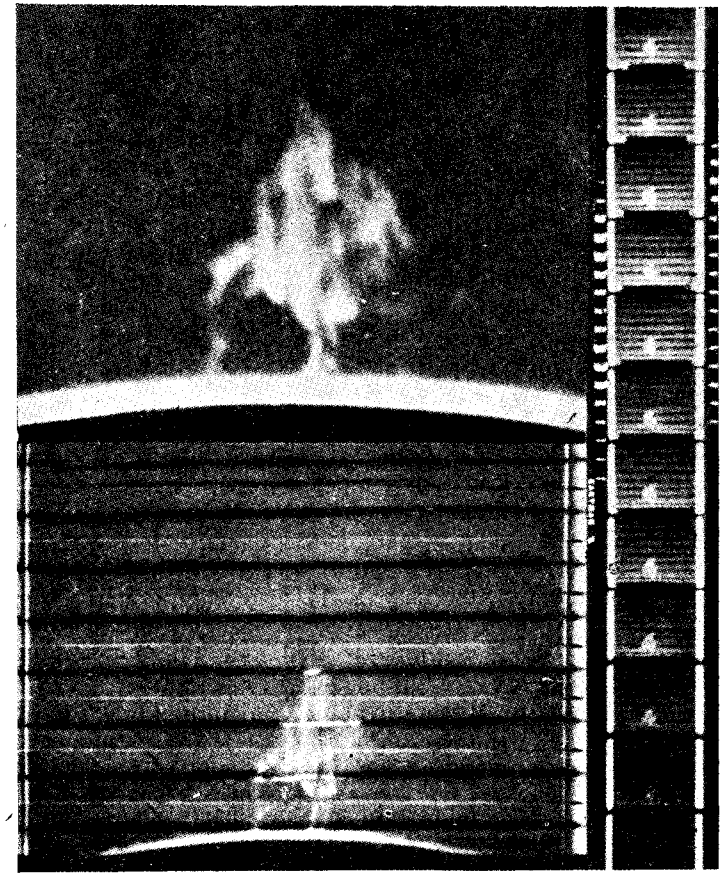


линии K. Инструмент сконструирован так, что камера остаётся в неизменном положении. Некоторые из фильмов состоят из тысяч отдельных кадров. Так как для съёмки таких фильмов требуется продолжительное время, необходимо иметь средство для проверки, что желаемая область спектра в точности удерживается на щели инструмента. Достигается это с помощью третьей щели, установленной на кальциевую линию H и колеблющейся синхронно с двумя другими. Контрольная камера, используя фотопластинки, регистрирует линию H и позволяет наблюдателю время от времени проверять работу инструмента и обеспечить безукоризненную работу в лучах линии K. Фотографии, сделанные при помощи контрольной камеры, проявляются немедленно после экспозиции.

Линии H и K солнечного спектра лежат за пределами видимой области. Для установки желаемых частей этих линий на соответствующие им щели требуется вспомогательное приспособление. В некоторых спектрогелиографах видимые линии солнечного спектра используются как опорные постоянные точки. В инструменте Мак-Мэз-Хулберт длины волн сравнения дают две вспомогательные щели в головной части спектрогелиографа. Свет от ртутной трубки для наблюдения линии K и от неоновой трубки для $H_\alpha$ проходит через эти щели, которые определённым образом установлены по отношению ко второй подвижной щели. Получающийся спектр наблюдается в микроскоп, имеющий крест нитей, центрированный по отношению к первой щели. После того как инструмент однажды отрегулирован, наблюдателю достаточно лишь установить ртутную линию 5790 Å на кресте нитей, чтобы обеспечить попадание желаемой части линии K на вторую щель инструмента. Так как ртутная линия неподвижна, несмотря на то что первичная щель колеблется, оказывается возможным проверять установку инструмента даже во время экспозиции.

Спектрогелиограф для лучевых скоростей принадлежит к горизонтальному типу и питается отдельной

оптической системой, находящейся внутри 50-футовой башни. Свет от целостата проходит через 10-дюймовый



Фиг. 97. Образец фотографий, получаемых на спектрогелиографе для лучевых скоростей на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт.

ахроматический объектив, а потом падает на плоское зеркало, которое отклоняет пучок солнечных лучей на 90°

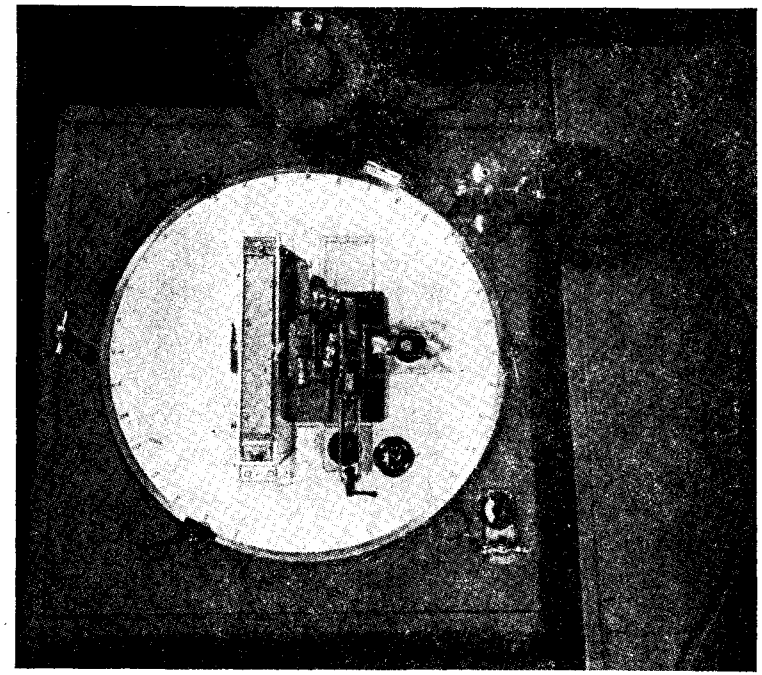


и направляет его на первую щель спектрогелиографа. Образец кинокадра, снятого с этим инструментом, изображён на фиг. 97 вместе со снимком, одновременно полученным с помощью главного спектрогелиографа. Щели спектрогелиографа движутся через протуберанец прерывисто, давая девять отдельных фотографий тёмной водородной линии в спектре неба. К каждому изображению тёмной линии примыкают с обеих сторон узкие полоски непрерывного спектра. Яркие линии водорода, испускаемые различными частями протуберанца, накладываются на тёмные линии. Смещение светлых линий по отношению к тёмным пропорционально лучевой скорости газов, согласно закону Допплера. Тщательно подобранное распределение экспозиций обеспечивает покрытие всего протуберанца. Обратный ход щелей совершается непрерывно, а не прерывисто и даёт слабое изображение протуберанца, наложенное на первый снимок; оно помогает найти положение светлых линий на протуберанце.

70-футовый башенный телескоп Мак-Грегора представляет собой верх простоты конструкции благодаря применению алюминиевых отливок для монтировки целостата. Первое и второе плоские зеркала имеют диаметры в 18 и 16 дюймов. Так как первое плоское зеркало сделано из кварца, то влияние изменений температуры минимально. Второе зеркало предполагалось также изготовить из кварца, но диск для него погиб вместе с судном, торпедированным на пути из Англии; пока пользуются ячеистым зеркалом, изготовленным из стекла «пирекс».

Приспособление для фокусировки состоит из пары расположенных раздельно ахроматов. Положительный ахромат диаметром в 10 дюймов и отрицательный диаметром в 7,5 дюйма дают вместе эквивалентное фокусное расстояние в 100 футов. С одним положительным компонентом получается фокусное расстояние в 50 футов. Вспомогательное плоское кварцевое зеркало, монтированное на подставке у основания башни, отбрасывает изображение Солнца под углом в 90° на щель горизонтального спектрографа. Передняя доска спектрографа пока-

зана на фиг. 98. Приблизительно на расстоянии 25 футов (8 *м*) позади щели помещается коллиматорная линза и плоская отражающая решётка, которая отбрасывает спектр при дисперсии около 2 Å/*мм* в первом порядке. Лицевая



Фиг. 98. Лицевая плита спектрографа башенного телескопа Мак-Грегора на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт.

плита спектрографа установлена на двух точных подшипниках, легко вращается и с помощью лимба с верньером может быть точно установлена в любом положении. Коллиматорная линза и решётка помещаются в цилиндрической клетке и могут поворачиваться от головного конца спектрографа при помощи ключа, соединённого с клеткой жёстким стержнем. Второй лимб с



верньером позволяет сравнивать позиционные углы щели и решётки. Линза при решётке фокусируется с помощью такого же устройства, состоящего из ключа и длинного соединительного стержня. Сельсина (самосинхронизирующийся мотор), также управляемая от переднего конца спектрографа, позволяет наклонять решётку и таким образом приводить в поле зрения любую нужную область спектра.

Спектрограф может также применяться либо для прямого фотографирования спектра, либо для обследования в двух измерениях диска и протуберанцев в монохроматическом свете. Когда нужно сфотографировать спектр протуберанца, решётка наклоняется таким образом, чтобы направить спектр на кассету, находящуюся над щелью. Кассета может наклоняться под любым углом и снабжена искривлёнными лекалами, обеспечивающими резкую наводку по всей длине спектра.

Механизм для обследования в принципе сходен с тем, который применяется в спектрогелиографе, находящемся в 50-футовой башне. Вместо киноленты здесь имеется чувствительный приёмник энергии, посредством которого поглощаемая энергия превращается в ток, который затем усиливается и автоматически регистрируется. Так как приёмник покрывает лишь очень малую поверхность, ему необходимо придать движения в двух измерениях. Движение по горизонтали непрерывно и осуществляется сходно с тем, как в спектрогелиографе башни. В конце каждого полуцикла непрерывного хода щель и приёмник передвигаются вертикально на ширину приёмника. Так как спектр переворачивается при отражении от решётки, то щель и приёмник должны двигаться в противоположных направлениях как при горизонтальном, так и при вертикальном перемещении.

В башне Мак-Грегора имеется также кинокамера новой конструкции, применяющаяся для прямого фотографирования солнечных пятен, факелов и обманчивой структуры поверхности Солнца, известной под названием грануляции. Явление грануляции, которое часто сравнивают с видом рисовых зёрен, плавающих в миске

супа, можно отчётливо сфотографировать лишь при наилучшем качестве изображений. Для того чтобы уменьшить влияние хотя бы долгопериодических нарушений качества изображений, экспозиция в этой камере насколько возможно сокращена — до 1/1000 секунды. Приняты также меры к устранению сотрясений камеры, особенно тех, которые создаются движением затвора.

Когда надо пользоваться камерой для прямой фотографии, поворачивают третье плоское зеркало до тех пор, пока нужная область Солнца не попадёт на отверстие камеры (показанное в крайней правой части фиг. 98). Затвор помещается в цилиндрическом кожухе и состоит из трёх быстро вращающихся дисков. На краю каждого диска есть прорезь величиной приблизительно с 35-миллиметровый кинокадр. Диски вращаются с различной скоростью и синхронизованы таким образом, что их вырезы совпадают перед отверстием камеры в продолжение 1/1000 секунды. Промежуток между двумя совпадениями может быть, по желанию, установлен от 5/6 секунды до 15 секунд, в зависимости от подбора пар шестерён. Позади кожуха с затвором помещается 35-миллиметровая кинокамера. Весь съёмочный агрегат монтирован на массивной стальной опорной плите, которая надёжно привинчена к основному стальному каркасу головной части спектрографа.

## КОРОНОГРАФ ЛИО

Большие усовершенствования, достигнутые на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт превратили наблюдения солнечной деятельности в обыденное дело. Но есть ещё некоторые солнечные явления, которые лежат за пределами наблюдательных возможностей спектрогелиографа.

Астрономам приходится путешествовать по всему миру, чтобы воспользоваться драгоценными моментами полного солнечного затмения. До недавнего времени солнечная корона — внешняя оболочка Солнца, распространяющаяся на многие сотни тысяч километров над солнечной поверхностью, — была доступна наблюдению



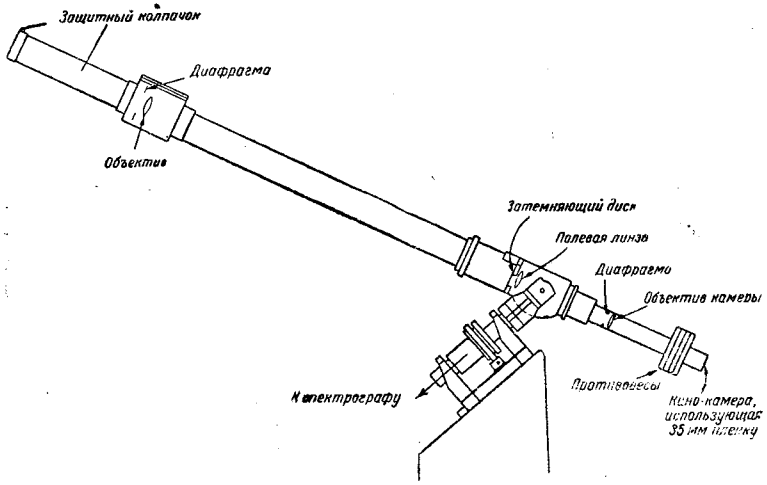
лишь в редкие моменты полного затмения. Это сияние вокруг Солнца в миллион раз слабее самого Солнца.

Бóльшая часть света короны в видимой части спектра происходит от её непрерывного спектра, однако в очень узких участках спектра непрерывный спектр короны менее ярок, чем эмиссионные линии короны, более или менее случайно распределённые по спектру и почти монохроматичные. До самого недавнего времени гелиофизикам не удавалось объяснить происхождение этих эмиссионных корональных линий. Хотя природа этого излучения ещё не вполне выяснена, есть достаточные основания думать, что корональные линии возникают в результате определённых процессов, совершающихся в условиях чрезвычайно сильного возбуждения, производимого солнечной радиацией в далёкой ультрафиолетовой области спектра.

Одним из основных препятствий к раскрытию тайн короны является отсутствие достаточно точных и разнообразных наблюдений. Астрономы давно стремились разрешить проблему наблюдений короны вне затмения. Главное затруднение состоит в том, чтобы увидеть на фоне Солнца эмиссионные линии, яркость которых составляет лишь одну сотую яркости полной Луны. К разрешению этой проблемы с замечательным успехом подошёл несколько лет назад Лио, астроном Парижской обсерватории.

Для наблюдения солнечных протуберанцев и корональных линий вне затмения необходимы безукоризненные оптические инструменты и атмосферные условия. Если бы на Земле не существовало наблюдательного пункта с атмосферой, достаточно прозрачной, для того чтобы корональные линии могли превзойти по яркости свет от освещённого воздуха вокруг солнечного диска, не было бы никакого смысла пытаться конструировать инструмент для наблюдения Солнца вне затмений. Однако довольно элементарные расчёты, основанные на наблюдениях над абсолютной яркостью корональных линий во время затмения показывают, что в свободном от пыли воздухе гор свет короны ярче света неба на ангстрем спектра.

Инструмент, наиболее подходящий для таких наблюдений над Солнцем, был не только сконструирован Лио, но и доведён им до такого оптического совершенства, какого до него никогда не достигали (фиг. 99). Объектив даёт изображение Солнца на заслоняющем диске. Объектив инструмента должен быть наивысшего качества.



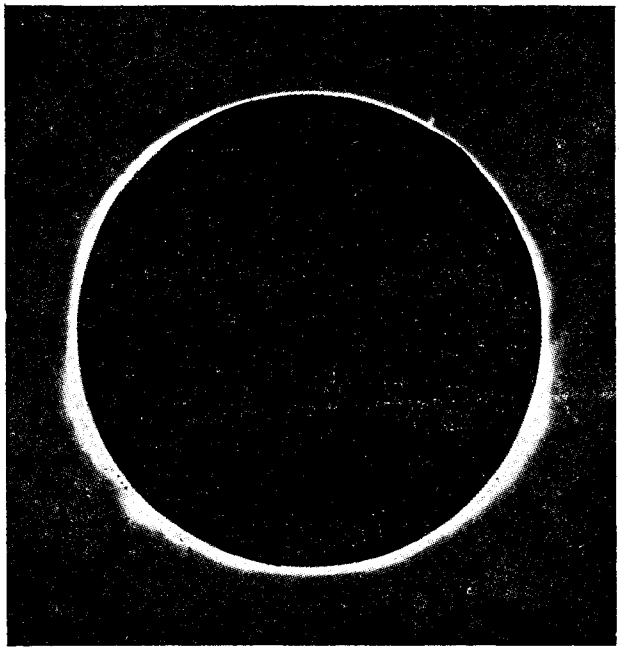

Фиг. 99. Схема коронографа Лио.

Оптическое стекло должно быть абсолютно свободно от пузырьков и свилей, а изготовленные из него оптические поверхности — совершенно свободны от «зализов», царапин и точек от шлифовки.

Солнце примерно на 19 звёздных величин ярче, чем самая яркая из эмиссионных корональных линий. Эта разница в звёздных величинах означает отношение интенсивностей, равное 40 000 000. Маленький пузырёк в стекле может внести в инструмент количество света, эквивалентное корональной линии. В конструкции инструмента должно быть обеспечено, чтобы весь рассеянный свет, избегнуть которого невозможно, был полностью уловлен и не смог попасть на пластинку.



Непрозрачный заслоняющий диск, совмещённый с изображением Солнца, производит в инструменте искусственное затмение. Наклонное плоское зеркало на передней части диска отражает бóльшую часть солнечного света

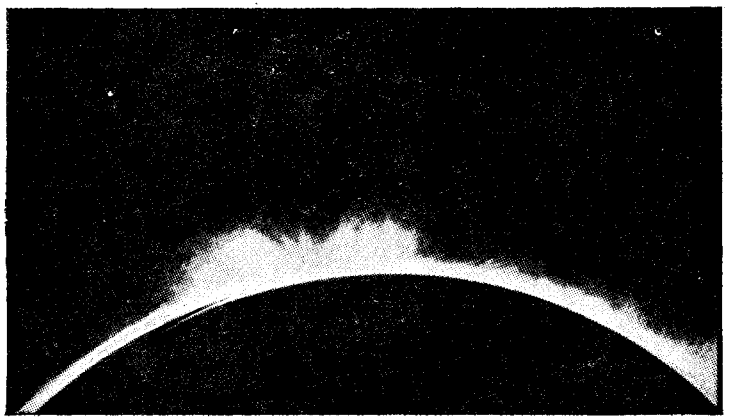


Фиг. 100. Искусственное затмение (по Лио).

в сторону, где он полностью улавливается. Полевая линза позади диска образует изображение объектива на объективе камеры. Диаметр этого изображения немного больше, чем объектив камеры, благодаря чему срезается дифракция на краю объектива. Объектив камеры фокусирует изображение Солнца и затмевающий диск на фотографической пластинке. В нужных местах помещены круглые диафрагмы, улавливающие рассеянный свет. Важ-

нейшими частями оптической системы являются объектив, диск и приспособления для улавливания рассеянного света. Устройство камеры не представляет существенных трудностей.

Вместо фотографической пластинки можно установить обычным путём спектрографическое оборудование.



Фиг. 101. Корона в лучах $\lambda$ 6374 Å (девятикратно ионизованное железо).

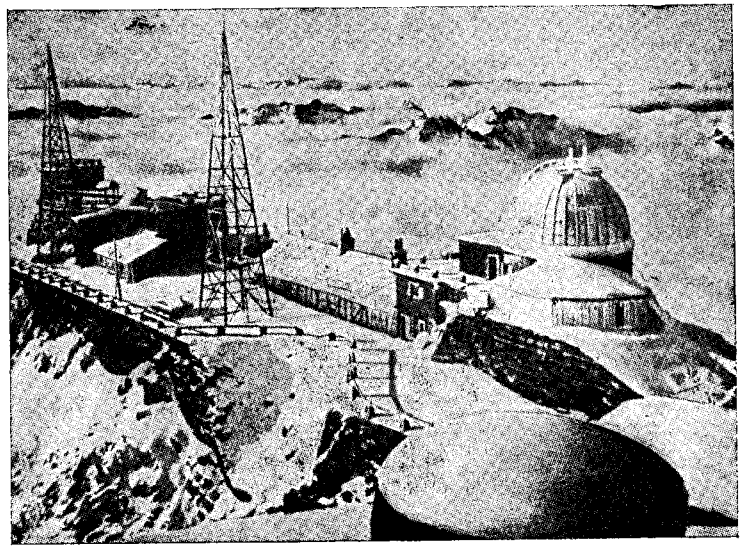
Можно пользоваться и щелевым и бесщелевым спектрографом.

Правильно построенный и правильно расположенный коронограф работает столь хорошо, что лишь земная атмосфера мешает получению ясных фотографий короны. Пользуясь коронографом как визуальным телескопом, наблюдатель может заметить тысячи пляшущих блестящих искр. Это — частицы пыли в атмосфере, кристаллы снега или, быть может, летучие семена растений. Так как эти блёстки находятся далеко и движутся относительно медленно, они часто выходят на фотографиях, снятых коронографом, в виде светлых чёрточек. С ними ничего нельзя поделать, так как эти частицы выше, чем



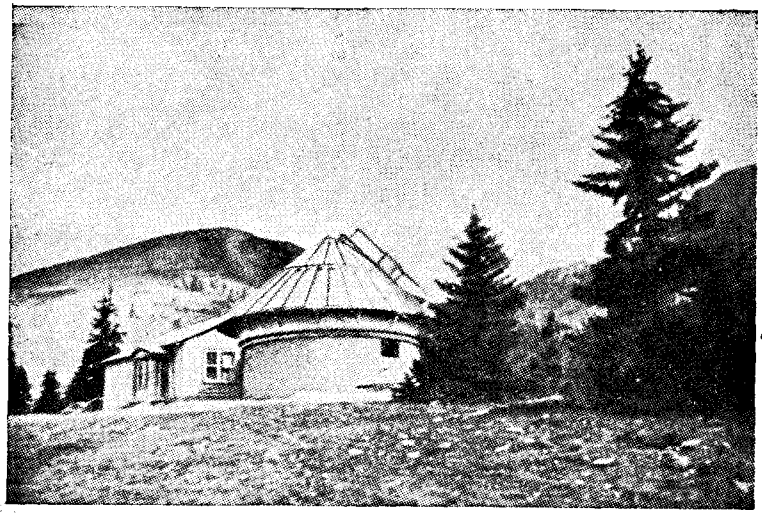
сами горы. Очень интересно, что, несмотря на такие препятствия, Вальдмайеру в Арозе удалось наблюдать Регул ($\alpha$ Льва) на расстоянии всего 12,4 минуты дуги от солнечного края.

Кроме коронографической станции Лио на Пик-дю-Миди теперь работают два других коронографа: один в

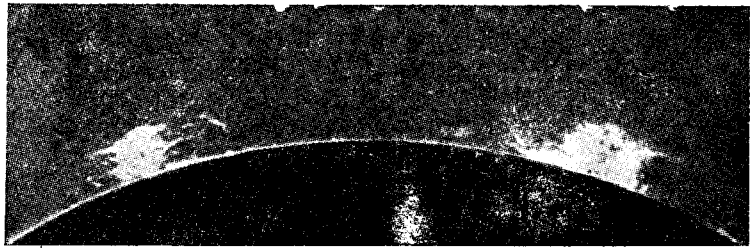


Фиг. 102. Обсерватория на Пик-дю-Миди.

Арозе, в Швейцарии, другой — в Клаймакс, на Колорадской станции Гарвардской обсерватории. Американская обсерватория находится на высоте 3,5 *км* и подвергается снежным заносам глубиною до 6 *м*. Из-за такого количества снежных осадков крыша обсерватории имеет коническую форму. На этой обсерватории производится как прямое фотографирование короны, так и спектрографическое изучение протуберанцев и короны (фиг. 104).



Фиг. 103. Горная станция Гарвардской обсерватории в Клаймаксе, Колорадо.



Фиг. 104. Два протуберанца, сфотографированные при помощи Гарвардского коронографа.

## КВАРЦЕВЫЙ МОНОХРОМАТОР

При некоторых специальных работах чрезвычайно полезен фильтр, пропускающий очень узкий участок длин волн. Стеклянные или желатиновые фильтры поодиночке или в комбинации друг с другом не отвечают этому требованию. Полоса шириной в 50 ангстремов — самый узкий участок, который можно практически изолировать с помощью фильтров. При исследованиях Солнца, охватывающих изучение монохроматических излучений протуберанцев и короны, желательно изолировать определённую длину волны и устранить ореол солнечного света других длин волн, рассеянный атмосферой и инструментом. Недавнее усовершенствование в технике изготовления фильтров имеет очень важное значение. Создан усовершенствованный фильтр, позволяющий изолировать участок около пяти ангстремов в любой части спектра; вкратце опишем его.



В первой главе мы видели, что поляризация света возможна вследствие того, что световые колебания являются поперечными. Луч неполяризованного света, проходящий через специально выбранный кристалл, расщепляется на два луча, называемых *обыкновенным* лучом и *необыкновенным* лучом; эти два луча обладают противоположной поляризацией. Кристалл обладает одним показателем преломления для обыкновенного луча и другим — для необыкновенного. Существование этих двух показателей производит расщепление света на два пучка — процесс, называемый *двойным лучепреломлением*.

Этим свойством обладает кварц. Его показатели преломления для линии $D_2$ натрия равны 1,5537 для необыкновенного луча и 1,5446—для обыкновенного (при 23° С). Кристалл кварца — одноосный. *Ось кристалла* есть направление, по которому обыкновенный и необыкновенный лучи совпадают.

Если пучок плоскополяризованного света входит в кристалл параллельно его оси, то обыкновенный и необыкновенный лучи продолжают распространяться в прежнем направлении, но у обоих возникает *круговая поляризация* в противоположных направлениях. Волновой фронт с правой круговой поляризацией отходит от волнового фронта с левой круговой поляризацией, если говорить о волновых фронтах, вышедших из источника совместно. Наблюдаемый эффект этого таков, что пучок

света, проходящий через кристалл, испытывает медленное вращение плоскости своей поляризации с увеличением расстояния по оси кристалла *). Величина вращения явным образом зависит от длины волны (приблизительно по закону $1/\lambda^2$), поскольку оба показателя преломления кристалла также зависят от длины волны.

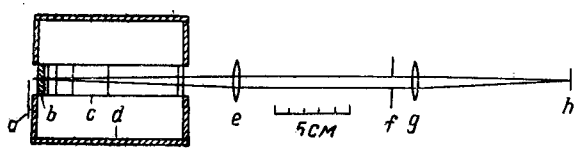
После того как свет пройдёт через определённую толщу кристалла и выйдет в воздух, ориентация плоскости поляризации оказывается зависящей от цвета. Пластинка поляроида, введённая в пучок света, пропустит длины волн, соответственно поляризованные, задержав длины волн, противоположно поляризованные. Промежуточные длины волн будут поглощены в различной степени, причём их интенсивность будет изменяться как квадрат косинуса угла ориентации. При толщине кристалла в 25 *мм* прозрачные области имеют ширину около 50 Å. Комбинируя эту оптическую систему с обыкновенными фильтрами, можно легко изолировать полосы шириной около 50 Å в любой части спектра. Такая избирательность фильтров, однако, оказывается совершенно недостаточной для исследования Солнца.

Если поляризованный в одной плоскости пучок войдёт в кристалл *под прямым углом* к оси последнего, то необыкновенный и обыкновенный лучи будут, соответственно, распространяться в виде эллипсоидального и сферического волновых фронтов. Если теперь наблюдать пучок после его прохождения через некоторую толщу кристалла, то окажется, что поляризация из плоской переходит в эллиптическую, в круговую и обратно. Толщина кварца, необходимая для совершения одного полного цикла, опять-таки представляет функцию цвета; при толщине в 25 *мм* определённая длина волны проделает 350 полных циклов и при выходе окажется снова поляризованной в плоскости. Соседние длины волн пройдут через 349 и 351 цикл и т. д. Промежуточные длины волн окажутся поляризованными по кругу или эллипсу. Толщина в 25 *мм* даёт расстояния около 19 Å от одной длины волны плоской поляризации до другой.

*) Коэффициент пропорциональности углового вращения расстоянию вдоль оси кристалла называется *удельным вращением*. Многие жидкости и твёрдые тела в растворе обнаруживают чрезвычайно сильную связь удельного вращения с цветом и, возможно, смогли бы послужить для изготовления полезного типа светофильтров.



Поскольку существует так много близко расположенных областей плоской поляризации, нежелательно останавливаться на этом. Поэтому мы заставляем пучок пройти ещё через слой в 12,5 *мм*, чтобы плоская поляризация получилась через каждые 38 Å. Два слоя кварца вместе, в соединении с пластинками поляроида между ними и позади них, пропустят максимумы, лежащие на расстоянии 38 Å, но каждый из них будет иметь ширину, соответствующую участкам, создаваемым толстой пластинкой. Ряд фильтров при толщине в 1, 1/2, 1/4, 1/8 и т. д. изолирует определённую длину волны, величина которой будет зависеть от толщины, которую при данной температуре будет иметь система *).

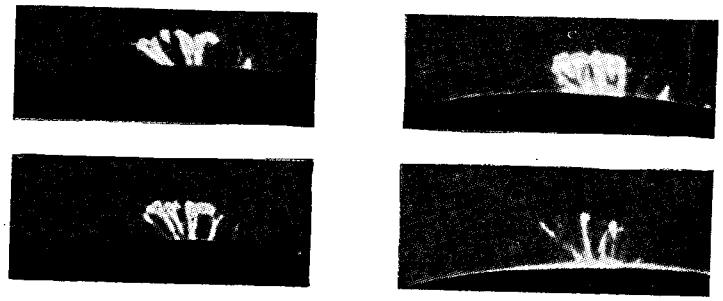



Фиг. 105. Оптическая система кварцевого монохроматора.

Металлический диск *a* заслоняет Солнце. Свет от края Солнца проходит через стеклянный фильтр *b*, а затем через шесть кварцевых элементов *c*. Камера *d* поддерживает кварц при постоянной температуре. Линза *e* собирает свет, а линза *g* фокусирует свет снова на пластинку *h*. Диафрагма *f*, как и в коронографе, лежит в плоскости действительного изображения объектива телескопа и улавливает рассеянный свет, а также срезает диффракционный свет от края объектива.

*) Фильтр Ёмана состоит из четырёх кристаллов и пяти пластинок поляроида. Эванс применяет шесть кристаллов и семь поляроидов. Этот тип фильтра был впервые предложен Р. В. Вудом в 1914 г. Вуд пользовался одним кристаллом кварца и двумя призмами Николя, для того чтобы изолировать любую из линий дублета натрия.

Общая толщина кристаллического фильтра для Hα (6563Å) с эффективным разрешением в пять ангстрем составляет около 90 *мм*. Диаметр кристаллических плиток



Фиг. 106. Протуберанцы, сфотографированные Эвансом через кварцевый монохроматор на обсерватории Шабо.

должен быть достаточен, чтобы обеспечить полезное поле зрения. Дж. В. Эвансом через такие фильтры были сделаны превосходные фотографии солнечных протуберанцев (фиг. 106).

# 8

# ПОСТРОЙКА ТЕЛЕСКОПА

Точность, с какой оптик должен отполировать и ретушировать оптическую поверхность, переходит за предел, доступный какому-либо механическому приспособлению, которым обычно измеряют длину, толщину или кривизну. При изготовлении линзового или зеркального объектива приходится пользоваться свойствами света, описанными нами в главе 1, для того чтобы открыть отклонения от желаемой фигуры — отклонения, часто меньшие одной миллионной дюйма. Такого совершенства достичь трудно, даже при размере поверхности всего в несколько квадратных сантиметров; в случае же современных огромных телескопов, где эта точность должна быть соблюдена на поверхности величиной до двадцати квадратных метров, задача становится несоразмерно трудной. И, тем не менее, при постройке телескопа высокое совершенство оптики, это — только первый шаг. Как бы ни была высока оптическая точность, она будет бесполезна для астронома, не будучи соединена с тщательно сконструированным опорным механизмом, — жёсткой трубой, прочным штативом, плавным движением и хорошим укрытием.

Мы очень часто думаем о телескопе как о комбинации оптических частей, высокое качество которых вызывает заслуженное восхищение, но мы забываем о том, что каждый сантиметр механической конструкции, от основания до крыши, требует механического искусства,

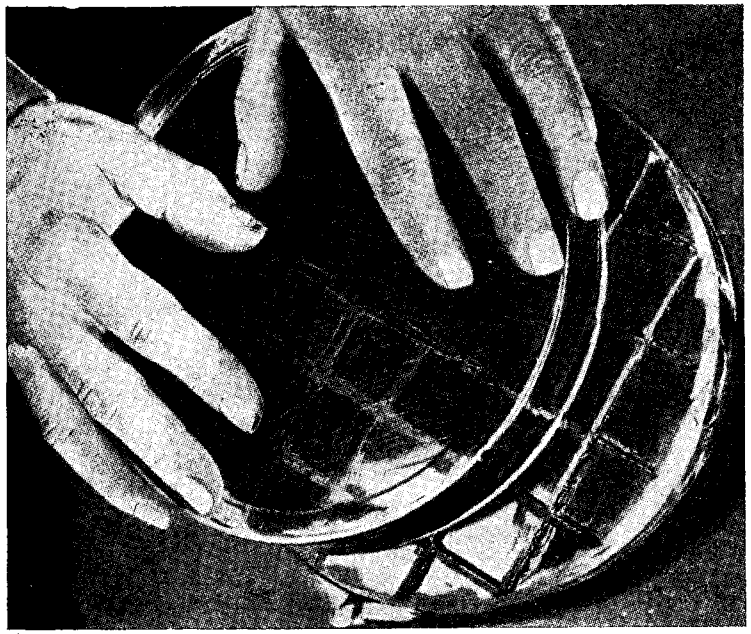
новаторской изобретательности, а иногда и конструкторского дерзания, встречающегося лишь в немногих других областях исследования. Телескоп, это — более, чем машина; это — центр, вокруг которого развёртывается жизнь целого института. В некотором смысле это — бесконечное развитие, рождённое идеей учёного, который провидит его, и техническими знаниями инженера, конструирующего его; он принимает форму в руках строителей, механиков и многих рабочих, способности и находчивость которых вкладываются в строительство; наконец, за ним ухаживает наблюдатель, заботится о нём в течение многих ночей и лет работы, постоянно изменяя и улучшая его, по мере того как годы приносят всё новые и новые технические достижения или как открываются новые пути к более эффективному его использованию.

Пожалуй, уместно спросить: к чему строить ещё телескопы? Постройка телескопа обычно является завершением долгих и терпеливых усилий разрешить трудную задачу при помощи существующих инструментов, которые либо недостаточны, либо слишком загружены. Во всём мире есть лишь несколько сот человек, действительно активно занятых астрономическими исследованиями. Может показаться странным, чтобы любой из них не мог, при некотором желании, найти удовлетворяющий его телескоп на одной из многих существующих обсерваторий. Однако часто случается, что не оказывается телескопа для решения определённой проблемы, а нужда в получении ответа на вопрос столь настоятельна, что дело заканчивается отпуском средств на новое начинание. Иногда создаются планы строительства, разрабатываются детали и даже начинается постройка на незначительные первоначальные средства за много лет до того, как широкие круги узнают, что нечто новое и большое происходит в астрономическом мире; часто дело держится на личном умении, энтузиазме, на вере в успех.

Часто случается, что богатый жертвователь оставляет средства для устройства обсерватории. Тогда должны быть сначала разработаны подробные планы исследований



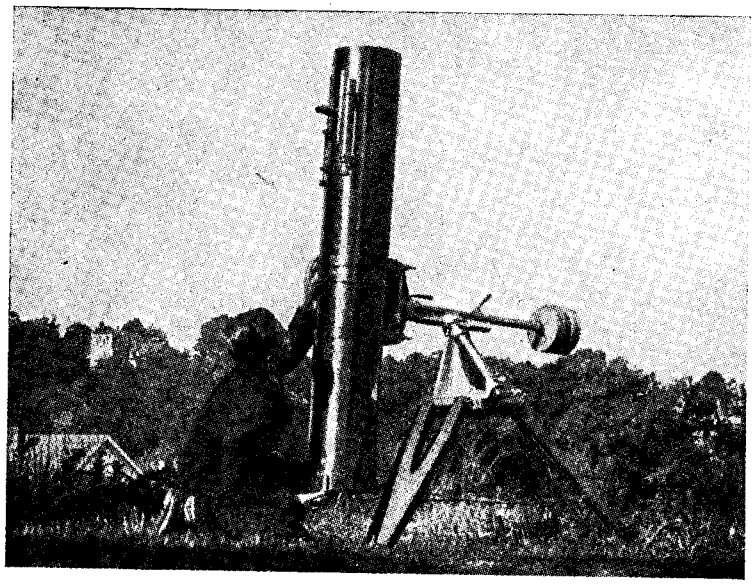
будущего учреждения, прежде чем можно решить, какие именно инструменты наилучшим образом подходят для намеченных исследований. Но всегда бывают неизбежные ограничения, зависящие от местоположения, качества изображений, а также от уже начатых иссле-



Фиг. 107. Полировка 8-дюймового зеркала.

дований или традиций. Лишь в исключительных случаях мы видим, что на постройку телескопа не влияли те или иные второстепенные факторы, среди которых сам астроном занимает далеко не последнее место. В конце концов, конечно, судьбой телескопа управляют астрономы, чьё образование, специальность или круг интересов определяют направление и работу обсерватории.

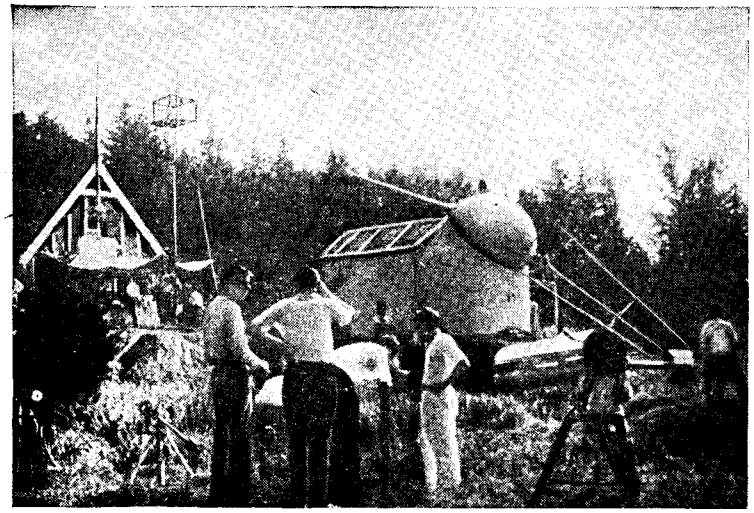
Но любитель астрономии, изготовляющий себе телескоп, обычно не связан этими ограничениями. Его побуждения, в отличие от профессионального астронома или строителя телескопа, состоят в создании ради создания и в удовлетворении желания обладать телескопом высокого совершенства и собственного изготовления.



Фиг. 108. Любитель у своего телескопа.

Он обладает здоровым честолюбием, которое астрономы и оптики-профессионалы поддерживают от всего сердца. Любители не знают поражений и, в духе истинного любительства, не затрудняясь профессиональной репутацией, договорами или сроками, они терпеливо полируют и полируют (фиг. 107), пока не добьются желаемого оптического совершенства поверхности. Их усилия никогда не бывают напрасны. Любителям не только удавалось изготовить поверхности высокого совершенства, но они с тем же энтузиазмом и успехом брались за новое и необычное. Вспомним камеру Шмидта как один из многих примеров, где любители в течение нескольких лет были ведущей силой в развитии способов изготовления необычных поверхностей.





Фиг. 109. Вид Стелло фейна—Клуба Спрингфильдской группы любителей телескопостроения.

Любители не только создавали малые телескопы (фиг. 108), — из их рядов вышли люди, которые были связаны с величайшими астрономическими начинаниями мира. Разве Кларк, Брэшир, Уорнер, Суэзи и Портер не были вначале любителями? Есть ещё другие лица, менее известные, хотя столь же одарённые и такие же энтузиасты; они продолжают нести традиции любителей. Они встречаются в самых неожиданных местах. Они работают в одиночку или группами, в городах и в деревнях, по всему миру. Одна из этих групп — хорошо из-

вестная Спрингфильдская ассоциация. Возникшая более двадцати лет назад, она сделала очень много для оживления движения любительского телескопостроения в США. Стеллофейн (фиг. 109) (клуб Спрингфильдской группы) заслуженно стал Меккой всех любителей телескопостроения.

Объём одного параграфа и даже целой главы слишком мал, чтобы рассказать увлекательную историю подъёма движения любителей телескопостроения. Отметим только, что уже в 1925 г. Альберт Г. Ингаллс обнаружил, что страсть к телескопостроению процветала в Виндзор Каунти, шт. Вермонт, через пять лет после организации Спрингфильдской группы. В то время литература по изготовлению зеркал была рассеяна и отрывочна, но пример Спрингфильдской группы и собственный интерес Ингаллса к изготовлению зеркал побудил его к составлению книг «Любительское телескопостроение» (Amateur Telescope Making), которые сейчас представляют руководство как для начинающих, так и для опытных любителей.

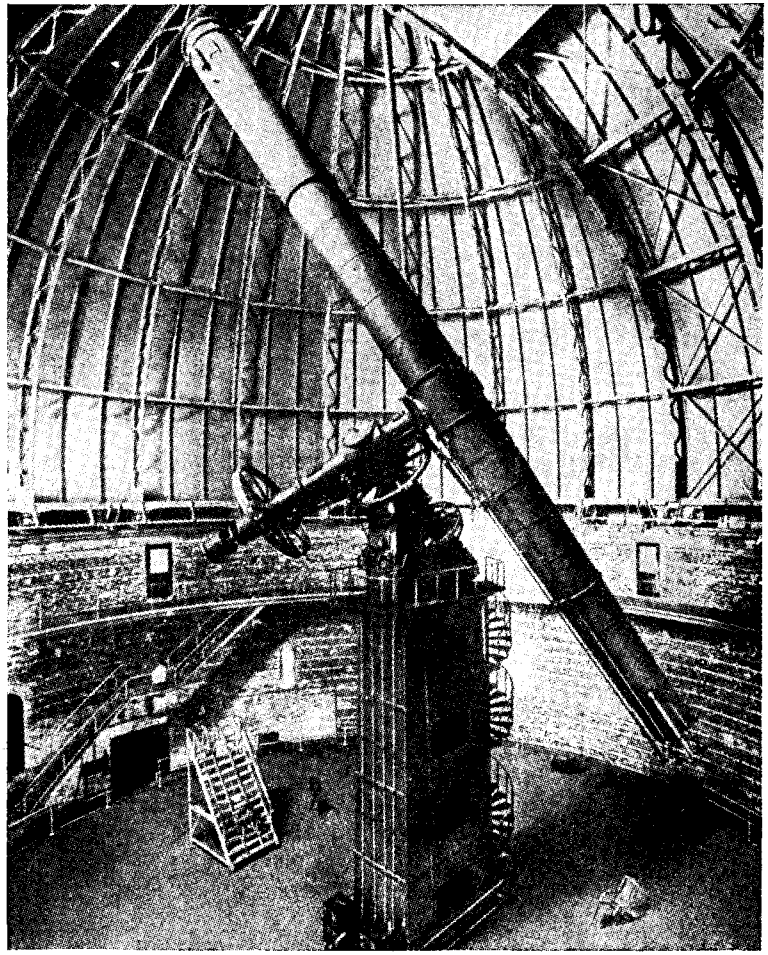
## ВЫБОР ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТЕЙ

Выбор практичного оптического устройства целиком зависит от местных условий и назначения инструмента. Мы уже видели в предыдущих главах, что каждый тип телескопа лучше всего приспособлен для определённого вида работы. Визуальный рефрактор может быть приспособлен для фотографических работ при помощи «жёлтых» пластинок и подходящих фильтров, пропускающих лишь жёлто-зелёные лучи, для которых визуальный телескоп исправлен. Но визуальный рефрактор обычно имеет малое относительное отверстие (1/15), что делает его слишком мало светосильным для фотографических работ. Положение ещё ухудшается тем, что чувствительные к жёлтым лучам пластинки работают много медленнее, чем пластинки, чувствительные к синим и фиолетовым лучам. С другой стороны, как бы ни был велик рефлектор, мы не можем эффективно пользоваться им для обзора неба вместо рефрактора или комбинации шмидтовского типа, потому что без дополнительных исправляющих линз поле рефлектора ограничено долями градуса. Большое зеркало лучше всего подходит для спектрографических работ как собирающая свет вспомогательная часть, а также для фотографирования отдельных объектов, тесных групп звёзд, туманностей и звёздных скоплений. Достаточно сравнить 200-дюймовый рефлектор и 20-дюймовую камеру Шмидта с эквивалентными относительными отверстиями. 200-дюймовый рефлектор собирает примерно в 100 раз больше света, так что с его помощью можно сфотографировать звезду за малую долю времени, потребного для 20-дюймовой камеры Шмидта; но, для того чтобы покрыть всё небо, шмидтовской комбинации надо менее 1000 фотографий, тогда как 200-дюймовому рефлектору для этого понадобилось бы более 400 000 фотографий. Этот пример не преследует цели показать преимущества или недостатки той и другой системы, но он должен лишь подчеркнуть, что они взаимно дополняют друг друга. Существует целый ряд важных критериев, которые надо принимать во внимание, прежде чем притти к выводу о сравнительной ценности двух телескопов.



Размеры телескопа ограничиваются главным образом размером дисков стекла, которые можно изготовить. Величайший рефрактор, это—40-дюймовый визуальный телескоп Иерксской обсерватории (фиг. 110). Получение оптически чистого стекла в виде дисков свыше сорока дюймов в диаметре, это—само по себе уже большая задача; но если бы и было возможно изготовить большие куски чистого стекла, вряд ли удалось бы придать такой линзе правильную фигуру, так как при таких размерах будет перейдён предел жёсткости стекла. Стеклянная линза диаметром в сорок дюймов и толщиной в несколько дюймов уже прогибается, опираясь только краями, и её поверхность искажается. Зеркало может быть изготовлено из обыкновенного зеркального стекла или пирекса, при том единственном условии, что оно хорошо отожжено, так как стекло служит здесь лишь для поддержки отражающей поверхности серебра или алюминия. Кроме того, зеркало может быть помещено в оправу, устроенную

таким образом, чтобы равномерно поддерживать его с задней стороны. Однако влияние прогибания серьёзно даже в этом случае и необходима специальная конструкция

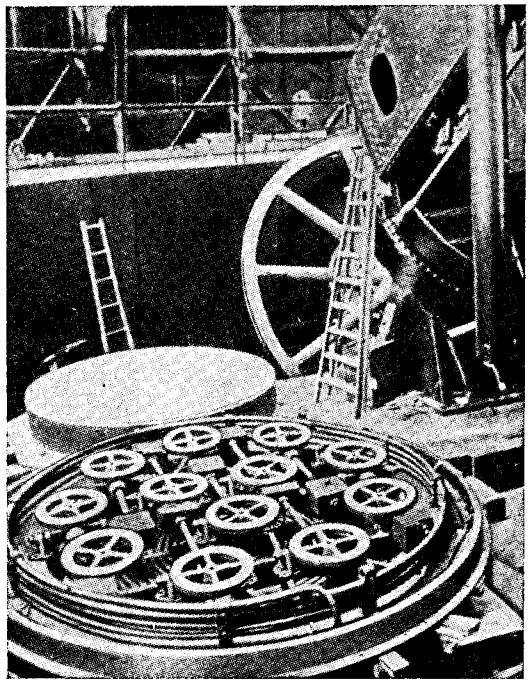


Фиг. 110. 40-дюймовый рефрактор Иерксской обсерватории.



поддерживающего механизма, если дело идёт о монтировке больших зеркал (фиг.111).

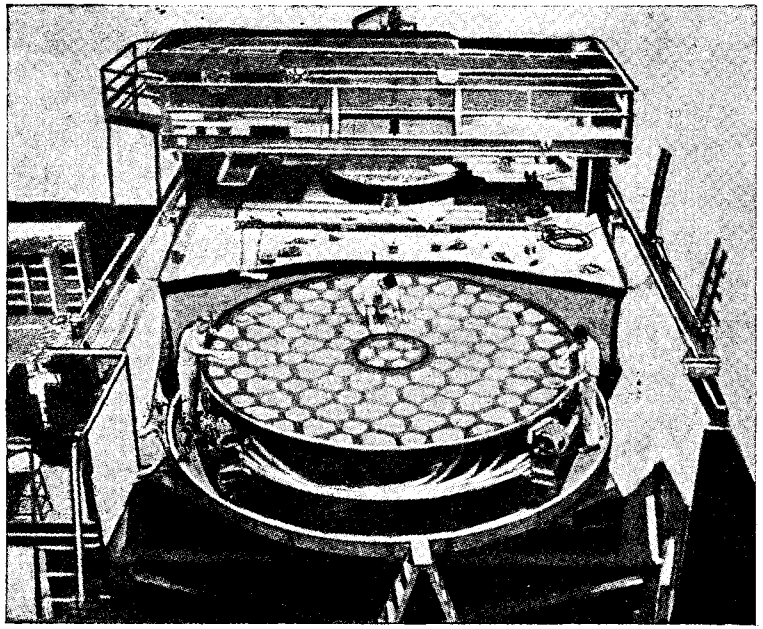
Представьте себе диск стекла диаметром в 5 *м*, весящий 14 $^1/_2$ тонн, в котором сделано углубление в форме мелкой чаши с точностью до миллионной доли дюйма. Зеркало



Фиг. 111. Оправа 100-дюймового телескопа обсерватории Маунт Вилсон.

такого размера должно сохранять свою фигуру не только, когда оно лежит на горизонтальном станке, на котором его шлифуют и полируют, но также и при любом наклоне, как это будет при его работе. Таковы оптические требования к величайшему астрономическому зеркалу

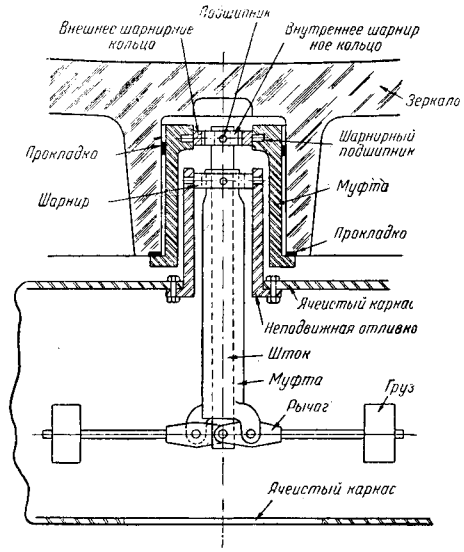
мира — 200-дюймовому зеркалу обсерватории Маунт Паломар (фиг. 112). Строгость этого требования станет нам ещё понятнее, если мы вспомним, что хорошая зеркальная витрина такого размера может отступать от плоскости на один сантиметр, и может быть прогнута или искривлена на величину вдвое или втрое бóльшую, всё ещё не становясь от этого непригодной.



Фиг. 112. Чистка 200-дюймового диска для проверки хода полировки.

Большие размеры означают и большой вес. Проблема уменьшения веса без ослабления жёсткости была разрешена для 200-дюймового диска путём придания ячеистого строения его задней стороне, как показано на прилагаемых рисунках. Ячеистая форма уменьшила общий вес стекла вдвое и в то же время в силу того, что слой стекла везде имеет толщину всего в пять дюймов, время, требующееся для того, чтобы зеркало приняло температуру окружающего воздуха, также сильно уменьшилось. Треугольники, видимые на фотографии зеркала (фиг. 112), представляют места, где нет стекла для уменьшения веса, а круглые отверстия сделаны для помещения остроумной и сложной системы поддерживающих рычагов и уравновешивающих грузов, предназначенных для предохранения оптической поверхности от прогибания (фиг. 113).






Фиг. 113. Поддерживающий механизм для 200-дюймового зеркала.

С тех пор как опубликована эта схема, были внесены изменения, направленные к улучшению поддерживающей системы. Вес зеркала теперь выдерживают прокладки, расположенные много ближе к поверхности зеркала, чем указано на рисунке.

Небольшое зеркало можно легко поместить в просторную оправу, без всякого вреда проложив какой-либо мягкий материал, вроде пропускной бумаги или сукна, между стеклом и дном оправы. Но, если диаметр зеркала

полметра или больше, необходима система подпирающих тарелок, которая обычно конструируется так, чтобы предотвратить сдавливание и изгибание (фиг. 111 и 113). В дополнение к этому, система боковых опор или скоб служит для центрировки зеркала в оправе и ведёт к равномерному распределению давления на края зеркала, когда телескоп наклоняется; о зеркале, подпёртом таким образом, говорят, что оно «плавает».

Оправа для линз столь же важна и должна конструироваться с большой тщательностью, так как в большом, многолинзовом объективе, вроде 20-дюймового астрографического объектива Росса (фиг.55), все линзы должны быть чрезвычайно точно установлены в отношении оптической оси и должны быть сделаны допуски на различия в радиальном температурном расширении стекла и оправы, а также для изменений в расстоянии линз друга в связи с продольным термическим расширением оправы.

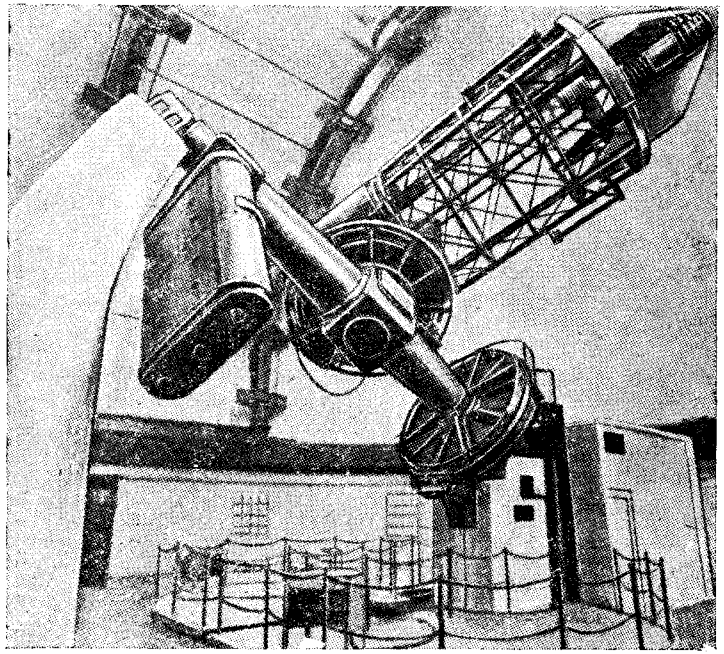
## «ТРУБА»

Труба или каркас, это — хребет телескопа; она служит для того, чтобы удерживать фотографическую пластинку астрографа или окуляр визуального телескопа на правильном расстоянии от объектива. Отсюда ясно, что даже малейший прогиб трубы сместит центр фотографической пластинки или окуляр с оптической оси. Ввиду способности человеческого глаза следовать за медленными изменениями в положении наблюдаемого предмета, труба визуального телескопа, если она защищена от ветра и сотрясения грунта, может обычно делаться из лёгкого материала и может слегка прогибаться и скручиваться. Проблема, однако, сложнее в случае фотографического телескопа. Здесь экспозиции обычно продолжительны, фотографическая пластинка жестка и, раз зажатая в кассету, уже не терпит каких-либо передвижений по отношению к объективу; отсюда—более строгие требования к жёсткости трубы. Лёгкое смещение кассеты с оптической оси может вызвать удлинение или растягивание изображения, что испортит снимок. При конструировании фотографического телескопа допуски очень малы, становясь всё



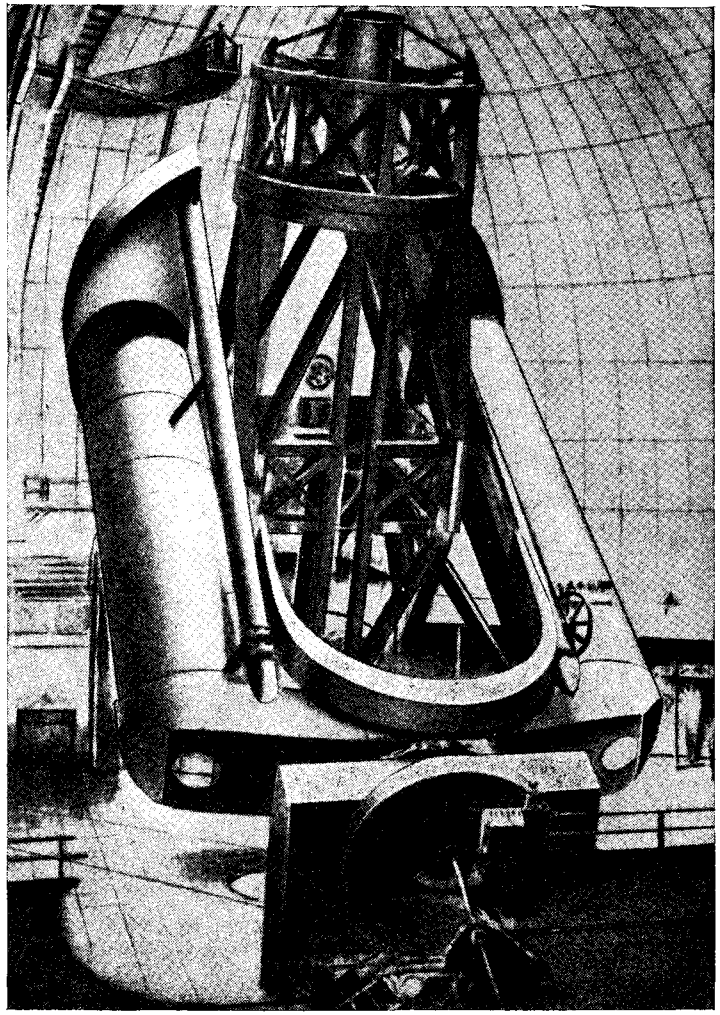
меньше, по мере того как увеличивается фокусное расстояние инструмента.

Многие крупные рефлекторы строятся так, чтобы допускать работу в ньютоновом и кассегрэновском фокусах,



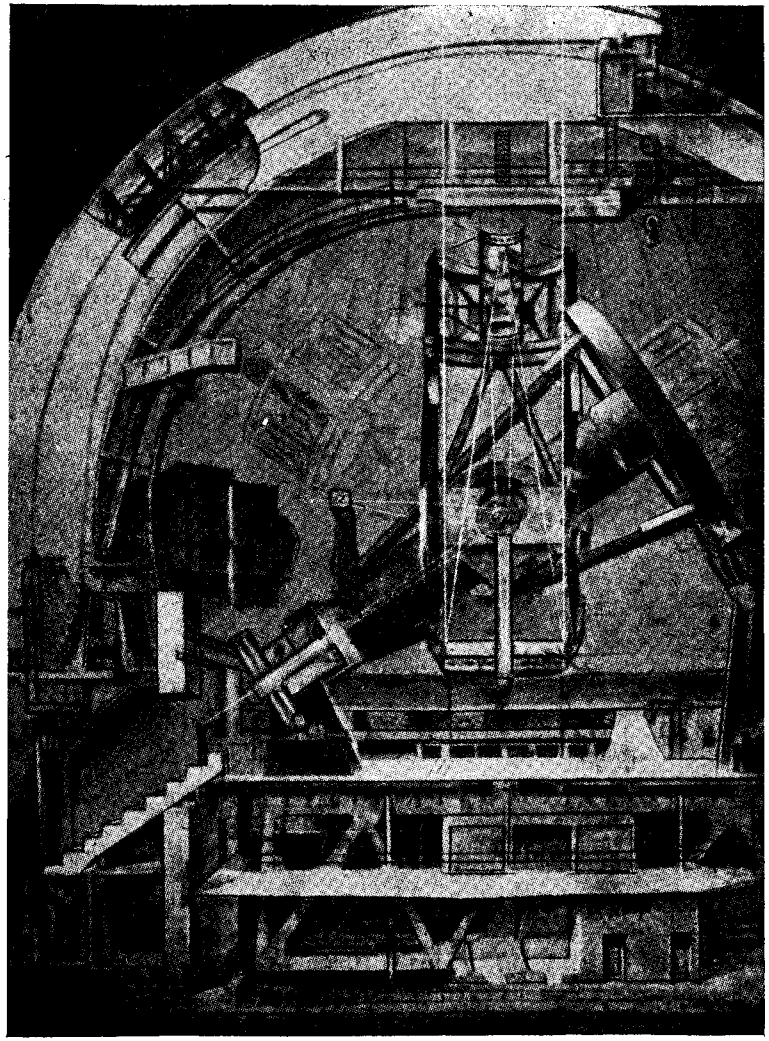
Фиг. 114. 82-дюймовый рефлектор Мак-Дональдовской обсерватории. Особая конструкция верхнего конца трубы делает главный фокус легко доступным.

в фокусе «кудэ», а иногда и в главном фокусе (фиг.37 и 114). Переход от одной формы к другой — дело непростое. Плоское зеркало ньютоновской комбинации должно быть заменено выпуклым зеркалом, если нужно производить наблюдения в кассегрэновском фокусе. Кассета и приспособление для наводки, обычно называемые задним



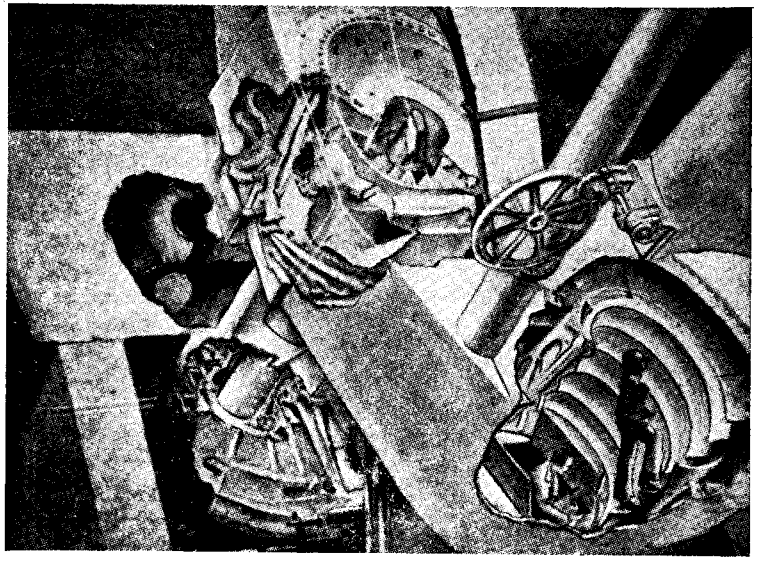
Фиг. 115. 200-дюймовый телескоп (рис. Р. В. Портера).





Фиг. 116. Штатив и купол 200-дюймового телескопа, частично в разрезе (рис. Р. В. Портера).

концом телескопа, должны быть перенесены с верхнего конца телескопа на нижний, а инструмент должен быть как следует уравновешен. Такой перенос отнимает время. Хотя программа наблюдений обычно разрабатывается заранее, так что эти изменения могут быть сделаны днём, иногда бывает желательно перейти от одного расположе-



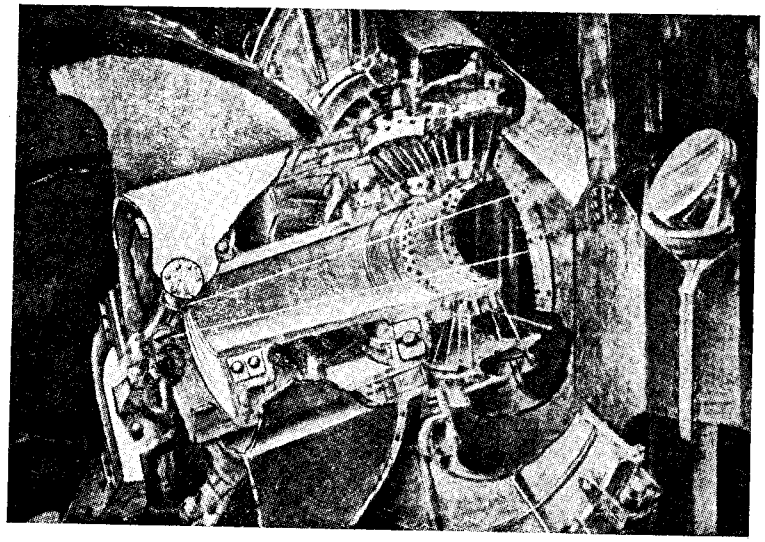
**Фиг. 117.** 200-дюймовый телескоп—южная полярная ось и часть «ярма».
Люди идут внутри одного из плеч «ярма» (рис. Р.В. Портера).

ния к другому в течение ночи. Это будет возможно в 200-дюймовом телескопе, где вспомогательные зеркала так монтированы внутри трубы, что переход от одного расположения, скажем от главного фокуса к фокусу Кассегрэна и «кудэ», может быть выполнен автоматически, посредством управления издали, в течение нескольких минут. Чтобы сделать такие изменения возможными, тысячи килограммов вспомогательных зеркал, оправ зеркал,



моторов и рычагов должны быть уравновешены во всех положениях, и они должны становиться на свои места с точностью, удовлетворяющей требованиям астрономической оптики.

Можно составить себе представление о жёсткости конструкции, так же как и о размерах крупнейшего

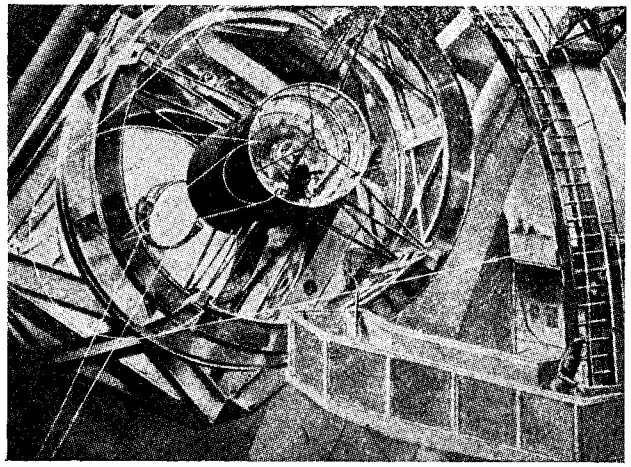


Фиг. 118. Цапфа оси склонения 200-дюймового телескопа.
Обратите внимание на человека, работающего внутри цапфы (рис. Р. В. Портера).

в мире телескопа по многочисленным эскизам, сделанным Портером (фиг. 115, 116, 117, 118, 119), которые показывают внутреннее устройство некоторых частей, как не могла бы показать никакая фотография. Вся конструкция столь тяжела и так жестка, что можно проходить внутри плеч вилки штатива, чтобы попасть в некоторые из спектрографических помещений, расположенных внутри цапфы оси склонения (фиг. 117, 118);

наблюдатель во время экспозиции самым настоящим образом «едет» в телескопе (фиг. 116, 119).

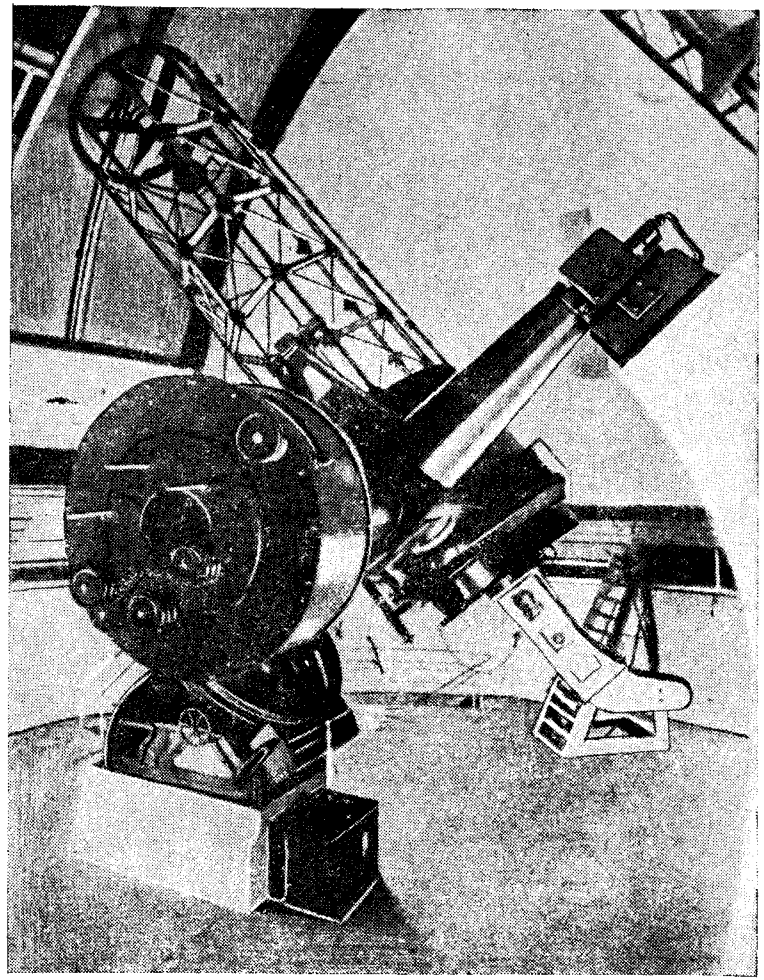
Труба для телескопов изготовляется из самых различных материалов — от бумаги и дерева до разных металлов; в последнее время она часто делается из такого лёгкого материала, как дюраль, или из ещё более лёгких магниевых сплавов. Обычная круглая труба, одинакового



Фиг. 119. Главный фокус 200-дюймового телескопа и наблюдатель, помещающийся в кабине для наблюдения (рис. Р. В. Портера).

диаметра по всей своей длине, иногда заменяется сквозным каркасом призматической формы, особенно в крупных рефлекторах, где желательна лёгкость верхней части (фиг. 120). В конструкции трубы 200-дюймового телескопа мы встречаемся с ещё большим отклонением от принятой цилиндрической формы. Вместо трубы постоянного диаметра посредине расположен отрезок квадратного сечения, от углов которого 20-дюймовые двутавровые балки поддерживают цилиндрические концевые части. Эти две части несут оправу зеркала на одном конце и кабину наблюдателя (для наблюдений в главном фоку-





Фиг. 120. 74-дюймовый рефлектор обсерватории Давид Денлап Торонтского университета (Канада).

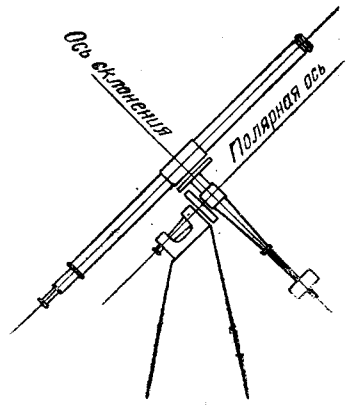
се) — на другом. Строгость требований к жёсткости явствует из того, что вся труба, весящая вместе с зеркалами и кабиной для наблюдателя 140 тонн, не изгибается и не деформируется под влиянием тяжести более чем на 1,5 *мм*. Обычное сооружение сравнимой величины, вроде башни или моста, может раскачиваться и изгибаться под действием тяжести на несколько сантиметров, всё-таки оставаясь надёжным.

## МОНТИРОВКА ТЕЛЕСКОПОВ

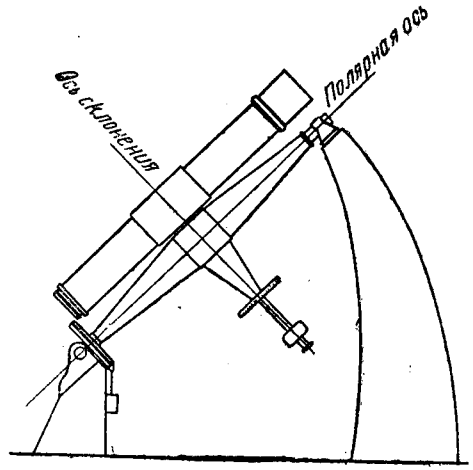
До сих пор мы описывали части самого телескопа, который при всём своём совершенстве был бы бесполезен для астронома, если только последний не обладал бы фантастической силой Геркулеса. Телескоп должен передвигаться из одного положения в другое и наводиться на звезду или на место неба, подлежащее наблюдению. Даже в случае самого малого визуального телескопа опорный механизм должен обладать движениями, позволяющими навести его на любую звезду, появившуюся над горизонтом. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность плавного движения с востока на запад, чтобы можно было следить за звездой в её суточном движении. Так как видимое движение светил с востока на запад происходит от вращения Земли вокруг оси в противоположном направлении, то телескоп обычно бывает установлен на полярной оси, параллельной оси вращения Земли. Эта ось тщательно ориентирована по меридиану, т. е. по линии, соединяющей север с югом, и точно установлена так, чтобы (в северных широтах) её северный конец был направлен как раз на северный полюс неба *). Труба телескопа соединяется с полярной осью не неподвижно,

*) Высота полюса различна в разных местах земного шара. Так, например, на северном полюсе Земли северный полюс неба находится точно над головой, в зените, а для наблюдателя, расположенного точно на экваторе, и южный и северный полюсы неба находятся на горизонте. Для местностей, расположенных между экватором и северным или южным полюсами, соответственно северный и южный полюсы неба возвышаются над горизонтом на угол, равный широте места наблюдения.



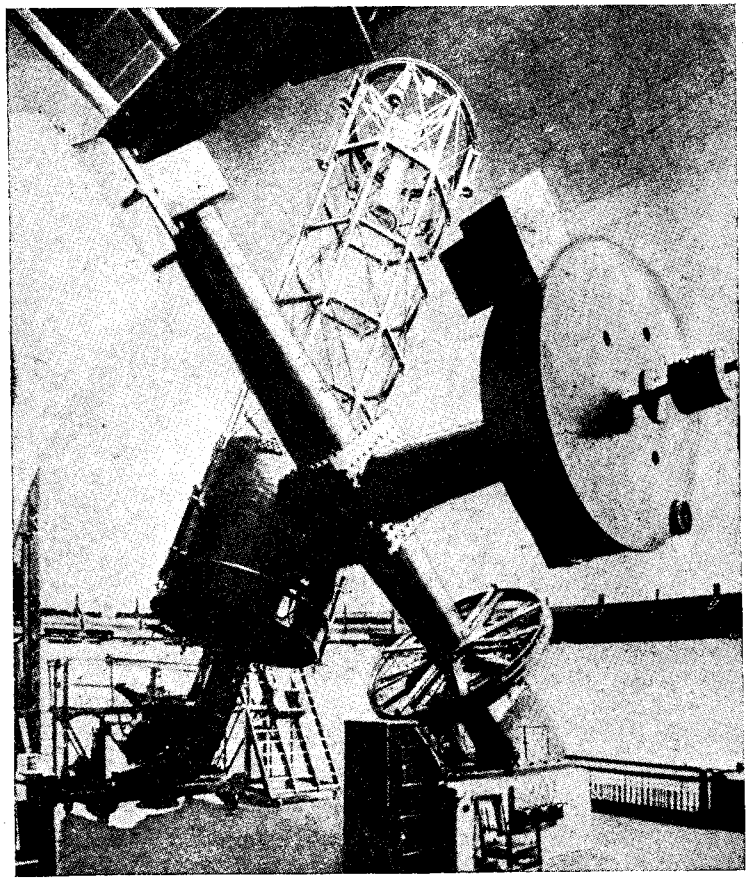



Фиг. 121a. Немецкая экваториальная монтировка.




Фиг. 121b. Английская экваториальная монтировка.

а так, что может вращаться вокруг оси, перпендикулярной полярной. Эта вторая ось называется осью склонения, так как она позволяет телескопу двигаться по склонению от полюса неба до экватора и далее по направлению к другому полюсу (до горизонта). Будучи наведён на объект, телескоп прочно закрепляется на полярной оси. Если теперь вращать полярную ось к западу с той же угловой скоростью, с какой Земля вращается к востоку, то телескоп будет следовать за звездой в её суточном дугообразном пути по небу.

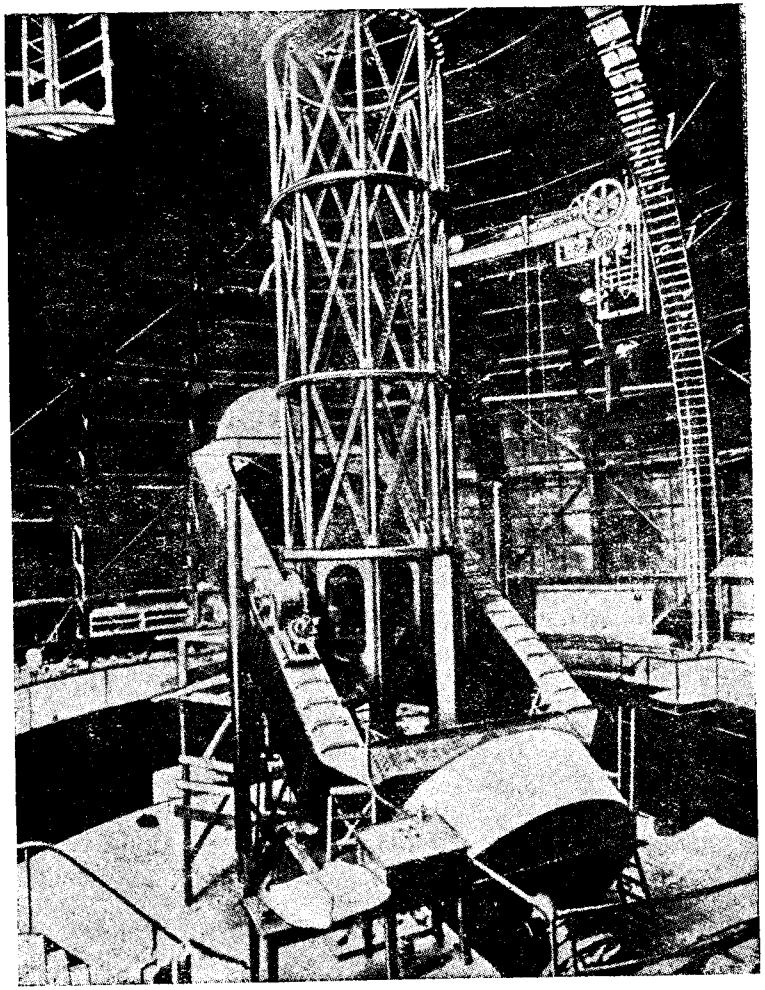


Фиг. 122. 72-дюймовый рефлектор Астрофизической обсерватории в Виктории (Канада).



Различия в практическом осуществлении двух осей и их опор порождают разнообразные типы монтировок, из которых два показаны на фиг. 121. Наиболее распространена *немецкая монтировка* (фиг. 121a и 110), особенно удобная для визуального рефрактора. Короткая полярная ось и одна колонна, поддерживающая инструмент в точке близ середины трубы, дают большую свободу наблюдателю и позволяют направить инструмент на любую часть неба. Вариант этой установки мы находим в *английской монтировке* (фиг. 121b и 122) с двумя колоннами, где полярная ось много длиннее и опирается на две колонны. Ось склонения также удлинена и несёт на себе уравновешивающий груз. Этот тип монтировки особенно желателен, когда телескоп очень тяжёл и отсутствие прогибов и жёсткость очень существенны. Однако и немецкий и английский типы установки имеют тот недостаток, что ими не всегда удобно пользоваться при переходе светила через меридиан, и приходится переводить инструмент с одной стороны колонны на другую сторону. Такой перенос особенно неудобен при фотографических работах, когда долгие экспозиции делаются именно в области меридиана, где вредное действие атмосферы минимально.

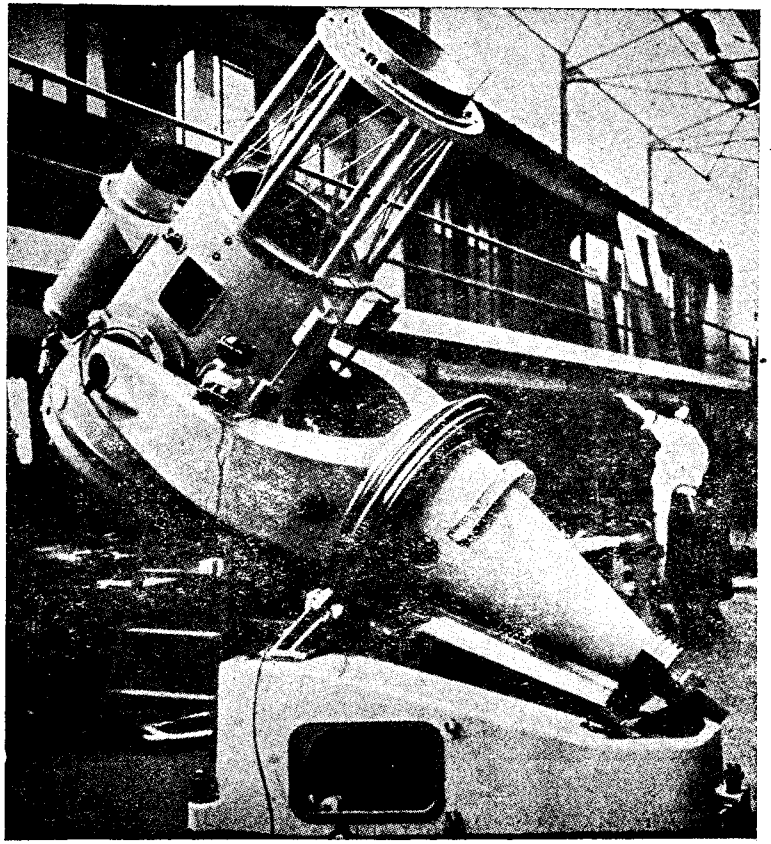
Видоизменением установки английского типа является 100-дюймовый гукеровский телескоп (фиг. 123), труба которого вместо того, чтобы укрепляться на конце оси склонения, уравновешенном на другом конце специальным противовесом, укреплена цапфами в двойной вилке («ярме»), несущей на своих концах северный и южный подшипники. Монтировка в двойной вилке устраняет необходимость перекладывания трубы с востока на запад от колонны, а также нужду в уравновешивании трубы на оси склонения, но имеет тот недостаток, что исключает возможность наблюдений в области полюса неба.



Фиг. 123. 100-дюймовый рефлектор обсерватории Маунт Вилсон.



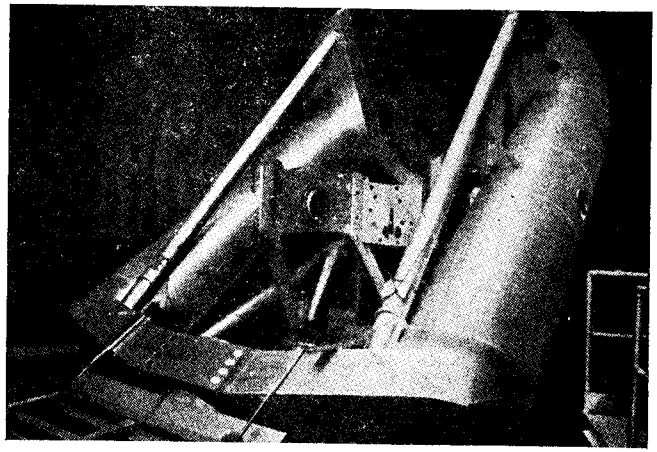
Широко распространённая *монтировка с одной вилкой* (фиг. 124) свободна от многих вышеуказанных недостат-



Фиг. 124. 18-дюймовый телескоп Шмидта, ныне установленный на Маунт Паломар (Калифорния).

ков. Здесь цапфы оси склонения лежат на концах двузубой вилки, так что труба вращается между ними, а ручка вилки выполняет роль полярной оси. При таком

устройстве за звездой можно непрерывно следить от востока до запада без того, чтобы перекладывать инструмент с одной стороны колонны на другую. Эта установка удобна для коротκофокусного рефрактора, а особенно для рефлектора, так как центр тяжести его трубы находится близ нижнего конца, где помещается тяжёлое зеркало в



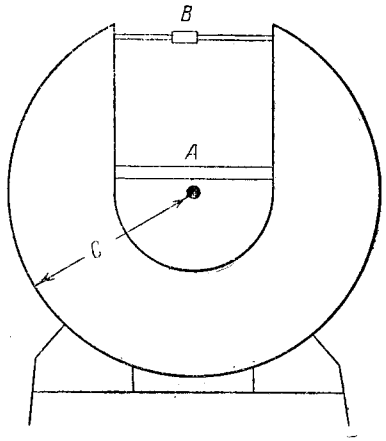
Фиг. 125. Вилка и подкова 200-дюймового телескопа на Маунт Паломар.
Обратите внимание на человека, стоящего в центре.

своей оправе, уравновешивающееся длинной, но лёгкой верхней частью трубы. Этот тип монтировки страдал бы от сильных прогибов, если бы применялся к более крупным инструментам.

Установка для 200-дюймового телескопа на Маунт Паломар соединяет в себе вилку, двойную вилку и установку с двумя колоннами. Здесь вся ось очень похожа на вилку, зубья которой соединены подковой (фиг. 125). Наружный край этой подковы, имеющей диаметр около 14 *м*, является северным подшипником полярной оси. Подкова скользит на тонких подушках из масла, накачиваемого под высоким давлением в промежуток между



металлическими поверхностями. Труба телескопа монтирована таким образом, что она может ложиться внутрь подковы, когда телескоп направлен на полюс. Подобный подшипник столь громаден и поддерживаемый им груз столь тяжёл, что он не смог бы сохранять при работе свою форму под нагрузкой. При поворачивании оси к востоку или западу сила тяжести изгибала бы подкову, деформируя её. Во избежание этого ведущая поверхность обтачивалась следующим образом: была вставлена распорка в *A* (фиг. 126), а в *B* устроена стяжка с гаечной муфтой. Подкова, деформированная таким образом, была установлена в станок и её край обточен по кругу. После удаления брусьев *A* и *B* зубья разошлись. Но, когда инструмент получит рабочую нагрузку, радиус *C* будет оставаться почти неизменным в любом положении.

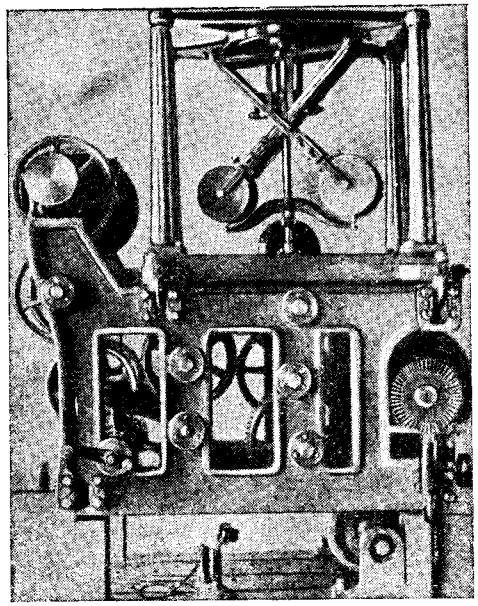



Фиг. 126. Способ деформации подковы 200-дюймового телескопа при обточке ведущей поверхности.

## «ЧАСОВОЙ МЕХАНИЗМ»

Видимое движение звёзд должно быть «устранено» при помощи движущего механизма, обычно называемого часовым, так как первоначальное устройство состояло из часового механизма с гирями. Скорость движения такого механизма должна, однако, беспрерывно меняться, чтобы вносить поправку на *дифференциальную рефракцию*. Когда звезда находится близ горизонта, её свет отклоняется (преломляется) при прохождении из внешних более разрежённых слоёв земной атмосферы в более плотные нижние слои. Звезда кажется поэтому расположенной не-

много выше, чем она есть в действительности. При наблюдении объекта приходится направлять телескоп туда, откуда мы видим приходящий свет. Механизм должен поэтому двигать трубу более медленно у восточной части горизонта, увеличивая эту скорость всё более и более, по мере того как звезда подымается к меридиану. К западу



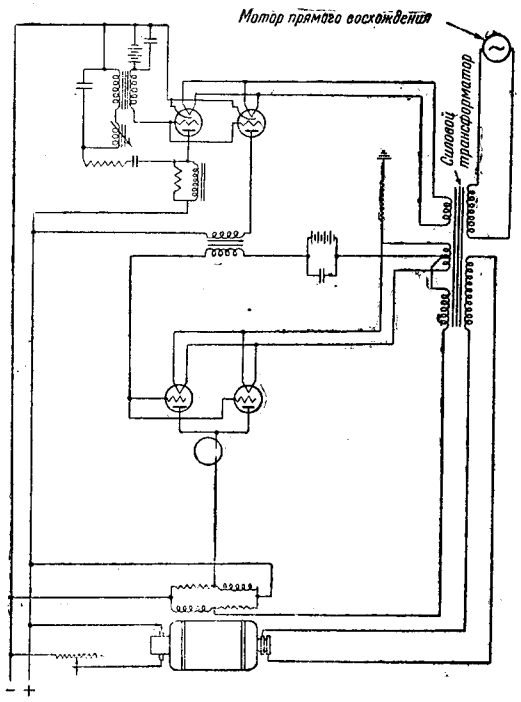
Фиг. 127. Первоначальный часовой механизм 100-дюймового рефлектора.

от меридиана ход должен опять постепенно замедляться. Лишь на меридиане, где суточное движение происходит в горизонтальном направлении и потому параллельно к слоям атмосферы, часовой механизм должен итти со звёздной скоростью.

Часовой механизм с гирями (фиг. 127) — наиболее старый и в некоторых отношениях самый простой, так



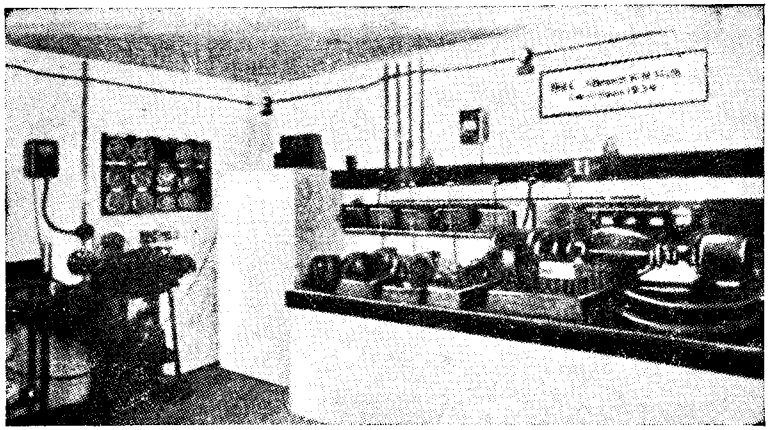
как его ход может регулироваться с помощью механического регулятора. У него, однако, тот недостаток, что его ход нелегко контролировать, когда он в движении. Кроме того, его нужно время от времени заводить, что может производиться автоматически, при помощи электромотора и соответствующих контактов.




Фиг. 128а. Схема регулятора частоты для движущего механизма (обсерватория Мак-Мэз-Хулберт).

В последнее время на первый план выдвинулся синхронный мотор с частотным контролем, усовершенствованный на обсерватории Мак-Мэз-Хулберт (фиг. 128). Двигатель этого типа чрезвычайно точен; в основе его конструкции лежит изменение числа периодов генератора,

которым наблюдатель может точно управлять, изменяя его по своему желанию. Двигатель гибок и хорошо приспособлен к обсерваториям, имеющим лишь один инструмент, но неудобен там, где нужно двигать много инструментов от одного и того же генератора, так как контроль частоты в своём современном виде требует отдельного генератора и контрольного механизма для каждого телескопа.

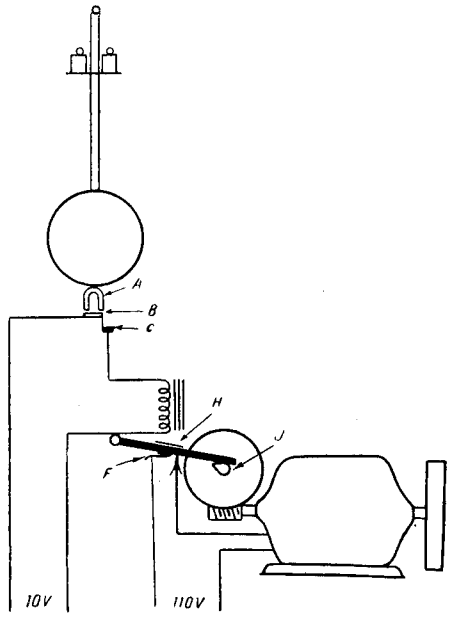


Фиг. 128b. Внутренний вид комнаты главного управления (обсерватория Мак-Мэз-Хулберт).

Чтобы обеспечить простой и независимый контроль для каждого инструмента, профессор В. П. Герриш (Гарвардская обсерватория) ещё в 1900 г. сконструировал электрический двигатель, носящий теперь его имя. Конструкция этого двигателя предусматривает компенсацию колебаний напряжения в обычной сети, особенно для тех случаев, когда обсерватория помещается вдалеке от центральной станции. Он одинаково приспособлен для любого источника электротока, так как предполагает заранее отрегулированные напряжения или частоты. Фиг. 129 показывает двигатель Герриша в той форме, в какой он сконструирован Г. Гансоном



и употребляется сейчас на Гарвардской обсерватории; он работает исключительно от обычной осветительной сети переменного тока. Электромотор соединён зубчатой передачей с червяком и червячным колесом, которое связано с телескопом. Число оборотов электромотора контролируется маятником обыкновенных часов. При прохождении маятника через вертикальное положение магнит *A*, соединённый с маятником, поднимает пластинку *B*, размыкая контакт *C*, отчего прерывается десятивольтовый ток. Как только ток прерван, якорь *H* падает на такое расстояние от электромагнита, чтобы последний не мог притянуть его обратно, хотя десятивольтовый ток замыкается немедленно после прохождения маятником вертикального положения. Когда якорь *H* падает, он замыкает реле *F* (ртутное реле или микрореле), и ведущий мотор начинает работать. С мотором соединён зубчатой передачей палец *J*, который возвращает якорь *H* в его исходное положение, где он удерживается десятивольтовым электромагнитом, пока маятник на возвратном пути не заставляет весь процесс повториться. Промежуток времени между моментом, когда маятник проходит через вертикальное положение, и моментом, когда палец поднимает якорь, обнимает период действия двигателя. Если мотор работает слишком




Фиг. 129. Двигатель Герриш-Гансона.

быстро, он повернёт палец быстрее и выключит ток через более короткое время, после того как маятник освободит якорь *H*. Если же мотор вращается слишком медленно, палец не столь скоро поднимает выключатель *F*, отчего продолжительность действия мотора увеличивается.

В позднейшей конструкции этого двигателя выключатель с электромагнитом заменён фотоэлементом, и сигналы посылаются каждый раз, когда маятник пересекает маленький пучок света, падающий на фотоэлемент. Маятник часов в этом случае качается абсолютно свободно, не делая работы поднятия якоря, как в старой модели.

Ход часов может быть легко изменён даже во время работы путём увеличения или уменьшения нагрузки маятника, вследствие чего повышается или понижается центр тяжести. Большое преимущество этого двигателя заключается в том, что он может работать как на переменном, так и на постоянном токе и не требует контроля частоты или напряжения тока.

## ГИДИРОВАНИЕ

Даже если приняты все меры к тому, чтобы движение было предельно точно, всё же остаются небольшие ошибки, которые до настоящего времени наилучшим образом устраняются в том случае, если при телескопе беспрерывно находится наблюдатель, который исправляет эти ошибки в течение всего времени экспозиции *). Для этой цели каждый фотографический телескоп снабжается вспомогательным визуальным телескопом или микроскопом для гидирования. Объект, подлежащий фотографированию, или близкая к нему звезда обычно устанавливаются на кресте нитей, сделанном по большей

*) Разработка приспособлений для фотоэлектрического автоматического гидирования идёт очень быстро, но до сих пор автоматическое гидирование не получило широкого распространения в повседневной работе.



части из паутинок *), и изображение звезды держится всё время в таком положении, чтобы крест нитей рассекал его; для этого обычно применяются микрометрические ключи.

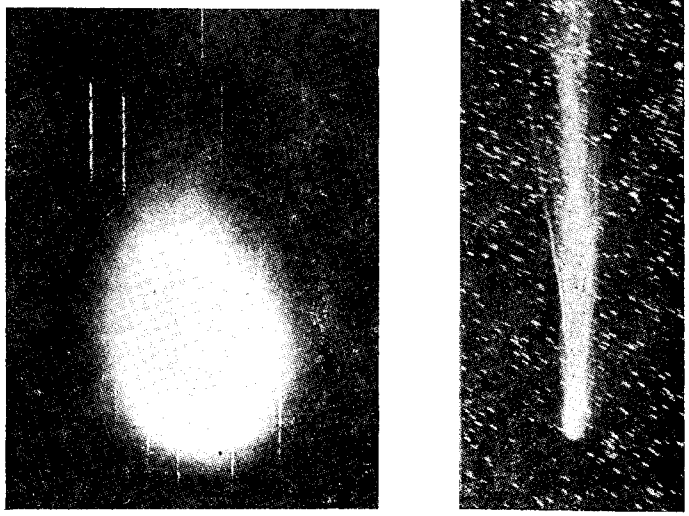
Если подлежащий фотографированию объект движется по отношению к звёздам (комета, астероид), то вычисляют угловое движение этого объекта и ориентируют микрометрический винт, составляющий часть окуляра каждого хорошего телескопа-гида, в желаемом направлении движения. Наблюдатель тогда периодически поворачивает головку винта на нужную часть оборота, смещая таким образом крест нитей в желаемом направлении, держа в то же время ведущую звезду на пересечении нитей. На фотографии движущегося объекта (фиг. 130) звёзды иногда выходят в виде неправильных чёрточек из-за того, что наблюдатель не в состоянии в каждый данный момент держать изображение звезды в точности рассечённым нитью надвое. За исключением редких случаев, на практике избегают гидировать по самому подвижному объекту, особенно если он имеет размытые очертания, как голова кометы.

При данном отверстии телескопа-гида гидирование будет тем легче, чем больше его фокусное расстояние по сравнению с фокусным расстоянием фотографического телескопа, так как небольшой сдвиг ведущей звезды в поле телескопа-гида будет соответствовать ещё меньшему сдвигу изображения на фотографической пластинке в отношении фокусных расстояний обоих телескопов. В некоторых случаях отношение отверстий обоих телескопов ещё важнее для успешного гидирования. Не рекомендуется пользоваться для гидирования телескопом с отверстием, составляющим менее половины отверстия фотографического телескопа. Обычно, подлежащие фотографированию объекты на несколько звёздных величин слабее самой слабой звезды, видимой в

*) Паутинные нити применяются из-за их большой эластичности, обеспечивающей достаточное натяжение при различных условиях температуры и влажности. Ночью крест освещается маленькой электрической лампочкой и представляется тонкими светящимися нитями на фоне неба.

телескоп того же отверстия, и, если фотографируемый участок не богат яркими звёздами, трудно будет найти хорошую ведущую звезду в достаточной близости. Затруднение будет не столь велико в случае телескопа-гида с достаточно большим отверстием.

Прогибы представляют величайшее затруднение для хорошего гидирования, особенно, если телескоп имеет значительную длину. Устранение прогибов в трубах



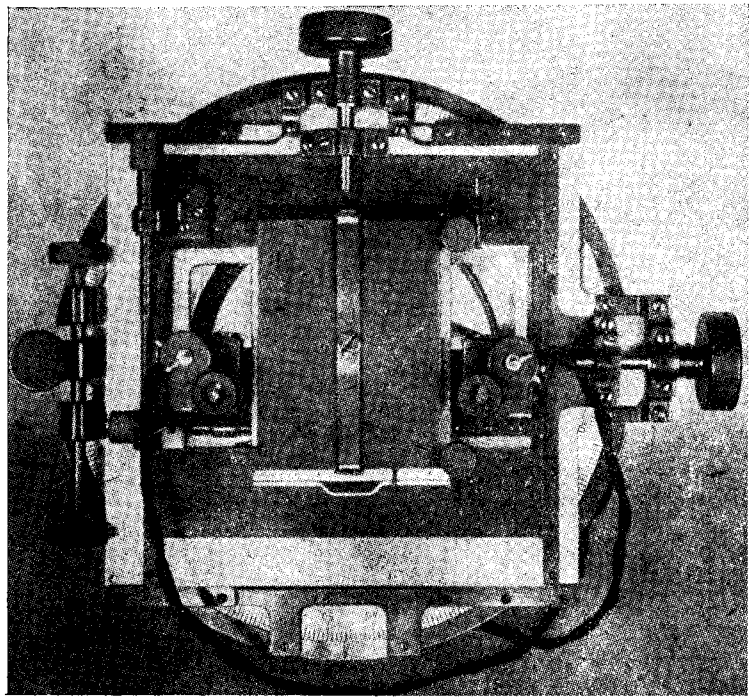
*a* *b*

Фиг. 130. Следы звёзд, образовавшиеся вследствие движения телескопа, гидированного по комете, движущейся с иной видимой скоростью, чем звёзды.

*a* Голова кометы Галлея 1910 г., *b* Комета Морхауза 1908 г.

фотографического телескопа и телескопа-гида, а также в соединении между ними составляет целую проблему при конструировании телескопа. Один из способов избежать влияния такого прогиба состоит в применении подвижной кассеты (фиг. 131). В этом приспособлении гидирующий микроскоп приделан к держателю кассеты, который может передвигаться с ним как целое, в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Передвижения производятся с помощью двух точных винтов, двигающих весь агрегат в фокальной плоскости телескопа. Наблюдатель наводит микроскоп на звезду, обычно у края поля зрения, и затем двигает кассету, гидируя с помощью микроскопа. Так как это приспособление допускает передвижения в двух направлениях, то оно называется кассетой с двойными салазками.

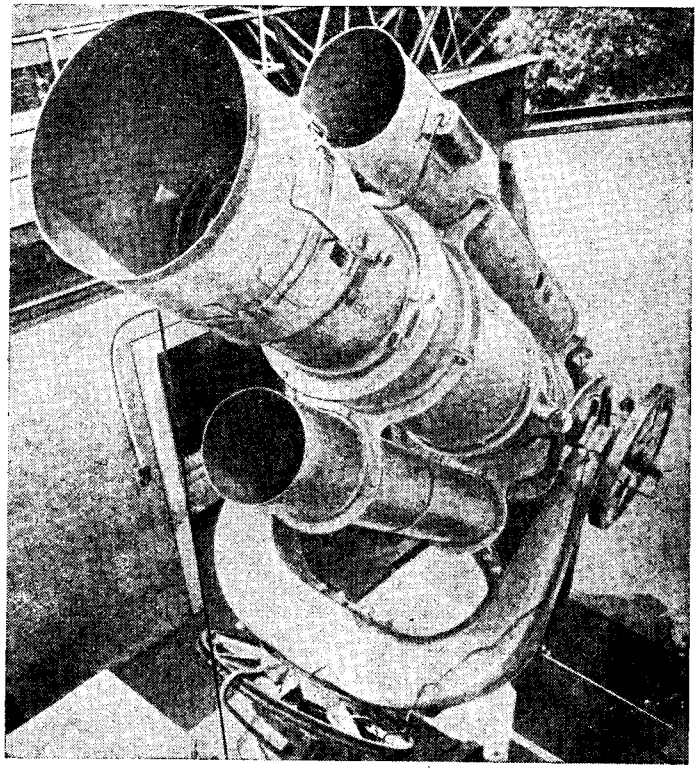




Фиг. 131. Кассета с двойными салазками.

## ВЫГНУТЫЕ ПЛАСТИНКИ; НАСАДКА ПРОТИВ РОСЫ

Мы уже видели (глава 4), что качество изображения изменяется, по мере того как мы переходим от центра



Фиг. 132. Насадка против росы на 16-дюймовом телескопе в Ок Ридже.

поля зрения к его краю. Это происходит вследствие различных аберраций, в том числе вследствие кривизны поля. Для того чтобы получить большее полезное поле, рефрактор может быть снабжён выгнутыми пластинками,



как это, например, делается для 16-дюймового телескопа Меткальфа на станции Ок Ридж Гарвардской обсерватории (фиг. 132). Фотографическая пластинка вкладывается в кассету с вогнутой задней стенкой и из пространства между ними выкачивается воздух. Тогда атмосферное давление прижимает пластинку к вогнутой стенке.

В случае камеры Шмидта приходится решать обратную задачу. Здесь фокальная поверхность представляет сферу, выпуклую в направлении зеркала, с радиусом кривизны, равным фокусному расстоянию телескопа. Кривизна пластинки достигается здесь прижиманием пластинки к кассете с соответственно выпуклым дном. Неудобство большой кривизны частично устраняется тем, что пластинка изгибается эмульсией наружу, на выпуклой стороне. Это увеличивает прочность пластинки, получающей защитную оболочку в виде эмульсии. Если употребляется плёнка, которая часто сминается в кассете, задняя стенка кассеты продырявливается, чтобы можно было применить откачивание воздуха для прижимания плёнки к выпуклой поверхности. Ещё один способ удержания плёнки на месте состоит в натягивании её на выгнутое основание кассеты при помощи кольца, удерживающего её за края.

Важным приспособлением к телескопу, особенно необходимым во влажном климате, является насадка от росы. Она служит для защиты объектива и, будучи снабжена грелками (фиг. 132), предупреждает осаждение влаги на передней поверхности. Обыкновенная 15-ватная грелка или электрическая лампочка, заключённая в коробку и приделанная к наружной стороне насадки, достаточны для поддержания температуры на долю градуса выше точки росы.

## ПОМЕЩЕНИЕ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА

Одна из задач, с которой встречаются при постройке телескопа, это — сооружение хорошего помещения для него. Для временной защиты от непогоды достаточно парусинового чехла, наброшенного на инструмент. Ин-

струмент может даже быть разобран и спрятан, как в случае маленьких камер (фиг. 133), которые снимаются со штатива и уносятся в фотолабораторию для заряжения.

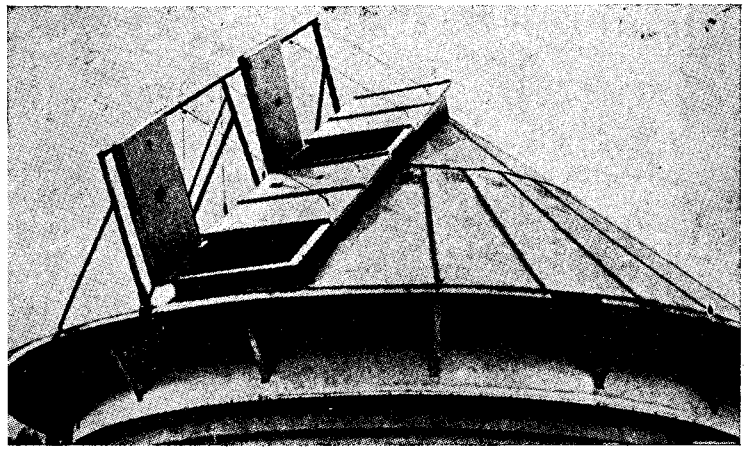
При увеличении размеров инструмента нужда в солидном укрытии становится острее. Очень простое помещение для телескопа средней величины — будка с откатывающейся крышей. Помещение этого типа имеет тот недостаток, что оно не обеспечивает хорошей защиты от ветра на время работы телескопа. Поверхность, которая выставлена на ветер, у большого телескопа весьма значительна и требует тщательной конструкции ставень или защитных козырьков, особенно, если труба сплошного, а не решётчатого типа. Даже лёгкий ветер губительно действует на результаты фотографирования, а если инструмент расположен на вершине горы, то сильные ветры могут составить настоящую проблему.

Фиг. 133. Миниатюрный телескоп, вероятно, наименьший из действующих.

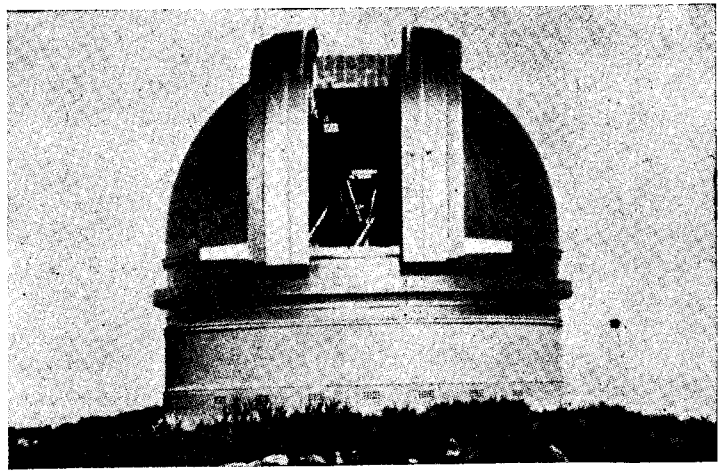
Объектив диаметром $^3/_4$ дюйма, светосилой $^1/_5$, с пластинкой 2,5×2 дюйма.

Для больших телескопов необходима башня или купол и, кроме того, весьма полезны дополнительные парусиновые завесы или разъёмные заслонки (фиг. 134). Башня или купол должны допускать вращение, чтобы щелевидное отверстие, через которое телескоп направляется на небо, могло быть ориентировано в любом направлении. Здесь опять-таки возникают значительные трудности, связанные с прочностью и весом, возрастающие при всяком увеличении размеров телескопа. Полушаровидный стальной купол для 200-дюймового телескопа имеет 41 *м* в



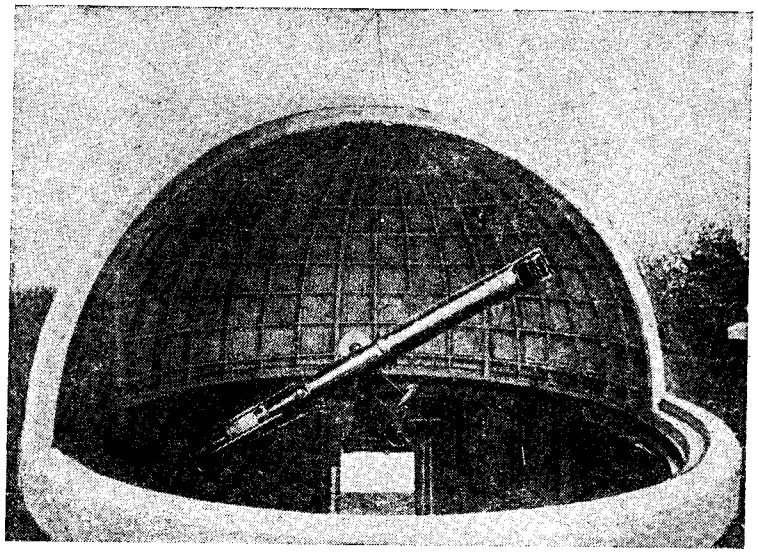


Фиг. 134. Купол специальной конструкции для горной станции Гарвардской обсерватории (Клаймакс, Колорадо).



Фиг. 135. Купол 200-дюймового телескопа (Маунт Паломар, Калифорния).

диаметре, весит 1000 тонн и монтирован таким образом, что его можно легко и плавно поворачивать (фиг. 135). Возведение такого большого полушария особенно трудно; надо иметь в виду, что подвижный купол не может быть наглухо закреплён на фундаменте и что он разрезан от точки, лежащей за зенитом, до основания, для того чтобы



Фиг. 136. Для специальных целей иногда необходимо строить купола необычного типа.

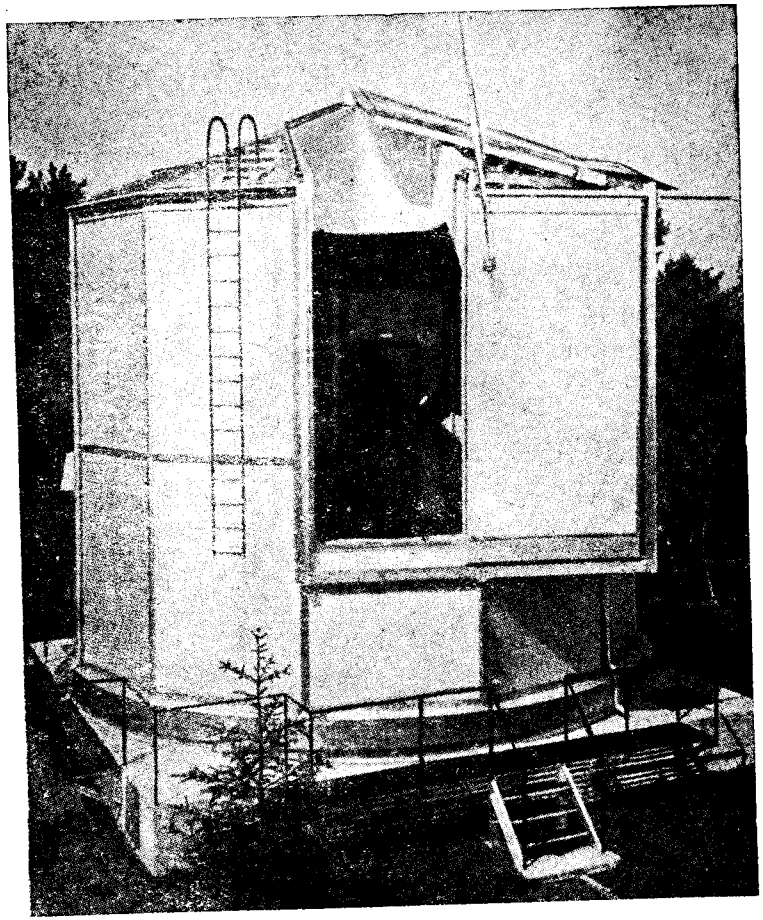
Рисунок показывает рассечённый купол 6-дюймового рефрактора Кларка на студенческой обсерватории Висконсинского университета. Одна половина купола больше другой и может вращаться вокруг неё. Таким образом, половина неба может быть открыта для наблюдений.

открыть широкое отверстие, через которое телескоп направляется на объекты наблюдений. Эта щель не может иметь каких-либо поперечных скрепов.

Выбор между сферической формой и ящичным или башенным устройством основан не только на архитектурных или финансовых соображениях, но зависит и от силы



ветра. В случае полушаровидного купола одна составляющая давления ветра направлена по радиусу сферы,

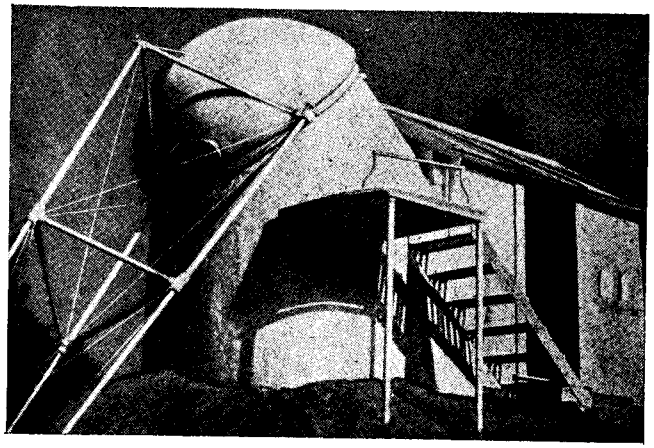


Фиг. 137. Башня Джеветтовского телескопа в Ок Ридже.

так что такая конструкция более устойчива, чем другие. Всюду, где проблема ветра не столь серьёзна, башен-

ный тип одинаково полезен и в то же время более экономичен.

Существует много видоизменений конструкций помещений, особенно приспособленных для специальных случаев. Помещение для джеветтовского телескопа на станции Ок Ридж Гарвардской обсерватории (фиг. 137) вы-



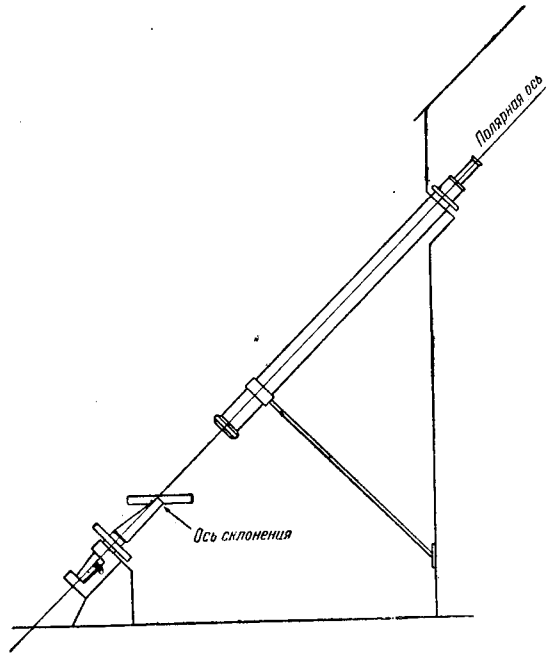
Фиг. 138. Телескоп с вращающейся башней в Стеллофейне.

деляется тем, что вся постройка вращается у самого основания. Типичная комбинация телескопа с вращающейся башней, это — конструкция, принятая в Стеллофейне, где купол представляет полярную ось и несёт на себе зеркало, составляющее часть самого телескопа (фиг. 138). Полярный телескоп (фиг.139) особенно удобен для наблюдателей, желающих оставаться на месте или работать в тёплом помещении.

Фиг. 140 показывает трубу телескопа инструмента Лумиса на Иельской обсерватории, установленную параллельно земной оси и направленную вниз на зеркало, отражающее небо. Самый крупный недостаток этого устройства состоит в том, что отражающее зеркало и



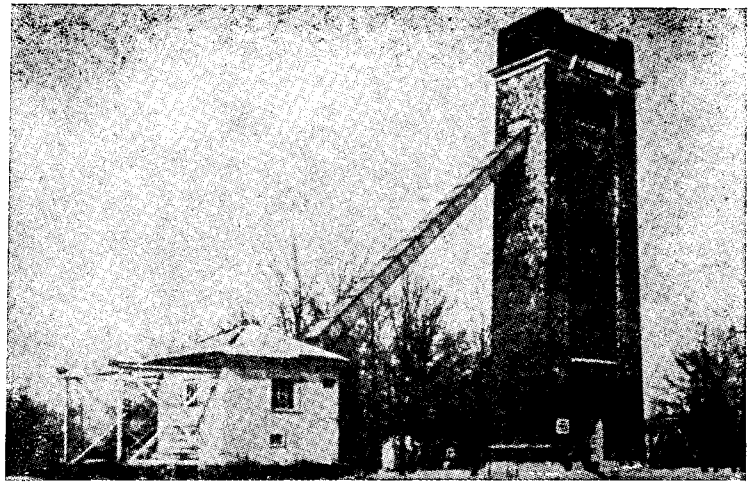
объектив (если это рефрактор) по необходимости помещаются близко к земле, в положении, вредном для качества изображений, но удобство, даваемое неподвижностью окуляра, может оказаться очень желательным, если при-




Фиг. 139. Полярный телескоп.

меняются нежные или громоздкие вспомогательные приборы.

Устройство «кудэ» для рефлекторов (глава 5) обеспечивает удобство неподвижности наблюдателя, как в полярном телескопе. Оно особенно подходит для спектрографа с высокой дисперсией, который громоздок и требует постоянной температуры, а также неподвижности изображения.



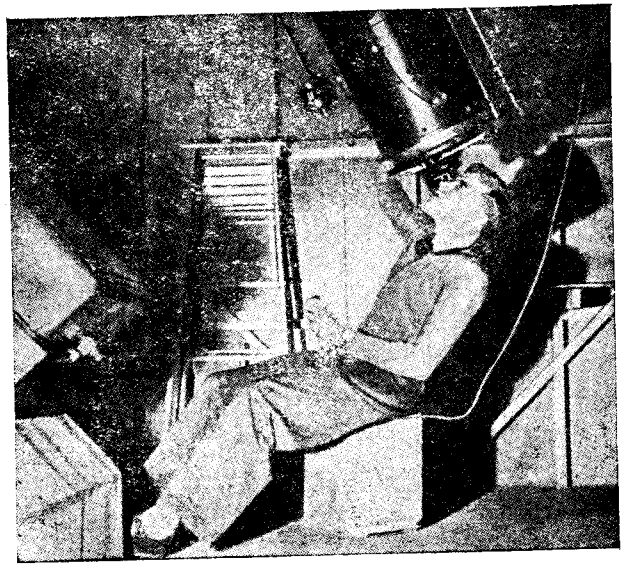
Фиг. 140. Башенный телескоп Лумиса на обсерватории Иельского университета.

## ФОТОЛАБОРАТОРИЯ

Хотя при повседневной наблюдательной работе обработка фотографических пластинок и может производиться на расстоянии многих километров, желательно наличие на месте фотолаборатории для заряжания кассет, испытания и стандартизации пластинок и для других работ. Если фотолаборатория предназначается также и для проявления негативов, то её конструкция и оборудование должны быть тщательно продуманы, хотя бы обслуживаемый ею инструмент и был очень мал. Форма и размеры фотолаборатории определяются различными обстоятельствами, но её расположение и оборудование должны выбираться в соответствии с нуждами наблюдателя и с характером предполагаемой работы. Если производятся длинные экспозиции, со сменой пластинок через каждый час или около этого, то короткая прогулка в тёмную комнату будет приятной переменой для наблюдателя, особенно, если ему пришлось гидировать



скорчившись (фиг. 141). В случае коротких экспозиций, когда пластинки могут сменяться каждые 5 минут, близкое расположение фотолаборатории сэкономит и силы и время.



Фиг. 141. Гидирование телескопа.

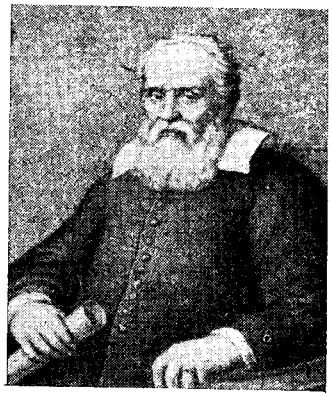
Очень удобна фотолаборатория с проточной водой, хотя в холодном климате и требует некоторой защиты от холода. Применение отапливаемой комнаты для разряжания холодных пластинок, только что экспонировавшихся в телескопе, повышает опасность осаждения на них росы и понижает их ценность для фотометрических целей. При современном состоянии фотографии, когда широко применяются пластинки для инфракрасных лучей, фотолаборатория должна иметь сушильную камеру, необходимую при гиперсенсибилизации *), так как, хотя

*) См. главу 3.

и возможно сушить пластинки, просто держа их перед обыкновенным вентилятором, это представляет значительную опасность запыления. Фотолаборатории с кондиционированным воздухом, очищенным от пыли, ещё не нашли широкого применения в астрофотографической практике. Тем не менее, они желательны, так как не следует проходить мимо чего бы то ни было, могущего содействовать стандартизации фотографического процесса и устранению случайностей в астрономической работе, где простое пятнышко может обозначать галактику, а несколько лишних зёрнышек серебра — катастрофическую судорогу звезды или хвост кометы.

## БУДУЩЕЕ

Дистанция от маленькой трубы Галилея до гигантских рефлекторов нашего времени неизмерима, но следует помнить, что современный телескоп, со своим плавным механизмом, управляемым одним пальцем, не мог существовать ещё 100 лет назад. Такие телескопы стали возможны лишь после технического прогресса и создания электромотора в прошлом столетии, после усовершенствований в производстве стекла и в исскустве шлифовки и полировки оптических поверхностей.

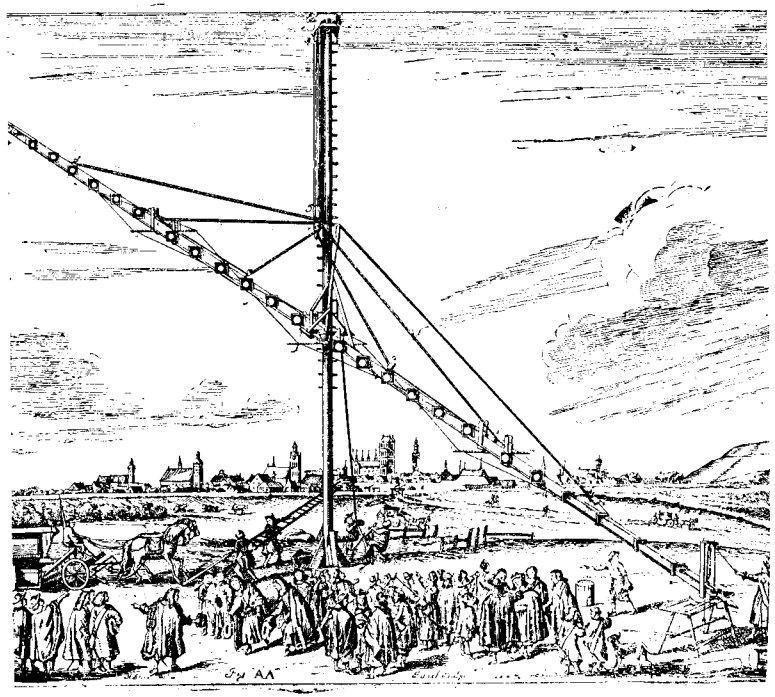


Фиг. 142. Галилей со своим телескопом.

Со времён Галилея линза состязалась с зеркалом с переменным успехом. Первенство переходило от линзы к зеркалу, затем опять к линзе и, наконец, снова к зеркалу. Это не случайно. При каждом качании маятника истории телескопа происходил новый прогресс в той или иной области техники. Каждый раз, когда



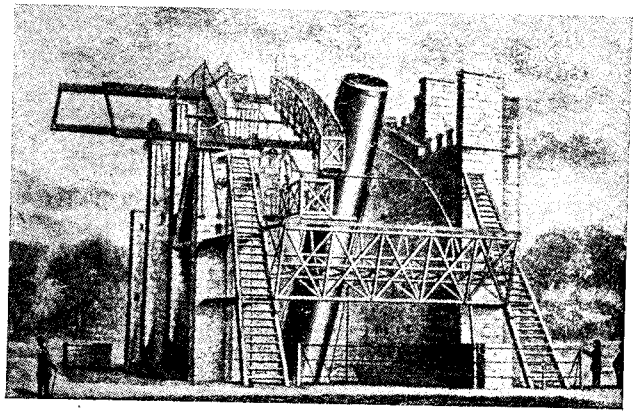
телескоп увеличивался в размере или возрастала его эффективность, перед техниками и инженерами вставала новая задача. И всякий раз наблюдатель умел «выжать» из своего инструмента всё, что он мог дать.



Фиг. 143. Телескоп XVII столетия.

Хотя телескоп Галилея был только игрушкой (см. фиг. 142), в руках своего создателя, являвшегося в то же время искусным наблюдателем, он стал мощным орудием и дал толчок к лучшему познанию строения солнечной системы. Маленький телескоп Галилея открыл фазы Венеры, спутников Юпитера и тысячи слабых звёзд, невидимых простым глазом. Если телескоп, обладающий отверстием всего в один дюйм, мог открыть

столь поразительные явления, что же можно было открыть с более мощным инструментом? Этот вопрос был толчком, создавшим спрос на бóльшие и бóльшие телескопы. Но, по мере увеличения размеров, недостатки оптических деталей становились всё резче; особенно это касается хроматической и сферической аберраций. Для их уменьшения длина трубы увеличивалась, пока не



Фиг. 144. Телескоп лорда Росса.

дошла до 15 и 30 *м* у телескопов конца XVII столетия (фиг. 143). Даже с такими неуклюжими инструментами наблюдатели продолжали расширять наши знания о небесных объектах и сделали телескоп настоящим орудием исследования. Между тем маятник начал своё движение к зеркальному телескопу. Создание зеркального сплава сделало возможным изготовление зеркал*) большого размера (фиг. 144) с поверхностью, допускавшей довольно лёгкую полировку и сохранявшей блеск

*) Джон Гадлей в 1722 г. не только представил Королевскому Обществу 6-дюймовое параболическое зеркало, но и опубликовал свои способы полировки, параболизации и испытания правильности фигуры зеркала.



в течение продолжительного времени. Такие зеркала имели ещё то достоинство, что были свободны от хроматической и сферической аберраций.

Затем последовало развитие новой техники стекловарения, которая дала большие диски*) оптического стекла, как крона, так и флинта, допускавшие изготовление больших хроматически-исправленных объективов. На некоторое время этот успех дал линзам преимущество перед зеркалами. Однако после разработки метода химического осаждения серебра на стекле**), означавшего, что отражающая поверхность могла быть возобновлена без новой полировки, всё возрастающий спрос на большие телескопы второй раз отклонил маятник в сторону зеркального телескопа.

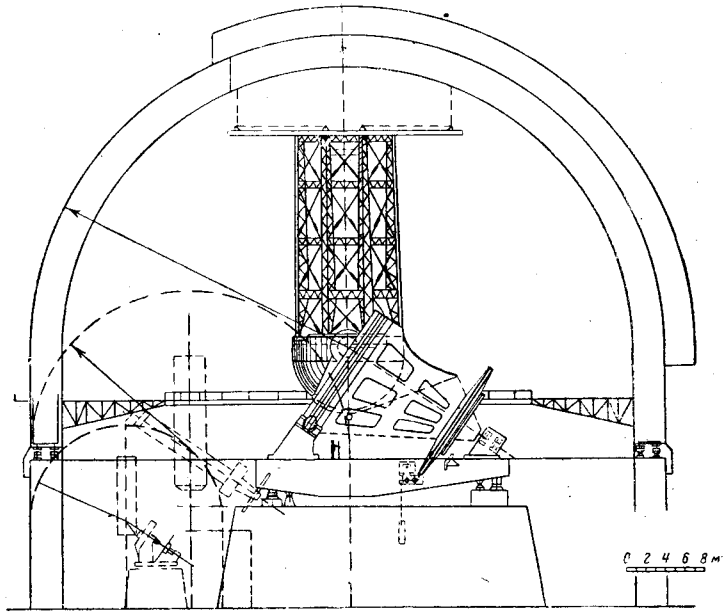
За это время техника приготовления оптического стекла сильно улучшилась, и мир увидел завершение 36-дюймового Ликского и 40-дюймового Иерксского рефракторов, достигших границы возможной величины линз, поскольку дело шло о жёсткости стекла. Но зеркало обещало бóльшие возможности. Его можно было легко подпереть с задней стороны, так что размеры телескопа стали опять зависеть лишь от диаметра стеклянного диска, который можно было бы должным образом отжечь. Когда производство стекла в Соединённых Штатах Америки достигло высокой ступени развития, отжиг в электрической печи позволил отлить величайший диск диаметром в 200 дюймов для Паломарской обсерватории.

Быть может, не слишком дерзок вопрос: что таит будущее? Конечно, нельзя предсказать будущие успехи науки и техники, но мы можем наметить новые пути в конструкции оптических приборов, в повышении чувствительности фотографической пластинки и в других областях. Пожалуй, наиболее важное современное достижение, это — шмидтовская комбинация из линзы и зеркала (глава 4), обладающая достоинствами и зеркала

*) Швейцарский ремесленник Пьер Луи Гинан в 1799 г. приготовил «безупречные диски флинтгласса диаметром в целых 6 дюймов».

**) Карлом Августом Штейнхейлем в 1856 г. и Жаном Бернардом Леоном Фуко в 1857 г.

и линзы, но устраняющая некоторые недостатки того и другой. Как мы уже видели, коррекционная пластинка может быть сделана из тонкого материала, так как изменение её формы вследствие прогибания имеет малое

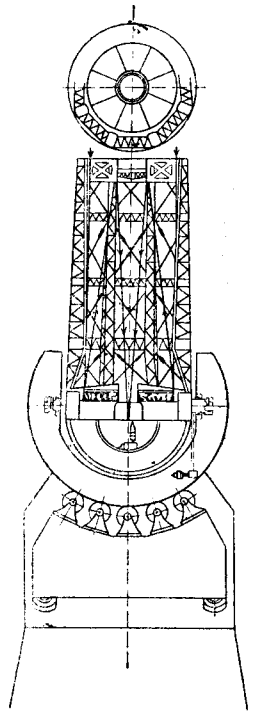



Фиг. 145a. Набросок 300-дюймового рефлектора; вид сбоку. (Рис. Ф. Г. Пиза.)

значение. Её тонкость устраняет вредное поглощение света сравнительно толстыми линзами рефрактора и не представляет производственных затруднений, поскольку дело касается размеров, так как всё сводится теперь лишь к отливке больших листов зеркального стекла. Но у нас уже есть 200-дюймовый диск для зеркала. Увидит ли 2000 год 200-дюймовую камеру Шмидта? Или мы будем строить всё бóльшие рефлекторы с зеркалами диаметром в 400, 800 или 1000 дюймов?



Мы не должны забывать о возможности создания электронного телескопа. Один способ осуществления подобного инструмента был уже предложен, но нельзя предвидеть будущих возможностей; достаточно вспомнить, как ещё недавно разработаны фотоэлектрические и флуоресцирующие поверхности, открыты электронный умножитель и электронная лампа. Предположения уже давно вышли из стадии мечтаний, но если бы это и было пока иначе, то к чему бояться мечтать? Ещё в 1921 г. о 300-дюймовом телескопе думал и даже спроектировал его Ф. Г. Пиз. Теперешний 200-дюймовый телескоп воплощает в себе многие черты, казавшиеся мечтой 20 лет назад. Сравните фиг. 145, 115, 116 и следующие.



Фиг. 145b. Вид 300-дюймового рефлектора в направлении полярной оси. (Рис. Ф. Г. Пиза.)

Нужно помнить также, что повышение эффективности телескопа не обязательно связано с увеличением размеров. При удвоении размеров мы вчетверо увеличиваем светособирающую силу, получая таким образом возможность фотографировать звёзды, более чем на одну величину слабéйшие. Начнём с другого конца. Не можем ли мы повысить эффективность фотографической пластинки? В течение последних двадцати пяти лет повышение чувствительности эмульсии главным образом зависело от улучшения её чувствительности к жёлтому и красному свету. Но повышение чувствительности эмульсии к синим лучам не происходило в той же пропорции. Куда привели бы те затраты средств и сил, ушедших за 25 лет на увеличение размеров телескопов, если бы их предметом было

усиление мощности телескопа при помощи повышения чувствительности фотографической эмульсии!

Достаточно ли нами исследованы возможности других способов регистрирования количества света, получаемого в фокальной плоскости телескопа? Мы знаем, что свет изменяет скорость течения некоторых процессов, например, роста или распада микроорганизмов. Возможно ли, что астрономы будут выращивать в своих лабораториях культуры бактерий и подсчитывать число бактерий для получения более полной картины вселенной?

Астрономия в прошлом делала заимствования у других наук, и теперь она тоже готова испытать новые возможности. В конце концов, фотографический процесс есть только одно из средств для определения интенсивности света звёзд, и результаты будут столь же интересны, будем ли мы подсчитывать зёрнышки серебра или микроорганизмы; всё дело в том, чтобы суметь подсчитать их с достаточной точностью.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

I. «Невидимое» стекло
II. Лучевые скорости
III. Крупнейшие рефлекторы (от 40 дюймов и выше)
IV. Крупнейшие рефракторы (от 25 дюймов и выше)
V. Крупнейшие камеры Шмидта
VI. Камеры Шварцшильда. Камеры Райта

# ПРИЛОЖЕНИЕ I

# «НЕВИДИМОЕ» СТЕКЛО

Для дальнейшего повышения эффективности инструментов особое значение имеют новейшие успехи в устранении потерь на отражение света от поверхностей раздела стекло — воздух. История «невидимого» стекла, отнюдь не завершённая ещё и сейчас, показывает, как учёные иногда не замечают довольно очевидных возможностей. После работ Юнга, проведённых около 1800 г., опыты над интерференционными полосами были самым обычным явлением. Никто, однако, не замечал возможностей, открываемых приложением результатов этих опытов к устранению довольно серьёзных потерь на отражение от поверхностей раздела стекло — воздух.

Со дня первого применения стекла знали, что пучок света, падающий на полированную поверхность стекла, граничащую с воздухом, расщепляется на преломлённый и отражённый лучи. В случае обыкновенной границы стекло — воздух или воздух — стекло отражается около 4% света, а 96% продолжает свой путь (см. главу 1). Если оптическая система содержит десять поверхностей раздела стекло — воздух, половина которых из кронгласса, а другая половина из флинта, то лишь 50% падающего света пройдёт насквозь. Загрязнение поверхностей и несовершенная полировка увеличивают потерю света на отражения. Потери света в соединении с отблесками и «духами» считались в прошлом достаточно серьёзными, чтобы настаивать на ограничении числа поверхностей стекло — воздух в фотографических или других системах десятью.



В 1892 г. Деннис Тейлор открыл, что потускневший снаружи объектив телескопа пропускает заметно больше света, чем новый объектив равного отверстия. Во время первой мировой войны Коллморген пытался искусственно вызвать потускнение поверхностей для избежания потерь на отражение.

В 1934 г. новая техника создания таких поверхностных плёнок была применена Стронгом; она была усовершенствована далее в 1938 г. Картрайтом и Турнером и примерно в то же время, но иным путём, Екатериной Блоджет.

В общем процесс состоит в нанесении тонкой интерференционной плёнки на поверхность стекла одним из нескольких возможных методов. Если удовлетворяется условие $n^2_{\text{плёнки}} = n_{\text{стекла}}$ и если толщина плёнки равна $^1/_4$ длины волны, то в отражённом пучке происходит интерференция с полным уничтожением колебаний. Четыре или пять процентов энергии, уничтоженной таким образом в отражённом пучке, должны добавиться к проходящему пучку путём интерференции с усилением колебаний. Таким образом, весь падающий свет преломляется. Тот же интерференционный процесс происходит на каждой поверхности раздела стекло — воздух, безразлично задней или передней. В результате этого оптическая система восстанавливает свою полную эффективность, не считая потерь вследствие поглощения.

Картрайт обнаружил, что плёнки хлористого или фтористого магния очень прочны, но плёнки фтористого лития или кальция более эффективны. При правильном нанесении плёнки можно достичь стопроцентного эффекта для определённой длины волны; однако ни при какой другой длине волны энергия отражённой волны не превышает энергии волны, отражённой от необработанного стекла, поскольку дело касается интерференции первого порядка. Такие плёнки имеют оптическую толщину в $^1/_4$ длины волны, что для натриевого света составляет около 0,00015 *мм*. Более толстые плёнки вносят интерференцию высших порядков; и в самом деле, путём применения более толстых слоёв можно усилить интенсивность отражённого луча до такой степени, что стекло

примет вид хорошего зеркала для какого-либо определённого цвета. Эффективность плёнки фтористого лития во всей видимой области спектра такова, что она снижает отражение от первоначального значения, равного примерно 5%, до 0,1%. Остаточное отражение очень слабо, при белом свете обладает красноватым оттенком и совершенно незаметно при жёлтом свете. Фтористый литий, к сожалению, очень хрупок и применим только для хорошо защищённых поверхностей. Кроме того, он настолько растворим в воде, что требует защиты от росы. Фтористый кальций в этом отношении лучше. Проблема хрупкости плёнок разрешена несколькими способами для военных надобностей. Астрономы смогут воспользоваться этими методами.

Из условия $n^2_{\text{плёнки}} = n_{\text{стекла}}$ следует, что показатель преломления плёнки должен быть около 1,23 для кронгласса. К сожалению, твёрдых тел с таким низким показателем преломления не существует. Фтористый литий — одно из наименее преломляющих веществ — имеет показатель преломления 1,39. Трудность получения столь низких показателей задержала приложение теории «невидимого» стекла.

Испаряя плёнку в вакууме определённого оптимального давления, удаётся получить плёнку, имеющую структуру, напоминающую швейцарский сыр. Вся толща слоя пронизана мелкими отверстиями. Средний показатель преломления среды вследствие этого понижается и может действительно быть снижен до 1,23. Согласно принципу Гюйгенса, субмикроскопические полости ведут себя как источники вторичных волн и вследствие этого не рассеивают света. Плёнка так тонка, что практически не влияет на оптическое действие даже в случае астрономических телескопов.

Мисс Блоджет готовила интерференционные плёнки путём отложения мономолекулярных слоёв жирных кислот, в частности, раствора арахидата кадмия. Около 22 погружений, или 44 мономолекулярных слоя, дают нужную оптическую толщину в $^1/_4$ длины волны света. Для уменьшения показателя преломления до 1,23 она помещала поверхности после покрытия в ванну из



алкоголя или ацетона, которые растворяли стеариновую кислоту — один из компонентов плёнки, — оставляя скелетную структуру со средним показателем преломления 1,23. Эти ячейки имеют молекулярные размеры и предположительно пусты. Такие плёнки очень хрупки и годятся только для плотно закрытых поверхностей.

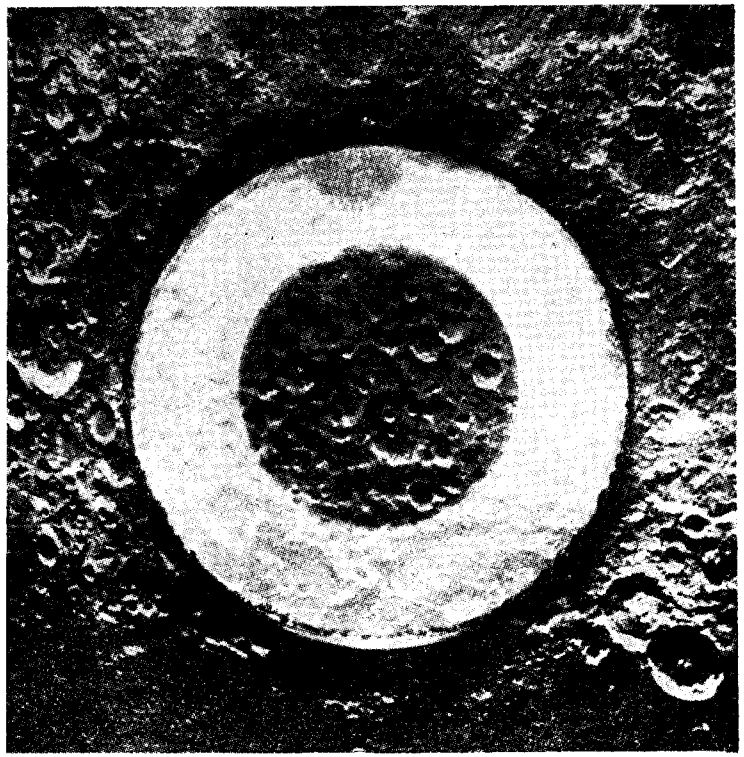
Стеклянные поверхности можно заставить потускнеть посредством подходящих химикалий. Так, например, азотная кислота вызывает потускнение определённых сортов стекла, включая баритовый крон и свинцовое стекло. Потускневшая поверхность может быть прочнее накладываемой плёнки, полученной испарением, но в целом она менее эффективна.

В последних работах пользовались парами фтористоводородной кислоты, которые превращают поверхность стекла в тонкий слой почти чистого кварца. Такие плёнки вполне постоянны. Отсутствие в настоящее время способов контроля заставляет воздерживаться от применения этого метода из-за опасения, что обработка ценных оптических частей этими парами превратит точные поверхности в закристаллизировавшиеся слои. Ещё лучшие и более практичные методы используются для военных целей, но в настоящее время не разрешается их описывать *).

Всюду, где астрономы или астрофизики пользуются стеклянными поверхностями, граничащими с воздухом, обработка, устраняющая отражение, должна оказаться эффективной. На фиг. 146 воспроизведён поразительный снимок, сделанный сквозь поверхности раздела стекло — воздух, обработанные и необработанные. В проходящем свете необработанное кольцо почти непрозрачно, в то время как обработанный кружок кажется невидимым,

*) Большие успехи в области уменьшения отражения света поверхностью стекла были достигнуты советскими учёными. Группа научных сотрудников Государственного Оптического института при участии академиков Гребенщикова и Теренина, члена-корреспондента АН СССР Обреимова разработала теорию вопроса и предложила ряд новых способов получения «невидимого» стекла. Подробное изложение вопроса читатель найдёт в монографии «Просветление оптики» под редакцией акад. Гребенщикова, Гостехиздат, М.—Л., 1946. (*Прим. ред.*)

если не считать пыли и красноватого отражения. Астрономические спектрографы чрезвычайно выиграют от такого повышения эффективности.



Фиг. 146. Фотография поверхности Луны покрыта стеклянным диском, центральная часть которого обработана с обеих сторон для уничтожения отражений.

На рисунке видно, что при сильном освещении лунные кратеры столь же хорошо видны через центральную обработанную часть стеклянного диска, как и на совершенно открытой части фотографии. Сквозь необработанное кольцо кратеры едва заметны.

# ПРИЛОЖЕНИЕ II

# ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ

Определение длины волны линий звёздных спектров служит не только для открытия химического элемента, производящего данную линию в звёздной атмосфере, но также даёт нам сведения о движении звезды в пространстве. Если источник света находится в движении по отношению к наблюдателю в направлении луча зрения, то длины волн различных спектральных линий изменяются под влиянием этого движения. Это явление называется *эффектом Допплера*. Если источник обладает скоростью $v$ по лучу зрения (называемой *лучевой скоростью*), то смещение $d\lambda$ любой линии поглощения или испускания, имеющей длину волны $\lambda$, даётся формулой

$$d\lambda = \left(\frac{v}{c}\right)\lambda,$$

где $c = 300\,000$ *км/сек* есть скорость света в пустоте. Смещение спектральной линии по спектру пропорционально длине волны этой линии. Поэтому линии поглощения в красной части спектра смещаются сильнее, чем линии, расположенные в синей части спектра. Эти смещения всегда чрезвычайно малы, за исключением спектров очень удалённых галактик. Скорости, меньшие, чем скорость снаряда, не могут быть обнаружены даже с помощью самых точных спектрографических определений. Величина $d\lambda$ может быть измерена на спектрограммах, полученных с щелевым инструментом. После этого величина $v$ может быть определена по вышеприведённой формуле. Чем выше дисперсия и разрешение, тем точнее

можно измерить лучевую скорость. Скорость движения звезды вычисляется путём сравнения наблюдённых длин волн в спектре звезды с найденными в лаборатории длинами волн для той же линии или тех же линий. Вследствие движения Земли вокруг Солнца и вращения Земли вокруг оси наблюдённые скорости должны быть пересчитаны на скорости по отношению к Солнцу.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕКТИВНОЙ ПРИЗМЫ

Со времени первого применения объективной призмы астрономы пытались найти способ определения лучевых скоростей по снимкам, полученным с объективной призмой. Вся проблема заключалась в получении подходящих стандартных длин волн, отпечатанных рядом с каждым спектром звезды или на нём.

Фиг. 59 показывает большое число звёздных спектров, сфотографированных на одной пластинке с помощью объективной призмы. Наиболее удачный современный способ определения лучевых скоростей по этим спектрам заключается в пропечатывании на спектре каждой звезды какой-либо линии поглощения известной длины волны посредством фильтра, помещённого перед фотографической пластинкой. Единственно известный подходящий для этой цели фильтр — раствор хлористого неодимия. Часть спектра поглощения неодимия лежит в жёлтой и красной областях спектра и состоит из широких полос трудно определимых длин волн. Но в синей части есть вполне резкая полоса, пригодная в качестве эталона длины волны. Эта полоса поглощения неодимия почти столь же резка, как и линии звёзд, подлежащие измерению. Желательно, однако, иметь по крайней мере две длины волны для повышения точности измерений и для определения лучевых скоростей более холодных звёзд, линии поглощения которых сливаются с одиночной линией неодимия, мешая измерениям. Применение хлористого неодимия в качестве эталона было усовершенствовано в Гарварде Боком и Мак-Куски, определившим лучевые скорости нескольких сотен звёзд.



Э. Пикеринг пытался следующим образом получить лучевые скорости по негативам, снятым с объективной призмой. Сначала производилась экспозиция звёздного участка нормальным способом. Затем призма поворачивалась вокруг оптической оси на 180°, и телескоп снова наводился на тот же участок неба. Готовый снимок содержал по два спектра для каждой звезды, лежащие бок о бок, но расположенные в обратной последовательности длин волн. Синие концы каждого спектра могли быть при этом совмещены. Смещения линий поглощения, производимые эффектом Допплера, происходят в противоположных направлениях. Этот метод не дал результата, так как он требовал недостижимой жёсткости длинной трубы телескопа. Это легко понять, если припомнить, что один микрон на негативе может соответствовать 10 *км/сек*. При столь больших ошибках в определении лучевых скоростей наблюдения оказываются на границе пригодности.

Несомненно, что метод парных спектров может быть успешен только в том случае, если спектры фотографируются одновременно. Р. В. Вуд предложил способ, называемый способом бипризмы с решёткой. Вуд закрывает отверстие камеры двумя призмами с параллельными основаниями и приблизительно одинаковым преломляющим углом, но противоположно ориентированными. Каждая призма закрывает половину отверстия. Пропускающая решётка на каждой призме даёт главную часть дисперсии. Решётки сами по себе дают спектры первого порядка, которые, не будь призм, были бы на пластинке далеко друг от друга. Отклонение, производимое призмами, используется для того, чтобы сблизить спектры и расположить их бок о бок. Небольшая дисперсия, производимая призмами, добавляется к дисперсии решёток, но её величина мала в сравнении с линейной дисперсией, даваемой решётками. В настоящее время стараются построить достаточно большие решётки и бипризмы, чтобы фотографировать спектры звёзд, ещё недоступных щелевым спектрографам.

Тот же метод может применяться с одинаковым успехом с одними призмами. Две призмы с нулевым отклонением

покрывают отверстие объектива по половине каждая. Дисперсии ориентируются в положении 180° одна к другой. Отсутствие отклонения обеспечивает то, что получающиеся спектры лежат бок о бок. Полученные так спектры должны дать лучевые скорости почти с той же точностью, как и скорости, определённые при помощи *щелевого* инструмента, обладающего такой же дисперсией.

Сходное устройство, заключающее две призмы с нулевым отклонением и противоположно направленной дисперсией, можно применить для бесщелевого спектрографа. Идеальный спектрограф для лучевых скоростей слабых объектов можно было бы создать из комбинации бесщелевого спектрографа типа Мак-Карти и расщепленной призмы и масок в фокальной плоскости для устранения вредного фона неба.



## ПРИЛОЖЕНИЕ III

## КРУПНЕЙШИЕ РЕФЛЕКТОРЫ (от 40 дюймов и выше)

| Обсерватория | F/D | Диаметр D в дюймах | Фокусное расст. F в м | Год постройки | Кем построен: Зеркало | Кем построен: Монтировка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Маунт Паломар, Калифорния, США | 3,3 | 200 *) | 16,50 | Не зак. | Браун | Вестингауз |
| Маунт Вилсон, Пасадена, Калифорния, США | 5,1 | 100 | 12,70 | 1917 | Ричи | Ричи |
| Анн-Арбор, Мичиган, США | — | 96 **) | — | — | — | — |
| Мак-Дональд, Маунт Лок, Техсас, США | 4,0 | 82 | 8,10 | 1939 | Лундин | Уорнер и Суэзи |
| Радклифф, Претория, Южная Африка | — | 76 *) | — | Не зак. | Грэбб—Парсонс | Грэбб—Парсонс |
| Денлап, Ричмонд Хилл, Онтарио, США | 4,9 | 74 | 8,95 | 1933 | » | » |
| Лорд Росс, Парсонстаун, Ирландия | 8,7 | 72 | 15,60 | 1845 | Ныне разобран и хранится в музее | |
| Астрофизическая обсерватория, Виктория, Канада | 5,0 | 72 | 8,95 | 1919 | Брэшир | Уорнер и Суэзи |
| Перкинс, Делавар, Охайо, США | 4,3 | 69 | 7,50 | 1932 | Фекер | » |
| Гарвард, Ок Ридж, Массачузетс, США | 5,1 | 61 | 7,75 | 1937 | » | Фекер |

*) Зеркало готово для параболизации. Монтировка в основном закончена.
**) Только стеклянный диск.

*Продолжение приложения III*

| Обсерватория | F/D | Диаметр D в дюймах | Фокусное расст. F в м | Год постройки | Кем построен: Зеркало | Кем построен: Монтировка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Гарвард, Ок Ридж, Массачузетс, США . . | 5,2 | 61 | 8,00 | 1900 | Коммон, зеркало ныне разобрано | |
| Блумфонтэйн, Южная Африка . . . . . | 5,1 | 60 | 7,88 | 1933 | Коммон—Фекер (ретушировано заново) | |
| Маунт Вилсон, Пасадена, Калифорния . . | 5,0 | 60 | 7,50 | 1908 | Ричи | Ричи |
| Кордоба, Боск Алэгрэ, Аргентина . . . | 5,0 | 60 | 7,50 | 1940 | Фекер | Уорнер и Суэзи |
| Мельбурн, Австралия . . . . . | 7,6 | 48 | 9,13 | 1870 | Грэбб | Грэбб |
| Гершель, Слоу, Англия . . . . . | 8,2 | 48 | 9,85 | 1789 | Гершель | Гершель |
| Лассель, Мальта . . . . . | — | 47 | — | 1860 | Лассель, уничтожено | Не существует |
| Парижская обсерватория, Франция, перенесено в Сен Мишель, Прованс, 1942 . . | 6,5 | 47 | — | 1932 | Кудэ (ретуширован заново) | |
| Флагстафф, Аризона, США . . . . . | 5,0 | 44 | 5,53 | — | Кларк | — |
| Мератэ, Италия . . . . . | 5,0 | 40 | 5,03 | 1926 | Цейсс | Цейсс |
| Симеиз, Крым, СССР . . . . . | 5,0 | 40*) | 5,03 | 1928 | Грэбб—Парсонс | Грэбб—Парсонс |
| Стокгольм, Сальтсиобаден, Швеция . . . | 5,0 | 40 | 5,03 | 1931 | » | » |

*) Во время второй мировой войны вывезен немцами в Германию и там приведён в негодность. (*Прим. ред.*)



# ПРИЛОЖЕНИЕ IV

# КРУПНЕЙШИЕ РЕФРАКТОРЫ

## (от 25 дюймов и выше)

| Диаметр в дюймах | Фокусн. расст. в м | Дата | Кем построен | Местонахождение |
|---|---|---|---|---|
| 40,0 | 19,0 | 1897 | Альван Кларк, Уорнер и Суэзи | Иерксская обсерватория, Вилльямс Бэй, Висконсин, США. Диски были первоначально привезены для телескопа университета Южной Калифорнии, для установки на Маунт Вилсон. Объектив был изготовлен Лундиным старшим и Кларком младшим. |
| 36,0 | 17,3 | 1888 | Альван Кларк, Уорнер и Суэзи | Ликская обсерватория, Маунт Гамильтон, Калифорния, США. Имеется 33-дюймовая коррекционная линза. |
| 32,7 | 15,9 | 1889 | Братья Анри, Готье | Астрофизический отдел Парижской обсерватории, Медон. На том же штативе рефрактор отверстием в 24,4 дюйма. |
| 31,5 | 11,8 | 1899 | Штейнхейль | Астрофизическая обсерватория в Потсдаме. |
| | | 1916 | Штейнхейль, переделан Репсольдом | Фотографический объектив; на том же штативе имеется 19,7-дюймовый визуальный. |
| 30,0 | 13,9 | 1914 | Брэшир, Уорнер и Суэзи | Аллегени, Питтсбург, США. Фотографический объектив; имеется 12-дюймовая визуальная коррекционная линза, вставляющаяся приблизительно посредине трубы. |
| 30,0 | 15,8 | 1886 | Братья Анри, Готье | Обсерватория Бишоффсгейм Парижского университета, Ницца. |
| 30,0 | 13,9 | 1885 | Альван Кларк, Репсольд | Главная Астрономическая обсерватория Академии Наук СССР, Пулково. Установка разрушена во время второй мировой войны. |
| 28,0 | 8,4 | 1893 | Грэбб, Рансом и Симмс | Королевская Обсерватория, Гринвич. Этот визуальный объектив может быть превращён в фотографический путём переворачивания кроновой линзы и изменения расстояния между линзами. |

*Продолжение приложения IV*

| Диаметр в дюймах | Фокусн. расст. в *м* | Дата | Кем построен | Местонахождение |
|---|---|---|---|---|
| 27,0 | — | 1927 | Мак Доуэлл, Местн. мастер. | Обсерватория Ламонт-Хасси Мичиганского университета, Блумфонтэйн, Южная Африка. |
| 26,8 | 20,7 | — | Штейнхейль | Астрономическая обсерватория, Трептов, Берлин. Этот телескоп применяется только для публичных демонстраций. |
| 26,8 | 10,3 | 1880 | Говард Грэбб | Университетская обсерватория, Вена. |
| 26,5 | 10,5 | — | Говард Грэбб | Университетская обсерватория, Трансвааль. |
| 26,0 | 9,7 | 1873 | Альван Кларк<br>Уорнер и Суэзи (перемонтирован) | Морская обсерватория, США, Вашингтон. |
| 26,0 | 9,8 | 1883 | Альван Кларк | Обсерватория Мак Кормик Университета Виргинии, Шарлоттенсвиль. Виргиния, США. |
| 26,0 | 6,7 | 1897 | Говард Грэбб | Королевская обсерватория, Гринвич. Объектив фотографический, на том же штативе—30-дюймовый рефлектор для равновесия. |
| 26,0 | 10,8 | — | Мак Доуэлл, Местн. мастер. | Южная Станция Иельской обсерватории, Иоганнесбург, Трансвааль. Фотографический объектив. |
| 25,6 | 10,2 | — | Цейсс | Университетская обсерватория, Берлин-Бабельсберг, Неубабельсберг (Берлин). |
| 25,6 | — | — | Цейсс | Университетская обсерватория Митака (Токио). На том же штативе ещё 13,8-дюймовый фотографический телескоп. |
| 25,6 | 10,2 | — | Цейсс | Астрономическая обсерватория Белградского университета, Югославия. |
| 25,0 | 9,0 | 1869 | Т. Кук и сыновья | Обсерватория физики Солнца Кембриджского университета, Кембридж, Англия. |



# ПРИЛОЖЕНИЕ V

## КРУПНЕЙШИЕ КАМЕРЫ ШМИДТА

| Обсерватория | *F*/*D* | Диаметр коррекционной пластинки в дюймах | Диаметр зеркала в дюймах | Кем изготовлена | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Оптика | Установка |
| Гарвард . . . . . | 2,5 | 60 | 60 | Фекер | Фекер |
| Паломар . . . . . | 2,5 | 48 | 72 | Хендрикс | |
| Тонанцинтла . . . . | 3,5 | 25 | 31 | Перкин—Эльмер | Гарвард |
| Школа Кэйз . . . . | 3,5 | 24 | 36 | Лундин (Уорнер и Суэзи) | |
| Гарвард . . . . . | 3,5 | 24 | 33 | Перкин—Эльмер | Гарзард |
| Флагстафф . . . . . | 3,5 | 24 (диск) | 31 (диск) | Перкин—Эльмер | |

# ПРИЛОЖЕНИЕ VI

## КАМЕРЫ ШВАРЦШИЛЬДА

Когсхолл, Индианский университет. Отверстие в 24 дюйма, фокусное расстояние 2 *м*.

Смайли, Браунский университет. Отверстие в 12 дюймов, фокусное расстояние 0,9 *м*.

## КАМЕРЫ РАЙТА

Р. Т. Смит, Ликская обсерватория. Относительное отверстие 1/4, коррекционная пластинка — 8 дюймов, зеркало — 10 дюймов.

Гарвард (Барнс). Относительное отверстие 1/4, коррекционная пластинка —5 дюймов, зеркало —8 дюймов (для спектроскопии при плоском поле).

С. Е. Уэллс, Розвилль, Калифорния. Относительное отверстие 1/4, коррекционная пластинка — 8 дюймов, зеркало — 10 дюймов.

ОГИЗ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
«ГОСТЕХИЗДАТ»

Москва, Орликов пер., 3

СЕРИЯ КНИГ ПО АСТРОНОМИИ

1. Г. ДИМИТРОВ и Д. БЭКЕР. Телескопы и принадлежности к ним.
2. Ф. УИППЛ. Земля, Луна и планеты (готовится к печати).
3. Ф. ВАТСОН. Между планетами (готовится к печати).
4. Б. БОК и П. БОК. Млечный Путь (готовится к печати).
5. Х. ШЕПЛИ. Галактики (печатается).
6. Л. АЛЛЕР и Л. ГОЛЬДБЕРГ. Атомы, звёзды и туманности (готовится к печати).