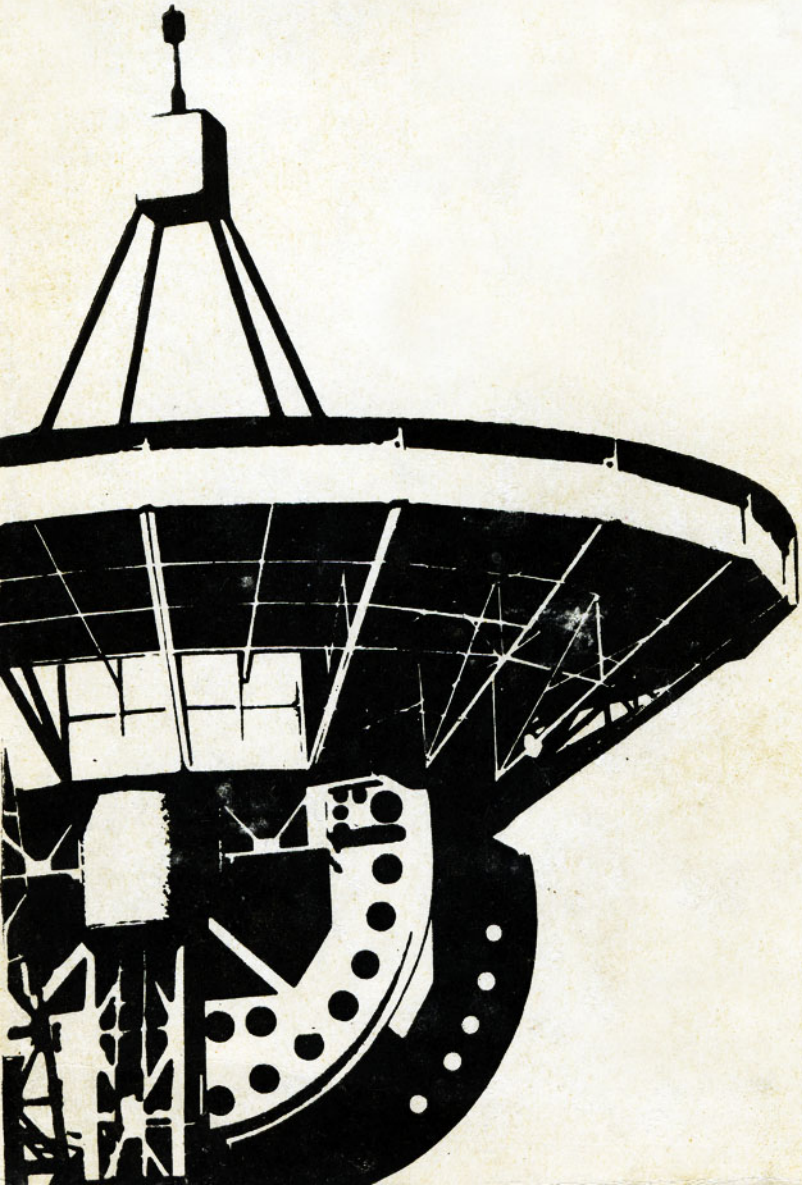
Современный телескоп



Современный телескоп

Книга «Современный телескоп» написана коллективом ученых — сотрудников Главной астрономической обсерватории АН СССР в Пулкове и Государственного оптического института. Авторы попытались впервые изложить в одном монографическом издании широкий комплекс вопросов, касающихся истории телескопов и астрономических открытий, развития астрономической оптики, устройства и принципов действия современных оптических, радио-, электронных и телевизионных телескопов.

В книге затрагиваются проблемы физической природы космических объектов и явлений, рассматриваются физические законы и теории оптических систем.

Книга может представлять интерес не только для астрономов и оптиков, но также для физиков, геофизиков, химиков, биологов, инженеров, студентов соответствующих вузов.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

О. А. МЕЛЬНИКОВ, Г. Г. СЛЮСАРЕВ,
А. В. МАРКОВ, Н. Ф. КУПРЕВИЧ

СОВРЕМЕННЫЙ ТЕЛЕСКОП



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Москва 1968

Ответственный редактор
член-корреспондент АН СССР
О. А. МЕЛЬНИКОВ

2-6-1
9-67

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прошло более 350 лет с того дня, когда итальянец Галилео Галилей начал первые систематические наблюдения с телескопом. Астрономическая наука развивалась и обогащалась открытиями все эти годы параллельно с развитием и усовершенствованием оптических средств наблюдения за небесными объектами. В 1960 г. исполнилось приблизительно 100 лет со времени возникновения новой отрасли астрономии — астрофизики, точнее, одного из ее разделов — астроспектроскопии. Комбинация телескопа со спектральным аппаратом и другими приборами явилась мощным средством изучения физического строения небесных светил и дала толчок дальнейшему развитию науки.

Последующие успехи астрономических наблюдений связаны с организацией спектрального изучения источников света в космосе. Использование телескопа со спектрографом-спектроскопом (для наблюдения за разнообразными объектами неба) позволило астрономам детально изучить химический состав удаленных звезд и других светил.

Изобретение радиотелескопа, электронных и телевизионных телескопов значительно расширило возможности изучения Вселенной и открыло перед астрономами совершенно новые горизонты. Эти возможности еще больше возросли в связи с выносом телескопов с помощью свободных баллонов в верхние слои атмосферы и с помощью ракет — в межпланетное пространство. Благодаря этому астрофизики смогли заглянуть почти в самый коротковолновый, рентгеновский участок спектра светил, сфотографировать невидимую сторону Луны.

Предлагаемая читателям книга «Современный телескоп» более или менее полно охватывает комплекс вопросов, связанных с развитием и использованием различных астрономических приборов. Ее замысел возник у авторов довольно давно и получил в свое время одобрение выдающегося популяризатора науки академика С. И. Вавилова. К сожалению, осуществление замысла оказалось весьма трудоемким и потребовало длительного времени.

Книга открывается кратким введением, в котором изложены главные проблемы современной астрофизики. Исторический обзор основных астрономических открытий, которому посвящена первая глава, изложен в связи с развитием и усовершенствованием телескопов. Во второй главе излагаются вопросы развития отечественного астрономического приборостроения, в третьей — вопросы оптики телескопов, специфики астрономических наблюдений и открытий и т. д. В заключительной, четвертой главе читатель познакомится с принципами устройства и спецификой работы новых систем — радиотелескопов, электронных и телевизионных телескопов.

За последние годы астрономическое приборостроение в СССР добилось больших успехов и получило широкое развитие. Совместными усилиями астрономические приборы создают астрономы и физики, стекловары и оптики, инженеры-конструкторы, механики и т. д. Однако описание результатов этих работ носит узкоспециальный характер или же вообще отсутствует, и надобность в доступном изложении всего комплекса вопросов совершенно очевидна.

В мировой литературе пока еще не было книги подобного профиля, которая охватывала бы такой комплекс проблем. Авторы надеются, что данное издание, хотя, возможно, не полностью, восполнит этот ощутимый пробел.

Следует отметить, что вопросы астрономического приборостроения достаточно сложны и ознакомление с ними даже в популярной форме требует определенной предварительной подготовки. В помощь читателям, не имеющим такой подготовки, в конце книги предлагается небольшой список научно-популярной литературы.

Первая глава книги и заключение написаны О. А. Мельниковым, введение и вторая глава — А. В. Марковым, третья — Г. Г. Слюсаревым, четвертая — Н. Ф. Купревичем. Авторы с благодарностью примут все критические замечания читателей по поводу этого первого и, по-видимому, не лишенного недостатков издания книги, а также советы и пожелания, касающиеся ее дальнейшего улучшения.

ВВЕДЕНИЕ

ЧЕМ ЗАНИМАЕТСЯ АСТРОНОМИЯ

Внимательное наблюдение в темную безлунную летнюю ночь ясного звездного неба с величественной аркой Млечного Пути, пересекающего небосвод, еще у мыслителей древности рождало представление о бесконечности Вселенной и о бесчисленном множестве заполняющих ее светил. Несколько тысячелетий назад зародилась астрономия — наука о небесных светилах. Однако только тогда, когда в помощь невооруженному глазу астрономов, изучавших Вселенную, были созданы оптические приборы, эта наука приобрела стимул для более быстрого развития.

В XVII в. для изучения далеких миров впервые были применены, тогда еще очень несовершенные, зрительные трубы, которые, однако, позволили обнаружить много новых звезд и туманностей, невидимых невооруженным глазом из-за слабой яркости их свечения. В дальнейшем удалось установить, что некоторые туманности сами состоят из огромного количества звезд и что звезды являются огромными светилами, подобными Солнцу.

Наибольших успехов в познании Вселенной астрономы достигли за последние сто лет, когда при наблюдениях с телескопом были применены фотография, спектроскопия, а также другие физические методы исследования небесных объектов.

Изобретение во второй половине прошлого века нового астрономического прибора — астрографа — открыло возможности для фотографирования небесных объектов и дало в руки исследователям материал, который позволил им решать вопросы о строении туманностей.

Изучением огромного числа снимков неба установлено наличие лишь в системе Млечного Пути, или Галактики,

не менее двухсот миллиардов солнц и большого количества находящейся в межзвездном пространстве пылеобразной темной материи. Определены и гигантские размеры Млечного Пути, достигающие 50 тыс. св. лет по большой оси [1]. По своим размерам и строению он оказался похожим на другую, ближайшую к нам островную вселенную — туманность в созвездии Андромеды [2].

Ученые определили, что Солнце находится на расстоянии около $2{,}5 \cdot 10^4$ св. лет от центра системы Млечного Пути, расположенного от нас в направлении созвездия Стрельца, видимого в южной части неба летом. Основная масса звезд центрального ядра нашей галактики недоступна ни обычной фотографии, ни глазу, так как закрыта от нас огромным количеством находящейся в этом направлении космической пыли. И только фотосъемка неба в инфракрасных лучах, а также радиоастрономические наблюдения открыли возможности для проникновения в строение центра системы Млечного Пути.

Фотографирование с помощью самого крупного из современных телескопов даже ближайшей островной вселенной, расстояние до которой около 1 млрд. св. лет, дает ее изображение в виде слабого пятнышка. На снимке галактика выглядит такой, какой она была (если учесть конечную скорость распространения света) 1 млрд. лет назад.

В последние годы ученые насчитывают гораздо более 100 миллионов таких галактик. Изучение общей картины Вселенной составляет одну из задач астрономической науки, которая решается с помощью современных телескопов.

Новейшие приборы, проницающая сила которых непрерывно растет, помогают астрономам решать сейчас и другую задачу — изучение строения и эволюции звезд. В тесной связи с ней находится исследование Солнца — его происхождения и дальнейшей судьбы, следовательно, и судьбы всей планетной системы. Основной материал для решения этого вопроса дает применение спектрального анализа. Уже более ста лет астрономы используют различные спектральные приборы в комбинации с телескопами. С целью измерения блеска звезд или, точнее, освещенности, доходящей от них до поверхности Земли, к телескопам были

[1] Световой год — расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью 300 000 *км/сек*, проходит за год.

[2] Островными вселенными с начала XX в. астрономы называют очень далекие скопления звезд, подобные нашей Галактике.

приспособлены фотометры. С их помощью были найдены и так называемые показатели цвета — величины, показывающие, насколько излучение объекта в видимой области спектра отличается от излучения, действующего на фотографическую пластинку. Показатели цвета связаны с температурой поверхностей звезд, которую определяют методом спектрального анализа.

Эти исследования показали, что звезды с одинаковой температурой поверхности могут быть двух типов — звезды-гиганты и звезды-карлики. Первые из них имеют огромные размеры и очень малую плотность, вторые — относительно малые размеры, но большую плотность.

Путем измерения положений звезд на небе, проведенных с помощью специальных телескопов, а также измерения их положения на небе по фотоснимкам, полученным в течение года, ученые определили величину видимого смещения (параллакса) более близких звезд относительно далеких. Явление параллакса происходит вследствие движения Земли вокруг Солнца. По его величине вычислили действительные расстояния до нескольких сотен звезд, удаленных от нас не свыше чем на 400 световых лет, а по этим расстояниям получили так называемые абсолютные величины звезд как результат их спектральных и фотометрических исследований.

Однако измерение расстояний до звезд, удаленных более чем на указанную выше величину, оказалось по параллаксу (тригонометрическим методом) невозможным. В этом случае для приближенного определения расстояний П. П. Паренаго предложил специальную диаграмму, отражающую зависимость между температурами чрезвычайно удаленных звезд и их абсолютными величинами [3]. Эта зависимость сводится к тому, что при крайне низких температурах фотосфер резко проявляется граница между группами карликовых и гигантских звезд, а при более высоких температурах эти группы сливаются.

Наблюдения двойных звезд — двух солнц, вращающихся около общего центра тяжести, и определения их орбит позволили найти массу этих звезд. В последние годы работами К. Стренда, пулковского профессора А. Н. Дейча

[3] Абсолютной величиной звезды в астрономии называют блеск, которым она обладала бы, находясь на расстоянии 10 *пс* (парсек). Парсек — расстояние, с которого полуось земной орбиты видна под углом в одну секунду дуги. Он равен $3 \cdot 10^{13}$ *км*.

и других ученых установлено, что в системах двойных звезд иногда встречаются невидимые нам даже в самые мощные телескопы темные спутники, масса которых не превышает массу планеты Юпитер более чем в 10 раз. Последнее обстоятельство наталкивает наблюдателей на мысль о сходстве систем двойных звезд с нашей солнечной системой.

Темные спутники двойных звезд обнаруживаются по зигзагообразной траектории одной звезды вокруг другой. Изменение траектории объясняется тем, что на самом деле здесь вокруг центрального тела движутся не одно, а два тела — вторая звезда и невидимый нам спутник малой массы.

У двойной звезды 61 Лебедя А. Е. Дейч открыл планетоподобный спутник с периодом обращения 5 лет и массой, равной около 10 масс Юпитера. Он находится в 5 млн. *км* от центра тяжести системы, что составляет лишь $^1/_{30}$ расстояния от Земли до Солнца. Блеск этого светила в сто раз меньше, чем блеск самой слабой звезды, заснятой в наиболее сильные телескопы. Обнаружить его и детально изучить его движение удалось путем фотографических наблюдений в сочетании с использованием приемов небесной механики [4]. Открытия темных спутников реально доказывают, что наша планетная система не единственная во Вселенной.

Следует отметить, что величина смещения звезд с орбиты, вызванного темным спутником, по определению А. Н. Дейча, составила лишь сотые доли секунды дуги, причем максимальная точность этого измерения с пулковским астрографом оказалась равной 0″,01. Уточнение значения масс темных спутников требует введения в практику измерения очень малых углов, больших телескопов и новых методов.

Ближайшая к нам звезда — Солнце своим притяжением определяет строение нашей планетной системы и своим теплом обеспечивает возможность жизни на Земле. Как теперь установлено, тесная связь с солнечными процессами проявляется, например, в том, что состояние земной атмосферы изменяется в течение каждого 11-летнего периода в связи с изменением числа солнечных пятен и корпускулярного излучения солнца [5]. Темные пятна на солнеч-

[4] На основе законов небесной механики Леверье еще в 1846 г. предсказал существование Нептуна, исходя из неправильностей движения Урана вокруг Солнца.

[5] Корпускулярным излучением Солнца называют поток выбрасываемых им атомов или ядер. Часть их достигает атмосферы Земли.

ной поверхности существуют не больше нескольких месяцев.

Солнце — единственная звезда, поверхность которой может быть подвергнута детальному изучению. Наблюдению доступны самая внешняя и обширная оболочка Солнца — солнечная корона, яркая фотосфера и простирающаяся над ней хромосфера. Спектрофотометрические промеры показали, что абсолютная температура фотосферы, т. е. яркой поверхности Солнца, видимой глазом, порядка 5700—6000°. Температура пятен, по данным Н. П. Барабашева, равна 4800°, т. е. она много ниже температуры фотосферы, благодаря чему пятна кажутся темнее ее.

Солнце ежесекундно излучает с каждого квадратного сантиметра своей поверхности 1,52 *ккал* тепла. Подсчитано, что если бы вся имеющаяся сейчас в Солнце энергия расходовалась, не пополняясь, то оно остыло бы через 30 миллионов лет. Однако геологи уже доказали, что поверхность Земли непрерывно получает от Солнца одно и то же количество энергии не меньше, чем в течение одного-двух миллиардов лет.

Что же является источником пополнения энергии, расходуемой Солнцем в продолжение столь длительного времени? Большинство ученых считает сейчас таким источником ядерные реакции, возможные при огромных температурах в миллионы градусов, существующих в центральных областях Солнца и звезд.

Еще в 1610 г. Галилей установил факт вращения Солнца вокруг оси. Позднее было обнаружено, что вращение происходит как бы слоями, причем с наибольшей быстротой, а именно в 25 дней, оборот вокруг оси делает экваториальный слой; околополярная зона совершает его за 30 дней. Эта особенность Солнца еще не объяснена. Благодаря его сравнительно медленному вращению вокруг оси возможно существование солнечной короны, окружающей Солнце со всех сторон и простирающейся до Земли.

В начале XX в. для изучения Солнца разработан специальный спектральный прибор — спектрогелиограф. На его описании мы остановимся ниже, а сейчас упомянем лишь о том, что с его помощью можно фотографировать всю поверхность Солнца в монохроматическом свете линий водорода или кальция. По таким снимкам изучают распределение различных образований на поверхности Солнца и скорости их передвижения по лучу зрения. Например,

по ним обнаружили, что водород и кальций, находящиеся над пятнами на расстоянии до 3500 *км* над фотосферой, текут к их центру. Атомы железа и свинца, расположенные ниже указанной высоты, поднимаются над пятнами вверх. Обнаруженные расщепления линий в спектре пятен показали наличие в них магнитного поля, противоположную полярность пятен, находящихся в разных полушариях Солнца, и, более того, смену знака полярности на обратный через каждый цикл солнечной деятельности (в среднем через 11,3 лет).

Хромосфера Солнца наблюдается как бы в виде отдельных волокон, представляющих собой восходящие и нисходящие потоки раскаленного газа. Иногда такие потоки выбрасываются из хромосферы на очень большие расстояния и принимают вид выступов (протуберанцы) различной формы. Протуберанцы достигают огромных размеров. Так, один из них, наблюдавшийся 1 июня 1946 г., имел конфигурацию арки толщиной 100 тыс. *км*, шириной 110 тыс. *км* и высотой 500 тыс. *км*, через три дня, 4 июня, он поднялся на высоту 1 млн. 700 тыс. *км*, превышающую диаметр Солнца.

Законы и скорости движения, а также эволюцию протуберанцев астрономы наиболее успешно изучают со времени применения киносъемки Солнца с помощью так называемых интерференционно-поляризационных фильтров. Ряд ученых Крымской астрофизической обсерватории (А. Б. Северный и др.) накопили таким путем ценный материал, необходимый для выяснения природы протуберанцев.

Мы уже упоминали выше о влиянии Солнца на Землю. Установлено, что часть атомов, выбрасываемых Солнцем, достигает Земли и порождает возмущения в ионосфере, вызывающие полярные сияния, временные прекращения радиосвязи и т. п. Зарегистрирован даже единичный случай перерыва железнодорожной сигнализации и телефонной связи. Приведенные факты убеждают в практической необходимости изучения такого рода влияния Солнца на Землю.

В последние годы достигнуты очень важные результаты в исследовании солнечной короны, особенно по ее снимкам, полученным во время полных солнечных затмений 1936, 1941 и 1945 гг. на специально разработанных в СССР коронографах. По этим снимкам изучено распределение яркости в короне, связь изменений этого распределения с солнеч-

ной деятельностью. По ним же установлено наличие в короне двух составляющих — струйчатой (электронной) и более равномерной желтой короны, а также непосредственный переход волокон полярной хромосферы в струйчатую составляющую короны.

Для объяснения видимости электронной короны ученые еще в 1905 г. высказали предположения о том, что последняя в основном обусловлена рассеянием солнечного света быстро движущимися электронами. В отраженном ими спектре Солнца фраунгоферовы линии невидимы из-за того, что замываются колоссальными скоростями перемещения электронов. Так как получаемые скорости движения электронов оказываются больше параболических, то электроны должны улетать, а Солнце — приобретать положительный заряд. По тем же причинам неизбежна утрата и части протонов. Факт непрерывной потери материи проявляется в постоянно наблюдаемом потоке корпускул, летящих из активных областей Солнца и вызывающих описанные выше возмущения в земной атмосфере (солнечный ветер).

Помимо проблем строения Солнца, разрешаемых в настоящее время с помощью специальных телескопов, астрономия занимается и такими вопросами, как происхождение солнечной системы и возможности жизни на планетах, что особенно важно для развития космонавтики.

Какие же вопросы планетоведения, если говорить об изучении планет нашей Солнечной системы, решают астрономы с помощью телескопов в настоящее время?

Известно, что по своему характеру эти планеты делятся на две группы. Четыре внешние большие планеты (Уран, Нептун, Сатурн и Юпитер), относящиеся к первой группе, имеют огромные, насыщенные водородом атмосферы из соединения метана и аммиака. Планеты другой, земной группы (Венера, Марс) в своих атмосферах не содержат указанных газов, но, вероятно, все же содержат в небольшом количестве кислород, обеспечивающий возможность жизни. Планета Меркурий и большинство спутников планет, например Луна, лишены атмосфер, как и все так называемые малые планеты [6]. Целое кольцо малых планет, диаметры которых не превышают нескольких километров в поперечнике, об-

[6] Последние поляризационные исследования темных пятен на Меркурии дают основание предположить существование здесь следов атмосферы, но эти результаты нуждаются еще в проверке.

ращается вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера.

Если измерить и сравнить отражательные способности деталей планет и земных горных пород, а также учесть влияние структуры поверхности на величину отраженного потока, то можно проверить, имеются ли на планетах горные породы, покрывающие поверхность Земли. Точное отождествление пород указанным способом требует еще постановки многих исследований.

По каким признакам следует судить о прошлом состоянии Земли и планет? В. Г. Фесенков в книге «Современные представления о вселенной» утверждает, что в этом отношении большое значение имеет детальное изучение лунной поверхности, так как Луна вследствие своей малой массы быстро почти полностью потеряла атмосферу. Поэтому ее рельеф — живая летопись древних эпох образования планеты. На Земле, обладающей атмосферой, такие детали уже давно изменены эрозией [7].

Описанию и классификации форм лунного рельефа посвящено много работ. В 90-х годах прошлого века ряд обсерваторий изготовил фотографические атласы лунной поверхности. В настоящее время в Советском Союзе осуществлены съемки и получена первая карта обратной стороны Луны.

В астрономической литературе несколько раз поднимался вопрос о незначительных изменениях лунной поверхности, выражавшихся в появлении на ней или исчезновении небольших кратеров, в изменениях ее отражательной способности [8].

Сейчас можно говорить о существовании двух теорий образования лунного рельефа. Небольшое число ученых придерживается метеоритной гипотезы, согласно которой происхождение всех лунных форм объясняется бомбардировкой лунной поверхности метеоритами. Другая, бóльшая группа исследователей считает, что рельеф Луны, как и других планет, формировался внутренними силами и что вулканизм при этом является одним из главных факторов.

Эта группа ученых доказывает, что Луна как планета не мертва до сих пор и что кора ее, так же как и земная ко-

[7] Эрозией называется постепенное изменение рельефа планеты под воздействием воды, ветра, нагрева поверхности и т. д.

[8] См. Луна. Монографический сборник. Под ред. А. В. Маркова. М., Физматгиз, 1960.

ра, переживает то периоды опускания, во время которых на Луне возникали «морские» впадины (по крайней мере 2 раза, судя по сохранившимся формам рельефа), то периоды расширения, сопровождающиеся усилением вулканизма и образованием кольцевых гор. В настоящее время, по А. В. Хабакову, Луна переживает эпоху затишья и отсутствия вертикальных смещений коры после только что закончившегося периода образования крупных цирков с системами светлых лучей. Когда-нибудь эту эпоху сменит новое опускание коры и образование «морей».

Чтобы установить наличие или отсутствие на Луне мелких изменений рельефа (появление метеоритных кратеров, трещин или слабое проявление вулканизма) необходима съемка нового большого фотографического атласа лунной поверхности, а также продолжение и расширение начатых в XX в. исследований ее физической природы. Советская астрофотометрия уже установила наличие значительной (и неодинаковой) изрезанности лунной поверхности. Одна из современных задач — исследование путем измерения отражательной способности некоторых мест Луны реальности изменений микроструктуры поверхности вследствие колебаний температуры (от —160 до +80° С).

Полагают, что очень коротковолновое излучение Солнца и его короны, не ослабляемое атмосферой, способно вызвать люминесценцию лунных пород, а в случае наличия на Луне следов атмосферы — свечение ее, аналогичное полярным сияниям. Поэтому спектральное исследование неосвещенных частей Луны представляет значительный интерес.

Изучение Марса связано с одной из наиболее животрепещущих тем — поисками на других мирах органической жизни. С помощью чувствительных термоэлементов, установленных в фокусе больших телескопов, ученые измерили температуру разных областей Марса. Оказалось, что она колеблется в пределах от —80 (для полюса) до +20° С (для экватора). Наблюдения подтверждают быстрые перемены прозрачности атмосферы Марса. А. В. Маркову, например, удалось заметить это явление даже с помощью 164-миллиметрового рефлектора. Путем фотометрических измерений планеты через фильтры накоплены данные, необходимые для ориентировочного расчета плотности ее атмосферы. Они показывают давление порядка 125 *мм* ртутного столба, равное давлению земной атмосферы на высоте

25 *км*. Однако состав атмосферы Марса до сих пор еще точно не определен. В результате обработки новых данных, в частности по наблюдениям космического корабля «Маринер-4», сейчас следует принимать для полного давления в атмосфере Марса значение от 3,8 до 15,0 *мм* рт. ст. или же 5—20 *мб* (Мороз В. И., 1967 г.).

Наличие снеговых или ледяных полярных шапок на Марсе, их сезонное таяние, распространение продуктов таяния по планете окончательно установлены наблюдениями Г. А. Тихова (1909 г.), Г. Койпера (1950 г.) и других астрономов.

Эти открытия приводят нас к необходимости выяснения вопроса о возможности существования в суровом климате Марса земноподобной растительности. Путем изучения спектра земных растений, находящихся в разных условиях, Г. А. Тихов и его ученики в Академии наук Казахской ССР выяснили причины отсутствия избытка отражения света в длинных волнах спектра у высокогорных растений и обратили внимание на то, что подобное явление характерно и для зеленых зон спектра Марса. Для окончательного решения этого вопроса нужны более мощные телескопы, чтобы изучить спектры мелких деталей поверхности. Спектральные исследования В. Синтона в 1957 г. и В. И. Мороза в 1964—1967 гг. в длинноволновой области ($\lambda \approx 3{,}4$ *мк*) также подтверждают сходство полос поглощения на спектрах темных зон Марса и отраженного зеленым покровом низших растений света. В настоящее время, однако, оба автора считают этот важнейший результат еще не окончательно доказанным (1963 и 1967 гг. соответственно), необходимы новые наблюдения.

Другие планеты земной группы, Венера и Меркурий, таят в себе еще больше ждущих разрешения загадок. До сего времени неизвестно и физическое строение Юпитера. Некоторые ученые считают его звездой, подобной упоминавшейся выше звезде в системе 61 Лебедя.

Таков в общих чертах краткий и, конечно, далеко не полный обзор важнейших проблем астрофизики. Их решение потребует дальнейшего расширения инструментальной базы для спектральных, поляризационных и других исследований, увеличения мощности телескопов, а также использования новейших достижений прикладной физической оптики.

Глава первая

ТЕЛЕСКОП И УСПЕХИ АСТРОНОМИИ
(исторический очерк)

1. ОДНОЛИНЗОВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ XVII—XVIII вв.

Еще задолго до нашей эры астрономы многих стран, наблюдая невооруженным глазом дневное и ночное небо, сделали целый ряд важнейших открытий. Однако всесторонняя разведка солнечной, а затем и звездной системы началась немногим более 350 лет назад. В 1609 г. итальянец Галилео Галилей, узнав об изобретении в начале XVII в. [1] голландскими мастерами зрительной линзовой трубы, или рефрактора, построил такую же и с 7 января 1610 г. начал систематически наблюдать за различными небесными объектами. Эта дата считается в науке началом эпохи телескопических наблюдений. Употреблявшаяся Галилеем и другими наблюдателями зрительная труба была названа телескопом [2].

Первый самодельный телескоп Галилея имел поперечник объектива $D = 4$ *см*, фокусное расстояние $F \approx 50$ *см*, трехкратную степень увеличения γ, был мал и несовершенен по оптическим и механическим свойствам. Таким же был и второй телескоп, или зрительная труба, с $D = 4{,}5$ *см*, $F = 125$ *см*, $\gamma = 34^{\times}$ и все последующие его модели. Однако несмотря на несовершенства телескопов, Галилей в течение двух первых лет наблюдений сумел сделать большое

---

[1] Не исключено, что телескоп был изобретен раньше, но не получил распространения.

[2] По предложению итальянского филолога Девизиани (1576—1614) — члена Академии деи Линчеи (т. е. «Рысьеглазых» — что подчеркивает особую прозорливость ее членов — ученых) в ответ на запрос ее председателя Фредерико Цези.

количество открытий. Он обнаружил четыре спутника у планеты Юпитер, фазы Венеры [3], неровности — горы, долины, трещины, кратеры — на поверхности Луны (и измерил их высоту), наличие у диска Сатурна придатков в двух диаметрально противоположных точках (истинную природу этого явления он разгадать не мог), пятна на Солнце и др.

Галилей был первым разведчиком Солнечной системы. Он считал, что планеты также имеют пятна, т. е. неровности, обращаются вокруг Солнца и являются остывшими космическими телами, как и наша Земля. Кроме того, Галилей сделал ряд открытий по звездной астрономии. Он, как говорят астрономы, «разрешил» на отдельные звезды видимые белые пятна Млечного пути, т. е. увидел вместо последних светлые точки или же звезды и звездные кучи. В настоящее время мы их называем звездными галактическими скоплениями, таково, в частности, скопление в созвездии Рака, названное «Яслями», и др.

Галилей заметил такое интереснейшее явление, как либрация (лат. libratio — качание) Луны.

Оптическая либрация Луны по широте доходит, как оказалось, до $\pm 6°,7$ (без учета возмущений), суточная же, или иначе параллактическая,— до 1°. Первая связана с наклоном оси вращения Луны к плоскости ее орбиты (в среднем 83°19′), вторая — с перемещением наблюдателя вместе с Землей при ее суточном вращении. Существует, кроме широтной, также и либрация Луны по долготе, доходящая до $\pm 7°,6$ и связанная с неравномерным обращением Луны вокруг Земли при равномерном ее осевом вращении (открыта польским астрономом Яном Гевелием в 1647 г.). Наибольшее одновременное совместное действие двух либраций составляет 11°,4.

Это все видимые, или оптические, либрации. Есть еще физическая либрация Луны, но она очень мала — до 2′ и связана с тем, что большая полуось лунного эллипсоида отклоняется от направления на центр Земли, а Земля стремится своим притяжением возвратить ее в прежнее поло-

[3] По обычаю того времени об этом открытии он сообщил анаграммой, т. е. шифром, который был прочитан в виде следующей фразы: «Венера подражает формам Цинтии» (Луны).

Здесь и далее общие данные истории астрономии заимствованы в основном из следующих изданий: 1. А. Берри. Краткая история астрономии. Л.— М., ОГИЗ, 1945; 2. А. Кларк. История астрономии в XIX столетии. Одесса, акц. Юж.-Русск. об-во печатного дела, 1913; 3. А. Паннекук. История астрономии. М., изд-во «Наука», 1966.

жение. Образуется пара сил, качающая Луну маятникообразно. Эта либрация также была установлена с помощью телескопа, но только позднее, когда значительно повысилась точность наблюдений. Благодаря явлению либрации центр видимого диска Луны передвигается (по экватору, а также меридиану Луны), и мы видим с Земли не 50, а 59% площади поверхности Луны.

Наблюдая спутники Юпитера, Галилей стремился решить важнейшую практическую задачу: найти возможность определять долготу точек земной поверхности по заранее произведенным расчетам движения открытых им спутников, которые были названы Ио, Европа, Ганимед и Каллисто [4] — I, II, III, IV в порядке возрастающего расстояния от планеты. В XVII—XVIII вв. по наблюдению в заранее рассчитанные моменты затмений спутников Юпитера, когда их покрывал диск планеты, и других явлений в этой системе определяли, в частности, местонахождение кораблей в море [5].

Голландскую зрительную трубу улучшил И. Кеплер, применив в окуляре не отрицательную (двояковогнутую) а положительную (двояковыпуклую) линзу. Это явилось началом создания современных окуляров типов Дж. Рамсдена, Х. Гюйгенса и других. Положительные окуляры [6] позволили применить крест нитей и винтовой окулярный микрометр для производства измерений. Это изобретение принадлежит В. Гаскойню (1640 г.). Таким способом он измерил диаметры Марса и Юпитера. Его работа некоторое время оставалась неизвестной. Поэтому независимо от него микрометр изобретен и усовершенствован в 1667 г. Ж. Пикаром, а в 1670 г.— А. Озу. Такой же прибор был сконструирован и описан в 1658 г. Х. Гюйгенсом, но, как и микрометр Г. Кирха 1691 г., он был худшего качества.

Применение в телескопах окулярного креста нитей и микрометра явилось важным этапом в развитии измери-

[4] В настоящее время известны двенадцать спутников Юпитера.

[5] Рассчитав изменения промежутка времени между затмениями Ио I, датчанин О. Ремер доказал конечность скорости распространения световых колебаний и впервые определил в 1675 г. ее достаточно точное значение. По его измерениям, луч света пробегал расстояние от Солнца до Земли за 8—11 *мин*.

[6] У них передняя точка фокуса и фокальная плоскость находятся впереди окулярной линзы (линзы поля в окуляре Рамсдена) — в точке заднего фокуса объектива телескопа.

БИБЛИОТЕКА
№ 471

тельной техники. Телескоп стал употребляться не только как прибор для качественного обзора небесной сферы и объектов на ней, но и как измерительный прибор. Прежде оптический центр поля зрения, фиксирующий координаты светила, определялся на глаз недостаточно точно. Из-за этого многие астрономы, например данцигский ученый Я. Гевелий, считали, что старый метод измерения трубой без объектива, но с диоптрами более точен. В трубах, применявшихся до изобретения телескопа, употреблялись два диоптра: глазной, имеющий вид небольшого круглого отверстия, и предметный — в виде большого круглого отверстия с крестом нитей. Астроном при наблюдении визировал светило через глазной диоптр на крест нитей предметного.

Заслуга в выполнении первых точных измерений на телескопе с микрометром принадлежит Ж. Пикару и Д. Флемстиду. Необходимо заметить, что прототип микрометра, но помещенный сбоку трубы (без линзы), имел уже Галилей.

С. Мариус в 1612 г., наблюдая небо невооруженным глазом, изучил туманность гигантских размеров в созвездии Андромеды, обозначенную позднее в одном из каталогов через M31. Как выяснилось теперь, при наблюдении в мощные телескопы, туманность Андромеды похожа на нашу Галактику и состоит из большого количества звезд (вероятно, и планет, комет), газа, пыли и т. д. Ее спиральную структуру оказалось возможным установить только при помощи светосильных телескопов в середине XIX в. Как простой объект неба туманность была занесена уже в каталог персидского астронома ас-Суфи (903—986 гг.).

Упомянем, что Мариусу в телескоп удалось наблюдать на объективе при выведенном окуляре явление «бегущих теней», названное в астрономии Мариусовым мерцанием [7], он же открыл наличие фаз у планеты Меркурий.

В 1618 г. И. Цизат обнаружил в поясе созвездия Ориона туманность, которую позднее изучал Х. Гюйгенс. Сейчас известно, что эта галактическая туманность является газово-пылевой. В 1643 г. Д. Ж. Риччиоли увидел в телескоп тени от спутников на поверхности Юпитера и обнаружил

[7] И. Кеплер наблюдал аналогичное явление без телескопа — на белом экране против окна, в которое попадал свет от Венеры при достаточно темном небе. Это — так называемое Кеплерово мерцание. Результаты он опубликовал в сочинении «Дополнения к Вителo» (1604), где, в частности, сформулировал закон убывания освещенности обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

двойственность звезды дзета в созвездии Большой Медведицы.

По мере углубления в изучение неба астрономы XVII в. постепенно совершенствовали однолинзовые телескопы-рефракторы. Повышалась техника стекловарения. Для ослабления хроматической аберрации, т. е. оптического дефекта — окрашивания изображения и его размывания, увеличивали фокусные расстояния объективов или, другими словами, уменьшали их относительные отверстия $A = D/F$. Были построены или спроектированы телескопы, имеющие при отверстии 5—20 *см* фокусные расстояния 37, 45 и 65 *м* (соответственно Гюйгенсом, Гевелием и Брадлеем).

Ведя наблюдения через рефрактор $D = 5$ *см* и $F = 2$ *м*, данцигский астроном Ян Гевелий открыл после Галилея либрацию Луны по долготе. Телескопы Гевелия были лучше, чем Галилея. Он детально изучал поверхность Луны и результаты описал в знаменитой «Селенографии». Труд Гевелия в 50-х годах XVII в. был переведен на русский язык с добавлением изложения теорий голландской и кеплеровой зрительных труб. Он сыграл большую роль в распространении телескопов в России. Фактически они появились здесь еще в 1614 г., т. е. вскоре после их изобретения. В середине XVII в. телескоп можно было свободно купить в Москве в торговых рядах.

Вести наблюдения в длиннофокусные телескопы было весьма сложно из-за несовершенства деревянных монтировок, однако они все же широко распространились в ряде стран. Одновременно с Я. Гевелием длиннофокусные телескопы применял Х. Гюйгенс, которому помогал в работе его брат К. Гюйгенс. Оба они собственноручно сделали много линз для телескопов различных параметров.

В 1655 г. Х. Гюйгенс первым обратил внимание на необходимость учета атмосферных волнений при изучении видимости звезд, Луны и планет. С телескопом $D = 5{,}7$ *см*, $F = 3{,}3$ *м* он открыл шестого спутника Сатурна, названного Титаном (8,8 зв. вел) [8].

[8] У этого спутника в 1944 г. Г. Койпером была обнаружена атмосфера, в основном метановая. Его масса близка к массе Ганимеда — третьего спутника Юпитера и почти равна удвоенной массе Луны, равной $^1/_{81}$ массы Земли. Яркость его слабее Ио — первого спутника Юпитера почти на 3 зв. вел., поэтому он не мог быть замечен в скромный по размерам телескоп Галилея. Всего Сатурн имеет девять спутников, но все остальные слабее этого. Последний, десятый (в порядке открытий) спутник Сатурна был открыт совсем недавно во Франции.

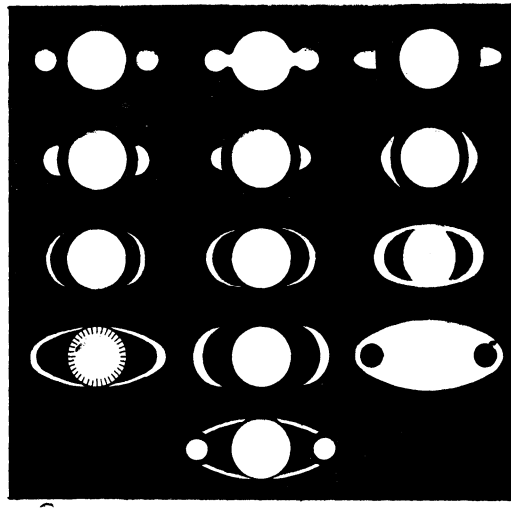


Рис. 1. Зарисовки планеты Сатурн наблюдателями середины XVII в.

В 1655 г. Х. Гюйгенс, изучая Сатурн, который его предшественники Галилей, Гевелий, Гримальди и другие изображали весьма причудливым (рис. 1), убедился в том, что планета окружена кольцом. «Сатурн окружен тонким, плоским, свободно парящим, наклонным к эклиптике кольцом»,— сообщал он о своем открытии (фраза, также прочитанная по анограмме — шифру) [9]. Подробное описание кольца дано в его классическом труде «Система Сатурна» (1659). Впоследствии французский математик П. Лаплас около 1784 г., англичанин Д. Максвелл в 1856 г. и наиболее строго русский математик С. В. Ковалевская в 1885 г. показали, что кольцо не может быть сплошным, а состоит из мельчайших тел, обращающихся вокруг планеты. Вскоре, в 1895 г. эта теория была подтверждена спектроскопически независимо друг от друга А. А. Белопольским в России, А. Деландром во Франции, Д. Килером и В. Кэмпбелом в Америке. Измерение сдвигов линий показало, что скорости обраще-

---

Цитированные в тексте номера определяются по порядку расстояния от планеты.

[9] Эклиптика — сечение плоскостью орбиты Земли воображаемой неподвижной сферы неба.

ния разноудаленных от планеты частей кольца различны, как это следует из третьего закона Кеплера. На этом основании был сделан вывод о метеоритном строении кольца Сатурна [10].

В «Системе Сатурна» описаны также туманность Ориона, видимость дисков Юпитера и Марса — наличие пятен и других образований.

Последующие наблюдения Гюйгенс проводил с телескопом $D = 6$ *см*, $F = 6{,}9$ *м*, $\gamma = 100^{\times}$. Самодельные рефракторы Гюйгенса были для своего времени весьма совершенными. Правда, успех наблюдений связан с хорошей видимостью Сатурна в те годы. В отдельные периоды, повторяющиеся через 15 лет, кольцо (толщина его менее 15 *км*) проектируется на диск планеты ребром и почти невидимо в телескопы с малыми отверстиями.

Х. Гюйгенс употреблял линзовые телескопы с фокусными расстояниями 37, 54 и 64 *м* при сравнительно небольших поперечниках объективов — от 10 до 20 *см*. Его телескоп с $D = 15$ *см* неоднократно с успехом демонстрировался в Английском королевском обществе.

При увеличении фокусных расстояний объективов уменьшаются их относительное отверстие $A = D/F$ и возможность оптических ошибок, вызванных сферической аберрацией и в особенности поперечным хроматизмом, т. е разноцветным размыванием изображения. Для получения хорошего качества изображений нужно, чтобы $F \geqslant 7D^2$. При отверстии $D = 200$ *мм* это даст $F \geqslant 280\,000$ *мм* $=$ $= 280$ *м*.

Стремление все более и более удлинять фокусные расстояния объективов привело астрономов к созданию «воздушных» телескопов (рис. 2). Поиски иных конструкций приводили в то время к непреодолимым техническим трудностям. В этих приборах объектив и окуляр крепились почти независимо один от другого на собственных штативах. Вести наблюдения через них было исключительно трудно, но тем не менее такие телескопы производились вплоть до середины XVIII в. Так, например, в 1728 г. итальянец Ф. Бианчини в воздушные телескопы работы Д. Кампани, $F = 7{,}6$ и $10{,}7$ *м*, по весьма размытым деталям на диске планеты наблюдал осевое вращение Венеры и получил пе-

[10] В 1935 г. советский астроном Г. А. Шайн показал, что спектрофотометрические данные указывают на то, что тела, составляющие кольцо, очень мелкие — типа микрометеоров.

риод 24,3 земных суток, т. е. не совпадающий со значением Жана Доминико Кассини (или иначе Джиовани Доминико) в 23,3 часа (1666 г.). Точная продолжительность периода осевого вращения Венеры до сих пор не известна, но можно

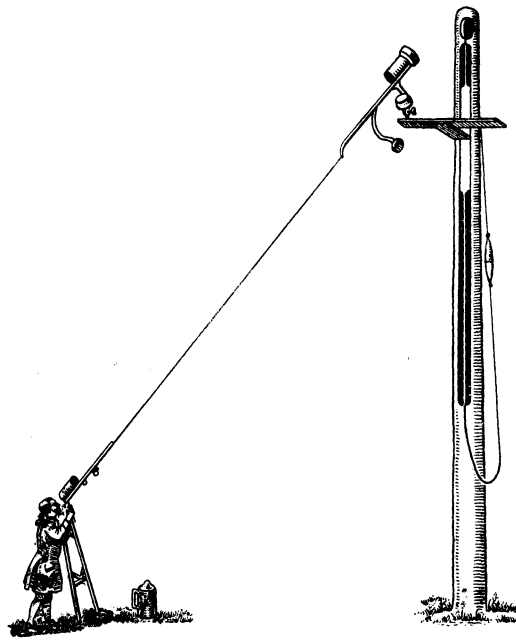


Рис. 2. «Воздушный» телескоп XVII в.

предполагать, что она окажется бо́льшей, до 247 земных суток [11] (по новейшим радиолокационным измерениям) и направлена обратно обращению.

Длиннофокусные объективы для телескопов в XVII в., кроме братьев Гюйгенсов и Я. Гевелия, изготовляли Д. Кампани в Риме, Е. Дивини в Болонье, Э. Чиригаузен в Германии, А. Озу и П. Борель во Франции, П. Нейль в Англии и др. Объективы Д. Кампани, сохранившиеся до

[11] Д. В. Скиапарелли получил в 1887 г. период вращения Венеры 225 земных суток в прямом направлении, что совпадает с периодом обращения планеты (224,7 суток).

настоящего времени, признаются наилучшими по степени однородности стекла и качеству его обработки.

Ж. Д. Кассини [12] в Италии при помощи телескопа с объективом Кампани (фокусное расстояние 5,1 *м*) и при участии последнего определил в 1666 г. по деталям на диске период вращения Марса (24 *час* 40 *мин*) [13], Юпитера и Венеры, измерил «сжатие» Юпитера (14/15), движение его спутников и их теней на диске планеты. В 1669 г. он переехал в Париж, где с этим же телескопом уточнил период осевого вращения Солнца. Для Парижской обсерватории были заказаны воздушные телескопы с фокусным расстоянием 10,2, 30,0 и 41,0 *м*. С помощью 5,1-метрового и данных трех телескопов были открыты четыре спутника Сатурна — VIII, V, IV и III, соответственно в 1671, 1672, 1684 и 1684 гг., названные Япет, Рея, Диона и Тефия (10—12 зв. вел.).

В 1672 г. Ж. Д. Кассини открыл полярные шапки Марса, а в 1675 г., наблюдая кольцо Сатурна, открыл щель, или зазор, между кольцами планеты. Однако последнее открытие было уже сделано раньше, в 1663 г., англичанином В. Болом в телескоп П. Нейля ($F = 11{,}6$ *м*).

В дальнейшем выяснилось, что кольцо Сатурна состоит из трех концентрических частей (условно их обозначили через *A*, *B*, *C*). Кольца прозрачны настолько, что сквозь них «просвечивают» звезды. Последнее кольцо *C*, названное креповым, наиболее прозрачное, было открыто гораздо позднее с 38-сантиметровым рефрактором У. Бондом в 1850 г. в США и независимо В. Дейвисом в Англии. Креповое кольцо по современным данным (В. Г. Райт, Н. П. Барабашов и др.) простирается до поверхности шара Сатурна. Гюйгенс, наблюдавший в 1658 г. только части *A* и *B* — кольцо *C* было недоступно для его телескопа,— полагал, что кольцо находится на некотором расстоянии от поверхности шара.

Масса кольца составляет примерно четверть лунной массы. Видимость его делений в телескоп является хорошей характеристикой прибора. Астрономы XVII—XVIII вв.

---

[12] Во избежание путаницы отметим, что у Ж. Д. Кассини (1625—1712) были сын Жак Кассини (1677—1756), внук Ц. Ф. Кассини де Тюри (1714—1784) и правнук Ж. Д. Кассини де Тюри (1748—1845). Все они — астрономы и были директорами Парижской обсерватории, последний — до 1793 г.

[13] Современное значение 24 *час* 37 *мин* 22,6 *сек*.

в несовершенные телескопы не могли рассмотреть все детали структуры кольца Сатурна.

Линзовые телескопы широко использовались и в России. Развитие астрономических наблюдений было подчинено в этот период в основном практическим задачам кораблевождения — определению координат судов в море. В 1692—1696 гг. была образована Холмогорская обсерватория, в 1727 г.— Петербургская при Академии наук. Петр I проявлял большой интерес к развитию астрономии. Будучи в Гринвиче в 1698 г., он сам с помощью квадранта наблюдал за положением Венеры. Подобные же наблюдения он вел в обсерваториях Голландии, Дании и Германии, находясь там проездом.

В 1675 г. в Англии была основана Гринвичская обсерватория. Она была также создана для практических целей, в основном для нужд морской навигации. В ней определялись положения звезд, Солнца, Луны и планет. Первым директором был Дж. Флемстид — крупнейший наблюдатель того времени. Он ввел в эксплуатацию микрометр с подвижной нитью (типа В. Госкойня и др.). Так он фиксировал оптический центр и значительно увеличил точность наблюдений, доведя ее до 10″, в то время как при наблюдении невооруженным глазом (через диоптры) точность была от 1′ до 10′. Обсерватория имела секстант с радиусом 2,1 *м*, 1-метровый квадрант, телескопы с фокусами 2,1 и 4,6 *м* и т. д. В отличие от астрономов других стран англичане не употребляли длиннофокусных телескопов, хотя в 1692 г. Х. Гюйгенс в числе других передал Королевскому обществу 37-метровый воздушный телескоп с оборудованием для монтировки системы.

Флемстида на посту директора Гринвичской обсерватории сменил Э. Галлей, который, в частности, в 1718 г. открыл явление собственных движений звезд, считавшихся неподвижными. Сравнивая положение звезд Сириуса, Проциона и Арктура по древним греческим записям и по записям датского астронома Тихо Браге (для Сириуса) со своими наблюдениями, полученными с угломерными инструментами, он заметил изменение их угловых расстояний от эклиптики. Это было очень важное открытие, показавшее, что движение во Вселенной присуще всем ее объектам. В 1677 г. Галлей открыл шаровое скопление в Геркулесе, в 1705 г.— явление периодических комет. Он отметил важность наблюдения прохождений Венеры по диску Солнца

для определения суточного параллакса Солнца [14] и вычисления расстояния до него. Кроме того, в 1693 г. он вывел уравнение для линзы и зеркала (без учета «правила знаков»— см. стр. 70 и 163)

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2},$$

где s_1 — расстояние до объекта, а s_2 — до его изображения.

В дальнейшем директором обсерватории был Дж. Брадлей. Существенно улучшив оборудование Гринвичской обсерватории, он повысил точность наблюдений до 4 *сек* дуги по склонению и 1 *сек* времени по прямому восхождению. С 65-метровым воздушным телескопом Брадлей в 1722 г. очень точно измерил диаметр Венеры. В ходе наблюдений он открыл годичную аберрацию — явление, связанное с годичным обращением Земли и с конечностью скорости света. Все звезды описывают в течение года на небе эллипсы, которые в полюсе эклиптики (северный в созвездии Дракона, южный в Дорадо) вырождаются в круги, а в плоскости эклиптики — в прямые линии. Он получил для большой оси эллипса 20″ — современное значение 20″,496. Позднее было открыто явление суточной аберрации, связанное с вращением Земли. Его значение — 0″,32 для точек на земном экваторе. Дж. Брадлей изучал явление аберрации сначала с вертикально установленным в г. Кью телескопом, наблюдая зенитную звезду γ Дракона, а затем с телескопом на более удобной и подвижной монтировке, установленным в Уинстенде.

Другим его открытием было сложное явление нутации — движение истинного Полюса Мира относительно среднего его положения. Окончательно это было им доказано и опубликовано в 1748 г. после ряда тщательных наблюдений в период с 1726 по 1747 г.: траектория движения эллиптическая с полуосями 9″,2 и 6″,6 и с периодом в 18,4 лет. На практике наблюдается результирующая двух движений — нутации и прецессии, траектория получается в форме кругоподобной волнистой линии, размеры траектории определяются прецессией с периодом 26 тыс. лет.

Успехи астрономии XVII—XVIII вв. стали возможны лишь благодаря применению сконструированной Ж. Пикаром в 1667—1669 гг. зрительной трубы с нитяным микрометром.

[14] Угол, под которым из центра Солнца виден радиус Земли.

Широкие исследования небесной сферы вела тогда также Парижская обсерватория, построенная в 1671 г. Она была значительно лучше оснащена, чем Гринвичская. В ней применялись длиннофокусные, в частности воздушные, телескопы. Физические или, как мы теперь говорим, астрофизические наблюдения были здесь первоклассными. Но парижские астрономы не смогли все же достичь той точности в измерении положений небесных светил, которой достигли в Гринвиче. Искусство наблюдений Я. Гевелия, Х. Гюйгенса и Ж. Д. Кассини было исключительно высоким. Последователи Ж. Д. Кассини еще долго не могли увидеть того, что видел в свои длиннофокусные телескопы этот талантливый астроном.

2. ЗЕРКАЛЬНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ XVII—XVIII вв. И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АСТРОНОМИИ

Трудности с употреблением однолинзовых телескопов-рефракторов заставляли исследователей искать новые пути. Было обращено внимание на зеркальные оптические телескопы, или рефлекторы. В эпоху внедрения этих телескопов в науку жил и работал великий Ньютон. Он осуществил разложение белого света на спектр с помощью стеклянной призмы (до него это делал Ян Марек Марци). Ньютон считал, что преломление света и происхождение цветовой гаммы — неразрывно связанные явления. Это привело его к ошибочному заключению, что «коэффициент дисперсии» $\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$ постоянен для всех прозрачных сред, и поэтому изготовить ахроматический, т. е. лишенный цветовых оптических ошибок объектив, невозможно.

Астрономы XVII в. отказались от поиска путей устранения этого существенного дефекта однолинзовых длиннофокусных объективов и сосредоточили все внимание на усовершенствовании рефлекторов. Их оптические схемы были предложены Н. Цукки в 1616 г., М. Мерсенном в 1638 г., Дж. Грегори в 1663 г. и Г. Кассегреном в 1672 г. Цукки предложил схему с вогнутым зеркалом и окуляром; Мерсенн — с двумя, большим вогнутым и малым выпуклым параболическим, зеркалами с совмещенными фокусами («афокальная» схема) и окуляром; Грегори — с двумя вогнутыми зеркалами при малом эллиптическом, поставленном за фокусом главного, и окуляром; Кассегрен — с вогнутым

главным зеркалом и выпуклым малым гиперболическим, поставленным перед фокусом главного, и окуляром.

Схемы эти не нашли практического осуществления, поскольку техника того времени не могла обеспечить соответствующего контроля при изготовлении поверхностей второго порядка. Лишь в 1764 г. Р. Гуком был построен телескоп по схеме Грегори, но качество его оказалось низким.

Для нас важна, конечно, не формальная дата изобретения рефлектора, а та, когда он стал пригодным для наблюдений. Эта заслуга принадлежит И. Ньютону. В 1668 г. он собственноручно построил рефлектор с поперечником вогнутого зеркала $D = 2{,}5$ *см* из зеркальной бронзы [15], при фокусном расстоянии 16,5 *см* (т. е. с $A = 1 : 6{,}6$) и увеличении 41 ×. В качестве окуляра в нем использовалась плоско-выпуклая линза с $f = 4$ *мм*, имеющая кривизну выпуклой поверхности 2 *мм*. Снизив увеличение до 25×, Ньютон убедился, что наблюдаемые объекты становятся более яркими. Чтобы наблюдатель не заслонял головой свет, он применил диагональное зеркальце или призму полного внутреннего отражения. При состоянии оптики первой и второй половины XVII в. схему Ньютона было значительно легче осуществить, чем, например, схемы Мерсенна, Грегори или Кассегрена.

Второй, вполне удовлетворительный шестидюймовый телескоп И. Ньютона 1671 г. имел $D = 3{,}4$ *см*, $F = 15{,}9$ *см*, т. е. $A = 1 : 4{,}7$, и увеличение 38 ×. Зеркало его было сферическим, Ньютон не пытался придать ему форму параболоида вращения. Из-за несовершенства технологии полировки края зеркала имели меньшую кривизну, чем центр. Эти недостатки Ньютон стремился устранять путем введения небольшого отверстия — диафрагмы в пространство между глазом и окулярной линзой.

Расчеты показывают, между прочим, что в первоклассном рефлекторе вполне возможно применять сферическое зеркало, если только при диаметрах его отверстий 10, 100, 1000 и 10 000 *мм* относительные отверстия будут меньше или равны соответственно [16]:

$$A = \frac{D}{F} = \frac{1}{1{,}52\sqrt[3]{D(\text{мм})}} = \frac{1}{3{,}3} ; \frac{1}{7{,}0} ; \frac{1}{15{,}2} ; \frac{1}{32{,}7} .$$

[15] Этот сплав из 6 частей меди и 2 частей олова быстро тускнеет и требует переполировки. Ньютон добавил в него 1 часть мышьяка, что сделало его более блестящим и легче поддающимся полировке.

[16] Формула Д. Д. Максутова.

В этом случае деформации волнового фронта (его изгибы) после отражения от зеркала будут меньше четверти длины волны света, и глаз будет не способен отличить ошибки уклонения сферы от параболоида.

Телескоп Ньютона, чтобы отвечать этим условиям, должен был иметь $A = 1 : 4{,}9$. В действительности же он имел $A = 1 : 4{,}7$. Незначительное расхождение не имело практического значения, т. е. зеркало его не отличалось ощутимо от параболического. Этим и объясняются хорошие возможности маленького рефлектора Ньютона, в который были видны спутники Юпитера, фазы Венеры и другие небесные объекты и явления. Рефлектор, сделанный Ньютоном в 1671 г., хранится в настоящее время в Английском королевском астрономическом обществе.

Убедившись в хорошем качестве изображений рефлектора со сферическим зеркалом, Ньютон не параболизовал свои зеркала, независимо от значения A. Взамен стеклянных зеркал, отражающих всего 4—5% упавшего света, он использовал зеркала из специальной бронзы, которая может отражать в свежем состоянии до 60% света, упавшего по нормали. Однако Ньютон не использовал построенные им телескопы для широкой программы наблюдений, как это сделал Галилей.

Позднее в Англии ньютоновский рефлектор с $D = 15$ *см*, $F = 1{,}58$ *м*, $A = 1 : 9{,}5$ (по формуле требуется $A = 1 : 8{,}1$) построил Джон Гадлей. Телескоп его демонстрировался в 1721 г. Он имел бронзовое зеркало и деревянную трубу, передвигающуюся по азимуту и высоте в небольших пределах. Прибор позволял видеть спутники Юпитера, их тень на диске планеты, щель Кассини кольца Сатурна и другие объекты, видимые, например, и в рефрактор Х. Гюйгенса с $D = 19{,}0$ *см* и $F = 37$ *м*.

В отличие от систем Цукки и Ньютона, системы Мерсенна — афокальная, Грегори — зафокальная и Кассегрена — предфокальная являются удлиняющими [17], их эквивалентное фокусное расстояние превышает прямое в 3—4 раза и более до бесконечности (в системе Мерсенна).

Много зеркальных телескопов фабричного типа в 1732—1768 гг. в Эдинбурге и позднее в Лондоне изготовил Д. Шорт.

[17] Афокальной называется система, дающая параллельный пучок лучей, зафокальной — система, в которой второе зеркало телескопа ставится за точкой фокуса главного зеркала, а предфокальной — система, в которой это зеркало стоит впереди точки фокуса главного.

Наибольший из них имел $D = 55$ *см* и $F = 3$ *м*. Построенные по различным схемам, в частности грегорианской с параболическим главным зеркалом и вогнутым эллиптическим, эти телескопы нашли широкое распространение. Перед смертью Шорт вывел из строя все оборудование и уничтожил все материалы по телескопам, содержавшиеся им при жизни в секрете. Современное исследование Д. Д. Максутовым зеркал Шорта показало их высокое качество, несмотря на почти 200-летний «возраст».

В конце XVII в. в Германии Э. Чирингаузен изготовлял большие медные зеркала до 1,5 *м* в поперечнике, с фокусным расстоянием до 180 *м*. Из-за низкого качества они использовались лишь для гелиотехники. В их фокусе плавился, например, серебряный талер.

В России большого успеха в изготовлении металлических зеркал диаметром до 50 *см* достиг Я. В. Брюс, употреблявший их и для наблюдений за небесными светилами.

Но наиболее выдающиеся достижения принадлежат М. В. Ломоносову, который занимался изготовлением астрономических приборов с первых лет пребывания в Петербургской Академии наук, а особенно плодотворно в период 1762—1763 гг. в созданной на дому мастерской. Ломоносову помогали мастера из академии — И. И. Беляев, Ф. И. Тирютин, А. И. Колотошин, Н. Г. Чижов, И. И. Калмыков, П. О. Гольшин и другие. Они улучшили рецепты и технологию изготовления металлических зеркал телескопов с большой «приумножающей способностью». После упорных трудов им удалось изготовить однозеркальный телескоп с относительным отверстием $A = 1 : 7$. В 1762 г. М. В. Ломоносов разработал и осуществил на практике новую схему телескопа, отличающуюся от схем Ньютона, Кассегрена и Грегори, но независимо от него предложенную также рядом других оптиков и астрономов. Какие объекты наблюдал М. В. Ломоносов со своими зеркальными телескопами, мы еще точно не знаем. Известно только, что зеркальными грегорианскими телескопами Академической обсерватории он почти не пользовался.

Работы М. В. Ломоносова над зеркальным телескопом продолжал И. П. Кулибин. У себя на родине, в Нижнем Новгороде, он узнал об изготовлении зеркальных телескопов в Англии и приступил к созданию этих приборов. Кулибин разгадал секрет сплава металла для зеркала, разработал технологию его обработки и изготовил два теле-

скопа по грегорианской схеме. В 1768 г. он переехал в Петербург и начал работать в Академии наук. Со своим помощником оптиком И. Шедневским он неутомимо совершенствовал зеркальные телескопы. До нас дошла работа И. П. Кулибина «Описание астрономической перспективы в шесть дюймов, которая в тридцать раз увеличивает и, следовательно, Юпитеровых спутников ясно показывать будет» и один из его телескопов, который хранится в Государственном Эрмитаже в Ленинграде. И. П. Кулибин не имел поддержки в Академии наук, и его талантливые изобретения постигла горькая судьба, как и изобретения многих российских самоучек того времени.

Изготовленные в России телескопы-рефлекторы с металлическими зеркалами почти не использовались для наблюдений.

Важнейшие открытия с зеркальным телескопом были сделаны в Англии В. Гершелем. Музыкант по профессии, Гершель из Ганновера переселился в английский город Бат и из любителя астрономии быстро вырос в крупного астронома и оптика. Тогда уже существовали совершенные системы линзовых телескопов Д. Доллонда, но они стоили дорого. Гершель сам изготовлял более доступные телескопы-рефлекторы с бронзовыми зеркалами и даже продавал их. Он фактически стал первым разведчиком звездных систем. Гершель отполировал и отшлифовал около 100 зеркал для телескопов. Он довел их размеры до $D = 1{,}22$ *м* и $F = 12$ *м*. Наиболее крупное зеркало из сплава 75% меди и 25% олова он заключил в трубу и смонтировал на азимутальной установке, подвижной по вертикали и горизонтали. Зеркало весило 960 *кг* при толщине 9 *см*. Телескоп был собран по «фронтовой» схеме, без промежуточной зеркальной оптики. Наблюдатель смотрел непосредственно на рабочую поверхность зеркала. При относительном отверстии $A = 1:10$ требовалась параболическая форма зеркала $D = 1{,}22$ *м*, которая отличается от сферической (того же радиуса кривизны при вершине) всего лишь на $\frac{1}{840}$ *мм*. Кроме того, главная оптическая ось должна была проходить не через поверхность зеркала в его центре (вершине), а сбоку. Всего этого Гершелю не удалось добиться, поэтому изображение получилось нечетким.

Лучших результатов он достиг с меньшими телескопами. Некоторые из них, особенно с $D = 16{,}5$ *см* и $F = 2{,}1$ *м*,

были высокого качества, давали значительные увеличения в результате применения сильных окуляров от $\gamma = 2000^{\times}$ до $\gamma = 6652^{\times}$. Из-за волнения атмосферы их удавалось использовать только для специальных целей — изучения точечных объектов, двойных звезд (при больших D и F).

С одним из таких телескопов Гершель, которому активно помогала сестра Каролина, сама открывшая восемь комет, обнаружил в 1781 г. в созвездии Близнецов объект, который был заметен уже при окуляре $\gamma = 227^{\times}$.

Петербургский астроном А. И. Лаксель путем вычислений доказал, что это не комета, как думал автор открытия, а седьмая большая планета Солнечной системы, названная позднее Ураном. В 1787 г. В. Гершель в телескоп $D = 30{,}5$ *см*, $F = 6{,}1$ *м* открыл у этой планеты два спутника и назвал их Титания и Оберон (14,0 и 14,2 визуальной зв. вел. в среднюю оппозицию.). В 1785 г. он открыл два спутника Сатурна, названные Мимас и Энцелад (12,1 и 11,7 визуальной зв. вел. в среднюю оппозицию).

Важность этих открытий В. Гершеля трудно переоценить. До него с телескопом планеты никто не открывал, и в последующие 65 лет большие планеты также не были открыты.

В. Гершель, кроме того, установил сжатие Сатурна и определил в 1790 г. период его вращения в 10 *час* 16 *мин*, открыл периодичность в изменении полярных шапок Марса, считая это аргументом в пользу его обитаемости, наблюдал туманность Ориона (1774), диск Солнца и образования на нем и т. д. Но главные его работы относятся к звездной астрономии. Он понял, что для полного исследования звездной системы необходимо увеличивать поперечники зеркал, при этом количество света возрастает пропорционально D^2. Поскольку освещенность от звезды изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния звезда — Земля, то, увеличивая поперечник зеркала (или объектива) в два раза, мы в два раза дальше проникаем во Вселенную.

С 1775 г., используя все более совершенные инструменты, В. Гершель систематически изучал небесную сферу. Лучшие результаты он получил в 1783 г. с телескопом $D = 30{,}5$ *см*, $F = 6{,}1$ *м* при поле 0°,25 по методу «звездных черпков»[18]. В более позднее время подобные же планы

[18] Метод изучения распределения звезд в отдельных, почти равномерно расположенных участках неба числом от 683 до 400.

применялись неоднократно (Каптейн, Паренаго и др.). Яркость и количество звезд на определенном участке он принимал за меру глубины проникновения в звездную систему. Собранные данные о распределении звезд в системе Млечного Пути, свидетельствующие о большой их концентрации, были в 1785 г. опубликованы им. Он выразил убеждение в неравномерности распределения звезд в нашей Галактике, сообщая о многих звездных скоплениях и туманностях, которые были им открыты и занесены в каталоги. До него с более скромными инструментами для наблюдений это сделали Н. Л. де Лакайль и Ш. Мессье соответственно для южного (опубликован в 1763 г.) и северного (1781 г.) неба. Многие туманности В. Гершель считал внегалактическими.

В. Гершель открыл немало визуально-двойных и кратных звезд и установил орбитальное движение в этих системах по закону тяготения Ньютона. Он выявил переменность блеска ряда звезд, в частности альфы Геркулеса в 1796 г. Наконец, обобщая данные Галлея о собственных движениях звезд, он в 1783 г. обнаружил по 13 звездам собственное движение Солнца в пространстве к точке, называемой апексом и расположенной в созвездии Геркулеса (предположительно с линейной скоростью, по замечанию В. Гершеля, «никак не меньше скорости движения Земли по ее годовой орбите»).

Телескопы В. Гершеля, особенно большие, не оправдали его надежд. Зеркала гнулись под собственным весом, металл давал трещины, а поверхность тускнела — телескопы «слепли», как тогда говорили, монтировки же без башен и куполов были также несовершенны. Особенно это относится к 122-сантиметровому телескопу, который с 1811 г. не использовался. В 1839 г. он был демонтирован, а в 1840 г. Дж. Гершель, сын астронома, превратил его в памятник отцу (рис. 3).

Попытка В. Гершеля определить параллаксы звезд, т. е. их угловые расстояния, была безуспешной, как и у предшествующих астрономов. Его обширные наблюдения, в основном по двойным звездам, продолжил сын Дж. Гершель с телескопом $D = 30{,}5$ *см*, $F = 6{,}1$ *м* в Южной Африке, на мысе Доброй Надежды в местечке Фельдгеузене у подножия Столовой Горы близ Капштадтской обсерватории (рис. 4).

Несмотря на недостатки конструкции, большие телескопы гершелевского типа продолжали строить. Широкую известность из них получили приборы англичанина У. Лас-

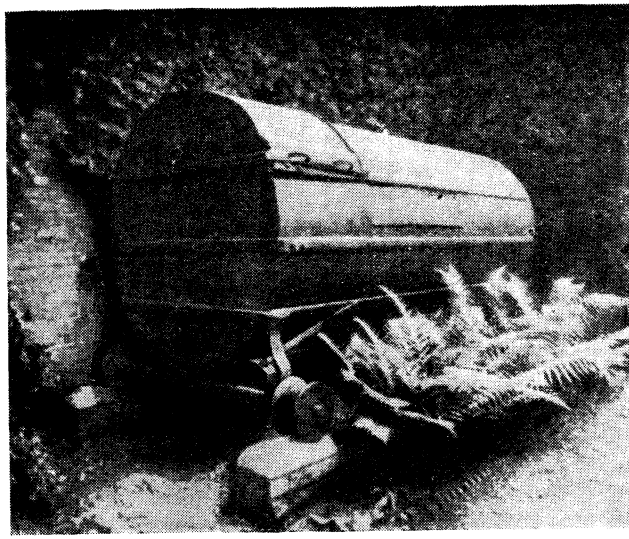


Рис. 3. Остатки трубы 122-сантиметрового телескопа-рефлектора В. Гершеля

селя, ирландцев Т. Грэбба и У. Парсонса (лорда Росса). У. Лассель, по специальности пивовар, в 1860—1861 гг. построил с помощью рабочих телескоп $D = 1{,}22\,м$, $F = 12\,м$ (рис. 5), в ньютоновской комбинации на вилке, и установил его на о. Мальта. В 1867 г. он опубликовал каталог 600 туманностей, которые наблюдал с помощью этого телескопа. Однако большей известностью пользуется его меньший телескоп $D = 61\,см$, изготовленный по конструкции Д. Несмита в 1844—1846 гг. в Англии и установленный в Старфильде близ Ливерпуля. В этот телескоп при $\gamma = 1060^{\times}$ Лассель в конце 1846 г. открыл первый спутник планеты Нептун, названный Тритоном. Сам Нептун был открыт И. Галле несколько раньше — 23 сентября 1846 г. с помощью берлинского 23-сантиметрового рефрактора. Его существование заранее предсказывали французский астроном У. Леверье [19] (18 сентября 1846 г.), по возмуще-

[19] Леверье открыл также вековое движение перигелия Меркурия. По последним данным оно равно 574″ в столетие, что больше на 43″, чем должно получаться из-за возмущений по данным классической ме-

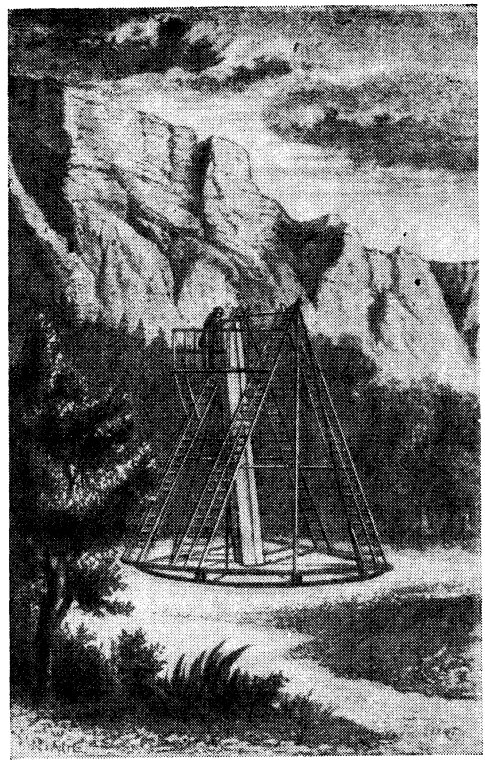


Рис. 4. **Телескоп-рефлектор Дж. Гершеля** на мысе Доброй Надежды

ниям на другие планеты, и независимо от него англичанин Дж. Адамс (сентябрь 1845 г.).

В 1848 г. У. Лассель, а двумя днями раньше него Г. Бонд через 38-сантиметровый рефрактор Гарвардского колледжа в Кембридже открыли седьмой спутник Сатурна — Гиперион. В 1851 г. У. Лассель открыл также первый и второй спутники Урана, названные Ариэль и Умбриэль. Эти спутники независимо от них наблюдал также О. В. Струве в Пулкове. В 1861 г. 61-сантиметровый телескоп У. Ласселя был перевезен на о. Мальту, где он работал параллельно со 122-сантиметровым.

ханики. Эти избыточные 43″ были блестяще объяснены в теории относительности А. Эйнштейна.

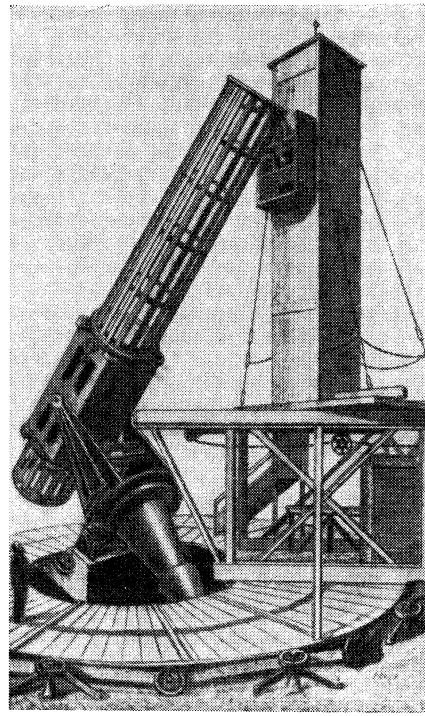


Рис. 5. Телескоп-рефлектор У. Ласселя

Телескоп Т. Грэбба был сделан в 1862 г. в Дублине и имел $D = 1{,}22$ *м* и $F = 9{,}8$ *м*. Он употреблялся в кассегреновской комбинации. В 1867 г. в Мельбурне с ним проводились наблюдения, но, по-видимому из-за запыленности воздуха, интересные открытия не были сделаны. Изготовляли его фабричным, а не любительским способом, как все остальные, за исключением телескопов Шорта. В механическом отношении он был достаточно совершенным. Зеркала во избежание прогибов разгружались противовесами с тыльной стороны.

Труба телескопа и монтировка до сих пор используются в обсерватории Маунт - Стромло в Австралии в комбинации Шмидта со стеклянным сферическим зеркалом $D = 1{,}27$ *м*, $F = 22{,}7$ *м*.

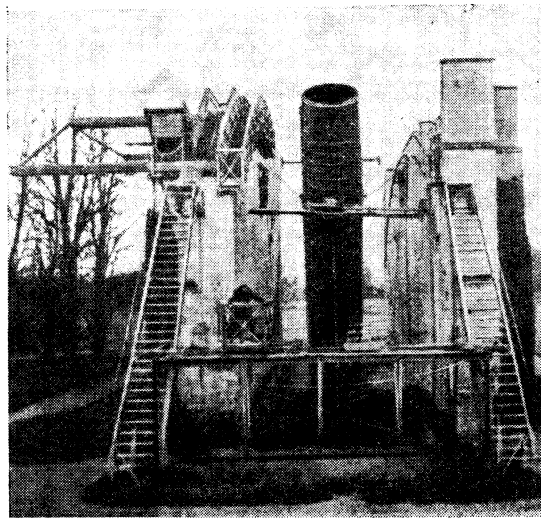


Рис. 6. Телескоп-рефлектор Росса

Ньютоновский телескоп ирландского феодала Росса, имевший $D = 1{,}83$ *м*, $F = 15{,}8$ *м* и увеличение до 6 тыс. раз, был установлен в 1845 г. в Бир-Касле близ Парсонстауна в Ирландии (рис. 6). Это был настоящий левиафан среди телескопов с металлическими зеркалами. Параболическое зеркало с $A = 1:8{,}7$ отклонялось у него от сферического лишь на 2,6 *ммк*. Последнее при толщине в 15 *см* было также разгружено. Монтировку этого телескопа нельзя считать совершенной. Малая подвижность ее по азимуту (всего лишь на $\pm 12°$) и по высоте (120° к югу и 40° к северу от полюса) не позволяла наблюдать объект на экваторе более чем в течение полутора часов.

Несмотря на существенные недостатки, телескоп в первые годы, пока не потускнело его зеркало, обладал достаточной светосилой и позволил глубже, чем гершелевский, заглянуть во Вселенную. Многие туманности В. Гершеля с помощью этого телескопа исследователи разложили на звезды, выяснили тождественность кольцеобразных и планетарных туманностей, когда в центре последних были обнаружены отверстия, или полости, а по краям — неровности, наподобие бахромы. Была доказана спиральная

структура известных внегалактических туманностей, подобная структуре в туманности М51 созвездия Гончих Псов, в хвосте созвездия Большой Медведицы, обращенной к нам плашмя, и в туманности созвездия Андромеды, повернутой к нам почти на три четверти. В 122-сантиметровый телескоп. У. Лассель вскоре подтвердил спиральную структуру ряда туманностей и открыл ряд объектов сам. Сравнение зарисовки спиральной туманности М51 в созвездии Гончих Псов, сделанной Россом, с современной фотографией убеждает, что 183-сантиметровый телескоп давал в то время неплохие результаты. По краям туманности Андромеды Росс увидел отдельные звезды, нелегко различимые даже в современные телескопы средних размеров.

Работы Росса показали, что для изучения слабых протяженных объектов Вселенной нужны большие телескопы. Но зеркало его телескопа быстро потускнело, и он вышел из строя. Повторить столь огромную работу по крупным телескопам никто не решался вплоть до первой четверти XX в., когда был построен 250-сантиметровый телескоп.

Как мы видим, с помощью отражательных телескопов в XVIII—XIX вв. было сделано немало важнейших открытий, которые в дальнейшем непрерывно обобщались. В частности, В. Я. Струве, первый директор Пулковской обсерватории, сделал одно из таких обобщений по данным В. Гершеля и других наблюдателей. В его знаменитых «Этюдах звездной астрономии» (1847) проведен детальный анализ строения Галактики с учетом фотометрических параллаксов звезд, которые В. Гершель еще не знал. В этом труде впервые говорилось об общем межзвездном поглощении света в системе Млечного Пути.

Еще ранее серьезное обобщение накопленных астрономами данных было сделано И. Кантом (1755 г.) и П. Лапласом (1796 г.) в виде новой небулярной космогонической гипотезы.

Значительные успехи, достигнутые с рефлекторами в XVIII—XIX вв., не помешали ученым и мастерам работать над усовершенствованием однолинзовых телескопов (особенно из-за быстрой порчи металлических зеркал рефлекторов), т. е. рефракторов.

В середине XVIII в., в 1752 г., была проведена выдающаяся работа по определению расстояния от Земли до Луны путем измерения параллакса Луны. Это сделал

Н. Л. де Лакайль, наблюдатель небольшой парижской обсерватории «Коллегия Мазарини», во время экспедиции на мыс Доброй Надежды. Одновременно с ним в Берлине на корреспондирующей станции наблюдал Ж. Лаланд. Определением расстояния до Луны занимались еще астрономы в древности, но де Лакайль и Лаланд применили тригонометрический метод. Они получили параллакс 57′ (современное значение 57′,04 соответствует расстоянию до Луны в 60,27 земных радиуса). Это так называемый средний экваториальный горизонтальный параллакс Луны. Кроме того, де Лакайль наблюдал на мысе Доброй Надежды по каталогу «Южное звездное небо» (издан в 1763 г.) 42 туманности, скопления, туманные звезды и т. д.

Определением параллакса Луны занимался также петербургский академик А. Н. Гришов, специально ездивший для проведения наблюдений на о. Эзель (ныне о. Сарема в Эст. ССР).

3. НАБЛЮДЕНИЯ С РЕФРАКТОРАМИ В XVIII—XX вв. С ДВУМЯ И БОЛЕЕ ЛИНЗАМИ

В 1733 г. англичанин Ч. Холл, исследуя линзы, заметил, что объектив, состоящий из двух линз — одна из легкого стекла крона, другая из тяжелого флинта (с ничтожной и с большой примесью окиси свинца соответственно),— не окрашивает изображений, т. е. влияние хроматической аберрации, особенно опасной для однолинзовых объективов, в нем относительно невелико. По заказу Холла оптик Г. Бест сделал несколько таких объективов, в частности с $D = 5$ *см* и $F = 0{,}5$ *м*. Однако стекло, особенно флинт, было неоднородным, и видимость небесных светил в эти объективы была плохой.

Примерно в то же время Л. Эйлер из Базеля, впоследствии член Петербургской Академии наук, исходя из сложной ахроматической системы — человеческого глаза, создал ахроматические объективы из стекла и воды между двумя линзами. Свой метод расчета он опубликовал в книге «Диоптрика» в 1769—1771 гг. Подобные же объективы изготовлял в Эдинбурге Р. Блеир. Следует отметить, что Эйлер, как и Ньютон, неточно решил задачу ахроматизации, так как опирался на неправильную гипотезу о связи дисперсии с рефракцией $\Delta n/(n - 1)$. Тем не менее идея о линзах с водяной прослойкой в принципе была правильна.

Англичанин Дж. Доллонд усовершенствовал холловское изобретение, изготовив объективы из положительной крановой линзы и отрицательной флинтовой. В 1758 г. он получил патент на ахроматический объектив. Впоследствии эти работы продолжали его сын П. Доллонд и Дж. Рамсден. П. Доллонд изготовлял также и трехлинзовые объективы.

Ахроматические объективы, хотя и были дороги, быстро получили распространение, в том числе и в России. Так, в описи имущества Петербургской академической обсерватории (составлена в 1766 г. профессором С. Я. Румовским) наряду с грегорианскими медными трубами упоминаются «Доллондова из красного дерева труба десятифутовая и доллондова из красного дерева труба шестифутовая». Это были ахроматические трубы с фокусным расстоянием 3 и 1,8 *м*, присланные в Россию через несколько лет после их изобретения.

М. В. Ломоносов наблюдал в 1761 г. редкое явление — прохождение Венеры по диску Солнца — также, по-видимому, с доллондовой 4,5-футовой трубой ($F = 1{,}5$ *м*). Специально заказанные Россией для наблюдений за прохождением Венеры в 1761 и 1769 гг. доллондовы трубы были вместе с другими инструментами Академической обсерватории в 1884 г. переданы в музей Пулковской обсерватории, организованный В. Я. Струве в 1839 г. В том же музее хранились десяти- и двадцатифутовые металлические зеркала гершелевских и шортовских телескопов. Десятифутовый телескоп Гершеля вместе с монтировкой, которая сохранилась в музее, был подарен в 1793 г. английским королем Георгом III Екатерине II. Пулковский музей и его уникальные инструменты погибли во время Великой Отечественной войны 1941—1945 гг.

Наблюдения за прохождением Венеры по диску Солнца дали М. В. Ломоносову основание сделать замечательное открытие о существовании у Венеры плотной атмосферы. До Ломоносова явление прохождения Венеры по диску Солнца использовалось для определения суточного параллакса Солнца. На основе анализа накопленного материала в 1822 г. и позднее И. Ф. Энке дал $\pi = 8''{,}57$ (современное значение $8''{,}79$, предыдущие определения давали расхождения в секундах дуги).

Великий русский ученый М. В. Ломоносов ставил целью не астрономические наблюдения, т. е. определение параллакса, а астрофизические и опередил здесь всех других ис-

следователей — как русских, так и зарубежных. Когда Венера только частично вступила на солнечный диск, то вокруг ее части, еще находящейся за пределами диска Солнца,

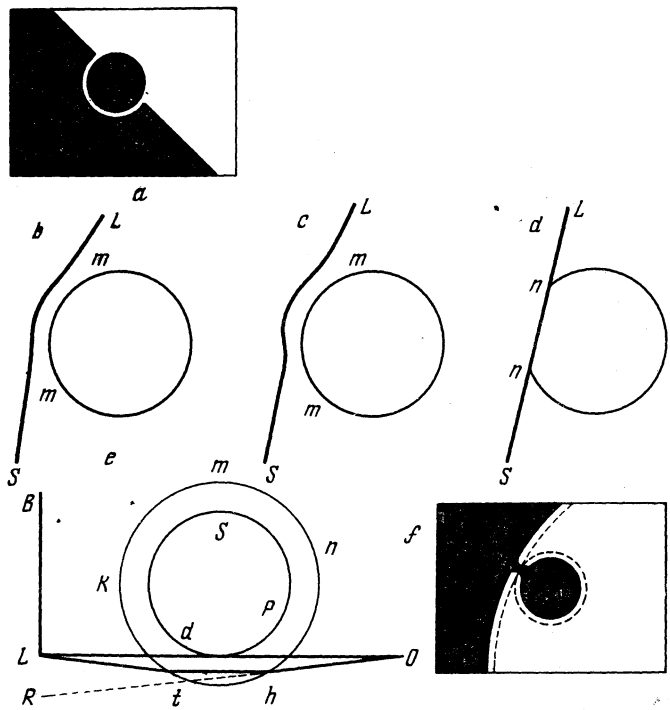


Рис. 7. Явление М. В. Ломоносова, замеченное им во время наблюдений планеты Венеры

на одну секунду вспыхнул светлый яркий ободок [20], окружающий диск планеты со стороны темного фона неба (рис. 7, *а*). Это явление астрономы назвали «явлением Ломоносова». Сообщение о нем ученый опубликовал на русском и немецком языках под заглавием «Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санкт-Петербургской Академии наук, майя 26 дня 1761 года».

[20] Из-за кратковременности явления М. В. Ломоносову, как и последующим наблюдателям, казалось, что светлое сияние пересекло темный диск планеты и как бы является продолжением солнечного диска.

Одновременно Ломоносов наблюдал и другое явление. Когда Венера прошла по диску Солнца и придвинулась к противоположному его краю на $^1/_{10}$ своего диаметра, в этот момент на краю Солнца перед ней образовался выступ, бугорок (рис. 7, *b*; здесь линия *LS* условно изображает край Солнца), который сначала, с движением Венеры, увеличивался (рис. 7, *c*), а потом исчез вместе с небольшим сегментом диска планеты (*n—n* на рис. 7, *d*). Ученый обратил внимание на то, что при первом и четвертом контактах дисков Венеры и Солнца край Солнца становился неясным, оба диска как бы слипались [21]. Важно, что М. В. Ломоносов не только наблюдал явление ободка, отмеченное и другими, но и объяснил его происхождение, как обусловленное атмосферой Венеры, точнее рефракцией, а не рассеянием, как думали и думают некоторые наблюдатели даже сейчас.

Объяснение М. В. Ломоносова иллюстрируется на рис. 7, *e*. Окружностью *spd* изображен диск планеты, а окружностью *tkmnh* — ее атмосфера. Пусть направление *LO* соответствует воображаемому лучу, идущему от края Солнца к наблюдателю в точку *O* в том случае, если бы атмосфера на Венере отсутствовала. При наличии атмосферы в виде скопления плотных газов и, возможно, аэрозолей (капельки пара, частицы дыма, пыли и др.) луч, вышедший от Солнца по направлению *Lt*, достигнув атмосферы Венеры, преломляется из вакуума в плотную среду и поднимается (на рисунке вверх). Продолжая свой путь в атмосфере, луч достигает точки *h* на ее границе. Переходя из плотной среды обратно в вакуум, он снова преломляется (на рисунке вверх) и может попасть, как и прямой луч *LO*, в точку *O*, т. е. к наблюдателю. В результате наблюдатель будет видеть точку *L* как продолжение входящего в его глаз луча *OhtR*, т. е. в направлении *OR*. Следовательно, край солнца будет казаться ему дальше направления *L* (на рисунке ниже, в точке *R*).

---

[21] Необходимо отметить, что другие наблюдатели отмечали совсем другое явление, названное «явлением черной капли» (рис. 7, *f*). Сразу после второго и перед третьим контактами дисков планеты Венеры и Солнца образовывалась темная перемычка. Это явление, не наблюдавшееся или не описанное М. В. Ломоносовым, связано главным образом не с атмосферой Венеры, а с различными оптическими помехами (иррадиация, дифракция, аберрации, турбуленция и рассеяние в земной атмосфере и т. д.). Из-за явления иррадиации, в частности, Венера кажется на диске Солнца меньше по диаметру, а само Солнце больше (их истинные дуги на рис. 7, *f* показаны пунктиром).

М. В. Ломоносов делает при этом вывод: «... и ради того излишек расстояния *RL* представить должен пупырь на краю солнечном перед передним краем Венеры, при ея вступлении» [22].

Этим и объясняется такая большая яркость ободка, что его можно наблюдать даже через закопченное стекло.

Гораздо позднее, в 1842—1849 гг., было обнаружено еще одно явление в атмосфере Венеры, связанное с рассеянием света. В момент нижнего соединения Венеры с Солнцем она обращена к нам своей неосвещенной, ночной, стороной, и мы ее видим в виде тонкого серпа. Если сумеречный свет в результате рассеяния в ее атмосфере, обусловленного освещенной, дневной стороной, проникает в неосвещенную, то «рога» смыкаются, и мы видим «сумеречное кольцо». Это кольцо, или светлая каемка, почти сливается с фоном неба и может наблюдаться до вступления планеты на диск Солнца, но только при условии очень высокого качества оптики телескопа. Именно поэтому оно было замечено после открытия более яркого «явления Ломоносова» почти через 100 лет, когда качество ахроматических телескопов значительно повысилось. Обусловленность этого явления рассеянием доказана только в наше время В. Г. Фесенковым, Б. Лио, Н. П. Барабашовым и др.

Открытие атмосферы на Венере иногда ошибочно приписывают В. Гершелю либо немецкому астроному И. Шрётеру, которые в 1792 г. заметили, что близ нижнего соединения с Солнцем, в 2—3° от его центра, дуга серпа Венеры превышает 180° из-за рассеяния света в ее атмосфере. Однако это было отмечено спустя почти 30 лет после М. В. Ломоносова. Шрётер вел наблюдения в Лилиентале, близ Бремена, в гершелевский рефлектор $D = 21{,}5$ *см*, а затем в рефлектор немецкого производства $F = 40$ *см*. Вид Венеры, по данным Шрётера, на разных расстояниях от Земли показан на рис. 8.

М. В. Ломоносов пользовался одной из первых ахроматических труб, еще весьма несовершенных, хотя для своего времени они ознаменовали большой прогресс в астрономическом приборостроении. Вот что пишет о них В. М. Ломоносов:

---

[22] Цит. по статье: В. В. Ш а р о н о в. Явление Ломоносова и его значение для астрономии.— «Астрономический журнал», 1952, т. 29, № 6, стр. 728.

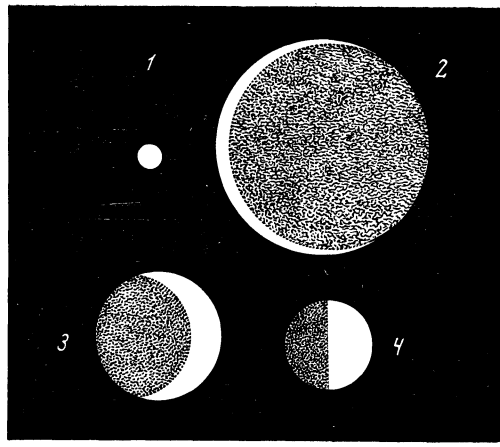


Рис. 8. Вид планеты Венеры на разных расстояниях от Земли при наблюдении ее в телескоп

«При сем ясно примечено, что как только из оси трубы Венера вступала в близость краям отверстия, тотчас являлись цветы от преломления лучей, и края оные казались неявственны тем больше, чем были от оси *X* далее. Для того при сей обсервации устанавливалась труба, чтобы Венера была всегда в центре отверстия, где края ее казались весьма явственны без всяких цветов».

По-видимому, вне оси хроматические ошибки были весьма большими (хроматизм увеличения).

Успех доллондовых труб был до некоторой степени случайным — мастерская располагала большими блоками относительно хорошего флинта. Когда они были израсходованы, появились новые блоки, значительно уступающие прежним по качеству, и видимость в более поздние доллондовы трубы стала хуже.

Трудности с оптическими приборами в Англии и вообще в Европе усугублялись большими налогами на стекольное производство, которые были упразднены только в 1845 г.[23]

---

[23] Отметим, что уже в 1811 г. при Главном штабе в Петербурге была организована механическая мастерская, которая в 20-х годах производила астрономические инструменты, в частности линзовые телескопы-рефракторы, вполне удовлетворительного качества.

Ученые искали новые решения. Одно из них было найдено австрийцем Й. И. Литровым, членом-корреспондентом Петербургской Академии наук с 1813 г., и осуществлено венским оптиком С. Плеслем в виде диалитических труб, в которых флинтовая, отрицательная линза отодвигалась к фокусу в сходящемся пучке. Диаметр ее был невелик, и маленький блок флинта было легко достать. Такой 18-сантиметровый телескоп был заказан к открытию Пулковской обсерватории в 1839 г., но из-за болезни мастера не был изготовлен. В принципе такие телескопы дают худшие изображения по сравнению с обычными ахроматами.

Производство кронов и особенно флинтов было значительно улучшено швейцарцем П. Гинаном в период с 1799 по 1814 г. Он отлил 45-сантиметровый диск, из которого французский оптик Р. Кошуа отшлифовал в 1823 г. наибольший для того времени 30-сантиметровый объектив. Д. Гершель убедился в его хорошем качестве, открыв, в частности, с его помощью в 1830 г. слабую шестую звезду в трапеции Ориона. Позднее этот объектив использовался в Дансинкской обсерватории в Дублине для определения параллаксов.

После кончины П. Гинана в 1824 г. секреты стекольного производства перешли к его сыну Г. Гинану, который через 4 года передал их стекольной фирме Г. Бонтана в Париже, совладельцем которой он стал. Позднее Г. Гинан со своим зятем Ш. Фейлем создал фирму «Фейль — Гинан». После кончины Г. Гинана она слилась с фирмой «Парра — Мантуа» в Париже. Во время французской революции 1848 г. Г. Бонтан вместе с другими экспертами и мастерами переехал в Англию, где стал совладельцем стекольной фирмы «Ченс и братья» в Бирмингаме, передав ей профессиональные секреты Гинана. Это в сильной степени повысило качество производства оптического стекла в Англии.

П. Гинан еще в 1805 г. ездил в Германию, в Бенедиктбейрн, близ Мюнхена, где консультировал молодого Й. Фраунгофера, который позднее заведовал оптическим отделением фирмы Мюнхенского математико-механического института, был директором Мюнхенско-Бенедиктбейрнской фирмы «Й. Фраунгофер и Й. Утцшнейдер». Впоследствии эта фирма называлась фирмой «Г. Мерц и Ф. Малер» в Мюнхене, а параллельно с ней существовала механическая (также и по обработке стекла) фирма И. Репсольда в Гамбурге.

Стекловарение в Германии в эти годы было весьма раз-

вито, поскольку английские товары, в частности оптическое стекло, почти не попадали на материк. И. Фраунгофер улучшил технологию изготовления телескопов и их ахроматические свойства, сделал целый ряд высококачественных рефракторов с ахроматическими объективами умеренных размеров.

Один из наиболее удачных его приборов — рефрактор, сделанный в 1817 г. ($D = 24{,}4$ *см*, $F = 4{,}3$ *м*), в 1824 г. был приобретен Россией для Дерптской обсерватории, где он и сейчас сохраняется как музейный экспонат. (г. Тарту, Эст.ССР). В нем был применен часовой механизм и микрометр на окулярном конце. С помощью этого телескопа с хроматической аберрацией $\Delta F_\lambda / F_\lambda = 0{,}0005$, т. е. не более 2,2 *мм* в сине-красной области спектра, сделал много замечательных открытий будущий директор Пулковской обсерватории В. Я. Струве. Этот прибор можно, согласно общему мнению астрономов, поставить в ряд с наиболее знаменитыми телескопами Гершеля.

Ахроматические рефракторы были лучше рефлекторов, особенно для астрометрических целей, т. е. для измерения положений светил на небе. В этом случае они оказывались незаменимыми. Не случайно поэтому В. Я. Струве, наблюдая в Дерпте звезду альфу Лиры, смог впервые определить в 1837 г. ее параллакс в $0''{,}125 \pm 0''{,}055$, который почти точно совпадает с современным значением $0''{,}124$ (расстояние до нее $r = 8$ *пс*).

В 1838 г. Ф. Бессель в Кенигсберге, выбрав звезду — широкую пару 61 Лебедя с угловым расстоянием $25''$ и собственным движением $5''{,}2$ в год (наибольшее из известных тогда значений, оно говорило о ее близости), получил параллакс $0''{,}314 \pm 0''{,}014$, также близкий к современному значению $0''{,}299$. Бессель вел исследования с новым оригинальным ахроматическим рефрактором-гелиометром, также изготовленным Фраунгофером. В нем объектив разрезан на две половины, передвигающиеся микрометром одна относительно другой. Для двойной звезды он дает четыре изображения, которые совмещаются наблюдателем, и их угловые расстояния при этом измеряются дифференциально.

В 1839 г. Т. Гендерсон на Капштадтской обсерватории (мыс Доброй Надежды) определил параллакс звезды альфа Центавра. Он наблюдал ее склонение, а для расчета прямых восхождений использовал данные других наблюдателей. Гендерсон получил параллакс $1''{,}16 \pm 0''{,}11$. Дей-

ствительное его значение 0″,756. Различие в точности измерений по сравнению с результатами Струве и Бесселя обусловлено тем, что используемые Гендерсоном инструменты (в основном меридианные) были менее совершенными.

В. Я. Струве сделал в тот же телескоп еще одно очень важное открытие. В 1835 г. он заметил, что блеск звезд, покрытых кометой Галлея, не изменяется. Это говорило о высокой степени разреженности вещества в хвостах комет. Открытие подтвердил еще ряд наблюдателей на примерах других комет, что частично пролило свет на их загадочное строение.

После успеха дерптского рефрактора Фраунгофера, о высоких качествах которого больше других факторов свидетельствовала возможность разделения с его помощью тесных двойных звезд, такие рефракторы изготовляли в разных странах: во Франции Р. Кошуа в 1824 г. ($D = 32$ *см*), в Италии Дж. Амичи в 1840 г. (D=24,4 и 28 *см*), в Англии Т. Кук в 1869—1871 гг. ($D = 18{,}8$ и 63,5 *см*) и т. д. Началась эпоха больших двухлинзовых ахроматических рефракторов, которые используются до настоящего времени.

В 1839 г. была открыта Пулковская обсерватория, прославившаяся впоследствии как астрономическая столица мира. Ее первый директор В. Я. Струве заботился о первоклассном оснащении этого национального учреждения. Обсерватория получила от фирмы «Г. Мерц и Ф. Малер» великолепный рефрактор $D = 38$ *см*, $F = 7$ *м*. Его установили в центральной башне главного здания. Высокие качества этого прибора были продемонстрированы в 1844 г., когда О. В. Струве, сын В. Я. Струве, смог увидеть в него четвертое появление уже сильно ослабевшей кометы Фая. Он же последним следил за обеими ядрами кометы в 1845—1846 г. после ее распада. О. В. Струве открыл с этим рефрактором много новых тесных пар двойных звезд и сделал измерение двойных звезд, уже известных по дерптским наблюдениям д. Я. Струве. Кроме того, в 1850 г. он одновременно с У. Бондом, В. Доусом и У. Лассселем изучал креповое, или флеровое, кольцо Сатурна, которое, правда, еще раньше их, в 1838 г., наблюдал в Берлине И. Галле. Часто наблюдатели замечали также тень кольца на диске этой планеты в моменты ее благоприятного расположения. С 38-сантиметровым рефрактором О. В. Струве подробно изучал газовые туманности, в частности туманность Ориона, и открыл переменность ряда звезд, как бы вкрапленных в ее отдельные части.

Восемь лет пулковский рефрактор был крупнейшим в мире и 23 года — одним из крупных.

В 1847 г. аналогичный инструмент той же фирмы был приобретен для Гарвардского колледжа в Кембридже, где с ним успешно работали отец и сын У. К. Бонд и Д. Ф. Бонд.

Другой пулковский инструмент измерительного типа — вертикальный круг ($D = 15$ *см*, $F = 2{,}59$ *м*) Г. Эртеля, преемника Г. Рейхенбаха в Мюнхене, усовершенствованный в мастерской обсерватории по указаниям В. Я. Струве, был использован А. Ф. Петерсом для продолжения работы В. Я. Струве по определению параллаксов. В 1846 г. были определены параллаксы восьми ярких звезд новым, абсолютным методом, а также средние параллаксы звезд второй величины.

Начиная с 1845 г. обсерватория печатает знаменитые «Пулковские каталоги» положений звезд, фундаментальные постоянные астрономии (аберрация и т.д.). В 1847 г. выходят в свет «Этюды звездной астрономии» В. Я. Струве, явившиеся после труда В. Гершеля следующим крупным шагом в разведке звездного мира. В этом труде он пишет об открытии межзвездного поглощения с коэффициентом $1^m{,}08$ *кпс* (по пересчету Г. А. Тихова на современные единицы). Этим открытием В. Я. Струве почти на столетие опередил своих современников.

В конце XVIII — начале XIX в. были сделаны и другие немаловажные открытия. К числу их относятся, например, открытия малых планет, местоположение которых заранее не предсказывалось астрономами. Согласно эмпирическому правилу Тициуса — Боде (1772 г.) для больших полуосей орбит планет a_n имеем $a_n = 0{,}4 + 0{,}3 \cdot 2^n$, что при $n = -\infty$, 0, 1,2,3, 4... дает следующие размеры полуосей орбит Меркурия, Венеры, Земли, Марса, неизвестной, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона соответственно: $a_n = 0{,}4$; 0,7; 1,0; 1,6; 2,8; 5,2; 10,0; 19,6; 38,8, 77,2 *а. е.* (астрономических единиц); наблюденные же значения были: 0,4; 0,7; 1,0; 1,5; неизвестно; 5,2; 9,5; 19,1; 30,1 и 39,5 *а. е.*

Как видим, для первых четырех планет эти цифры дают очень хорошее соответствие. Дальнейшее подтверждение правила Тициуса — Боде было сделано с открытием в 1781 г. Урана: при $n = 5$ его $a_5 = 19{,}6$, а наблюденное значение 19,1. Однако место $n = 3$ при $a_3 = 2{,}8$ оказалось пустым. И. Кеплер на этом основании еще в 1596 г. предполагал, что между Марсом и Юпитером существует планета. В 1796 г.

после конференции в Готе образовалась группа из 24 астрономов (Лаланд, Шрётер и др.) для поисков новой планеты. Однако обнаружить ее им не удалось, и разгадка была сделана не ими и до некоторой степени случайно.

Дж.Пиацци 1 января 1801 г., наблюдая в Палермо небесную сферу в телескоп типа оригинального полутораметрового вертикального круга — «альтазимута» Дж. Рамсдена, случайно обнаружил объект седьмой звездной величины. Вскоре этот объект—малая планета—скрылся в лучах Солнца и был потерян, что вызвало большие огорчения астрономов. Однако 24-летний ученый Карл Фридрих Гаусс из Геттингена разработал метод вычисления орбиты малой планеты Пиацци, определил место ее расположения и даты появления. Ровно через год, 1 января 1802 г., утерянная планета в соответствии с его расчетами снова была найдена в созвездии Девы. По просьбе Пиацци ей дали название Церера.

28 марта 1802 г. Г. Ольберс в Лилиентале увидел через рефрактор в созвездии Девы другую малую планету, которую назвали Палладой. Затем М. Хардинг и Г. Ольберс открыли еще две малые планеты—Юнону в созвездии Кита в 1804 г. и Весту в созвездии Девы в 1807 г. Благодаря сравнительно большой яркости названных малых планет (соответственно 7,4, 8,0, 8,7 и 6,5 зв. вел.) астрономы с помощью рефракторов измерили их диаметры.

Позднее были обнаружены и поименованы еще четыре малые планеты: Астрея в 1845 г., Геба в 1847 г., Ирида в 1847 г. и Флора в 1847 г.

Таким образом, к середине XIX в. стало известно восемь малых планет, орбиты которых астрономы изучили путем тончайших измерений с телескопом, который открывал все более широкие горизонты в познании Вселенной.

Во второй половине XIX в. специалисты непрерывно улучшали рефракторы с ахроматическими объективами и увеличивали их поперечники. Некоторые рефракторы, в частности трептовский [24] в Берлине (рис. 9), создавали специально для любителей астрономии. Естественно, что с помощью больших телескопов удалось сделать много важных открытий. Мы упомянем лишь о некоторых из них, наибо-

[24] В этом телескопе окуляр располагается на пересечении часовой оси и оси склонения, что очень удобно для визуальных наблюдений.

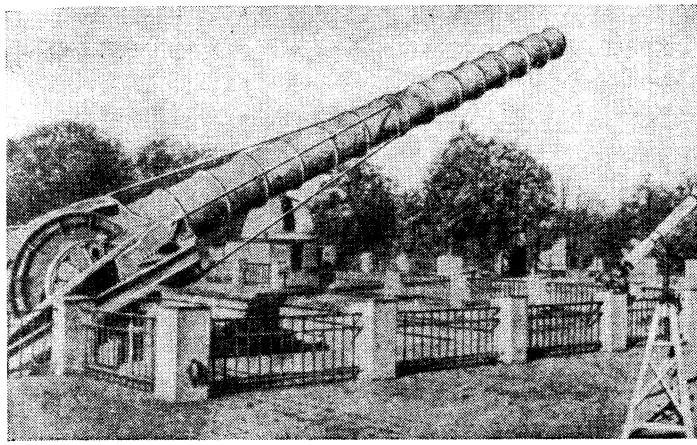


Рис. 9. Оригинальный телескоп-рефрактор в Берлине (ГДР), установленный для показа неба любителям астрономии

лее наглядно свидетельствующих о новых возможностях усовершенствованных телескопов-рефракторов.

В «Путешествиях Гулливера» Д. Свифт высказал догадку о наличии у планеты Марс двух слабых спутников — двух Лун, открытых якобы лапутянами с помощью маленьких, но сильных телескопов. В 1877 г. А. Холл в Вашингтонской морской обсерватории с помощью высококачественного рефрактора $D = 66$ *см* действительно обнаружил у Марса двух спутников. Они были очень слабы (11,5 и 13 зв. вел.) и расположены близко от края планеты. Им дали мифологические имена сыновей бога войны Марса — Фобоса и Деймоса (что значит страх и ужас).

Движение этих спутников по микрометрическим измерениям изучил Г. О. Струве, внук В. Я. Струве и сын О. В. Струве, с помощью высококачественного пулковского рефрактора $D = 76$ *см*. В 1911 г. он сумел рассчитать по возмущениям в движении Фобоса динамическое сжатие шара [25] Марса, получив значение 0,0052, близкое к возможному теоретическому пределу 0,0057. Оптические измерения дают значительно большую величину, равную 0,013; причина такого расхождения до сих пор не выяснена.

[25] Т. е. $\frac{a-b}{a}$, где a — экваториальный и b — полярный радиусы Земли.

Из-за близости к планете Фобос совершает оборот вокруг нее за 7 *час* 39 *мин*, т. е. за время, значительно более короткое, чем время осевого вращения Марса, равное 24 *часа* 37 *мин*. В связи с этим он восходит на западе 2—3 раза в сутки, а заходит на востоке, что необычно и непривычно для земных жителей, знакомых только с Луной. Период обращения Деймоса, удаленного от Марса значительно дальше, равен 30 *час* 18 *мин*, и его заходы и восходы происходят «нормально».

В 1945 г. Б. Шарплесс, обрабатывая наблюдения Г. Струве и др., определил, что Фобос ускоряет свое обращение на величину изменения периода —0,01 *сек* за 50 лет, т. е. за это время он забегает вперед по орбите. Это явление хорошо известно астрономам, но в более широкий обиход оно вошло лишь после запуска искусственных спутников Земли. Для объяснения его был выдвинут ряд гипотез. Однако величину ускорения и его знак пока еще нельзя считать окончательными. Спутники Марса настолько малы, что их диаметры невозможно измерить с помощью самых мощных телескопов. По измерению блеска диаметры этих спутников составляют всего около 10 *км*.

Телескопы показали свои большие возможности после зарождения нового раздела науки астрономии — астрономии невидимого.

Значительный вклад в усовершенствование телескопической измерительной техники сделал Ф. Бессель. В 1834 и 1840 гг. он обнаружил в своем приборе, что Сириус и Процион периодически меняют свое положение на небе. Он истолковал увиденное как движение каждой из этих А звезд в отдельности вокруг общего центра тяжести двойных систем (Сириус А + В, Процион А + В) со вторыми компонентами двойной звезды, одна из которых (В) значительно более слабая. Однако наблюдатели того времени не обратили должного внимания на это интересное предсказание.

Американец Альван Кларк, по профессии художник, начал работы по шлифовке зеркал сначала как любитель. С 1851 г. он тренировался в перешлифовке старых линз и, проверяя их качество по звездам, открыл ряд двойных звезд — 8 Секстанта, 96 Кита и др.,—имеющих взаимное расстояние между компонентами меньше одной секунды дуги. Получив подтверждение высокого качества обработки линз, он вместе с сыновьями Джорджем и Грейамом организовал сначала небольшую мастерскую, а затем хорошо оборудованное

предприятие в Кембридже для изготовления и испытания объективов. Последнее осуществлялось в тоннеле длиной 70 *м* по искусственной звезде. Так родилась фирма «Альван Кларк и сыновья». Получив от фирмы «Ченс и братья» кроновый и флинтовый диски, фирма «Кларк и сыновья» изготовила 47-сантиметровый ахроматический объектив для университета в Миссисипи. Испытывая этот объектив, Альван Кларк 31 января 1862 г. действительно обнаружил очень слабый спутник Сириус В у звезды Сириус А. Его открытие вскоре было подтверждено Бондом с помощью 38-сантиметрового рефрактора в Гарварде. После этого лишь в 1892 г. Д. Шеберле с ликовским рефрактором диаметром 91 *см*, в то время наибольшим в мире, обнаружил Процион В у звезды Процион А.

Звезды оказались представителями нового класса «белых карликов» —звезд с малой массой (1,0—0,6 $\mathfrak{M}_\odot$) и светимостью, но с очень большой плотностью. Благодаря последнему обстоятельству состояние вещества в центре этих звезд особое — так называемое вырожденное. Впервые его исследованием занимался физик Р. Фаулер. В 1925 г. В. Адамс именно в спектре Сириуса В измерил сдвиги спектральных линий в красную сторону, подтвердившие некоторые из основных положений теории относительности. В дальнейшем, несмотря на прогнозы, высказываемые астрономами-наблюдателями и теоретиками, вплоть до 1955 г. никому не удавалось найти столь трудно разрешимых в телескопы и необычных двойных звезд.

Своими наблюдениями с 66-сантиметровым рефрактором в Вашингтоне С. Ньюолл и другие ученые показали, что ахроматические телескопы разрешают в благоприятных атмосферных условиях двойные звезды с расстояниями компонент (примерно одинакового блеска) до $0''{,}16$, что даже несколько лучше теоретического предела $11{,}6/D(см) = 0''{,}176$ в визуальных лучах. Другими словами, двухлинзовые ахроматические объективы обладали в 16 раз меньшей хроматической аберрацией, чем однолинзовые объективы XVII в. Благодаря этому стало возможным при соблюдении тех же требований к четкости получаемых в них изображений строить рефракторы в 16 раз более светосильные, с бо́льшим диаметром и более короткие.

Повышение качества приборов улучшило видимость тонких деталей на поверхностях планет — Юпитера, Сатурна и в особенности Марса.

Для изучения планет, в частности Марса, П. Лоуэлл в 1894 г. построил специальную обсерваторию в Аризоне на горе Флагстаф (на высоте 2210 *м* над уровнем моря) с благоприятными атмосферными условиями. В 1896 г. там был установлен кларковский 61-сантиметровый рефрактор.

Еще в 1877 г. Д. В. Скиапарелли с небольшим 22-сантиметровым рефрактором Мерца увидел на Марсе «каналы». П. Лоуэлл продолжил изучение поверхности Марса. Визуальные наблюдения этой планеты вели также В. Пикеринг, Е. М. Антониади, Н. Н. Калитин (последний на 76-сантиметровом рефракторе в Пулкове) и другие ученые. Были обнаружены тонкая структура «каналов»,их удвоение и другие особенности.

Данные наблюдения с помощью рефракторов, установленных в горах, правда, уже не в это время, а значительно позднее, в 40-х годах XX в., были проведены астрономической станцией Пик дю Миди (1870 *м* над уровнем моря) в Пиренеях. На этой станции с рефракторами диаметром 38 *см*, а затем 60 *см* занимались наблюдениями Б. Лио, А. Камишель, Дж. Джентили и А.Дольфус[26] и др.

На большой высоте неспокойствие (волнение) земной атмосферы сказывается меньше, и это обстоятельство позволило впервые частично изучить вид дисков (пятна, полосы и т. д.) ярких спутников Юпитера и спутника Сатурна — Титана.

Успехи, достигнутые при наблюдении Марса с относительно малыми рефракторами, и отдельные неудачи — с большими (ликовским и йерксовским, медонским и др.) привели астрономов в XIX в. к ошибочному заключению, будто малые рефракторы с отверстиями 10—20 *см* более благоприятны для визуальных наблюдений. Такое предположение мотивировалось тем, что якобы из-за неоднородностей (порядка 10 *см*) земной атмосферы, обусловленных ее волнением, в объективе малого телескопа появляется только дрожание наблюдаемых светил, тогда как в объективе большого телескопа изображение размывается, так как в объектив сразу попадает свет, прошедший через много неоднородностей, изменяющихся асинхронно. Распространившемуся мнению противоречило то обстоятельство, что тончайшие детали кольца Сатурна, полос Юпитера и т. п. удалось рассмотреть только в большие телескопы.

[26] Путем измерения поляризации в 1950 г. А. Дольфус доказал наличие следов атмосферы у Меркурия.

Выдающимся результатом визуальных астрометрических наблюдений в XIX в. было открытие в Берлине Ф.Кюстнером и исследование американцем С.Чэндлером периодического смещения полюса Земли (изменяемости широт).

Недавно упомянутые результаты изучения Луны и планет превзойдены астрономической станцией Пик дю Миди (наблюдения велись с фотографическим рефрактором) и Пулковской обсерваторией (наблюдения велись с горизонтальным солнечным телескопом).

Большие возможности открылись в астрономии после изобретения фотографии. Фотографические приемники излучения постепенно заменяли человеческий глаз, и в наше время визуальный способ уже редко находит применение при изучении планет и астрометрических наблюдениях. Но и в этих последних случаях все чаще внедряется фотоэлектрический или специальные фотографические методы и методы получения электронных изображений.

Первые фотоснимки с помощью телескопов производились уже в 1851—1871 гг. на примитивных пластинках так называемым мокроколлоидным способом, а еще раньше — методом дагерротипии (на светочувствительной пленке на металле). Но ни тот, ни другой способы не дали сколько-нибудь значительных результатов. Правда, удалось получить очень четкие фотографии Солнца на Медонской обсерватории (П. Ж. Жансен, 1896 г.) благодаря тому, что мокроколлоидные эмульсии имеют очень мелкую зернистость (и гранулистость). В настоящее время более высококачественные снимки сделаны обсерваторией Пик дю Миди при помощи фотографического рефрактора, а также Пулковской обсерваторией при помощи горизонтального солнечного телескопа. Особенно хорошие фотографические изображения Солнца удалось получить А. Дольфусу и М. Шварцшильду, поднявшим телескопы с помощью стратостатов на большую высоту. Ими зарегистрированы, например, очень четкие и очень мелкие (меньше 1″ дуги) гранулы.

В России наиболее ранние астрономические фотоснимки сделаны в обсерватории г. Вильно после установки в ней в 1861 г. фотогелиографа. Здесь систематически фотографировали фотосферу Солнца М. М. Гусев, Е. Е. Саблер, П. М. Смыслов. В Московской и Пулковской обсерваториях несколько позднее опыты по фотографированию звезд, комет и других объектов производили А. А. Белопольский, В. К. Цераский, Б. Гассельберг и др.

Фотографический способ отличался от визуального в первую очередь своей документальностью. Фотографии показывали внешний вид светил и позволяли очень точно изучать их положения и собственные движения.

Развитие фотографии потребовало постройки специальных рефракторов. Такие инструменты, получившие название астрографов, стали изготовлять в Англии Г. Грэбб, во Франции Ф. Готье и братья Поль и Проспер Анри (оптики) и фирма «Репсольд» в Германии. Однако на первом этапе для этой цели приспосабливали существующие визуальные рефракторы несколькими способами: установкой специальных коррекционных линз небольшого диаметра вблизи фокуса, изготовлением сменных линз и другими методами. Иногда изготовляли астрографы с двойными телескопами для визуальных наблюдений и фотосъемки.

Специалисты рассчитали многолинзовые объективы для фотографических камер с большим полем зрения, например объектив Пецваля портретного типа в 1840 г. Он имел две линзы, разделенные большим воздушным промежутком, каждая из них в свою очередь состояла из двух крон-флинтовых линз (положительной и отрицательной). Из объектива этого типа были созданы специальные астрографические объективы, не имеющие оптических ошибок в заданных пределах. Более сложные объективы для астрографических целей — анастигматы имели большие рабочие поля. К числу таких относятся объективы типа Тейлора (триплеты), Тессара (четырехлинзовые), Росса, Зонненфельда и ряд других, которыми располагают ныне многие обсерватории.

В СССР объектив типа Пецваля ($D = 17$ *см*, $F = 0{,}8$ *м*, $A = 1 : 4{,}7$) имелся в Пулковской обсерватории на бредихинском астрографе, объектив типа Росса ($D = 10$ *см*, $F = 0{,}7$ *м*, $A = 1 : 7$)— на двойном астрографе под шифром АКД конструкции Н. Г. Пономарева. На аналогичном двойном астрографе в Голосеево установлены два отечественных объектива типа Тессар — «Индустар-17»[27] ($D = 12$ *см*, $F = 0{,}7$ *м*, $A = 1 : 5{,}8$). Четырехлинзовые объективы типа Зонненфельда имеются на астрографах Крымской, Московской ($D = 40$ *см*, $F = 1{,}6$ *м*, $A = 1 : 4$) и Абастуманской ($D = 20$ *см*, $F = 1$ *м*, $A = 1{:}5$) обсерваторий.

За рубежом во многих обсерваториях наряду с подобными объективами применяются объективы-апохроматы,

[27] В каждой стране объективы имеют свою марку.

имеющие по сравнению с ахроматами уменьшенный вторичный спектр (цветовые ошибки). Их изготовление стало возможным только после разработки и освоения технологии изготовления новых, специальных сортов стекол.

Астрографы с успехом применялись для систематического изучения небесной сферы фотографическим способом, изобретенным в 1839 г. после открытия Л. Дагера. Вскоре, как указано выше, были получены дагерротипы Солнца, солнечных пятен, Луны, звезд. Это были первые опыты практического использования фотографии. Фотоснимки производились на светочувствительной пленке на металле.

На смену дагерротипному способу в 1851 г. пришел мокроколлоидный, который также применялся для фотографирования Солнца, Луны, звезд и т. д. Оба способа не дали обнадеживающих результатов. Последний в 1871 г. был заменен изобретенным Р. Мэддоксом способом фотографии с сухими бромо-желатиновыми пластинками, которые употребляются до настоящего времени.

Первыми астрономами, применившими фотографию, были У. К. Бонд и Д. Ф. Бонд, Г. Дрепер, Л. М. Резерфорд в США, братья Анри во Франции, Варрен Делярю в Англии.

Открытия с астрографами наглядно иллюстрируются результатами изучения малых планет—астероидов, т. е. звездоподобных, или планетоидов (название, предложенное В. Гершелем).

Ученые считают, что астероиды — это обломки планет, которые со временем подвергнутся дальнейшему взаимному дроблению в результате столкновений.

В 1891 г. М. Вольф в Гейдельберге с 15-сантиметровой камерой, имеющей портретный объектив, открыл первую малую планету фотографическим способом. Ее назвали Бруцией (№ 323). В следующем году он открыл уже 18 малых планет, а А. Шарлуа в Ницце — 10. К 1935 г. астрономы занумеровали уже 1375 малых планет. Это весьма значительная цифра, если учесть, что малые планеты получают номер не при их первом обнаружении ученым, а только после того, как будет изучено их движение, указаны их положения и даты следующего появления, необходимые для дальнейшего наблюдения [28].

[28] В настоящее время зарегистрировано около 1700 малых планет с известными орбитами. Из них четыре планеты открыты визуальным способом в 1801—1807гг.; в 1850 г. открыта 13-я, в 1865 г.—84-я, в

В России первая малая планета была открыта Н. М. Ляпиным в 1906 г., работавшим тогда временно в Пулкове. Крупных успехов в открытии новых малых планет достигла Симеизская обсерватория. В ней до 1941 г. было открыто и изучено 113 малых планет (и еще много комет). Большие заслуги в этом принадлежат Г. Н. Неуймину.

Симеизская планета № 748 в честь ее открывателей получила наименование «Симеиза», а планету, открытую С. И. Белявским в 1916 г. (№ 852), в честь В. И. Ленина назвали «Владиленой».

В 1898 г. немецкий астроном Г. Витт в Берлине открыл малую планету (№ 433), которую назвали Эрос (в среднем 10,7 зв. вел., от 6,7 до 11,3 зв. вел.), а австриец Э. Оппольцер в 1901 г. обнаружил колебания его блеска на 1,5 зв. вел., обусловленные вытянутостью тела и неровностью поверхности.

Этот астероид в некоторые моменты подходит к Земле на расстояние 0,15 *а. е.* (22,3 млн. *км*), что благоприятствует определению по нему параллакса Солнца. В 1900—1904 гг. ряд астрономических обсерваторий мира включился в эту работу. Среди них была и Пулковская обсерватория, в которой наблюдения проводили Ф.Ф. Ренц на 76-сантиметровом рефракторе, а В. В. Серафимов и А. П. Соколов — на 38-сантиметровом рефракторе. Обработка собранной информации, выполненная К. Хинксом, дала параллакс Солнца, равный 8″,806 и 8″,807 по визуальным и фотографическим наблюдениям соответственно [29].

Некоторые еще более слабые малые планеты приближаются к земной орбите даже на меньшее расстояние и иног-

1875 г.—157-я, 1885 г.— 253-я, и в 1890 г.—302-я планета. Все эти открытия сделаны также визуальным способом. Затем последовали новые многочисленные открытия, но в основном фотографическим способом.

[29] На международной конференции директоров национальных эфемерид 1896 г. в Париже по многочисленным и разнообразным наблюдениям было принято для геоцентрического параллакса Солнца 8″,80, что дает 1 *а.е.*=150 млн. *км*. В дальнейшем наблюдательный материал накапливался (многое дали современные радиолокационные наблюдения Меркурия, Венеры и Марса в СССР и США). В августе 1964 г. на 12-ой Генеральной Ассамблее Международного астрономического союза в Гамбурге с учетом всего материала и в целях согласования различных фундаментальных постоянных между собой было принято для параллакса Солнца 8″,794 и для 1 *ае* = =146,6 млн. *км* (среднее расстояние Земли от Солнца — астрономическая единица. См.: К. А. Куликов. Система астрономических постоянных.— «Астрономический журнал», т. 42, 1965, стр. 666).

да входят внутрь ее (внутрь орбиты Венеры). Например, открытый в 1932 г. Амур (№ 1221) в перигелии своей орбиты находился на расстоянии 15,5 млн. *км* от Земли, а еще не занумерованный Гермес (в Международном астрономическом каталоге в этом случае указывают год открытия и две буквы: 1937, UB) 30 октября 1937 г. прошел от Земли на расстоянии всего лишь 0,58 млн. *км*, т. е. только в 1,5 раза дальше Луны.

Слабые малые планеты в сравнении с другими планетами имеют незначительные размеры. Например, Адонис яркостью 18,5 зв. вел. (1936, CA) имеет поперечник всего лишь около 0,8 *км*. 7 февраля 1936, г. он прошел на расстоянии 2 млн. *км* от Земли. Интересно отметить, что Адонис и Гермес настолько ослабли, удаляясь от Земли, что вообще были потеряны астрономами. Попытка найти Адонис с помощью мощного 2,5-метрового телескопа была предпринята обсерваторией Маунт-Вилсон (Р. С. Ричардсон, 1943 г.), однако она не увенчалась успехом. Возможно, что в дальнейшем Адонис и Гермес при повторном приближении к нашей планете будут найдены, но их могут принять за новые малые планеты, и тогда они получат какие-либо новые названия. Теоретические расчеты показывают, что в принципе с современными мощными телескопами можно найти до 75 тыс. малых планет-астероидов (до 20-й фотографической зв. вел.).

В. Бааде 26 июня 1949 г., работая с телескопом диаметром 1,22 *м* системы Шмидта на обсерватории Паломар, фотографическим способом открыл новый интересный астероид (№ 1566), названный Икаром. Он располагался тогда в созвездии Скорпиона и передвигался за час на $^1/_{10}$ диаметра Луны. Затем движение его замедлилось. Американский ученый С. Херрик провел всестороннее исследование Икара. Он установил, что его диаметр равен около 1,5 *км*, а период обращения, составляющий 409 суток, соизмерим с годичным периодом Земли в 365,25 суток. Несложный расчет показывает ($409 \times 17 = 6953$ и $365{,}25 \times 19 = 6940$), что Икар будет сближаться с Землей через каждые 19 лет. Например, 15 июня 1968 г. Икар приблизится к Земле на расстояние 7,0—7,6 млн. *км* (возможная ошибка не более 1 млн. *км*)[30]. Яркость его будет все же очень слабой, около 13 зв.

---

[30] Г. А. Чеботарев. Из мирового координационного центра

вел., направление движения — почти перпендикулярным земной орбите, а скорость относительно Земли — равной 43 *км/сек*. Астрономы возлагают много надежд на наблюдение этого интересного объекта как с Земли, так и из Космоса [31]. В зарубежной печати в связи со сближением Икара с Землей публикуется много необоснованной фантастики.

Для многих малых планет определены углы фаз (угол между направлениями от планеты к центру Солнца и к наблюдателю) и их коэффициенты, т. е. изменение звездной величины на 1° угла фазы. Для Цереры, например, получено значение 0,043, Паллады — 0,038, Юноны — 0,030, Весты — 0,030. Колебание блеска, наблюдавшееся у Эроса, обнаружено и у других планет.

Если первоначально для открытия малых планет употреблялись сравнительно небольшие камеры диаметром от 12 до 25 *см*, то позднее для этих целей стали применять более сильные 40-сантиметровые астрографы. Как и прежде, производились также и непосредственные визуальные микрометрические измерения.

Фотография широко применялась также для изучения поверхностей планет, особенно Марса, первый снимок которого через рефрактор сделал в 1879 г. Б. А. Гульд в Кордобе (Аргентина). Г. А. Тихов получил блестящие фотографии Марса в оппозицию в 1909 г. через светофильтр на 76-сантиметровом пулковском рефракторе. Ученые астрономы систематически фотографировали Марс и в наше время: в СССР — Н. П. Барабашов с сотрудниками Харьковской обсерватории, а за рубежом — А. Камишель и А. Дольфус на станции Пик дю Миди, последователи П. Лоуэлла К. Лампланд, Е. и В. Слейферы во Флагстафе, В. Райт (после 1924 г.) в Ликской обсерватории. В итоге многочисленных наблюдений ученые обнаружили:

1) уменьшение контрастов деталей к краю планеты, что говорит о наличии у нее атмосферы;

2) сезонные изменения участков поверхности Марса, временами выпадение снега, его таяние, пылевые бури и т. п.

3) систематические изменения диаметра в зависимости

по теоретическим работам и публикации данных о положении и датах малых планет в Институте теоретической астрономии АН СССР.—«Земля и Вселенная», 1966, т. 5, стр. 30.

[31] В. А. Бронштэн. Свидание с Икаром.— «Земля и Вселенная», т. 5, 1966, гр. 2 .

от цвета лучей, использованных при фотографировании (диаметр увеличивается в синих и уменьшается в красных лучах, что обусловлено как атмосферой Марса, так и фотографическими явлениями в эмульсии);

4) отражательные свойства «материков», имеющих светло-оранжевый цвет, и «морей» — темных частей поверхности, которые при фотографировании через большие телескопы показывают мозаичную структуру;

5) тонкую структуру каналов, в виде отдельных образований, при хороших изображениях в телескопы с большим объективом, наблюдаемую более четко в моменты потемнения морей; совсем недавно фотографированием из Космоса (с межпланетного корабля) на поверхности Марса обнаружены образования, по виду напоминающие кратеры;

6) полярные шапки, иногда окантованные темной каймой либо ободком в результате таяния снега, и их обоюдное сезонное изменение;

7) отсутствие больших открытых водоемов (согласно расчетам В. Г. Фесенкова). Многие из этих открытий подтверждены наблюдениями с рефлекторами.

Крупных успехов при фотографировании неба достигли М. Вольф и Э. Барнард. Первый из них открыл в 1891 г. туманность, напоминающую по очертанию североамериканский материк и названную поэтому «Северная Америка». Им же выявлены ряд темных туманностей, отражательная туманность, окутывающая звезды в Плеядах, и около 5000 туманных ядер — размытых объектов, оказавшихся, как выяснено позднее, внегалактическими туманностями спиралевидной, эллиптической и иррегулярной формы, расположенными очень далеко.

Э. Барнард сфотографировал Млечный Путь и составил атлас темных туманностей, на которые при визуальных наблюдениях в Риме еще в 1877 г. обратил внимание А. Секки. Фотографическим способом Э. Барнард обнаружил пятого спутника Юпитера яркостью 14,0 зв. вел., который расположен гораздо ближе к планете, чем остальные семь, и поэтому обращается вокруг нее за 12 *час* [32].

Усилиями ученых многих стран с помощью фотографии измерены точные положения слабых звезд на небе, составлены «Карты неба» и проведен ряд других фундаменталь-

[32] Как и везде, блеск спутников указан для среднего противостояния.

ных коллективных работ. Все эти достижения в XIX—XX вв. шли параллельно—путем астрономических наблюдений при помощи рефракторов и рефлекторов, и поэтому их трудно разграничить.

В заключение отметим, что многие линзовые телескопы-рефракторы были улучшены путем замены или добавления оптики. У. Пиацци-Смит в 1874 г. первым улучшил упомянутый выше портретный объектив Пецваля, устранив его ошибку — кривизну поля тем, что поставил перед фокальной плоскостью рассеивающую линзу. Это был фактически первый однолинзовый анастигмат — объектив со всеми исправленными ошибками (введенная линза не влияет на остальные ошибки — аберрации), специальные многолинзовые анастигматы были изобретены только в 1891 г.

В дальнейшем к существующей оптике добавлялись разнообразные системы. В одних употреблялись афокальные (не меняющие фокуса) ахроматические линзы-компенсаторы в сходящемся пучке (рефракторы Пулкова, Лика и Йеркса диаметром соответственно 76, 91 и 102 *см*), в других — сменные линзы, в частности, для изменения области ахроматизации, в третьих — увеличительные или уменьшительные камеры.

В 1956 г. А. Мейнел разработал уменьшительную камеру для йеркского рефрактора $D = 1{,}02$ *м*. Она состоит из линзы поля, коллиматорной линзы (что позволяет установить ИПФ[33] и другие элементы, требующие параллельных пучков малого сечения) и камерной линзы. В комбинации с йерксовским рефрактором $F/18$ получается комбинация $F_e/3$ (с полем 30′), т. е. короткофокусная, и диск дрожания, обусловленный волнением земной атмосферы, в линейной мере уменьшается. Употребление этой камеры дает высококачественные фотографии туманностей.

Выигрыш этой комбинации при выдержке 1 *мин* составляет 2,3 зв.вел., при выдержке 30 *мин*—4 зв. вел., но, естественно, при меньшем масштабе снимка. При увеличении фотографий для сравнения делали уравнивание масштабов при $F/18$ и $F_e/3$. Камера испытывалась и в кассегреновском фокусе Макдональдского рефлектора $D = 2{,}08$ *м*, что дает $F_e/2$, где также показала замечательные результаты.

[33] Интерференционно-поляризационный фильтр для очень узкого участка спектра. Через F мы обозначаем оригинальные фокусные расстояния объектива или зеркала, а через F_e — эффективные (после добавления какой-либо оптики).

Несмотря на крупные успехи астрономии, достигнутые путем визуальных наблюдений, фотографирования с помощью рефракторов и астрографов, несмотря на постоянное усовершенствование этих приборов, ученым не удалось полностью устранить существенный их недостаток — хроматизм, т. е. окрашивание изображений. Даже при современной технологии изготовления стекол происходит окрашивание наблюдаемых объектов. Поэтому во второй половине XIX в. астрономы снова вспомнили о рефлекторах.

К этому времени стал известен способ наружного серебрения стеклянных зеркал, разработанный Ю. Либихом, и можно было отказаться от малопригодных металлических зеркал. Серебряная пленка, так называемый фильм, наносилась на стеклянное зеркало путем действия виноградного сахара на соли азотнокислого серебра. Метод Либиха применил не сам автор, а немецкий физик К. Штейнгейль, освоивший в 1856 г. технологию нанесения на стекло тонких серебряных фильмов. Независимо от него этим же способом изготавливал зеркала французский физик Л. Фуко.

Штейнгейль изготовил в 1856 г. параболический рефлектор $D = 10\,см$, $F = 2{,}44\,м$, $\gamma = 100^{\times}$ (т. е. 10 единиц на 1 *см* отверстия, как обозначали увеличение прежде). Постепенно он увеличил диаметр зеркал до 30 *см*. В это же время Фуко изготовил параболический рефлектор с $D = 15\,см$ (позднее, в 1873 г., с $D = 80\,см$) $\gamma = 300^{\times}$, который парижский механик М. Секретан собрал на деревянной вилочной установке (рис. 10). Таким же способом Ф. Эйхен собрал 33-сантиметровый рефлектор по ньютоновской схеме (на деревянной вилочной монтировке), а также большой рефлектор ($D = 80\,см$, $F = 4{,}5\,м$), стеклянный диск которого изготовила фирма в г. Сен-Гобен (Франция) — основной поставщик стеклянных блоков до 1914 г. Последний телескоп Ж. Шакорнак употреблял для наблюдения планет в Париже, затем в Лионе и, наконец, с 1864 г. в Марселе.

В 1878 г., развивая идеи Фуко, в Париже построили большой современного типа параболический рефлектор на английской монтировке ($D = 1{,}22\,м$, $F = 7{,}2\,м$). Оптические устройства для него изготовил А. Мартин, а конструкцию разработали Ф. Эйхен и Ф. Готье. Это был крупнейший телескоп в Европе, однако наблюдения с ним по неиз-

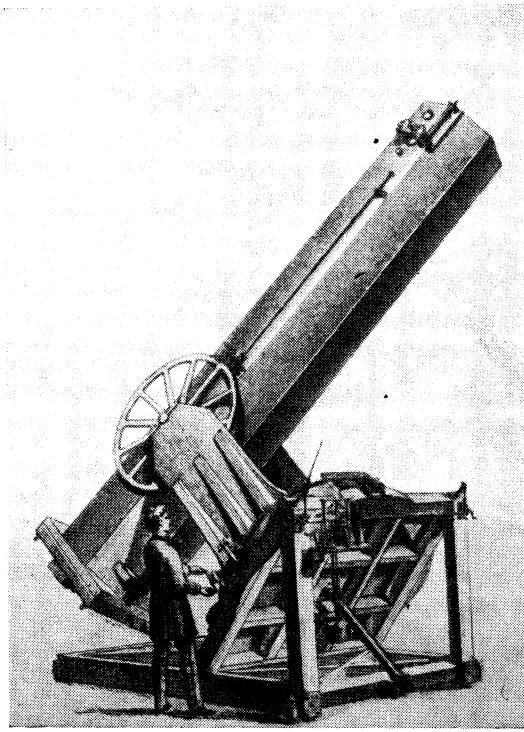


Рис. 10. Один из первых деревянных телескопов — рефлектор Л. Фуко

вестной причине оказались малоэффективными. В недавнее время зеркало этого телескопа было отлично перешлифовано А.Кудером для фокусного расстояния 6,5 *м*, а фирма Секретана заново смонтировала прибор. Его установили в Сен-Мишеле на высоте 580 *м* над уровнем моря, и теперь он дает исключительно хорошие результаты.

Крупный горизонтальный французский зеркальный телескоп демонстрировался на Парижской выставке 1900 г. как техническая новинка. Сделан он был несколько раньше этого времени.

Рефлекторы XIX в. имели стеклянные зеркала с серебряными пленками, или фильмами. Их достоинства связаны

(исследованиями Л. Фуко, который разработал расчетным способом удобный «теневой метод» определения качества поверхности и фигуры зеркал, предложенный еще раньше, в 1779 г., Дж. Рамсденом. Именно отсутствием подобного метода объясняются невысокие качества бронзовых зеркал-рефлекторов XVIII—XIX вв. Фотография зеркала, сделанная этим методом, называется «фокограммой».

Стеклянные зеркала со свежим серебряным фильмом отражали не 60% упавшего света, как бронзовые, а 90—95% и являлись, таким образом, более светосильными при том же поперечнике. Хроматизм у зеркал вообще отсутствует. Однако в сравнении с рефракторами они имели и свои недостатки. Одним из них у параболических рефлекторов, особенно с большой светосилой, являлось малое рабочее поле, равное нескольким минутам дуги. Однако для увеличения поля перед фокусом можно поставить двухкомпонентные афокальные линзы, например Росса или Максутова, практически не изменяющие фокусные расстояния зеркала, или даже какую-либо другую оптическую систему. Второй недостаток рефлекторов заключался в большей чувствительности их к децентрировке. Поэтому для астрометрических целей более пригодным оставался рефрактор. Третий недостаток рефлекторов XIX—XX вв.,— наличие относительно большого рассеянного света, обусловленного зернистостью серебряного или како-либо другого фильма. Четвертый недостаток заключался в сильной дефокусировке зеркала при изменении температуры. Но зато через рефлектор можно было фотографировать объекты в ультрафиолетовых лучах, что недоступно для рефрактора.

В те же годы, т. е. в последней четверти XIX в., над созданием рефлекторов со стеклянными зеркалами, покрытыми серебряными фильмами, много трудился А. Коммон, английский инженер, большой любитель астрономии. Ему помогал механик Г. Кальвер, изготовлявший в своей мастерской зеркала диаметром до 125 *см* и монтировки для небольших рефлекторов.

Их рефлектор с зеркалом 45 *см* употреблялся для наблюдения планет. В 1879 г. был изготовлен большой рефлектор ($D = 91$ *см*, $F = 6{,}4$ *м*) конструкции Г. Кальвера, вилочную монтировку к которому сделал Г. Грэбб, сын Т. Грэбба [34]. Полярная (часовая) ось телескопа была очень массив-

[34] Позднее Г. Грэбб объединился с Ш. Парсонсом, сыном В. Пар-

ной, противовесом служила ртутная флотация — на южном конце (ось входила в контейнер с ртутью). Главное зеркало исследовалось по методу Фуко из центра кривизны. Прибор предназначался для фотографирования объектов, но часовой механизм, ведущий трубу за светилом, оказался вначале непригодным для этого. Постепенно его усовершенствовали. И тогда на сухих бромо-желатиновых эмульсиях были сделаны фотографии туманности Ориона с заметными волокнами, кометы 1881 г., планет и т. д. Этот успех способствовал разработке в 1891 г. нового проекта телескопа ($D = 150$ *см*, $F = 7{,}8$ *м*) с менее вредной для наблюдателей водяной флотацией, который, однако, не был тогда закончен [35] (рис. 11).

Телескопы с посеребренным 76-сантиметровым зеркалом А. Коммон и Г. Кальвер изготовили для частных обсерваторий Н. Локьера близ Лондона, а также богатого любителя астрономии Э. Кросслея в Галифаксе ($D = 91$ *см*, $F = 5{,}5$ *м*). Последний в 1895 г. подарил свой прибор Ликовской обсерватории, где его подвергли усовершенствованию: вилочную монтировку в 1904 г. заменили на современную английского типа с полой клепаной полярной осью, а зеркало заново перешлифовали у Г. Грэбба.

Здесь телескоп успешно использовали для фотографирования неба, особенно туманностей. В 1904 и 1905 гг. с его помощью К. Перрайн открыл шестой и седьмой спутники Юпитера средней яркостью 14,7 и 17,5 зв. вел. Спустя девять лет С. Никольсон с тем же инструментом обнаружил на фотографии девятый спутник Юпитера 18,0 зв. вел. Приблизительно в это же время П. Мелотт в Гринвичской обсерватории с 76-сантиметровым рефлектором (укрепленным в качестве противовеса на 66-сантиметровом экваториале Томпсона) сфотографировал восьмой спутник Юпитера яркостью 16,5 зв. вел.

Открытие четырех новых слабых спутников, из которых три были недоступны визуальным наблюдениям в самые

сонса (лорда Росса), создав фирму «Грэбб — Парсонс и К°» в Ньюкасле, которая сейчас поставляет телескопы для всего мира. У этой фирмы был приобретен, например, 100-сантиметровый рефлектор для Симеиза.

[35] В 1933 г. зеркало телескопа А. Коммона и Г. Кальвера перешлифовал Д. Фекер. С усовершенствованной монтировкой телескоп передали Гарвардской обсерватории на станцию Блюмфонтейн (Южная Африка).

мощные телескопы, свидетельствовало об эффективности сочетания рефлекторов с посеребренными зеркалами с фотографическим методом исследования.

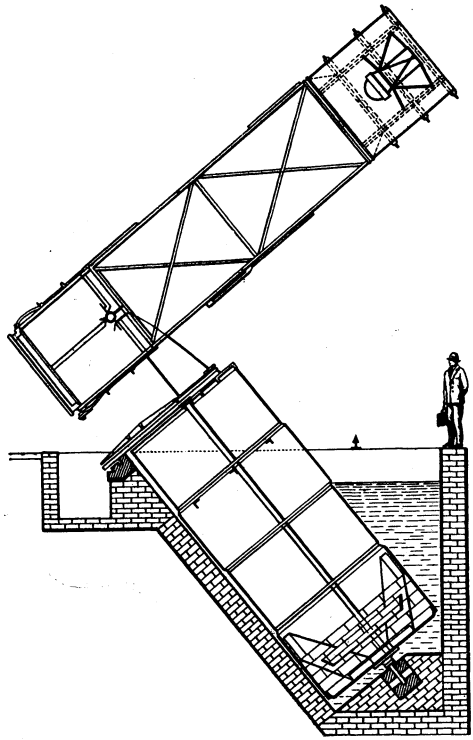


Рис. 11. Проект телескопа А. Коммона с водяной разгрузкой на южном конце полярной оси

Действительно, если глаз с поперечником зрачка 0,4 *см* воспринимает ночью предельные звезды с блеском 6 зв. вел., а поток излучения от звезды пропорционален D^2, то предельные величины блеска звезд для визуальных наблюдений в телескопы диаметрами 10, 100, 500 и 1000 *см* будут соответствовать яркости 12,5, 17,5, 21,0 и 22,5 зв. вел. И это только верхняя граница! Пределом видимости для телескопов конца XIX в. и начала XX в. (наибольший D = = 100 *см*) была яркость ниже 17,5 зв. вел. Поэтому седьмой

и девятый спутники Юпитера удалось открыть только фотографированием.

Первые рефлекторы с серебряными стеклянными зеркалами в отличие от фабричных ахроматических телескопов XIX в. изготовлялись любителями или для любителей. Так, англичанин Г. Дрепер в 1858 г. сделал 39-сантиметровый рефлектор на альтазимутальной монтировке. При увеличении 1900× прибор разрешал двойные звезды γ^2 Андромеды, Сириус, кратную (6-ю) звезду Θ Ориона и др. В 1872 г. Дрепер построил большой, 70-сантиметровый рефлектор.

Д. Брэшир, вначале занимавшийся астрономией тоже как любитель, построил в 1877 г. 30-сантиметровый рефлектор, а позднее строил и бо́льшие. Л. Резерфорд в 1860 г. сделал 28-сантиметровый рефлектор на штативе 33-сантиметрового рефрактора. В. Деларю изготовил рефлектор (D = = 33 *см*, F = 3 *м*), который в 1873 г. установили в Оксфордской обсерватории.

Большие рефракторы были наиболее пригодными в области фотографической астрометрии. В 1903—1904 гг. Ф. Шлезингер в Йерксе с 102-сантиметровым рефрактором определил 26 новых параллаксов звезд с точностью $\pm 0''{,}013$, а до него всеми астрономами с различными инструментами было получено всего 30 параллаксов с точностью до $0''{,}05$.

С именами Г. Дрепера, Л.Резерфорда и другими связаны первые опыты по фотографии неба. Развитие этого метода началось после того, как 16 июля 1850 г. (в ночь открытия крепового кольца Сатурна) Д. Бонд получил первый дагерротипный снимок неба, т. е. звезд. Луну дагерротипным методом впервые сфотографировал американец Д. Дрепер в Нью-Йорке еще раньше, в 1840 г. Им же сделан этим методом и первый снимок спектра Солнца. В 1845 г. Л. Фуко и Л. Физо получили путем дагерротипии фотографию Солнца даже с солнечными пятнами.

Дагерротипный метод, как мы знаем, был вытеснен мокроколлоидным, который в свою очередь сменили сухие бромо-желатиновые фотопластинки.

С именами А. Коммона, Д. Килера, Г. Ричи, И. Робертса, П. Жансена, работавших соответственно с 91-, 91-, 60-, 50- и 100-сантиметровыми рефлекторами со стеклянными посеребренными зеркалами, связана первая истинная фотографическая разведка неба и особенно туманностей всех типов, уточнение их тонкой, волокнистой и спиральной структур.

Успех рефлекторов способствовал их бурному развитию и внедрению в практику наблюдений вплоть до наших дней при постоянном увеличении поперечников зеркал.

Новый толчок это направление получило после 1930 г., когда Д. Стронг в Калифорнийском институте технологии алюминировал зеркала. Алюминиевые фильмы образуют защитные пленки и сохраняют блестящую поверхность очень долго. Кроме того, они хорошо отражают ультрафиолетовые лучи, которые серебряный фильм практически не отражает.

Зеркало упомянутого выше кросслеевского 91-сантиметрового рефлектора было первым в 1936 г. покрыто алюминием, и это значительно увеличило эффективность телескопа.

В настоящее время, по предложению Р. Вилльямса, алюминий наносят на хромовую подложку. Хром лучше алюминия прилипает к стеклу, но плохо отражает свет, алюминий же хорошо прилипает к хрому и хорошо отражает свет. Ведутся работы по изысканию более выгодных, многослойных покрытий с коэффициентом отражения 0,99 и более.

Сами зеркала делают сейчас из высококачественного стекла пирекса (с низким температурным коэффициентом расширения — около 0,0000025 на 1 °С), взамен крона, из которого они делались раньше. В самое последнее время их начали изготовлять из ситала (пирокерама) и других материалов. Новые более выгодные материалы пока еще недостаточно освоены для практического использования в крупной астрооптике. Правда, успешные опыты проведены Д. Д. Максутовым, под руководством которого В.Г. Шрейбер изготовил в Пулкове 70-сантиметровое стальное зеркало.

Основными поставщиками крупных астрономических дисков для рефлекторов сейчас являются: «Корнинг Глас К°» в США (Корнинг, Нью-Йорк; Брадфорд, Пенсильвания), «Грэбб — Парсонс» в Англии (Ньюкасл), народное предприятие «К. Цейс» в ГДР (Иена, завод Шотта), ряд предприятий в СССР и др. Соответствующие монтировки изготовляют фирмы «Фекер», «Варнер — Свазей», «Перкин — Эльмер» (и его отделение «Баллер — Чивенс» на юге), «Вестингауз» и др. в США, «Грэбб — Парсонс» в Англии, народное предприятие «К. Цейсс» в ГДР, ряд предприятий в СССР (ЛОМО и др.) и т.д.

Современному рефлектору диаметром 500 *см* при использовании новейших материалов доступны звезды 24—25 зв.

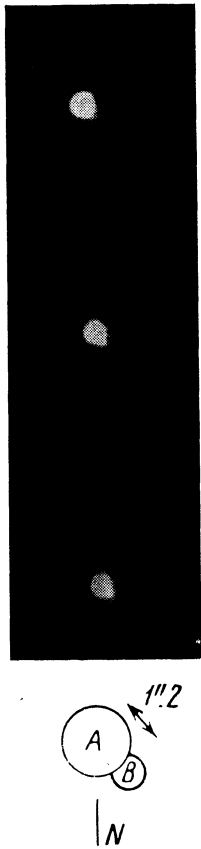


Рис. 12. Фотография двойной звезды Росс 614. На пределе разрешающей силы телескопа удалось заснять две ее компоненты: *A* — яркая и *B* — слабая, со взаимным расстоянием 1″,2 дуги

вел. (на фотопластинке Истмен Кодак IIIa-J), что соответствует освещенности $(7 \div 3) \cdot 10^{-16}$ люкса или около 1 свечи и менее на расстоянии 38 000 *км*.

Много открытий с астрономическими приборами при использовании их для фотографии небесных светил сделано в XX в. Представляет интерес, например, установление двойственности звезды Росс 614 в Единороге. Предположение об этом на основании переменного собственного движения звезды впервые высказано С. Л. Липпинкот при наблюдении в обсерватории Спрул с помощью 61-сантиметрового рефрактора. Но тогда не удалось увидеть разделенные звезды.

В марте 1955 г. В. Бааде на Паломарской обсерватории в течение 3 ночей выжидал удобный случай, чтобы сфотографировать Росс 614 с помощью 500-сантиметрового рефлектора. В первые две ночи видимость была неблагоприятна для наблюдений, впереди оставалась еще одна ночь. Соответствующая ситуация для наблюдения этой звезды вследствие ее орбитального движения могла повториться только через 16 лет. К счастью, третья ночь, 23 марта 1955 г., выдалась хорошей, и ученому удалось обнаружить двойственность звезды Росс 614 (рис. 12) с положением звезды B по предсказанию С. Л. Липпинкот. Это третий случай в истории «астрономии невидимого» после Сириуса и Проциона, когда двойственность звезды, предсказанная ученым, блестяще подтвердилась.

Как и звезда *A*, спутник *B* оказался красным карликом, но более слабым (на 3,5 зв. вел., т. е. $m_B = 14^m,8$). Поскольку параллакс его равен 0″,251, то расстояние $r =$

$= 3{,}98$ *пс* $= 13{,}0$ световых лет, а абсолютная величина (светимость) $M = +16^{m}{,}8$. Таким образом, Росс 614 В оказывается второй слабейшей звездой из пяти (эти звезды имеют следующую светимость: Ван Бисброка $M = +19^{m}{,}3$; Росс 614В $M = +16^{m}{,}8$; Вольф 359 $M = +16^{m}{,}6$; Лойтен 726-8В и 726-8А $M = 16^{m}{,}1$ и $+15^{m}{,}6$ зв. вел. соответственно).

Взаимное расстояние между звездами Росс 614А и Росс 614В равно $1''{,}2$. Поскольку более яркая звезда Росс 614А на паломарских пластинках имеет видимый диск $0''{,}9$, то 500-сантиметровым рефлектором она разрешается на пределе, а на 61-сантиметровом рефракторе, где диск ее виден размером в $7''$, разрешить двойную звезду вообще невозможно. Большая полуось относительной орбиты составляет 3,9 *а. е.*, т. е. система помещается в орбиту Юпитера (полуось 5,2 *а. е.*). Масса звезды А равна 0,14, а звезды В — 0,08 массы Солнца. Величина массы, равная 0,08 солнечной, — почти наименьшая для известных малых звезд. Она в 84 раза больше массы наиболее крупной планеты — Юпитера. Масса спутника «звезды Барнарда» с периодом 24 года, определенным по возмущениям в системе, рекордно мала — 0,0015 массы Солнца [36].

Применение рефлекторов для получения снимков комет было столь успешным, что в значительной мере способствовало дальнейшей разработке теории форм комет. В частности, обобщая свою теорию хвостов комет, Ф. А. Бредихин воспользовался полученными фотонегативами.

Были сфотографированы особенные кометы, например типа Швассмана — Вахмана (является промежуточным объектом между кометой и метеором), Аренда — Роллана с очень длинным выступом вперед, от головы в направлении движения и т. д.

Для построения теории комет большую роль сыграло изучение их спектров. Впервые итальянец Дж. Б. Донати визуально со спектроскопом увидел три полосы излучения ядра кометы Темпеля 1864 г. Аналогичные наблюдения провел В. Хеггинс над кометами, появившимися в 1866, 1867 и 1868 гг. Немного позднее русский ученый Ф. А. Бредихин открыл в спектре ярких комет I и II 1882 г. линии металлов, в частности натрия, обнаруженные затем и другими наблюдателями.

Во время появлений ярких комет 1881 и 1882 гг. были сделаны их фотографии, получены спектры (со щелевыми спектрографами).

---

[36] Vistas in Astronomy, vol. 8, ed. A. Beer a. Aa. Strand, Pergamon Press, Oxford — London, 1965.

В 1907 г. француз Ф. Балдэ, применив фотографическую призменную камеру, получил спектры не только яркого ядра, но и хвоста кометы. В ядре наблюдаются излучения молекул CH и CH_2 (по Ф. Уипплу, это соединение считается замерзшим с вкраплениями метеорной материи), в оболочке кометы — полосы молекул C_2, CH, OH и NH, в хвостах — ионизированные молекулы CO^+, N_2^+. Иногда в спектрах ядер наблюдаются, как указано, линии (D_1, D_2) натрия и очень редко железа, хрома и других металлов.

Новые успехи астрономии принесло фотографирование планет, в частности Марса. Мы уже говорили о фотографировании его с рефрактором Г. А. Тиховым и другими астрономами. Э. Хаббл, наблюдая визуально Марс в рефлектор $D = 150$ *см*, $\gamma = 800^\times$, увидел на диске настолько подробное изображение мелких деталей, что их практически было невозможно нанести на рисунки [37].

Фотографии Марса через рефракторы и рефлекторы внесли много нового в науку. Ценные снимки получили в 1905—1907 гг. П. Лоуэлл с сотрудниками во Флагстафе,

---

[37] Э. Хаббл проводил наблюдения со знаменитым кросслеевским (см.стр. 65,66) 91-сантиметровым рефлектором (F=5,5 *м* = 5,5·10³ *мм*) и микроскопическим объективом $f = 13$ *мм* с увеличением 5×, 4 $\left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{s''} = \frac{1}{f}\right.$, где принято $s' = 15{,}4$ и $s'' = 83{,}0$ *мм*, а увеличение равно $\frac{s''}{s'} = \frac{83{,}0}{15{,}4} = 5\times{,}4$). Оригинальный масштаб кросслеевского рефлектора (число секунд дуги в 1 *мм* в фокальной плоскости) определится из уравнения 1 (*мм*)=5,5·10³ (*мм*)·α (*рад*)= $\frac{5{,}5\cdot 10^3\ (мм)}{2{,}06\cdot 10^5}$ (*сек*/*рад*)· ·α (*сек*)= $\frac{1}{37'',5}$ α″. Отсюда α = 37″,5 в 1 *мм*. С увеличительной камерой масштаб пропорционален $\frac{s'}{s''\cdot F}$ или равен α $\frac{s'}{s''} = \frac{\alpha''}{5\times{,}4} = 6'',95$ в 1 *мм*. На ближайшем расстоянии (противостояния 1924 и 1926 гг.) Марс имел условные диаметры около 25″ и 20″, т. е. его линейные диаметры в фокальной плоскости увеличительной камеры составляли: $\frac{25}{6{,}95} = 3{,}6$ *мм*; $\frac{20}{6{,}95} = 2{,}9$ *мм*. Этого все же мало, и поэтому не удивительно, что «эффект Райта» — зависимость измеренного линейного диаметра Марса от спектральной области наблюдений,— как бы доказывающий наличие атмосферы, сильно рассеивающей ультрафиолетовые лучи, оказался, по В. В. Шаронову, фиктивным. Он обусловлен в основном, по-видимому, влиянием фотографических эффектов и другими ошибками.

Ф. Бааде в Париже (1908 г.), Г. А. Тихов в Пулкове (1909 г.), Н. П. Барабашов в Харькове (1924 г.), В. В. Шаронов и Н. Н. Сытинская в Ташкенте (1939 г.), Б. Лио с сотрудниками на Пик дю Миди, В. Райт в Лике (1924 и 1926 гг.), а также Ф. Росс в США (Йеркс, Маунт-Вилсон). Они подтвердили также визуальные наблюдения: сезонные изменения, наличие зелени, пылевых бурь, вызывающих сильное ухудшение видимости, и т. д.

В последние годы наличие растительности на Марсе было «бесспорно» доказано спектральными наблюдениями, когда в области «морей» Марса В. Синтон обнаружил полосу 3,45 *мк*, характерную для низшей растительности. С другой стороны, В. И. Мороз нашел (1964, 1965 гг.) следы той же и других молекулярных полос в спектре всего диска Марса. Однако в последующем оба автора (1963 и 1967 гг. соответственно) считали наличие полосы поглощения 3,45 *мк* (главная частота колебания радикала, цепочки CH), да и некоторых других полос, еще не окончательно доказанным. Спектральные наблюдения свидетельствовали также о том, что кислород в атмосфере Марса либо отсутствует, либо имеется в ничтожном количестве.

В 1956 г. в Маунт-Вилсоне наблюдения Марса велись через 150- и 250-сантиметровые телескопы (Р. С. Ричардсон) во время сильной пылевой бури, и каналы были видны в небольшом количестве. В. В. Шаронов и А. Дольфус предположили, что пыль относится к лимонитам, т. е. минералам типа $2Fe_2O_3 3H_2O$.

Согласно новейшим данным Н. П. Барабашова и В. И. Гаража (1960 г.), поверхность Марса покрыта пылью (размеры пылинок 0,01—0,1 *мм*). Пылевые облака состоят из еще более мелких частиц, как и «желтая мгла», относительно прозрачная в длинноволновых и непрозрачная в коротковолновых лучах света.

Н. А. Козырев, изучая спектры Марса через 122-сантиметровый рефлектор, сделал попытку объяснить его оранжевую окраску избирательным поглощением света в атмосфере. При этом возникли трудности с объяснением явления, которое наблюдалось не только в центре диска, но и к краю планеты. Г. Койпер, проведя измерения с 208-сантиметровым макдональдским рефлектором, пришел к выводу, что полярные шапки Марса представляют собой воду, замерзшую при температуре ниже 0°, что согласуется с данными Г. А. Тихова.

Много новых и интересных материалов дало изучение и других планет. В частности, Г. А. Тихов наблюдениями с фильтрами на рефракторе $D = 76$ *см* и Г. А. Шайн спектральными наблюдениями на рефлекторе $D = 1{,}02$ *м* обнаружили в 1935 г., что кольцо Сатурна в целом значительно синее диска. Открытие подтвердило гипотезу, согласно которой отдельные части колец состоят из мелких пылевых частиц.

В 1953 г. Н. А. Козырев наблюдал свечение «ночного неба» Венеры с рефлектором $D = 1{,}22$ *м* и заметил излучения молекул N_2^+, N_2, сходные с полярным сиянием. То же частично подтвердил в 1959 г. Г. Ньюкерна (США). При наблюдениях в Крыму Козырев обнаружил неизвестные полосы поглощения 4120 и 4372Å, найденные в последующем и в теллурическом спектре земной атмосферы.

Интересные явления в атмосферах планет можно увидеть при покрытии ими звезд. К. Бом и А. Коде 20 ноября 1952 г., проводя такое наблюдение с рефлектором $D = 1{,}5$ *м* в Маунт-Вилсоне, измеряли в линии К кальция Са II[38] блеск звезды σ Овна, покрывавшейся диском Юпитера. Путем сравнения результатов их наблюдений с теорией был найден закон уменьшения плотности атмосферы Юпитера. Ее средний молекулярный вес 3,3 говорил о смеси в ней водорода и гелия в приблизительном отношении 3 : 1. В. Гершель и И. Шрётер занимались определением времени осевого вращения Юпитера и установили его зависимость от широты, которая оказалась не плавной (А. А. Белопольский, Н. П. Барабашов, Ф. А. Бредихин, О. Лозе в Потсдаме и др.)[39].

Об определении времени вращения кольца Сатурна мы уже упоминали выше, а период осевого вращения Венеры до сих пор точно неизвестен. Вероятно, он составляет около

---

[38] Для уменьшения рассеяния, так как спектр звезд—типа B5, в котором линии К нет.

[39] Материал в области телескопических исследований планет необычайно велик. Поэтому мы отсылаем читателя к следующим изданиям, в которых содержатся необходимые сведения: В. Г. Фесенков. О природе Юпитера. Харьков, 1917; В. В. Шаронов. Природа планет. М., 1958; Н. П. Барабашов. Исследование физических условий на Луне и планетах. Харьков, 1952; Н. И. Кучеров. Новейшие данные о жизни на Марсе. Л., 1959; Г. А. Тихов. Астроботаника. Алма-Ата, 1949; Он же. Астробиология, М., 1953; В. И. Мороз. Физика планет. М., 1967.

247 земных суток (по новейшим радионаблюдениям), и направление осевого вращения Венеры противоположно направлению ее обращения по орбите (см. сноску на стр. 22).

Новейшее изучение спектров планет разъясняло картину химического состава их атмосфер.

А. А. Майкельсон еще в 1890 г. высказал мысль о возможности измерения диаметров удаленных объектов с помощью интерферометров, а затем измерил таким способом диаметры спутников Юпитера.

В 1920 г. на рефлекторе $D = 2{,}5$ *м* был установлен первый четырехзеркальный звездный интерферометр с базисом 6 *м*. Ф. Пиз определил с его помощью диаметры ряда красных звезд: Бетельгейзе 0″,047, Антареса 0″,040, Арктура 0″,020 и др. Был построен рефлектор $D = 91$ *см* с базисом интерферометра 15 *м*. В Пулкове, по идее В. П. Линника, также соорудили большой звездный интерферометр для измерения кратных звезд.

Особый интерес представляло телескопическое открытие Плутона, наличие которого теоретически предсказали П. Лоуелл в 1905 г. и повторно В. Пикеринг в 1919 г. Многие ученые пытались найти Плутона, ведя систематические наблюдения в астрономические приборы. Это открытие выпало в 1930 г. на долю К.Томбо. Он обнаружил планету около звезды дельта Близнецов на негативе, полученном с 33-сантиметровым объективом-триплетом на фотографическом рефракторе Д. Меткафа во Флагстафе (фокусное расстояние 1,68 *м*,масштаб снимков 30 *мм* на 1°).Для контроля на приборе был смонтирован 12,5-сантиметровый рефрактор Брэшира. Плутон, как оказалось, имеет яркость 15 зв. вел., небольшую массу, сильно вытянутую и наклоненную орбиту. Его мог бы еще в 1919 г. обнаружить М. Юмасон с маунт-вилсоновским рефлектором. По случайности на одной из его пластинок в том месте, где находилось изображение Плутона, был дефект, а на другой пластинке изображение планеты слилось со звездным изображением.

В 1950 г. Г. Койпер измерил диаметр Плутона визуальным способом в телескоп $D = 5$ *м*. Блеск планеты по фотоэлектрическим измерениям в средней оппозиции равен $14^m{,}7$ и $15^m{,}4$ соответственно в визуальных и фотографических лучах. Изменение блеска на $\pm$ 0,1 зв. вел. с периодом в 6,39 суток было установлено наблюдениями со 107-сантиметровым рефлектором во Флагстафе (Уолкер, Хорди).

Блестящие результаты в изучении Луны, полученные Г. Ричи и др. с рефракторами и Е. Холденом и др. с рефлекторами, в частности Ликским ($D = 91$ *см*), М. Лёви и П. Пюизё с экваториалом Куде, дали богатый материал для составления атласов, позволивших детально изучить лунную топографию [40]. Много сведений о Луне дали исследования поляризации отраженного ею света (Б. Лио в 1922—1927 гг.на Пик дю Миди и А.В.Марков с сотрудниками в 1955—1960 гг. в Пулкове),а также радиометрические наблюдения Э. Петтита и С. Никольсона в Маунт-Вилсоне в 1927 г. и т. д. Новейшие фотометрические данные В. Г. Фесенкова (1960 г.) говорили о том, что поверхность Луны покрыта крупнозернистым веществом, частицы которого слабо связаны друг с другом и рассеивают упавший на них свет в основном и в обратном направлении, затеняя друг друга.

Исследования Луны путем фотографирования в 1959 г. и позднее видимой и обратной ее сторон с автоматической межпланетной станции СССР и США явились выдающимися событиями в истории астрономии. В настоящее время эти исследования пополнены фотографиями лунной поверхности, переданными на Землю советскими и американскими автоматическими станциями «Луна 9», «Луна 13», «Сервейер-1», совершившими мягкую посадку на Луну.

Мы останавливаемся лишь на отдельных открытиях с помощью астрономических приборов. Увеличение их мощности в последние десятилетия сопровождалось все более

---

[40] Со времени изготовления первой карты Луны в 1647 г. Я. Гевелием, основателем новой науки — селенографии (этим термином он озаглавил свою книгу о Луне, в которую вошли первые детальные карты Луны) , было изготовлено много лунных карт. Известна карта 1651 г. итальянца Дж. Риччиоли. Названия деталей лунной поверхности на картах Я. Гевелия и, в более полной мере, Дж. Риччиоли сохранились в большинстве случаев до настоящего времени. Карта Луны диаметром 0,95 *м* была составлена в 1834 г. немецкими любителями В. Беером и М. И. Медлером. В 1878 г. немецкий астроном И. Шмидт изготовил карту Луны размером 2 *м*. Из фотографических карт следует упомянуть карту французов М. Лёви и П. Пюизё, полученную и репродуцированную в 1898—1908 гг. Эта карта-атлас содержит более 10 000 деталей лунной поверхности. Сейчас она заменяется американским атласом, выполненным под руководством Г. Койпера. В дальнейшем в научный обиход войдут цветные фотографические атласы. Хорошие цветные фотографии уже получены Н. П. Барабашовым в Харькове и рядом зарубежных ученых. В СССР скоро выйдут в свет карты Луны, выполненные под руководством Ю. Н. Липского, И. И. Катяева (цветная) и др.

углубленным проникновением во Вселенную. Астрономы обнаружили неоднородности Метагалактики, неизотропности и качественные отличия в строении скоплений галактик и объектов, из которых они состоят. В частности, это относится к локальному скоплению ближайших галактик — Супергалактике, отличающейся, например, от галактических скоплений в Деве, Волосах Вероники, Персее и др.

Большие работы проводятся с рефракторами. В. Райт, работая с астрографом Ликской обсерватории, определял собственные движения звезд так называемой привязкой к внегалактическим туманностям, т. е. измерением положений звезд относительно практически неподвижных галактик. В 1947—1954 гг. К. Шэн и К. Виртанен в Лике на пластинках 43×43 *см* (шесть квадратных градусов) сфотографировали все северное небо до склонения 23° за 2492 часа выдержки, запечатлев объекты до 18^m зв. вел. Точность измерения положений звезд и туманностей соответственно составила $\pm$ 0″,136 и $\pm$ 0″,15. Они заметили безусловную и сильную тенденцию всех галактик к скучиванию в скопления. При этом отдельные скопления оказываются зачастую качественно и количественно различными.

Аналогичные работы в целях определения координат и собственных движений астрономических объектов ведутся и в обсерваториях других стран. В СССР под руководством А. Н. Дейча уже с 1939 г. Пулковская, Ташкентская, Московская и другие обсерватории определяют положения галактик для создания нового каталога слабых звезд.

Мощные рефлекторы обеспечивали возможность наблюдений далеких объектов — до 24—25 зв. вел. Первым разведчиком внегалактической системы стал Э. Хаббл в Маунт-Вилсоне. Ученый открыл новые пути исследования. Уже в 1929 г., ведя наблюдения с телескопом $D = 2{,}5$ *м* и телескопом со спектрографом, он установил новый закон — линейное соотношение между сдвигом линий в красную сторону в спектрах галактик и их расстоянием, точнее, видимой величиной. Оказалось, что сдвиги линий положительны ($\Delta\lambda > 0$) для всех галактик, за исключением некоторых ближайших, и пропорциональны для разных галактик расстояниям ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim r$). Относительные же сдвиги ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \text{const}$) в спектре данной галактики постоянны ($\Delta\lambda \sim \lambda_0$).

Э. Хаббл достиг в то время при фотографическом методе предельного расстояния наблюдений для своего рефлектора в $2{,}5 \cdot 10^8$ св. лет.$= 7{,}67 \cdot 10^7$ *пс* $= 76{,}7$ *Мпс*. Казалось, это соответствовало скорости «удаления» галактик от Земли в 42 000 *км/сек* при соотношении Э. Хаббла $v = H \cdot r$ между скоростью удаления и расстоянием и $H = 550$ *км/сек/Мпс* $= 1{,}78.10^{-17}$ *сек*$^{-1}$. Полученный так называемый коэффициент экспансии зарубежные астрономы ошибочно связывают с «возрастом мира». Обнаруженное явление было истолковано многими исследователями неправильно, в свете гипотезы расширяющейся (из ничего, из фиктивной точки) Вселенной [41]. Сейчас этот вопрос пересматривается (см. работу И. Д. Новикова в сб. «Сверхзвезды». М., изд-во «Мир», 1965).

Закон линейного соотношения Э. Хаббла имеет важное значение в современной космологии.

Спектральные снимки галактик классов F — G, в среднем типа солнечного, еще ранее были получены Ю. Шейнером и М. Вольфом в Германии, В. Слайфером в Америке (с рефлектором $D = 70$ *см*) и др.

Кардинальное значение для науки имел вопрос о шкале расстояний до галактик. В 1912 г. Г. Левитт по снимкам, полученным с брюсовским телескопом $D = 60$ *см*, $F/5{,}5$ на гарвардской станции «Бойден» в Арекипе (Перу, 1896—1927 гг., позднее переведена в Блюмфонтейн), установила, что долгопериодические цефеиды (переменные звезды с периодом 1—50 суток) Магеллановых облаков показывают монотонное изменение среднего блеска в зависимости

---

[41] В лучшем случае это явление строго применимо к центрам тяжести скоплений галактик, которые в наблюдаемом участке метагалактик расширяются приблизительно однородно и изотропно. Но такие допущения возможны только при условии, если явление «красного смещения» интерпретировать как результат движения. Следует указать, что в СССР, Англии, США и других странах в настоящее время подготавливаются эксперименты, цель которых состоит в наблюдении явления резонансного рассеяния и поглощения гамма-квантов, направленных вертикально вверх, т. е. против силы тяжести Земли. Оказывается, что если при этом измерять частоту с относительной точностью выше 10^{-15} (в этом случае сдвиг линии будет больше ее ширины, т. е. ширины спектральной линии резонансного рассеяния гамма-квантов), то можно экспериментально проверить реальность явления «красного смещения» и тем самым независимо подтвердить одно из основных положений общей теории относительности. См.: В. В. Милле р. С точностью до одной миллиардной. (Лабораторная проверка общей теории относительности).«Природа», 1960, № 7, стр. 7—12.

от изменения их периода. Немного раньше то же самое получил С. Бэйли для короткопериодических цефеид (с периодом меньше 1 суток), открытых в шаровых скоплениях.

Соотношениями между периодом и яркостью цефеид воспользовались Э. Хаббл — для внешних галактик и Х. Шэпли — для шаровых скоплений Галактики и установили соответствующие шкалы расстояний. Естественно, что для этого понадобились нуль-пункты указанных зависимостей, которые были установлены по галактическим цефеидам, имеющим известные параллаксы. По расчетам нуль-пунктов Шэпли общая зависимость абсолютной величины от периода короткопериодических цефеид выражалась абсолютной величиной $0^{m}_{,}0$ (1930 г.), у О. А. Мельникова величина зависимости повышалась на $-0^{m}_{,}5$ (1944 г.), а у В. Бааде на $-1^{m}_{,}5$ (1952 г.). Публиковались и многие другие исследования по этому вопросу. Все они вызвали изменение шкалы расстояний до внешних галактик, в которых только и найдены до сего времени долгопериодические цефеиды, в частности во внешних частях спиральной туманности Андромеды (М31, 1923—24 гг.).

Если принять нуль-пункт В. Бааде, то шкала расстояний увеличивается в два раза и коэффициент экспансии H становится равным 275 *км/сек/Мпс* [42].

После ввода в строй в 1949 г. Паломарского рефлектора большого диаметра ($D = 5$ *м*) появились новые материалы по внегалактическим туманностям, их блеску, цвету и спектрам. К ним прибавились еще результаты наблюдений в Лике. В связи с этим вопрос о шкале расстояний до галактик в 1956 г. обсуждался группой астрономов с участием Н. Мейала, М. Юмасона, А. Сандеджа, Дж. Стеббинса, А. Уитфорда, Э.Петтита. При этом, помимо цефеид, использовались и другие критерии для определения расстояний: средние величины блеска новых и сверхновых звезд, размеры областей газообразного водорода H II и т. д.

Новое значение по дискуссии С. Ван де Берга (1960 г.) для локальной группы нескольких ярких галактик в соседстве с нашей Галактикой дает коэффициент экспансии $H = 120$ *км/сек/Мпс*, и при этом разные методы дают согласные результаты.

---

[42] Трудность этой проблемы заключается в том, что расстояния для галактик местной системы определяются не теми методами, какими для удаленных галактик.

Как отмечалось выше, постоянную Хаббла H зарубежные ученые ошибочно связывают с «возрастом мира». Поскольку, говорят они, наиболее «старые» звезды в составе галактик имеют возраст $14 \cdot 10^9$ лет, то за это время галактики должны уйти на расстояние $14 \cdot 10^9$ св. лет.$= 4{,}3 \cdot 10^9$ *пс* $= 4{,}3 \cdot 10^3$ *Мпс*. Согласно линейному соотношению между скоростью «убегания» галактик и расстоянием, получаем скорость $4{,}3 \cdot 10^3 \cdot H$ *км/сек*. Но по теории относительности эта скорость не может превышать скорость света, равную $3 \cdot 10^5$ *км/сек*. Поэтому получается, что $H = 70$ *км/сек/Мпс* или, с некоторыми поправками, $H = 50$ *км/сек/Мпс* [43]. Но эта цифра не соответствует значению $H = 120$ *км/сек/Мпс*, рассчитанному по наблюдениям. Старое значение $H = 550$ соответствует «возрасту» Вселенной $t_0' = 1{,}8 \cdot 10^9$, а $H = 275$ — возрасту $t_0'' = 3{,}6 \cdot 10^9$ лет. Последний возраст соответствует возрасту минеральной оболочки Земли примерно $\sim 3{,}5 \cdot 10^9$ лет.

Однако подобный расчет явно ошибочен. Он основан на предположении, что Вселенная небесконечна, однородна и изотропна и возникла одновременно из одной фиктивной точки [44].

Совершенно очевидно, что объяснение красного смещения надо искать не в этом направлении. Возможно даже, что известные сейчас сдвиги спектральных линий, наблюдаемые, например, в скоплении Гидры (соответствующие скорости «убегания» до 60 000 *км/сек*), хотя и пропорциональны длине волны в спектре от 0,4 *мк* до 21 *см* (оптический и радиодиапазоны), все же в определенной части не обусловлены наличием скоростей разбегания галактик, точнее, центров тяжести скоплений галактик.

---

[43] Поправка взята в применении к «Модели мира». Поскольку 1 *Мпс* $= 10^6$ *пс* $= 3{,}083 \cdot 10^{19}$ *км*, то $H = 50$ *км/сек/Мпс* $= 1{,}62 \cdot 10^{-18}$ *сек*$^{-1}$.

[44] Мы уже указывали, что сейчас выяснена неоднородность Метагалактики как одно из ее главных свойств. Наблюдается сильная тенденция к скучиванию галактик. В некоторых из них встречаются объекты, качественно отличные от объектов местной системы и Супергалактики, например, в скоплениях Девы, Волос Вероники и др.,— голубые или даже фиолетовые галактики, открытые со шмидтовским телескопом в Мексике Г. Аро в 1956 г. Они имеют цвет звезд типа B9, A5, F8 с большим избытком излучения в ультрафиолетовом спектре. Обычные галактики имеют цвет, характерный для более поздних звезд класса G и др. В 1960 г. в Москве А. А. Ростовская обнаружила по фотографиям со шмид-

А. Сандедж в 1956 г. высказал предположение, что при скоростях около 40 000 *км/сек* линейность соотношения «скорость — расстояние» нарушается. Дисперсия скоростей галактик в скоплениях, несомненно, говорит о принципиальной приближенности «закона красного сдвига линий — красного смещения» [45].

Э. Хаббл, наблюдая галактики, разделил их на три группы: спиральные (иногда с перемычкой по диаметру), эллиптические и иррегулярные. К первому классу относятся туманности в Андромеде и Гончих Псах (с перемычкой — галактика в созвездии Пегаса), ко второму — «спутники» туманности Андромеды и к третьему — Магеллановы облака, большое и малое. Кроме того, он наметил и пути эволюций галактик от эллиптических к спиральным, в том числе имеющим вид пересеченной спирали. Сейчас этот вопрос заново изучен Г. де Вокулером.

Еще в 1885 г. в Дерпте Э. Гартвиг обнаружил в центре туманности Андромеды сверхновую звезду — S Андромеды [46]. Позднее выяснилось, что немногим раньше ее видели

товским телескопом еще много подобных же объектов. Можно предположить, что либо процесс звездообразования идет в них быстрее, чем в членах местной системы Супергалактики, либо же в состав этих галактик входит много газа, дающего в спектре линию 3727Å («запрещенный» переход в кислороде и т. д.).

[45] В настоящее время выяснилась принципиальная невозможность при наблюдениях классическим спектрометрическим методом определять сдвиги линий в спектрах слабых галактик со скоростями выше 60 000 *км/сек*. При фотографировании с большой выдержкой спектр галактик замывается более ярким спектром ночного неба. В преодолении этого затруднения новые перспективы открывает применение специальных электронно-оптических преобразователей (ЭОП) с электрической компенсацией спектра неба или методов узкополосной колориметрии для определения сдвигов по спектральной энергетической кривой удаленных галактик (К. Бем в США и др.). В спектрах квазизвезд QSS сейчас обнаружены относительные сдвиги спектральных линий до $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} > 2$. Однако в этом случае линейная формула Доплера неприменима, а формула теории относительности дает скорость $v < c$.

Для более детального ознакомления с этими вопросами см.: В. А. Амбарцумян. Некоторые вопросы космогонической науки.— «Коммунист», 1959, № 8, стр. 86—96.

[46] Для упорядочения многочисленных типов туманностей и звездных скоплений Дж. Л. Дрейер издал в 1890 г. в Лондоне их каталог на 7840 номеров (перед номером ставятся три латинских буквы NGC). Позднее в 1895 г. вышло дополнение к нему «Индекс каталог» с 1529 объектами (перед номером ставятся две латинские буквы IC и рим-

И. Вард в Белфасте и Л. Гюлли в Руане. В 1926 г. Э. Хаббл «разрешил на звезды» (т. е. увидел раздельно) внешние части галактики в Андромеде при помощи телескопа $D = 250$ *см*, а в 1943 г. с тем же телескопом В. Бааде на пластинках, чувствительных к красным лучам, разрешил на звезды и центральные части туманности. Успеху его работы содействовал темный фон обычно светлого неба, так как в это время в Калифорнии в связи с войной было затемнение. В итоге он пришел к заключению о двух типах (I и II) населения космических объектов во Вселенной.

Отметим, что первое подтверждение спиральной структуры туманности Андромеды получил англичанин И. Робертс фотографическим способом с помощью рефлектора $D = 50$ *см* в 1887 г.

В дальнейшем круг исследований галактик с рефлекторами все более расширялся, причем и нашу Галактику — Млечный Путь — астрономы изучали постоянно и последовательно. Х. Шэпли подробно изучил систему шаровых скоплений, являющихся как бы ее остовом. Были открыты многочисленные газовые туманности — разновидности большой туманности в Орионе, спектр которой в 1864—1865 гг. визуально изучали А. Секки и В. Хеггинс, а впоследствии его неоднократно фотографировали.

Англичанин Д. Хинд обнаружил ряд переменных пылевых туманностей, отражающих свет соседних горячих звезд, например в Тельце, близ нестационарной звезды Т Тельца,— туманность NGC 1555 и наблюдавшуюся О. В. Струве туманность NGC 1554, в Единороге — своеобразную, наподобие головы кометы, туманность NGC 2261 со звездой. Все они интересны тем, что временами возгорались, а иногда совершенно погасали, становясь невидимыми даже в наиболее мощные телескопы.

В 1885 г. братья Анри в Париже на фотографии, полученной на нормальном астрографе, обнаружили, что звезда Майя в Плеядах окружена туманностью. И. Робертс, работавший в Кроуборо с упомянутым выше рефлектором при выдержке 89 *мин* указал на то, что все четыре яркие

ская цифра I, т. е. IC-I). Затем в 1910 г. вышло второе дополненние (IC-II) с 3857 объектами. Всего в этих каталогах занумеровано 13 226 объекта. Уже в наше время появились Симеизский каталог, в котором объекты (туманности) обозначаются через латинскую букву S (Г. Шайн и В. Ф. Газе), Алма-Атинский атлас туманностей (В. Г. Фесенков, Д. С. Рожковский) и многие другие.

звезды в Плеядах — Альциона, Электра, Меропа и Майя — окружены туманностями. В. В. Стратонов нашел в Плеядах в нормальный астрограф Ташкентской обсерватории ряд мелких туманностей. Когда же И. Робертс увеличил выдержку до 3 *час*, то увидел, что все они — лишь части одной большой туманности, сходной с газово-пылевой туманностью Трапеции Ориона.

Сейчас некоторые известные туманности иногда называют кометарными. В СССР их подробно изучал в последние годы В. А. Амбарцумян в Бюракане. Во время вспышек, отражая состояние освещающих их звезд, они как бы посылают в космос световые сигналы. Несколько таких случаев зарегистрировал Г. А. Шайн в Симеизе, увидев туманности (не только кометарные) в соседстве со звездами, меняющими блеск.

Не менее интересны планетарные туманности (например, в Лире), получившие такое название в связи с тем, что по внешнему виду и зелено-голубому цвету они напоминают планеты Уран и Нептун. Таких туманностей известно в настоящее время около 300. Это — газовые туманности-оболочки с центральной звездой. Их спектр в 70-е годы XIX в. наблюдал Ф. А. Бредихин в Москве. В 1927 г. И. Боуен объяснил особенности их спектров наличием кислородных линий, связанных с «запрещенными» переходами в этом атоме. В спектрах планетарных туманностей наблюдаются, кроме того, водородные и другие линии.

Первые фотографии планетарных туманностей сделаны Д. Килером на ликском рефлекторе $D = 91$ *см*, Х. Кертис в 1918 г. предложил классифицировать их. Только мощные телескопы-рефлекторы позволяли во многих случаях фотографировать слабые звездочки в центре планетарных туманностей, например, такие, как в созвездии Лиры, снимки которых в 1892 г. были сделаны обсерваториями Алжира и Ватикана.

К классу переменных туманностей примыкают также туманности, образующиеся вокруг новых и сверхновых звезд вскоре после их вспышки. Такова, например, туманность вокруг Новой Персея 1901 г. и Сверхновой (Крабовидная) в Тельце 1051 г. (возможно 1054 г.). Вокруг Новой Змееносца, открытой Галилеем в 1604 г. и описанной Кеплером, В. Бааде с рефлектором $D = 250$ *см* и узкополосными фильтрами нашел в 1943 г. только клочки газовой туманности, почти рассеявшейся. Обрывки волокон найдены и на месте Новой Кассиопеи 1572 г. и др.

В плоскости Млечного Пути и других местах есть много туманностей совсем темных, иногда полностью экранирующих звезды, расположенные за ними. Это — пылевые туманности. Одна из них большого размера названа мореплавателями «Угольный мешок», находится в созвездии Южного Креста. На нашем северном небе такая туманность есть в созвездии Лебедя близ звезды Денеб. В этом месте Млечный Путь как бы раздваивается и образует вилку. Одна ее ветвь, более слабая, идет через созвездия Лиры — Змееносца, а вторая — через созвездие Стрельца, и обе ветви соединяются только через 120° в созвездиях Кентавра и Южного Креста.

Исследуя в XIX в. фотографии Ликской обсерватории, В. Рейнард объяснил эти и более мелкие туманности действием пылевой среды. Дальнейшему их изучению и описанию мы обязаны в первую очередь Э. Барнарду и М. Вольфу, получившим фотографии пылевых туманностей с помощью широкоугольных объективов типа портретных. Э. Барнард работал с дублетом Вайларда $D = 15$ *см* в Лике и затем в Йерксе с камерами брюсовского телескопа $D = 25$ *см* и $D = 15$ *см* и сделал снимки 182 темных туманностей[47]. При фотографировании с длиннофокусными рефракторами и рефлекторами с малыми рабочими полями их изображение можно было получить очень редко и всегда менее отчетливо. М. Вольф исследовал эти же объекты в 1891 г. в Гейдельберге также с портретным объективом двойного астрографа $D = 15$ *см*. Оба ученых выдвинули много доказательств, подтверждающих, что это именно темные пылевые туманности, а не прогалины или «коридоры» между звездами.

В 1920 г. и в последующие годы И. Гаген, работая с визуальным рефрактором ватиканской обсерватории Кастель Гандольфо, обнаружил туманности другого типа, слабые и занимающие большие участки неба. Но их существование до сего времени еще не подтверждено, несмотря на длительное обсуждение этого вопроса в 1920—35 гг. Впервые их заметил в рефлектор, по-видимому, В. Гершель в 1818 г.

М. Вольф позднее применил в Гейдельберге двойной брюссовский астрограф $D = 40$ *см* с полем $6° \times 7°$ и вместе с австрийцем И. Пализой издал 220 карт неба со звездами

[47] Э. Барнард издал «Атлас избранных областей Млечного Пути» (Вашингтон, 1927). Наблюдения Южного неба были дополнены Г. Весселем в Сиднее в 1890 г.

до 16 зв. вел. После него обширный атлас северного Млечного Пути издали Ф. Росс и М. Кальверт (Чикаго), снятый с 12,5-сантиметровым четырехлинзовым объективом Росса в Маунт-Вилсоне и Флагстафе. Недавно, в 1952 г., появился «Атлас Южного неба» Ф. Хейдена, Л. Мак Хуга и В. Роберта, снятый в Бокайюве (Бразилия) с тем же объективом Росса.

Среди туманностей северного неба на общем фоне Млечного Пути выделяются туманности в созвездиях Тельца (площадью более 1000 кв. град.), Змееносца, Лошадиной головы в Орионе и др. Зачастую темная туманность граничит со светлой или переходит в нее на фоне некоторых светлых туманностей. Б. Бок и Е. Рейли в 1946 г. обнаружили круглые темные объекты, по-видимому, очень плотные, размерами 1000—100 000 *а. е.* Их назвали глобулами. Некоторые астрономы принимают их за протозвезды.

Важнейшим этапом в изучении Галактики было открытие галактического вращения голландцем Я. Оортом в 1927 г. путем анализа собственных движений и лучевых скоростей звезд. К этому открытию многие астрономы были близки и раньше, в частности М. А. Ковальский в России (1859 г.), однако им еще не хватало необходимого материала. Я. Оорт воспользовался методом полярных диаграмм для изучения движений звезд в Галактике, который широко использовал также голландец Я. Каптейн. Исследования по динамике Галактики шведа Б. Линдблада, Я. Оорта, К. Ф. Огородникова и других астрономов обогатили науку представлениями о морфологических особенностях Галактики, ее размерах, массе, возрасте и т. д.

Осевое вращение было обнаружено также и у внешних галактик. Работы по его изучению велись с рефлекторами диаметрами 250, 150 и 91 *см* при выдержке спектров до 80 *час*. В 1914 г. галактики М31 типа Sb, NGC 4594 типа Sa исследовали М. Вольф и В. Слайфер, а в 1916—1918 гг.— Ф. Пиз. Оказалось, что эллиптические галактики и ядра двух названных галактик вращаются как твердые тела, т. е. скорость их отдельных частей линейно возрастает с удалением от центра. Период вращения ядра М31 в Андромеде определили в 18 млн. лет, а для ядра нашей Галактики — в 12,5 млн. лет.

Исследования Х. Бебкока в 1933 г. в Маунт-Вилсоне изменили это представление: на больших расстояниях от центра туманность уже не вращается как одно целое. На расстоянии 0—4′ от ядра линейная скорость возрастает

линейно до 100 *км/сек*, далее снижается до нуля, затем увеличивается монотонно, но нелинейно и на расстояниях 32′ и 96′,5 составляет соответственно 200 и 375 *км/сек*. Из этих данных получили значение массы М31, равное 100 млрд. масс Солнца. Периферийные части удобно было изучать по газовым туманностям с блестящими линиями. Новые результаты удалось получить благодаря соединению рефлекторов со спектроскопом-спектрографом, что значительно повысило их мощность.

До сего времени, однако, остается загадкой вопрос, как вращаются спирали — раскручиваясь или закручиваясь (вероятнее второе). Спектрографируя галактики, мы, к сожалению, не знаем, какая из двух видимых ветвей находится дальше или ближе от наблюдателя.

В телескопы удалось обнаружить, что звезды О, В высокой светимости располагаются в Галактике определенным образом, по спиралям. Об этом говорили и сдвиги линий межзвездных облаков. Г. Мюнч в 1953 г. нашел, что в долготах Галактики l^{I} от 60° до 140° линии двойные и удовлетворяют формуле галактического вращения Я. Оорта, но на разных расстояниях — 400 и 3000 *пс*. Тот же вывод подтверждался и наблюдениями радиолинии 21 *см*. Так была доказана спиральная структура Галактики.

Для характеристики «населенности» галактик следует добавить, что еще в 1917 г. Ричи и Кертис открыли новые звезды, которые сейчас известны в 12 системах. В 1932 г. Э. Хаббл открыл также шаровые скопления в галактиках.

Ядро Галактики состоит из звезд II типа — красных и желтых гигантов, по Бааде, и сферической составляющей, по терминологии Московской школы. Ветви состоят из звезд I типа (плоской составляющей) — белых сверхгигантов и др.

Мы уже говорили, что В. Я. Струве в 1847 г. обнаружил общее поглощение света в Галактике, а Г. А. Тихов в 1910 г.— избирательное поглощение. Позднее, в 1930 г., эти явления детально исследовал Р. Трумплер по рассеянным скоплениям. В 1949 г. А. А. Калиняк, В. И. Красовский и В. Б. Никонов обнаружили с ЭОП в инфракрасных лучах, как и Д. Стеббинс и А. Уитфорд фотоэлектрическим методом, большое облако в центре Галактики. Как показали исследования Д. Дюфэ и др. во Франции в 1952 г.,оно разрешается на отдельные звезды.

В 1904 г. Г. Гартман, а за ним и другие астрономы нашли

межзвездные линии ряда газов — кальция, натрия, титана, калия и др.

Весьма интересны попытки изучения метагалактического поглощения. Оно очень мало́, и его определение при наблюдениях было затруднено постепенным покраснением галактик по мере их удаленности из-за сдвига энергетической кривой согласно красному смещению. В настоящее время ее красный сдвиг, наоборот, служит сравнительно легким средством определения шкалы расстояний во Вселенной.

Работами Д. Стеббинса и А. Уитфорда в 1948 г. было выявлено, что далекие эллиптические галактики гораздо краснее, чем по соотношению красного смещения (сравнение было сделано с ближайшей эллиптической галактикой М32 — спутником Андромеды). Однако позднее А. Уитфорд уже не нашел избытка цвета. По-видимому, в 1948 г. энергетическая кривая М32 была ошибочна или же эта галактика является аномальной. В противном случае избыток цвета говорил бы о различных во времени стадиях эволюции далеких эллиптических галактик, откуда свет вышел около 1 млрд. лет назад, и ближайших, типа М32, свет от которых вышел в более позднее время, всего около 1 млн. лет назад.

Очень важным результатом астрономических исследований явилось открытие в 1944 г. и позднее Х. Бебкоком в Маунт-Вилсоне на 250-сантиметровом телескопе магнетизма звезд. Долгие годы астрономы считали, что напряженность магнитных полей коррелируется со скоростью осевого вращения звезд. Еще в 1877 г. англичанин В. Абней высказал мысль о возможности определения скорости осевого вращения по уширению профилей спектральных линий в интегральных по диску спектрах звезд [48]. Но эта глубокая идея не была понята в то время. Только в 1929 г. О. Л. Струве удалось приближенно доказать ее. Но вскоре он же и Г. А. Шайн, после того как в 1929—1930 гг. была ими измерена

[48] Один край звезды, ось вращения которой перпендикулярна лучу зрения, приближается к наблюдателю, другой удаляется, а середина диска в направлении на наблюдателя вообще не движется. Спектральные линии от двух краев диска звезд по принципу Доплера — Физо сдвигаются на величину скорости вращения, деленной на скорость света и умноженной на длину волны ($\Delta\lambda = \frac{v}{c}\lambda_0$), в разные стороны. Линия же от центра диска не сдвигается. Промежуточные точки диска дают линии, сдвинутые на величину меньше $\Delta\lambda$, поскольку диск звезды наблюдается интегрально, т. е. все линии в спектре просто расширяются.

скорость осевого вращения звезд по профилям линий поглощения в их спектрах, нашли для нее более полные доказательства.

Ф. Шлезингер в 1909 г. определил скорость вращения путем сдвигов линий двойных звезд при частном затмении, в частности δ Весов.

С тех пор многие астрономы определяли скорость осевого вращения звезд. В последние годы подобные исследования широко проводил А. Слеттебак. Именно эта скорость коррелировалась, как казалось, с магнетизмом звезд. Если общее магнитное поле Солнца достигает величины 1 *э*, а скорость осевого вращения на его экваторе 2 *км/сек*, то у звезд они повышаются в сотни и даже тысячи раз.

У ряда звезд и Солнца в дальнейшем было обнаружено изменение магнитных полей и самой полярности. Это указывало на то, что вращение и магнетизм связаны лишь косвенно.

Используя эту же методику, спектроскописты открыли и исследовали много спектрально-двойных звезд. Вначале изучением их занималась Потсдамская обсерватория, позднее — Викторианская, Йерксовская, Макдональдская, Маунт-Вилсоновская и др. Русские ученые также проявляли к ним интерес: в Пулковской и Симеизской обсерваториях — А. А. Белопольский, Г. А. Шайн, В. А. Альбицкий, О. А. Мельников, в Энгельгардовской — Д. Я. Мартынов и В. А. Крат и др. Было открыто много новых спектрально-двойных звезд, а фотометрия линий в их спектрах позволила установить различия компонент в блеске. Кроме того, исследовались и затменно-переменные звезды: в Гарварде — С. Гапошкиным, З. Копалом, в Казани и Пулкове — Д. Я. Мартыновым, В. А. Кратом, Н.М. Гольдберг, А. Н. Дадаевым, в Ташкенте — И. М. Ищенко, в Крыму и Казани — С. В. Некрасовой, в Ленинграде — В. А. Домбровским и т. д.

Изучение вместе с визуально-двойными звездами спектрально-двойных и затменно-двойных звезд дало материал для установления зависимости между массой и светимостью. Приближенное значение этой зависимости $L \sim \mathfrak{M}^{10/3}$, установленное А. Элдингтоном, в дальнейшем уточняли Г.Н. Рессели, Ш.Е.Мур, П.П.Паренаго,А.Г.Масевич и др.

Крупное открытие с помощью рефлектора со спектрографом сделал в 1940—1942 гг. в Симеизе Г. А. Шайн для звезд классов R и N (С-звезды). Он нашел в их спектре по-

лосы молекул, в которые входят как легкий, так и тяжелый изотопы атомов, в частности C^{12} и C^{13}. При этом относительное обилие $C^{12}/C^{13} = 2 \div 20$ изменяется от звезды к звезде. В то же время теоретическое обилие, подтвержденное лабораторными опытами, $C^{12}/C^{13} = 90 : 1$.

Позднее, в 1947 г., Г. А. Шайн и В. Ф. Газе обнаружили у холодных звезд полосы тяжелой молекулы $C^{13}N^{14}$.

За границей полосы C_2, CN в звездах класса R и N в 1948 г. изучали с рефлекторами и спектрографами П. Мер-



Рис. 13. Темная туманность Конская голова в созвездии Ориона

рилл, Р. Сэнфорд, К. Вурм, Г. Герцберг, Ш. Ференбах и особенно много А. Маккилер. Оказалось, что все звезды класса R разбиваются на 2 группы: а) с отношением $C^{12}/C^{13} \approx \approx 50$ и более и б) с отношением $C^{12}/C^{13} \approx 3$.

Это открытие, как и открытия других изотопов, имеет большое значение для построения теории развития звезд вообще. К нему примыкает открытие П. Мерриллом на маунт-вилсоновском рефлекторе линий технеция в спектрах холодных долгопериодических переменных звезд типа S (R Андромеды, R Близнецов и др.) на участке около 4200 А. Этот элемент (№ 43 в периодической системе Д. И. Менделеева) в 1939 г. был получен искусственным способом, что и объясняет его название. Наиболее устойчивый изотоп технеция имеет короткий (по сравнению с временем жизни звезд) период полураспада — около $9 \cdot 10^5$ лет.

Выше мы говорили об открытии Б. Боком и Е. Рейли в 1946 г. почти шарообразных темных глобул на фоне снимков светлых туманностей. Это сильно уплотненные области, по форме напоминающие круги с поперечником около 1000—100 000 *а. е.* По сравнению с темными туманностями, например Конской головой в Орионе (рис. 13), глобулы (рис. 14) очень малы. Помимо правильных темных глобул, которые многие ученые считают протозвездами (т. е. дозвездными образованиями из холодной пыли и газа), А. Секерей в Радклифовской обсерватории обнаружил темные сгустки неправильной формы.

Значительным достижением телескопических исследований явилось обнаружение туманностей, изменяющих форму и блеск (см. ниже стр. 90). Наибольшее внимание привлекла уже упоминавшаяся выше туманность Д. Хинда [49] около звезды Т Тельца. Другая туманность NGC 2262

---

[49] Переменная кометарная туманность NGC 2261 открыта Ю. Ф. Шмидтом (1861). Затем ее изучали многие, в частности Э. Хаббл (установивший с призменной камерой наличие сильного непрерывного спектра) и В. Слайфер (установивший со щелевым спектрографом линии поглощения и излучения в спектре).

Переменная кометарная туманность NGC 1555, открытая также Д. Хиндом в 1852 г., в течение 38 лет непрерывно (с флуктуациями) уменьшала свою яркость до полного исчезновения. В 1890 г. ее с трудом увидел в большой 36-дюймовый ликовский рефрактор Э. Барнард, но уже в 1897 г. он уверенно рассмотрел туманность в 40-дюймовый йерксовский рефрактор. В последнее время туманность наблюдается в 40″ от переменной звезды Т Тельца.



Рис. 14. Темные глобулы правильной формы в области светлой (эмиссионной) туманности Розетка NGC 2237

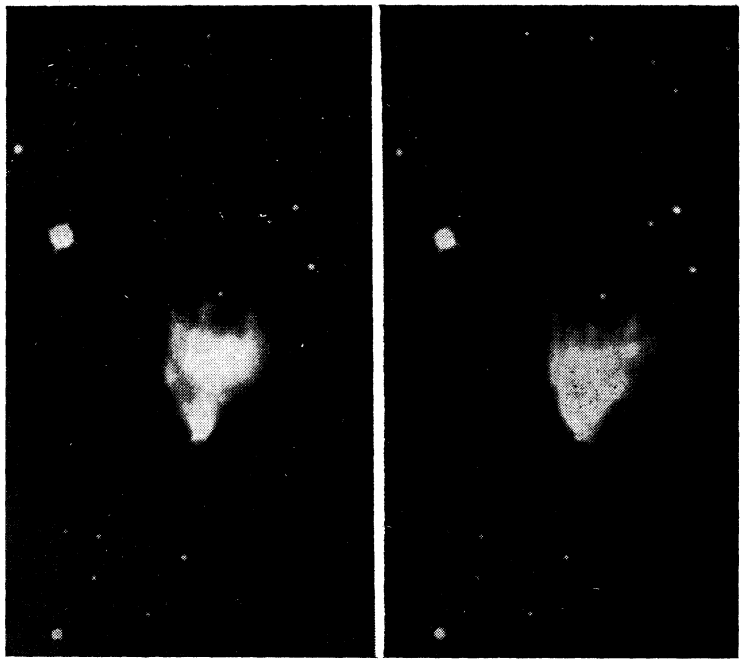


Рис. 15. Переменная кометарная туманность NGC 2261 со звездой R в созвездии Единорога (в голове «кометы»); показаны две фазы ее развития

найдена наблюдениями с маунт-вилсоновским и паломарским инструментами около звезды R Единорога (рис. 15) и относится к тому же типу. Изменение блеска кометарных туманностей со звездой в голове (изменение яркости по площади) происходит со скоростью, близкой к световой, и обусловлено переменностью звезды, дающей вспышки более яркие, чем вспышки на диске Солнца. Другая такая освещаемая туманность — туманность NGC 6729.

Еще следует упомянуть о поляризации света туманностей и звезд. В 1954 г., например, наблюдалась поляризация Крабовидной туманности (В.А. Домбровский, Я.Оорт, Т. Вальравен, В.Бааде, Г.А.Шайн, С.Б.Пикельнер, Р.Н. Ихсанов и др.), предсказанная И.М.Гордоном и В.Л.Гинзбургом и коррелирующаяся с тонкой структурой. В некоторых тонких волокнах (12″—3″ дуги) поляризация достигает, по В.Бааде, 100 процентов. И.С. Шкловский и В. Л. Гинзбург

высказали предположение, что подобная поляризация может возникнуть в результате тормозного излучения релятивистских (быстрых) электронов, движущихся в межзвездных магнитных полях.

Поляризация света далеких звезд обусловлена межзвездной пылевой средой и лишь частично звездным веществом. Она была обнаружена Д. Холлом и В. Хилтнером в 1949 г. в Йеркской обсерватории, а позднее изучалась в Морской Вашингтонской и Макдональдской обсерваториях. Независимо от этих работ поляризация света звезд со степенью поляризации [50] в несколько процентов обнаружена и изучена В. А. Домбровским, который наблюдал ее с телескопом-рефлектором ($D=25$ *см*), имеющим вместо спектрографа короткофокусную линзовую камеру. Колебание электрического вектора световой волны, идущей от звезд, как показывают наблюдения, происходит преимущественно параллельно галактическому экватору, но есть и другие предпочтительные направления. Расчет показал, что межзвездные пылинки, обусловливающие покраснение звезд и поляризацию, должны быть вытянуты в определенном направлении по отношению к экватору Галактики (Г. К. Ван де Холст и др.) [51]. Это, возможно, обусловлено слабыми магнитными полями (Х. Альфвен, 1943 г.) порядка $10^{-4} — 10^{-5}$ *э* [52].

Существенно, что поляризация, которую ранее приписывали атмосферам звезд (В. А. Домбровский и др.), имеет в основном межзвездное происхождение, что доказывается корреляцией P степени поляризации (в процентах) с полным межзвездным или избирательным поглощением [53]

$$E_{B-V} \cong \frac{A_B}{5},$$

---

[50] Степень поляризации частично поляризованного света равна отношению мощности потока излучения поляризованной доли света к полной мощности потока частично поляризованного света (выражается в процентах).

[51] Согласно Р. Койрелу и Е. Шатцману, межзвездные пылинки могут быть тонкими кристалликами графита, часть которых ориентирована магнитным полем.

[52] По Л. Дейвису и Д. Гринстейну (1951) пылинки — межзвездные частички — могут быть льдинками, замерзшими газами даже без ферромагнитных включений, но ориентированными за счет явления парамагнитной релаксации—взаимодействия поля со спином (вращательным моментом) частиц.

[53] Индекс B относится к фотографическим, V — к фотовизуальным, v — к визуальным лучам.

а именно:

$$P = (2 \div 4) \cdot A_B = (10 \div 20) E_{B-V}.$$

Употребляя особый рефлектор из плоских зеркал с целостатом и спектрографом, О. Л. Струве и К. Т. Эльви обнаружили вблизи звезд классов О, В громадные области с эмиссионным блестящим спектром водорода и «запрещенных» линий [OII], [NII], [SII], [OIII] и т. д., которые в 500 и более раз слабее эмиссий в спектре туманности Ориона.

Области ионизированного водорода HII оказалось возможным сфотографировать только с узкополосным фильтром в линии водорода H_α. Исследованием этих областей занимался Б. Стремгрен (1939 г.). За ними следуют области нейтрального водорода HI.

На обычных фотографиях, сделанных в Йерксовской и Макдональдской обсерваториях в 1937 г. и позднее, в этих местах неба туманностей нет вообще.

Подобные области располагаются в ветвях спиралей и наблюдаются во всех спиральных галактиках, в том числе и в нашей.

5. ОТКРЫТИЯ С ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫМИ ТЕЛЕСКОПАМИ В XX в.

В 1930 г. эстонский оптик Б. Шмидт в Гамбургской обсерватории изобрел зеркально-линзовую систему, состоящую из сферического зеркала и пластины, поставленной в центр его кривизны.

Наибольший телескоп такого типа, имеющий диаметр зеркала $D = 1{,}22$ *м*, диаметр пластинки $D = 1{,}83$ *м*, фокусное расстояние 3,05 *м*, поле $6 \times 6°$, работает с 1956 г. очень эффективно в Паломарской обсерватории [54]. Недавно на нем в течение 3,5 лет с фотопластинками 36×36 *см*, специально изогнутыми, проводилась большая работа по составлению фотографического Атласа всего наблюдаемого северного неба до —30° с двумя светофильтрами — крас-

[54] Сейчас тоутенбургский рефлектор (ГДР) имеет также и шмидтовскую комбинацию с $D_1 = 1{,}37$ *м* и $D_2 = 2{,}03$ *м* (для пластины и зеркала соответственно).

ным и синим. При выдержке 10 *мин* с его помощью можно получать в сине-фиолетовых лучах снимки звезд 20^m1 зв. вел. Для съемки всего неба понадобилось около 2 тыс. фотографий, на которых выявились сотни миллионов звезд и десятки миллионов туманностей — галактик, входящих в состав Метагалактики, и других объектов.

Продолжением этой работы на юге занимается ряд астрономических станций:

а) Боуденская станция Гарвардской обсерватории, использующая ADH-телескоп (Армаг — Дансинг — Гарвард) кассегрено-шмидтовской системы с $D_1 = 80$ *см*, $D_2 = 90$ *см*, $D_1/F = 1 : 2{,}6$, поле 4°,5 (D_1 и D_2 для пластины и зеркала);

б) обсерватория Тонанцитля в Мексике, где наблюдения ведутся в шмидтовский телескоп с $D_1 = 66$ *см*, $D_2 = 76$ *см*, $D_1/F = 1 : 3{,}5$.

Параллельно с большим Паломарским телескопом работает сейчас другой шмидтовский телескоп с $D_1 = 45{,}7$ *см*, $D_2 = 66$ *см*, $F = 0{,}9$ *м*, $D_1/F = 1 : 2$, поле 9°,5.

Ф. Цвикки открыл в телескопы этой системы много сверхновых звезд, которые одновременно изучались, но только с другими телескопами В. Бааде, М. Юмасоном и Р. Минковским. Как показали эти наблюдения, кривые блеска звезд — двух типов и спектры их совершенно особенные, свидетельствующие о мощном взрыве. В максимуме блеска они излучают света больше, чем вся галактика в целом, их светимость эквивалентна светимости 10^8—10^9 звезд с яркостью Солнца. Следы гигантских вспышек сверхновых сохранились и в нашей Галактике от 369, 1051 (1054?), 1572 и 1604 гг.

По данным астрономической статистики, подобные явления происходят в конкретной галактике не чаще, чем 1 раз в 500 лет. Однако фактически в нашей Галактике и других только за последние столетия вспыхнуло уже несколько сверхновых и много новых звезд.

Но наиболее важным открытием со шмидтовским телескопом явилось обнаружение Ф. Цвикки в 1952 г. перемычек между удаленными галактиками. На фотографии, полученной с телескопом $D = 5$ *м*, перемычки между двумя туманностями, например типа Sop—IC 3481 (вторая, соседняя безымянная) и типа Sap—IC 3483, не видны, тогда как они хорошо выявляются на фотографии шмидтовского телескопа с $D = 1{,}22$ *м*, в 4 раза меньше в поперечнике (рис. 16).

По-видимому, они состоят из звезд и лишь отчасти газа, пыли. Их удалось сфотографировать благодаря увеличению светосилы последнего телескопа $\left(\frac{D_1}{F}\right)^2 = \left(\frac{1}{2{,}5}\right)^2 = \frac{1}{6{,}25} \approx \frac{1}{6}$

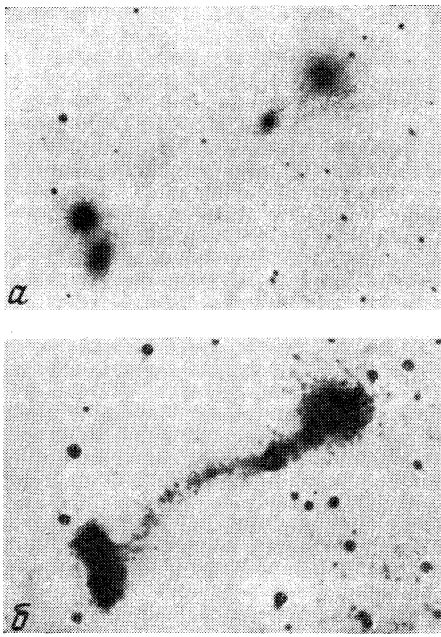


Рис. 16. Фотоснимки внегалактических туманностей IC 3481 (типа Sop—известная, вторая безымянная) и IC 3483 (типа Sap): *а* — получен с паломарским рефлектором ($D = 5$ *м*, $A = 1/3{,}7$); *б* —получен с паломарским зеркально-линзовым шмидтовским телескопом ($D = 1{,}22$ *м*; $F/2{,}5$). Здесь видна перемычка между туманностями, состоящая, по-видимому, из звезд, газа и пыли, отсутствующая на первом снимке, сделанном с менее светосильным телескопом

по сравнению с первым (5*м*) с коррекционной линзой $\left(\frac{D}{F}\right)^2 = (1/3{,}7)^2 = \frac{1}{13{,}65} \approx \frac{1}{14}$ больше чем в 2 раза, что и обеспечило эффективность фотографирования протяженных объектов.

Совсем недавно Б. А. Воронцов-Вельяминов, используя Паломарский атлас, обнаружил множество связей между галактиками в виде перемычек и сделал с него фотографический атлас этих участков в большом масштабе.

В 1941 г. советский оптик Д. Д. Максутов разработал и построил менисковые системы со сферическим зеркалом и вогнутым мениском почти постоянной толщины и нулевой силы вблизи фокуса. Эта конструкция с 1950 г. применяется на Алма-Атинской обсерватории ($D_1 = 50$ *см*, $D_2 = 66$ *см*,

$D_1/F = 1 : 2{,}4$) и с 1955 г.— на Абастуманской ($D_1 = 70$ *см*, $D_2 = 97{,}5$ *см*, $D_1/F = 1 : 3$), где телескоп имеет еще 10-метровый фокус с коррекционной линзой, расчет которого выполнен под руководством Г. Г. Слюсарева.

С первым из упомянутых менисковых телескопов были получены блестящие фотографии, по которым В. Г. Фесенков и Д. А. Рожковский составили атлас туманностей. На рис. 17 показана диффузная туманность в Лебеде, открытая В. Г. Фесенковым. В отдельных ее волокнах видны сгущения, свидетельствующие, по его заключению, о процессе образования звезд.

С помощью второго менискового телескопа, имеющего объективную призму, М. В. Долидзе и ряд других астрономов обнаружили много звезд в основном раннего, но также и позднего типа, с линиями излучения в спектре. Раньше такая же работа была успешно начата Г. Ааро в Тонанцитле на шмидтовском телескопе.

Г. А. Шайн и В. Ф. Газе с успехом применяли в Симеизе оригинальные зеркально-линзовые камеры с $D_1 = 45$ *см*, $D_1/F = 1 : 4$ и $D_1 = 64$ *см*, $D_1/F = 1 : 4$. Используя узкополосные интерференционные фильтры в комбинации с заданными фотоэмульсиями, они получили высококачественные снимки туманностей, например тонковолостной туманности в созвездии Возничего (рис. 18), областей HII Галактики, спиральных галактик. Результаты их исследований использованы для составления Атласа и Каталога туманностей, которые обозначаются в нем символом *S* (Симеиз). Их метод был затем широко использован другими обсерваториями и южными станциями.

Для обзора всего неба по методу узкополосных фильтров Д. Гринстейн и Л. Хеньи рассчитали широкоугольную (до $\approx 140°$) зеркально-линзовую камеру. В ней изображение области неба, полученное в вогнутом зеркале (для метеорологических целей ранее употреблялось выпуклое зеркало, менее выгодное), фотографируется светосильным линзовым объективом, установленным на расстоянии 1 *м* от зеркала.

Хорошо зарекомендовали себя зеркально-линзовые камеры «Супершмидт» Ф. Уиппла и др. Они состоят из сферического зеркала, двух концентрических менисков, обращенных вогнутостями друг к другу, и ахроматизирующей, коррекционной пластины между ними. На сильно искривленной поверхности (особый вид стеклянных дисков под

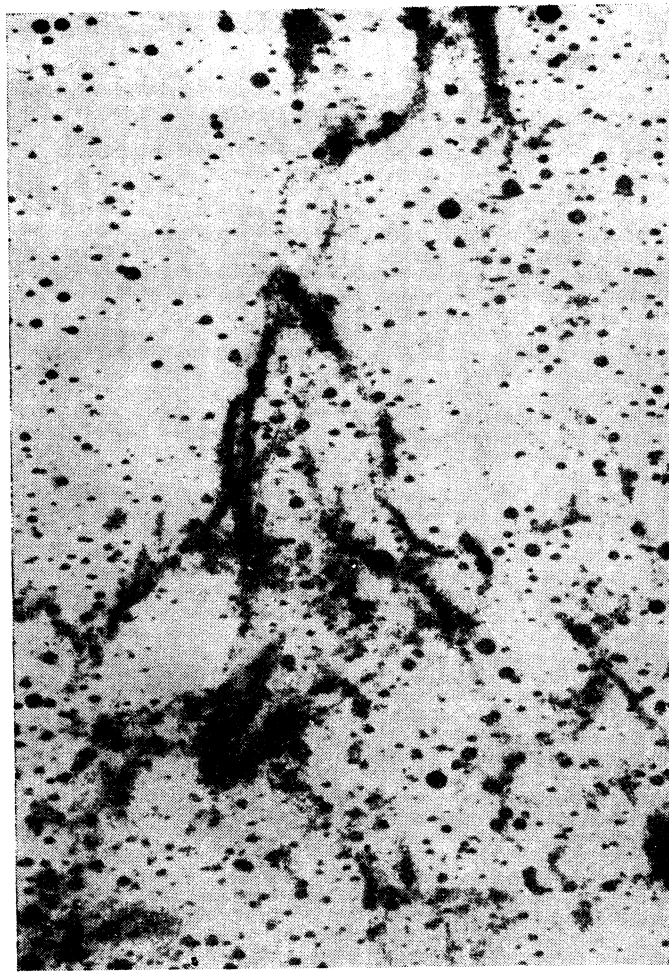


Рис. 17. Диффузно-волокнистая газовая туманность в созвездии Лебедя, полученная с менисковым зеркально-линзовым телескопом Д. Д. Максутова в Алма-Атинской астрофизической обсерватории. Заметны отдельные сгущения, представляющие собой, по-видимому, молодые зарождающиеся звезды

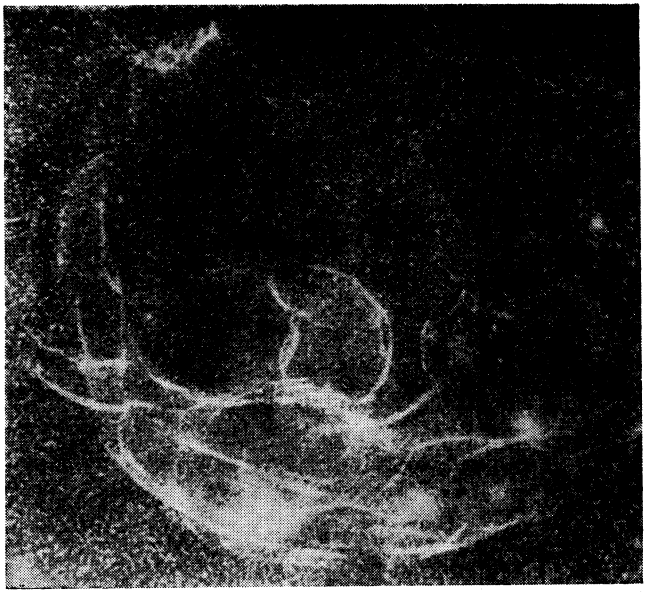


Рис. 18. Тонковолокнистая газовая туманность в созвездии Возничего, полученная с зеркально-линзовым телескопом Крымской астрофизической обсерватории близ Симеиза

эмульсии) с относительным отверстием $D_1/F = 1{:}0{,}67$ получается участок неба в 52—56° и более в поперечнике.

Такие системы установлены в Манчестерском университете на станции Джодрел Бэнк ($D_1 = 43$ *см*, $D_1/F = 1 : 0{,}63$, поле 56°), на метеорных станциях Гарвардской обсерватории ($D_1 = 31$ *см*, $D_1/F = 1 : 0{,}65$, поле 55°) и др. Они наиболее пригодны в метеорной службе. Их видоизменением является система К. Винне 1947 г.

Одно из наиболее современных оптических зеркально-линзовых устройств — система Бекера — Шмидта, имеющаяся, в частности, в Гарвардской обсерватории. Она фактически напоминает усовершенствованную систему Шмидта — Кассегрена, например упоминавшийся телескоп ADH на Бойденской станции Гарварда (пластина Шмидта $D_1 = 80$ *см*, главное зеркало $D_2 = 90$ *см*, $F = 2{,}08$ *м*, $D_1/F = 1 : 2{,}6$, поле плоское 4°,5, вторичное выпуклое зеркало $D_3 = 40$ *см*). При выдержке 1,5 *часа* прибор дает на фотопла-

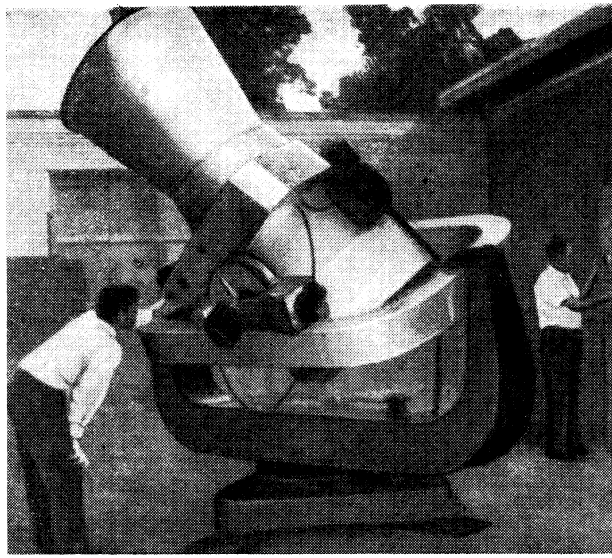


Рис. 19. Специальный зеркально-линзовый телескоп Бекера — Нанна (США) с тремя осями вращения

стинке изображение объектов в 19,3 зв. вел. (наименьший видимый диаметр 0,02 *мм*). Перед пластиной Шмидта установлена объективная призма с углом 2°,5.

Имеются и специальные зеркально-линзовые системы. Одна из них — система А. Зоннефельда — состоит из менискового зеркала типа Манжена со сферическими поверхностями разной кривизны и посеребренной выпуклой задней стороной и ахроматических линз, положительной и отрицательной, перед фокусом. В Одесской обсерватории установлена система ($D = 42{,}5$ *см*, $D/F = 1 : 10$) П. П. Аргунова из сферического зеркала и ахроматической коррекционной линзы перед фокусом с отражением пучка обратно, в отверстие главного зеркала (типа усложненного Кассегрена). В. Н. Чуриловским была рассчитана, а Н. Г. Пономаревым построена система ($D = 50$ *см*) из сферического зеркала и линзового корректора перед прямым (главным) фокусом. В систему Г. Г. Слюсарева входят сферическое зеркало, кассегреновское зеркало и ахроматическая линза, дающие параллельный пучок в отверстие

главного зеркала, фокусируемая система линз с призмой прямого зрения и т. д.[55]

В последние годы специальные системы, к примеру системы Бекера — Нанна (рис. 19)[56], построены для наблюдения за искусственными спутниками Земли и ракетами.

Мы не имеем возможности рассказать о всех открытиях, которые были сделаны с помощью зеркально-линзовых систем. Вместе с другими достижениями астрономии они послужили основанием для важных теоретических обобщений. Так, например, В. А. Амбарцумян на основе этих наблюдений разработал теорию звездных ассоциаций. Г. А. Шайн, Е. Л. Рускол осветили вопросы, связанные с ориентировкой длинных (светлых и темных) волокон туманностей в Галактике вдоль магнитных полей большого масштаба. Именно в этом направлении может двигаться, т. е. удлиняться, ионизированная среда — межзвездная плазма. Согласно данным о плоскостях поляризации света звезд в межзвездном пространстве эти направления почти параллельны плоскости Галактики в Персее, Тельце и других созвездиях.

Интересен следующий факт. На рис. 20 изображены фотографии спиральной галактики NGC 23, полученные с телескопом $D = 5$ *м* еще в 1955 г., но внимательно изученные только в 1958 г. На левом снимке выдержка была получена с паломарским телескопом-рефлектором 23 августа 1955 г. на обычных фотопластинках Кодак 103a-O (относится к голубым лучам), а на правом — через 60 дней, 23 октября 1955 г., на панхроматических фотопластинках 103a-D с фильтром Шотта GG-11 (пропускает красные лучи). На правой фотографии в 10″ севернее и в 10″ восточнее центра NGC 23 (север — вверху, восток — слева) видна звезда (звезда внизу — это проекция галактической), а на левой, полученной через 60 дней, ее нет (А. Сандедж, 1959 г.). По оценке видимая визуальная величина звезды $16^m,0$, а фотографическая интегральная туманности $12^m,5$ (исправленная на галактическое поглощение $0^m,25$ cosec b, где b — галактическая широта), т. е. на $3^m,5$ ярче. Сдвиг линий в спектре NGC 23, исправленный за движение Солнца 300 *км/сек*, дал 4790 *км/сек*.

[55] Зеркально-линзовый объектив этой системы был опытным и не предназначался специально для спектральных работ. В дальнейшем Г. Г. Слюсарев и другие ученые провели специальные исследования по созданию звездных бесщелевых спектрографов.

[56] Эта система описана К. Г. Хейницем. См.: Sky and Telescope, 1956, vol. 16, p. 108.

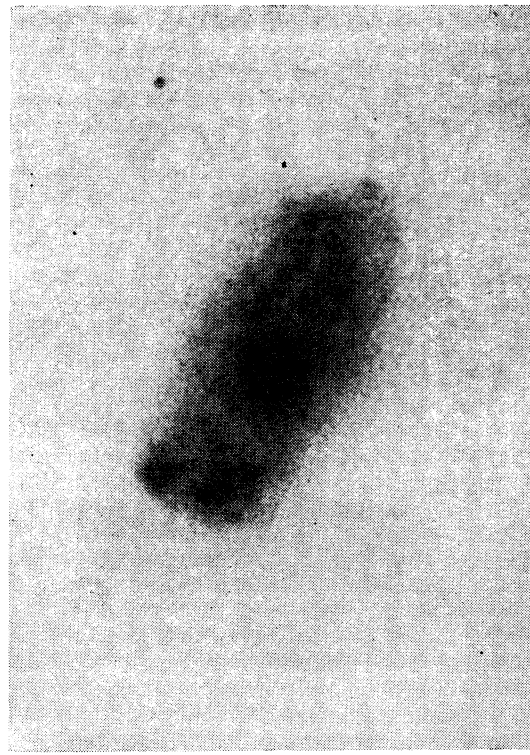
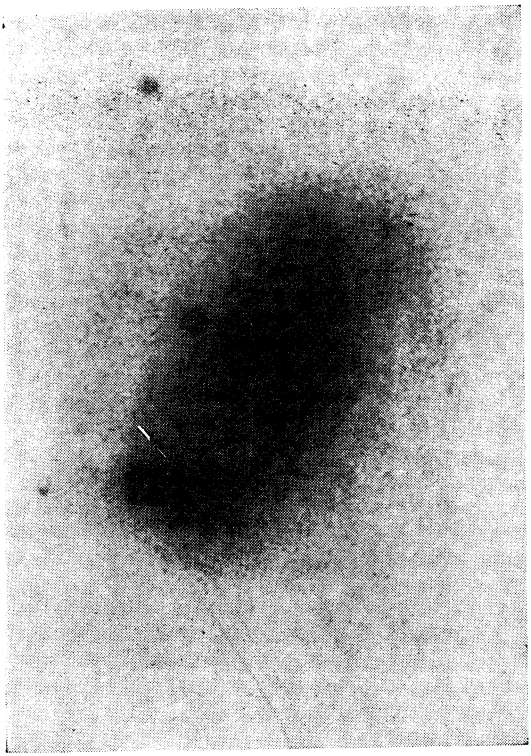


Рис. 20. Фотография Сверхновой звезды в

Если принять постоянную Хаббла $H = 75$ *км/сек/Мпс*, то расстояние галактики NGC 23 будет равно 64 *Мпс* = $= 64 \cdot 10^6$ *пс*. Следовательно, абсолютная светимость туманности $M_B = m_B + 5 - 5 \lg r = -21^M,5$, и поэтому абсолютная светимость звезды $M_з = -21^M,5 + 3,5 = -18^M,0$. Значит, звезда в момент фотографирования была слабее галактики NGC 23, которая содержит, вероятно, миллиарды звезд, только в $10^{0,40\Delta M} = 10^{1,4} = 25$ раз. Это открытие хорошо иллюстрирует силу современных оптических телескопов.

Кульминационным пунктом открытий с оптическими небольшими камерами было фотографирование обратной стороны Луны советской межпланетной автоматической стан-



спиральной туманности NGC 23

цией, запущенной 4 октября 1959 г. Съемка производилась 7 октября 1959 г. с помощью специальных фотоаппаратов, которые вместе со станцией, через датчики лунной и солнечной ориентации, были направлены на Луну. Фотографии были переданы на Землю по команде с помощью телевизионной аппаратуры. Это были исторические снимки Луны (рис. 21).

Последние успехи в этой области широко известны из газет и журналов. Как было указано выше, фотографирование Луны производилось с очень близких расстояний: 1) с падающей на Луну части ракеты (США) и 2) со станции, размещенной на самой поверхности Луны (СССР и позднее США). Несмотря на скромные размеры объективов фотоаппа-

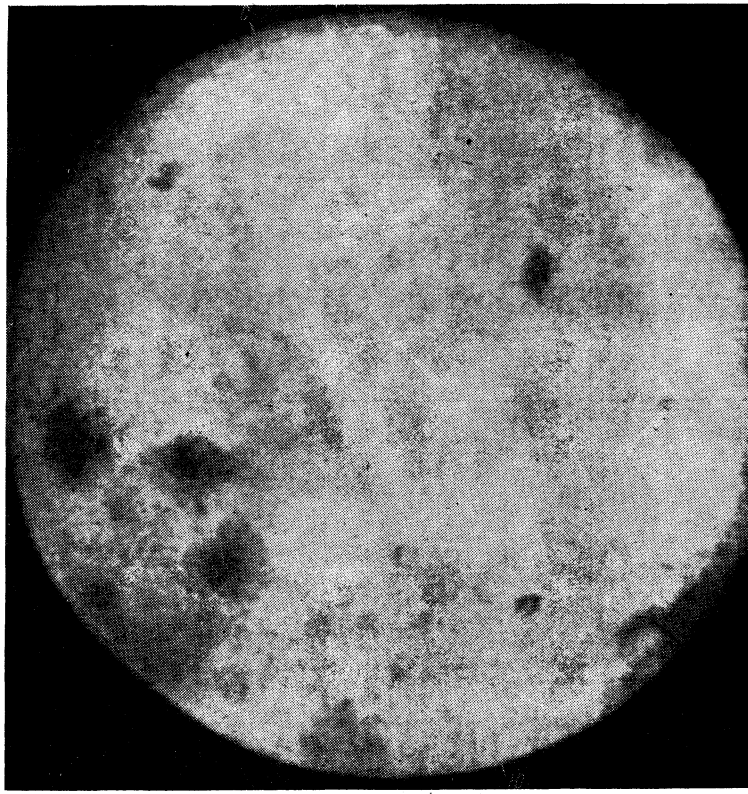


Рис. 21. Первая в истории советская фотография обратной (невидимой с Земли) стороны Луны, полученная 7 октября 1959 г. с борта автоматической межпланетной станции

ратов получены исключительно четкие снимки, с многочисленными мелкими деталями. В самое последнее время эти работы значительно продвинулись как в СССР, так и в США.

6. ДОСТИЖЕНИЯ АСТРОНОМИИ С ПОМОЩЬЮ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

В 1931—1932 гг. американец К. Г. Янский зарегистрировал сигналы по радио, происхождение которых было внеатмосферное, космическое, от отдельных участков неба. В целях изучения этого явления в 1936 г. Г. Ребером был построен в США специальный радиотелескоп. Он имел параболический отражатель диаметром около 950 *см*, облу-

чатель в его фокусе и был настроен на волну 185 *см*. С помощью этого телескопа были получены радиоизофоты яркости Млечного Пути, в общем совпавшие с оптическими изофотами. Радиотелескопия — молодая область астрофизики. Однако ей принадлежат уже очень важные открытия.

1. Обнаружено радиоизлучение Солнца, Луны и некоторых планет. Радиоизлучение Солнца оказалось очень сложным и делится на спокойное и неспокойное и т. д.

2. Выявлены связи между некоторыми дискретными радиоисточниками и оптическими образованиями:

а) наиболее интенсивный источник Кассиопея-А связан со слабой туманностью (остаток сверхновой) спирали Персея в Галактике, турбулентные скорости в которой измеряются тысячами километров в секунду (Р. Миньковский, телескоп $D = 5$ *м*);

б) источник Лебедь-А связан с двойной слабой галактикой, возможно, в результате столкновения двух (В. Бааде, телескоп $D = 5$ *м*), но вероятнее в результате деления путем взрыва (В. А. Амбарцумян) одной галактики;

в) источник А в созвездии Печь связан с пекулярной галактикой NGC 1316 (И. С. Шкловский, П. Н. Холопов, 1952 г.);

г) более слабые дискретные радиоисточники в Корме и Парусе также связаны с туманностями в состоянии турбуленции и т. д. Характерны спектры этих и других радиоисточников в оптическом диапазоне. В основном их получали с небулярным спектрографом на телескопах $D = 5$ *м* и $D = 2{,}5$ *м* (В. Бааде и Р. Минковский).

3. Установлено сходство сдвигов оптических и радиолиний в спектрах внешних галактик — красного смещения. Сдвиги пропорциональны, как было указано, длине волны в оптическом диапазоне [57]. Они линейно изменяются с расстоянием $\Delta\lambda/\lambda_0 \sim r$ и имеют положительное значение и в радиодиапазоне, т. е. в общем диапазоне $\lambda = 0{,}00004 \div 21$ *см*, или, иначе говоря, в диапазоне частот от $7{,}5 \cdot 10^{14}$ *сек*$^{-1}$ и до $1{,}43 \cdot 10^{9}$ *сек*$^{-1}$ (т. е. 19 октав, или 5,7 декады) [58]. Отличие, как видим, почти в миллион раз.

4. Проведены наблюдения непрерывных спектров дискретных источников — радиозвезд (или радиотуманностей)

[57] Исключение составляют некоторые ближайшие галактики.

[58] За октаву принимается разница частот в 2 раза и за декаду — разница длин волн в 10 раз. Оптический диапазон обычно считается равным $0{,}00001 \div 0{,}0050$ *см*, а радиодиапазон — $0{,}5 \div 3000$ *см*. На Земле доступна оптическая область только от 0,00003 до 0,0014 *см*

и всего Млечного Пути и вообще неба, а также линейчатого излучения и поглощения межзвездных облаков водорода на волне 21 *см*. К сожалению, для наблюдений дискретных радиоисточников и пятен на Солнце разрешающая сила телескопа, пропорциональная λ/D, недостаточна. Например, у параболоида $D = 9{,}5$ *м* Г. Ребера она всего лишь 12°. Радиотелескоп в этом отношении уступает оптическому телескопу. Г. Ребер проводил обзор неба с радиотелескопом в 1948 г. Другие радиоастрономы в ряде стран также осуществили аналогичные исследования на разных длинах волн от сантиметровых и до метровых. В результате получены радиоизофоты неба.

Наиболее интенсивное радиоизлучение космических объектов наблюдается начиная от области Стрельца с галактической долготой $l^{\text{г}} = 327°$ и широтой $b^{\text{г}} = 1°{,}5$ (к югу от галактического экватора). Интересно, что в радиодиапазоне диффузные туманности фон неба гораздо «ярче» Солнца. Например, на волне 15 *м* «яркостная температура» достигает 250 000 °К. В сантиметровом диапазоне в 1965 г. обнаружено реликтовое равновесное излучение (во всем окружающем нашу систему пространстве) с громадной энергией и температурой около 3°К (см. работу И. Д. Новикова в сб. «Сверхзвезды»).

5. Исследовано излучение спиральных галактик, в частности М31 Андромеды от ее гало (или корональной составляющей), которое, в частности, оказалось больше гало Галактики в 2,5 раза.

6. Зарегистрировано мерцание радиозвезд, обусловленное волнением ионосферы Земли.

7. Открыто радиоизлучение Крабовидной туманности — остатка Сверхновой 1051 г. (или 1054 г.?) — и других туманностей. Интенсивность радиоизлучения Крабовидной туманности уступает только двум дискретным источникам радиоизлучения в Кассиопее и Лебеде.

8. Открыто радиоизлучение Метагалактики, а также местной Супергалактики (1952 г. и позднее).

9. Обнаружено и исследовано радиоизлучение Магеллановых облаков (Ф. Керр и Г. де Вокулер, 1954) и т. д.

Очень ценные результаты получены из интерпретации наблюдений межзвездных облаков нейтрального водорода областей H I на радиолинии излучения 21 *см* почти одновременно в Австралии (В. Кристиансен и Д. Хайндмен), Голландии (Я. Оорт, К. Мюллер) и США (Г. Юри и Е. Парсел).

В отличие от оптического диапазона, ограниченного межзвездным поглощением, радионаблюдениям доступны все участки Галактики. Области H II, содержащие водород, концентрируются в спиралях.

Первую карту спиральной структуры Галактики на основе изучения допплеровских сдвигов линии 21 *см* из-за галактического вращения составили К. Мюллер, Я. Оорт и Г. Ван де Холст в 1953—1954 гг. в Голландии (г. Лейден). Интересно, что в некоторых случаях облака межзвездного кальция и натрия, дающие линии поглощения (Г. Мюнч), излучают и радиолинию 21 *см*.

Картина спиральной структуры Млечного Пути в южной части неба была дополнена наблюдениями Ф. Керра, Д. Хейндмана и др. В общем спиральная структура Галактики по радионаблюдениям согласуется с данными, полученными оптическими методами.

Выяснилось, что угловая скорость вращения Галактики монотонно уменьшается по мере удаления от центра до 14 *кпс*. Линейная круговая скорость движения изменяется от 0 до 225 *км/сек*; максимум ее, равный примерно 225 *км/сек*, наблюдается на расстоянии 7 *кпс* от центра. Поскольку Солнце расположено на расстоянии от центра около 8,3 *кпс* $= 8{,}3 \cdot 10^3$ *пс*, то его линейная скорость равна 220 *км/сек* и, следовательно, оно поворачивается за одну секунду на угол в радианах]:

$$\frac{220\ км/сек}{(8{,}3 \cdot 10^3\ пс \cdot 3{,}06 \cdot 10^{13})км} = 8{,}7 \cdot 10^{-16}\ \frac{рад}{сек}.$$

Поскольку в году $\sim 3{,}2 \cdot 10^7$ секунды, угол поворота за год будет

$$8{,}7 \cdot 10^{-16} \cdot 3{,}2 \cdot 10^7 = 2{,}8 \cdot 10^{-8}\ рад.$$

Полный оборот, т. е. угол $360° = 2\pi$ *рад* будет совершен за $\frac{2\pi}{2{,}8 \cdot 10^{-8}} = 2{,}2 \cdot 10^8$ лет или, приближенно, за 200 000 000 лет.

Этот промежуток времени кругового оборота Солнца в Галактике и принято сейчас, как указывалось выше, называть космическим годом и употреблять его для удобства при изучении эволюции звезд Млечного Пути.

По данным оптических наблюдений (В. Моргана, Б. Бока и др.) в 1951—1953 гг. с камерой Гринстейна — Хеньи из

распределения звезд О — В и областей Н II в Млечном Пути была найдена Орионова ветвь, или рукав, идущая по созвездиям Лебедя, Цефея, Кассиопеи, Персея, Ориона и Единорога (долгота $l^{\text{г}} = 40° \div 190°$). Солнце расположено на внутреннем краю этой ветви. Дальше следует Персеева ветвь (долгота $l^{\text{г}} = 70° \div 140°$), проходящая через рассеянное скопление χ, h Персея. Обе эти ветви внешние. Внутренняя ветвь, или ветвь Стрельца (долгота $l^{\text{г}} = 300 \div 345°$), проходит через созвездия Наугольник, Скорпион, Стрелец и т. д. Эта картина подтверждается и распределением теплового радиоизлучения Галактики (И. С. Шкловский, 1952 г.), и измерением радиолинии 21 *см*, проводившимся рядом авторов.

Радиометод позволил обнаружить, кроме того, еще одну спиральную ветвь, заходящую в области, далекие от центра Галактики [59]. Теперь она наблюдается и в современные оптические телескопы. Найдены и другие обрывки спиральных рукавов.

Б. Бок и его сотрудники еще раньше в Гарварде заметили, что области Н I нейтрального водорода расположены не только в плоскости Галактики, но и в галактической короне. Это согласуется и с данными С. Б. Пикельнера, обнаружившего в ней в 1952 г. по линиям межзвездного газа разреженную газовую среду, которую И. С. Шкловский отождествил тогда со сферической составляющей Галактики. Существенные результаты были получены рядом зарубежных ученых при измерении радиоизлучения от центра Галактики в Стрельце. В СССР такую работу выполнили недавно Ю. Н. Парийский в Пулкове на волнах сантиметрового диапазона. Эта область неба практически недоступна оптическим наблюдениям из-за поглощения пылью (исключение составляет инфракрасная область спектра).

Совсем недавно по предсказанию Н. С. Кардашова были обнаружены радиолинии водорода и гелия, соответствующие переходам электрона между очень высокими уровнями этих атомов, что представляет большой научный интерес.

Дальнейшее развитие радиоастрономии потребовало увеличения разрешающей силы телескопов. С этой целью в 1951 г. В. Кристиансен ввел радиоинтерферометр из 32

[59] Некоторые ученые допускают, что это продолжение Персеева рукава.

параболических зеркал, напоминающий грубую дифракционную решетку [60]. М. Райли в лаборатории Кэвэндиша построил с сотрудниками интерферометр из четырех компонентов по 180 *м* каждый, размещенных по два в направлении восток — запад на расстоянии 610 *м* и север — юг на расстоянии 120 *м*. В Сиднее создан гигантский интерферометр «крест Милса», имеющий большую разрешающую силу по обеим координатам и употребляемый для поисков дискретных источников. Большой радиоинтерферометр площадью 8 тыс. $м^2$ сооружается близ Бюраканской обсерватории. На станции Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР в Серпухове (а в последнее время в Крымской астрофизической обсерватории, на станции близ Симеиза) успешно работает с 1960 г. подвижный параболический отражатель диаметром 22 *м* и несколько позднее крест интерферометра 40×40 *м* («крест Милса»).

Параболические подвижные отражатели, сплошные и сетчатые с дипольными или рупорными облучателями в фокусах, имеются в обсерваториях: Джодрел Бэнк в Англии с 1957 г. ($D = 76$ *м*, Манчестерский университет), г. Сиднея в Австралии с 1961 г. ($D = 70$ *м*, Радиофизическая лаборатория CSIRO), Грин Бэнк в США, Западная Виргиния, с 1962 г. ($D = 42$ и 90 *м*, Национальный научный фонд) и т. д. Радиотелескопы неподвижного типа установлены: в 1954 г. в Вашингтоне, с апертурой 450 *м* (тип «крест Милса»), в 1957 г. в Сиднее, с апертурой 1000 *м* (тот же тип), в 1958 г. в Кембридже, с апертурой 970 *м* (тип «синтезируемый крест»). Строятся новые радиотелескопы, основанные на принципе «апертурного синтеза» и др.

В Пулковской обсерватории сравнительно недавно (в 1958 г.) был установлен и работает на полную мощность ленточный параболический отражатель с апертурой размером 3×120 *м*. В других обсерваториях СССР также имеются разнообразные радиоастрономические телескопы, о которых уже много написано в специальной и научно-популярной литературе. Весьма успешно работают, например, радиотелескопы в г. Горьком, где с их помощью детально исследуют радиоизлучение Луны (В. С. Троицкий и др.).

[60] Радиоинтерферометр строят обычно по оптической схеме Ллойда, Милса или Майкельсона. В первых вариантах (австралийских) интерферометров («морских») помимо прямого излучения на антенну от источника использовалось также излучение, отраженное от поверхности моря. Оба потока радиоизлучения интерферируют.

О некоторых важнейших открытиях, полученных с радиотелескопами и соответствующими приемниками излучения, было весьма сжато (ибо автор не является специалистом в данной области) рассказано выше. Первые усилия молодой науки радиоастрономии были направлены на детальный обзор неба и выявление более или менее заметных источников радиоизлучения, превышающих радиояркость среднего неба, а затем их отождествление с теми или иными оптическими объектами, если подобные встречаются в этих местах. Из самых последних открытий следует указать на обнаружение в 1963 г. пяти, а затем и более звездообразных (на оптических снимках) весьма сильных источников радиоизлучения. Их стали называть квазизвездными объектами, квазизвездными источниками (в английской транскрипции сокращенно QSO, QSS) или сверхзвездами и квазарами (в русской литературе)[61]. Спектры некоторых из них уже получены и в них найдены заметно уширенные линии водорода, ионизированного магния (разрешенные, в излучении), кислорода и неона (запрещенные, в излучении). При этом ряд объектов был найден в третьем Кэмбриджском каталоге (сокращенно 3С). Например, объект под номером 3С 273 излучает в указанных полосах и в слабом непрерывном спектре громадную энергию порядка 10^{39} *вт*. Отметим для примера, что солнце-карлик излучает во всем электромагнитном спектре только $4 \cdot 10^{26}$ *вт*, а звезда-сверхгигант — до $4 \cdot 10^{31}$ *вт*. Мощность излучения огромных галактик близка к 10^{37} *вт* (радиоизлучение у них составляет всего лишь $10^{-7} \div 10^{-5}$ от оптического излучения) при массе около $5 \cdot 10^{11}$ масс Солнца, т. е. при числе звезд порядка 500 миллиардов!

Некоторые космические радиоисточники, имеющие повышенное излучение в области электромагнитного спектра от 1 *мм* до 10 *м* и более, называют радиогалактиками. Их излучение в радиодиапазоне более мощное, чем обычных галактик (это и обусловливает их название), достигает примерно 10^{38} *вт*! Мощность же излучения наиболее абсолютно ярких квазизвезд, или сверхзвезд, составляет, как мы уже сказали, $\sim 10^{39}$ *вт* и больше, т. е. в 10 раз превышает излучение радиогалактик. Правда, на долю излучения квазизвезд в радиодиапазоне приходится лишь $^1/_{100}$

[61] См. работы Дж. Гринстейна, Х. Чу, Дж. Нарликара в сб. «Сверхзвезды». М., изд-во «Мир», 1965. Известно уже 150 квазаров и для многих десятков измерены красные смещения. См. И. Д. Новиков.— «Земля и вселенная», 1967, т. 4, стр. 58.

излучения в оптическом диапазоне или около 10^{37} *вт*. Но, по-видимому, они не являются звездами, так как, вероятно, слишком массивны, больше критического теоретического предела в 100 масс Солнца. Они не являются и галактиками. Их излучение за время существования по теоретической оценке выражается огромной величиной более 10^{53} *дж*, тогда как полное сгорание Солнца соответствует энергии порядка 10^{47} *дж* [65]. Кроме того, их спектры не похожи на спектры систем из миллиардов звезд, т. е. галактик. Некоторые источники этого типа периодически заметно изменяют свой блеск, чего не может наблюдаться в галактике, состоящей из многочисленных и разнообразных объектов. Например, блеск квазара 3С 48 изменяется, согласно А. Сандеджу и В. Мэтьюз, на 1,3, а квазара 3С 273, по А. С. Шарову и Ю. Н. Ефремову,— на 0,7 зв. вел. (фотоэлектрические и фотографические наблюдения соответственно). Зарегистрированы короткие и длительные изменения.

Одна из спорных точек зрения на физическую природу загадочных QSS и других подобных объектов состоит в объяснении их явлением «гравитационного коллапса». Под этим подразумевается быстрое катастрофическое сжатие («схлопывание») гигантской массивной массы и превращение (из-за неустойчивости) в очень маленькое тело со своеобразным свойством пространства и времени вокруг него (согласно выводам общей теории относительности) [66].

Как отмечалось выше, заслуга в открытии этих интереснейших объектов принадлежит радиоастрономии. Но автор, не являясь специалистом в данной области, отсылает читателя к указанной в сносках специальной литературе, где можно найти сведения и по истории радиоастрономических открытий.

---

[65] См. сб. «Сверхзвезды».

[66] Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков. Релятивистская астрофизика.— «Успехи физических наук», 1964, т. 84, № 3, стр. 377; 1965, т. 86, № 3, стр. 447. Отметим здесь, что в 1965 г. А. Сандедж с оптическим телескопом $D = 5$ *м* обнаружил в высоких галактических широтах новые, тоже голубые и загадочные объекты «квазизвездные галактики» или квазаги (QSG), но в отличие от квазаров со слабым радиоизлучением. Э. А. Дибай и В. Ф. Есипов с оптическим телескопом $D = 1{,}25$ *м* в Крыму в комбинации со спектрографом и ЭОП получили спектры аналогичных объектов по списку обсерватории Тананцинтла (Топ). Из 10 объектов всего лишь один показал линии излучения в спектре, что представляется весьма интересным.

7. НАБЛЮДЕНИЯ С ТЕЛЕВИЗИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ТЕЛЕСКОПАМИ

Об успехах астрономии, достигнутых благодаря введению в практику наблюдений этих новейших приборов, мы можем сказать читателю очень мало. Поэтому порекомендуем ему обратиться, как и в предыдущем разделе, к специальной литературе, поскольку эти системы находятся пока еще в стадии освоения.

Названия телескопов — телевизионный и электронный — не совсем правильны. Системы этих типов употребляются не самостоятельно, а в комбинации с оптическими телескопами, о которых рассказывалось выше. Следовательно, эти системы являются скорее комплексными приемниками (детекторами) излучения, а не самостоятельными телескопами. Но, к сожалению, за ними закрепились самостоятельные названия.

Телевизионный и электронный телескопы разработаны лишь в последние годы. Наблюдения производятся с рефрактором или рефлектором, в фокусе которого устанавливается передающая телевизионная трубка (типа суперортикон в телевизионном телескопе), или электронно-оптический преобразователь (в электронном телескопе), переводящий инфракрасное изображение объекта в видимое, или же просто электронный усилитель изображения.

Укажем некоторые открытия, сделанные с этими телескопами в СССР.

1. С телевизионным телескопом $D = 28$ *см*, $F = 1062$ *м* Н. Ф. Купревич зарегистрировал в Пулкове «разрывы» звездных изображений (рис. 22) при очень большом масштабе—0″,2 дуги в миллиметре в переводе на экран телевизора (фокус оптического кассегреновского телескопа около 125 *м*, увеличение в телевизоре около 8,5$^{\times}$, т. е. эквивалентный фокус около 1062 *м*). Указанные разрывы обусловлены волнением земной атмосферы.

2. Успешно применили высокочувствительную телевизионную систему на 500-миллиметровом крымском телескопе А. И. Абраменко, Е. С. Агапов и их соавторы [67]. За время накопления от 4 до 60 *сек* они достигли 20^{m} — 21^{m} предельной звездной величины. Это рекордные цифры, так как предельная звездная величина для такого теле-

[67] См. «Известия Крымской астрономической обсерватории», 1965, т. 33, стр. 313.

скопа на современных фотопластинках не слабее 18^m!

3. Успешно использованы телевизионные телескопы для наблюдения Луны в Пулкове (особенно в ИК-области) и затем в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга в Москве.

4. А. А. Калиняк получил с электронным телескопом снимок солнечной короны в инфракрасных лучах, а совместно с В. Б. Никоновым и В. И. Красовским — фотографию центра Галактики в лучах длиной волны около 1 *мк* с двумя максимумами интенсивности: первый — от упоминавшегося выше звездного облака в Стрельце, второй — от аналогичного, но нового облака по южную сторону от галактического экватора. В обычных фотографических лучах темная пылевая материя заслоняет его, и оно с обычными оптическими телескопами не обнаруживалось. За рубежом аналогичные наблюдения выполнили Ж. Дюфе и Бертье.

5. В комбинации со спектрографом электронно-оптические преобразователи и другие усилители изображений с успехом применяются для изучения спектров полярных сияний, неба в СССР, США и других странах, а в комбинации с телескопами — и спектров Луны, планет, звезд и особенно туманностей. Большие успехи при наблюдениях последних объектов (да и многих других) были достигнуты сотрудниками Государственного астрономического института

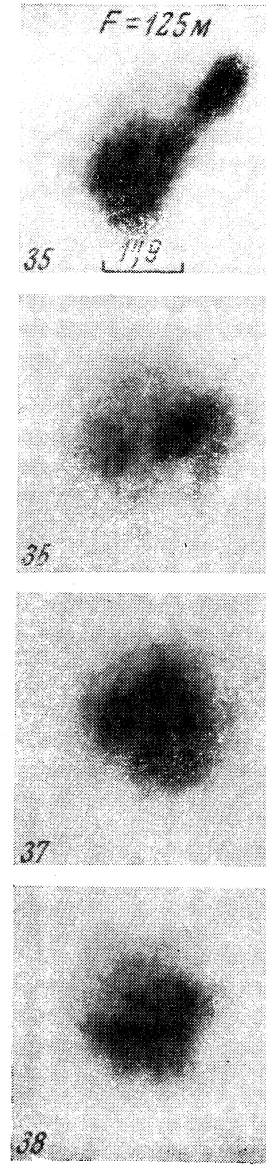


Рис. 22. «Разрывы» изображений звезды альфа Тельца

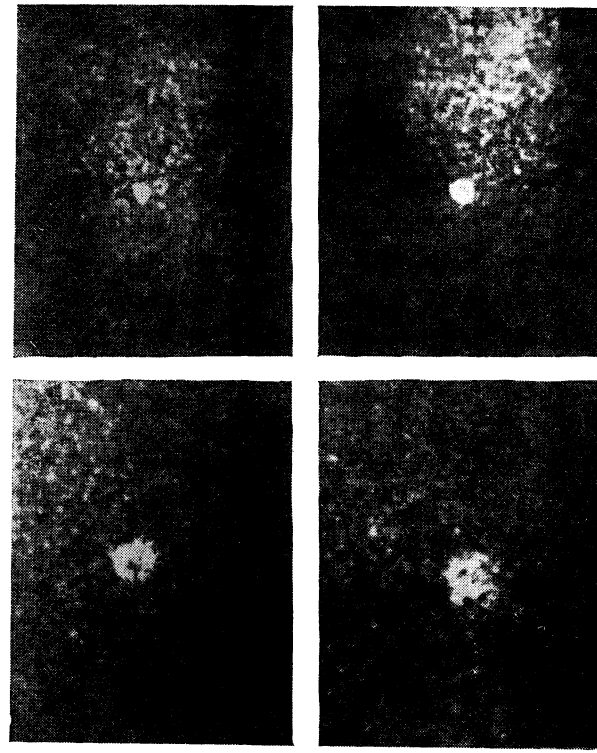
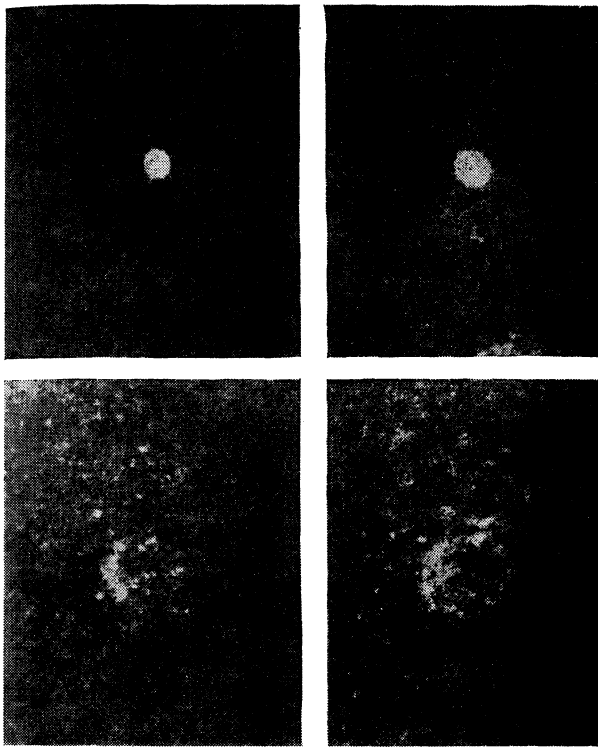


Рис. 23. Последовательное развитие искусственной космической ракеты. Снимки получены

им. П. К. Штернберга в Москве и его Южной станции в Крыму (В. Ф. Есипов, В. Г. Курт, П. В. Щеглов и др.).

Электронная система в комбинации даже с небольшими телескопами $D = 10$ *см*, $F = 0{,}25$ *м* и $F = 0{,}50$ *м* и узкополосным (30 Å) интерференционным светофильтром с успехом была применена для наблюдения за искусственной натриевой кометой в Бюракане (В. И. Мороз) и Душанбе (В. Ф. Есипов, И. С. Шкловский, В. Г. Курт, В. И. Мороз и П. В. Щеглов), выпущенной с борта второй советской космической ракеты 12 сентября 1959 г. (рис. 23), и т. д.

6. В самое последнее время А. А. Калиняк успешно применил электронную систему для наблюдения спектров спутников Юпитера.



натриевой кометы, выпущенной с борта второй советской при помощи электронного телескопа

Заканчивая изложение, отметим, что мощность недавно изготовленного телескопа им. Г. А. Шайна ($D=2{,}6$ *м*) Крымской астрофизической обсерватории (фирма ЛОМО) была наглядно продемонстрирована, когда группе сотрудников с помощью него удалось сфотографировать весьма слабый межпланетный корабль «Марс-1», запущенный в СССР 1 ноября 1962 г. На рис. 24 виден корабль (указан верхней стрелкой) и ракетоноситель (указан нижней стрелкой). Этот корабль являлся автоматической межпланетной станцией (АМС).

В заключение главы мы хотим сообщить читателю, что имеется в опубликованном виде полный список телескопов оптического типа, т. е. рефлекторов, рефракторов-астро-

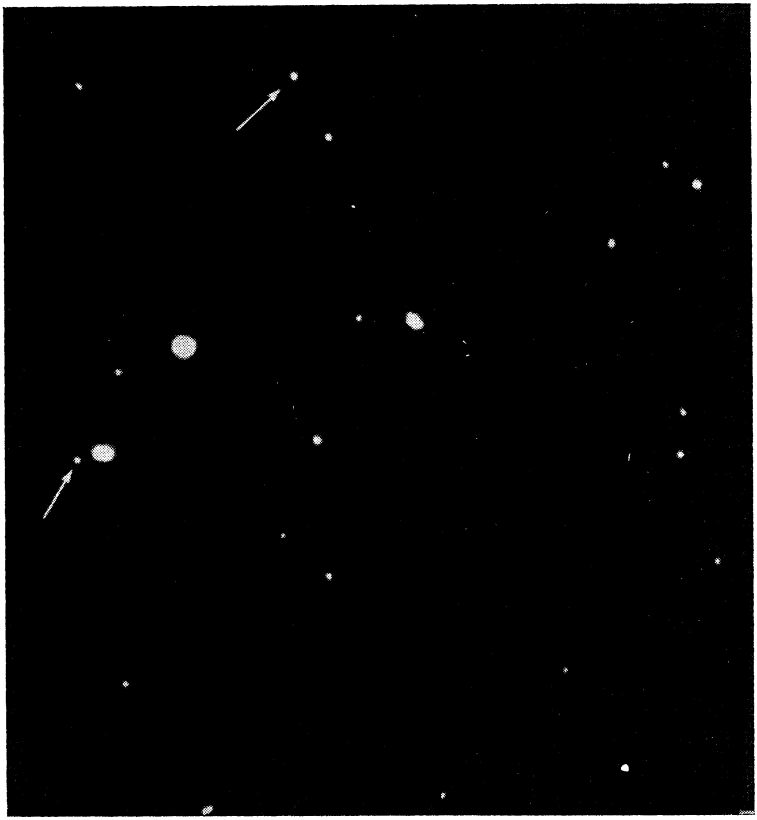


Рис. 24. Фотография космического корабля автоматической межпланой станции (АМС) «Марс-1»

графов и зеркально-линзовых систем с отверстиями более 50 *см* в диаметре (по поперечнику) и список крупнейших «неподвижных» и соответственно «подвижных» радиотелескопов всего мира, за исключением введенных в самое последнее время или достраивающихся [68].

Крупнейшим из рефлекторов является в настоящее время рефлектор Паломарской обсерватории США с $D=5$ *м*.

[68] См. сб. «Телескопы». Под ред. В. А. Крата и Н. Л. Кайдановского. М., ИЛ, 1963, стр. 290—312. Данные о солнечных телескопах см. в кн. «Солнце». Под ред. Г. Койпера. М., ИЛ, 1957, стр. 594—596.

В США обсуждался вопрос о создании рефлектора с $D=7{,}5—15$ *м*.

Наиболее крупным рефрактором располагают Йеркская обсерватория (диаметр 1 *м*). В нашей стране до Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. был рефрактор диаметром 76 *см* (объектив его сохранился и, кроме визуального, создан фотографический диаметром 82 *см*, но пока без монтировки). Из действующих в СССР приборов этого типа самый крупный сейчас имеет диаметр 65 *см*.

Среди линзовых астрографов первое место занимает двойной астрограф Ликской обсерватории США.

Крупнейший зеркально-линзовый телескоп типа Шмидта, имеющий зеркало диаметром 1,83 *м* и пластину диаметром 1,22 *м*, имеется в Паломарской обсерватории США. Однако новый таутенбургский рефлектор ГДР с диаметром зеркала 2,03 *м* также допускает зеркально-линзовую комбинацию типа Шмидта с диаметром пластины 1,37 *м*. В Бюраканской обсерватории АН АрмССР введен в действие и уже продуктивно работает шмидтовский телескоп ($D_1=1$, $D_2=1{,}3$, $F=2{,}13$ *м*).

В самое последнее время астрономические станции СССР пополнились и продолжают пополняться разнообразными системами телескопов. Ряд телескопов поставила из ГДР фирма «К. Цейсс» (например, с $D=2$ *м* для Шемахинской АО АН АзССР и др.). Крупнейшим в Европе является упоминавшийся выше телескоп ЗТШ имени акад. Г. А. Шайна в КрАО АН СССР с $D=2{,}6$ *м*. На заводе фирмы «ЛОМО» в Ленинграде завершается монтаж 6-метрового телескопа АН СССР.

Из зеркально-линзовых телескопов типа Д. Д. Максутова (т. е. менискового) наибольшие размеры имеет абастуманский с зеркалом 97,5 *см* и мениском 70 *см*. Недавно по этому типу, но с двумя встречными менисками по 70 *см* создан астрограф для экспедиции СССР в Чили (АЗТ-16).

Из краткого перечня открытий, полученных с телескопами на протяжении около 360 лет, мы видели, что астрономическая наука действительно добилась многих успехов.

Астрономические открытия все более опровергают идею конечности Вселенной в пространстве и времени и все обоснованней свидетельствуют о ее бесконечности, утверждая тем самым великое учение диалектического материализма, созданное трудами Маркса — Энгельса — Ленина.

Глава вторая

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ В РОССИИ И СССР И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ РАБОТЫ

1. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОНСТРУКТОРЫ ТЕЛЕСКОПОВ

Использование оптических средств наблюдения за небесными светилами на территории нашей страны началось очень давно. Впервые о применении линз для этих целей писал знаменитый средневековый ученый-энциклопедист, узбек по национальности, хорезмиец аль-Бируни (973—1048 гг.).

Советская ориенталистика недавно установила, что трудам Бируни астрономия обязана определением географических координат многих пунктов Средней Азии и конструкцией ряда астролябий. Бируни высказывал сомнения относительно неподвижности Земли в пространстве и считал, что движение планет легко объяснить, с одной стороны, движением Земли вокруг Солнца, а с другой,— обращением ее вокруг оси. Наконец, в XI в. он очень точно, методом понижения горизонта, измерил диаметр Земли.

Работы Бируни написаны на основе его личных наблюдений, проведенных с помощью астрономических инструментов, не содержащих оптики. Однако в трудах великого хорезмийца по минералогии, написанных в 1047 г., содержится указание на то, что в его время простая лупа была обычным инструментом.

В разделе о яхонте Бируни писал: «Если яхонт в виде полушария поместить вблизи книги, то мелкие письмена читаются так же, как и с полушарием из горного хрусталя, так как для смотрящего письмена за ним утолщаются и строки раздвигаются, а причину этого ведает наука о зеркалах».



Рис. 25. Линза VIII—X вв. из горного хрусталя

Лупы из горного хрусталя, очевидно, не представляли редкости для народов, населявших в то время территории южных районов нашей страны. В отделе истории Музея Грузии в Тбилиси хранится линза диаметром 45 *мм* из горного хрусталя (относится к VIII—X вв. н. э.), найденная в станице Георге-Абинской на Кубани (рис. 25). Как видно из рисунка, такую лупу нужно было класть нижней слабо выпуклой стороной на страницу книги и при чтении водить по строкам. Получалось почти двукратное увеличение. Очевидно, одна из таких линз была использована Бируни при изучении минералов.

В результате татаро-монгольского нашествия развитие науки на Руси искусственно затормозилось. Позднее его задерживало и реакционное влияние христианской религии.

В начале XVII в. на западе голландские оптики, а вслед за ними Галилей создали свои первые зрительные трубы. Это изобретение скоро проникло и в Московскую Русь. В 1614 г., т. е. спустя 4 года после изобретения телескопа Галилеем, несколько зрительных труб было приобретено для царя Михаила Романова, а в 1630 г. такие приборы продавали в торговых рядах Москвы. Архивы дворца Романовых сохранили указания на то, что мелкие неполадки зрительных труб уже тогда устраняли русские механики.

В то время на Руси имелись и «звездозаконники» — астрономы, знакомые с астрономической наукой Запада и, безусловно, пользовавшиеся зрительными трубами для наблюдений неба.

Одновременно с реформами Петра I, но независимо от них, появилась первая русская обсерватория в Холмогорах, созданная одним из образованнейших людей XVII в. А. А. Любимовым, уроженцем Тюмени (1641 г.). В 1666 г. он постригся в монахи, приняв имя Афанасия. Монастырское книгохранилище явилось источником его познаний. В 1678 г. он отправился в Москву, где произвел впечатление на царский двор и духовенство своей ученостью. Его оставляют в Москве, а в 1682 г. дают сан архиепископа (высшее духовное лицо в области) и посылают управлять Холмогорской и Архангельской епархией. В Холмогорах Любимов жил до своей смерти (1702 г.).

В отличие от большинства представителей тогдашнего русского духовенства, он был передовым человеком и поборником науки, обладавшим большими знаниями в области астрономии. В Холмогорах в 1692—1696 гг. он построил свою обсерваторию, в которой имелось семь труб и один угломерный прибор. Наблюдениями неба Любимов занимался, вероятно, лишь с целью ознакомления с небесными диковинками. Однако сам факт интереса к астрономии со стороны представителя допетровского духовенства значителен. В литературе имеются указания на то, что Любимов производил также и геодезическую съемку дельты Северной Двины.

Под влиянием петровской реорганизации страны на Руси началось быстро развитие астрономии. К этой эпохе относятся и первые попытки телескопостроения. Во время своих поездок за границу Петр I уделял большое внимание и изучению астрономии. В обсерваториях Копенгагена и Гринвича он знакомился с техникой наблюдений, сам при-

нимал в них участие. Известно, что в России он наблюдал солнечные затмения 1699 и 1706 гг.

Астрономические знания были весьма необходимы, в особенности для навигации и картографии.

Их развитие идет очень бурно. Даже вельможа Александр Меньшиков под влиянием Петра заводит в своем дворце обсерваторию (вероятно, типа обсерватории А. Любимова).

Один из сподвижников Петра генерал-фельдцехмейстер русской армии Яков Вилимович Брюс не только занимался астрономическими наблюдениями на обсерваториях, созданных им в Москве на Сухаревой Башне и в своем доме в Глинках, но также сам строил телескопы и шлифовал к ним зеркала. В тридцатых годах XVIII в. Брюс писал неизвестному лицу: «При этом пересылаю я к трубам зеркала, из коих меньшее сделано с мышьяком, а другое без мышьяка. Отошли их, пожалуйста, господину профессору Лейтману и сообщи, что я еще прошлым летом сделал катадиоптическую трубу (отражательный телескоп). Оба зеркала к этой трубе изготовлены мною в своем доме. Эту трубу с окуляром в 2,8 дюйма я неоднократно употреблял для наблюдения Луны. Луна в ней выглядела отчетливо и ясно, и был виден весь ее диаметр». В Государственном Эрмитаже в Ленинграде сохранилось вогнутое зеркало для отражательного телескопа, изготовленное Брюсом в 1733 г.

Таким образом, Я. В. Брюс был первым ученым, о котором по сохранившимся документам известно, что он строил в России телескопы. Помимо того, Брюс обучал астрономии первых русских штурманских офицеров. В их обучении огромную роль сыграл также Леонтий Филиппович Магницкий. Его «Арифметика» содержала необходимые знания по астрономии, и по ней обучалось в то время русское юношество, в том числе и будущие штурманы. По ней учился М. В. Ломоносов.

М. В. Ломоносову принадлежит заслуга открытия атмосферы на Венере, организация и выполнение наблюдений за ее прохождением через диск Солнца в 1761 г. на территории России, предпринятые для определения расстояния до Солнца, и оригинальная теория электрической природы кометных хвостов.

Неоднократные наблюдения за небом, проводившиеся им с помощью оптических труб, наталкивают его мысль на

улучшение оптических систем. На 12 лет раньше Гершеля он разработал новую форму отражательного телескопа.

Конструированием и изготовлением различных оптических инструментов (зажигательных стекол, так называемых ночезрительных труб и т. д.) Ломоносов занимался на протяжении всей своей творческой деятельности. В частности, в 1761 г. он создал целостат, предназначенный для изучения Солнца в неподвижную трубу. Руководя Географическим департаментом Академии наук с 1757 г., он отдавал много сил и энергии конструированию необходимых для экспедиций астрометрических инструментов.

Им разработаны несколько разновидностей зеркальных телескопов, отличавшихся от широко известных в то время рефлекторов Грегори и Ньютона. Не считая, что «наука достигла уже той степени совершенства, при которой нельзя уже ожидать новых успехов», Ломоносов писал: «Я всегда имел намерение, чтоб ...небесные орудия (телескопы Ньютона и Грегори — *А. М.*) через новое усовершенствование лучшие приспособления получили. Я нашел, что они должны испытывать от излишества зеркал не мало недостатка; именно, что малое зеркало должно быть оставлено». В марте 1762 г. Ломоносов решил создать телескоп с наклоном главного зеркала к оси трубы и выполнил все необходимые для этого расчеты. Построив и испробовав его 15 апреля 1762 г., он записал: «Изображение произведено в действие с желательным успехом». В его записях говорится о необходимости исследования точности сферических зеркал, потерь света при отражении и т. д. Диаметр главного зеркала этой модели был лишь 2,5 *см*, наклон его к оси трубы 4°, относительное отверстие 1 : 7.

13 мая 1862 г. свою «однозеркальную трубу» Ломоносов демонстрировал Академическому собранию и после этого решил опубликовать работу.

О своем изобретении Ломоносов должен был докладывать на торжественном заседании Академии наук 29 июня 1762 г. В этот день ежегодно в память основателя Академии Петра I делались сообщения о лучших научных работах. В заранее напечатанной речи, которая должна была рассылаться после доклада, по обычаю того времени имелось приветствие царствующему императору (Петру III). Однако 28 июня 1762 г. произошел дворцовый переворот, на русский престол взошла Екатерина II. Речь Ломоносова о новом телескопе, назначенная на 29 июня, не состоялась,

ее текст не был разослан и, по-видимому, подвергся уничтожению (до нас дошли лишь единичные экземпляры).

Впоследствии Ломоносов продолжал разработку конструкции телескопа и вел постройку нового прибора с зеркалом диаметром 30 *см* и относительным отверстием 1 : 4, но не осуществил ее до конца.

Помимо того, Ломоносов предложил следующие усовершенствования в конструкции телескопов Ньютона и Грегори. В телескопе Ньютона он считал нужным наклонить главное зеркало к оси трубы, а плоское зеркало установить на краю трубы так, чтобы оно не виньетировало главного. В конструкции Грегори он предложил наклонить главное зеркало для того, чтобы плоское зеркало, находясь на краю трубы, посылало лучи параллельно ей и чтобы в малой трубе получалось изображение объектов. В качестве окуляра Ломоносов предлагал использовать микроскоп, а увеличение малой трубы предполагал довести до 60 раз. Обе эти конструкции были забыты его преемниками в Академии наук. Первая из них осуществилась лишь в XIX в. в Европе, а вторая послужила прототипом линзозеркального телескопа «Брахита», построенного в 1876 г. в Австрии.

В России работам первого русского конструктора телескопов суждено было пролежать забытыми вплоть до советского времени.

Недоверие правящих кругов царской России к силам соотечественников, не прекращавшееся после смерти Петра I, и ложное убеждение в том, что проще и дешевле астрономические приборы покупать за границей, затормозили развитие русского астрономического приборостроения. Тем не менее, в екатерининские времена несколько телескопов изготовил И. П. Кулибин. В начале XX в. преподаватель физики варшавской гимназии Троцевич опубликовал первую книгу на русском языке, посвященную построенному им телескопу.

Первым крупным русским оптиком, собственными руками создавшим параболическое зеркало, был Александр Андреевич Чикин. Сын курского мещанина, А. А. Чикин родился в Харькове 27 сентября 1865 г. С детства он увлекается естественными науками и прежде всего астрономией. Ему не удалось закончить гимназию. В 1884 г., под влиянием развившегося у него влечения к живописи, он поступает в Петербургскую Академию художеств. В первый же год обучения, вынужденный самостоятельно изыскивать



Рис. 26. Александр Андреевич Чикин

средства к жизни, он работает иллюстратором в разных журналах, в том числе прогрессивном научно-популярном журнале «Вестник знания». Детское увлечение астрономией возрождается у А. А. Чикина с новой силой. Он приобретает весьма посредственную астрономическую трубу и усовершенствует ее. С этого момента началась его конструкторско-новаторская работа.

А. А. Чикин много путешествовал по разным частям России, в том числе по Крыму (1886 г.) и Кавказу (1889 г.). В 1887 г. он побывал в Палестине. В 1888 г. совместно с членом Географического общества П. Г. Щербовым совершил восхождение на гору Килиманджаро в Центральной Африке. Они были первыми русскими путешественниками в Центральной Африке. В 1890 г. побывал в Курдистане и Персии, причем специально занимался сопоставлением форм гейзеров, встречавшихся ему в этих странах, с лунными вулканами. В 1891 г. он посещает Лондон, а в 1896 и 1900 гг.— выставки в Нижнем Новгороде и Париже в качестве корреспондента.

С 1898 г. он регулярно следит за научными астрономическими журналами, проявляя наибольший интерес к астро-

номическим инструментам. Конец своей жизни он полностью посвятил шлифовке зеркал и постройке телескопов.

Сближение А. А. Чикина с другими астрономами, вначале любителями, относится в 1909 г., когда усилиями механика Ю. А. Миркалова был создан кружок любителей неба «Русская Урания» и на Марсовом поле в Ленинграде) построена для популяризаторских целей первая общедоступная обсерватория. Здесь Чикин знакомится с горным инженером С. В. Муратовым и другими астрономами-любителями, организовавшими Русское общество любителей мироведения.

Чикин входит в его состав, вскоре избирается товарищем председателя совета и принимает активное участие в журнале «Известия русского общества любителей мироведения», в котором в 1911—1912 гг. были опубликованы некоторые его работы. Он выступает с рядом докладов, пропагандируя создание отечественной оптики, и в 1911 г. изготовляет первое параболическое зеркало. Доклад Чикина об этом зеркале, прочитанный в 1911 г., публикуется в журнале «Известия русского астрономического общества». Он вызвал живейший интерес и был перепечатан затем отдельным изданием в количестве 300 экз. Астрономическое общество, председателем которого был тогда проф. А. А. Иванов, впоследствии директор Пулковской обсерватории, объединяло главным образом астрономов-специалистов, но среди его членов были и любители.

Большой опыт, накопленный в изготовлении параболических и плоских зеркал, а также рефлекторов, А. А. Чикин излагает в книге «Отражательные телескопы (изготовление рефлекторов доступными для любителя средствами)». Этот труд издало в 1915 г. на частные пожертвования Русское общество любителей мироведения. Это прекрасное издание является сейчас библиографической редкостью. Содержание книги показывает, что все стороны изготовления малых рефлекторов были хорошо знакомы ее автору. Для наглядности мы приводим из этой книги снимок 140-миллиметрового рефлектора на переносной параллактической установке с кругами и микрометрическим движением, целиком изготовленного Чикиным (рис. 27). Книга завоевала признание не только любителей астрономии и самоучек, для которых она собственно и предназначалась, но и специалистов — оптиков и астрономов, работающих на обсерваториях.

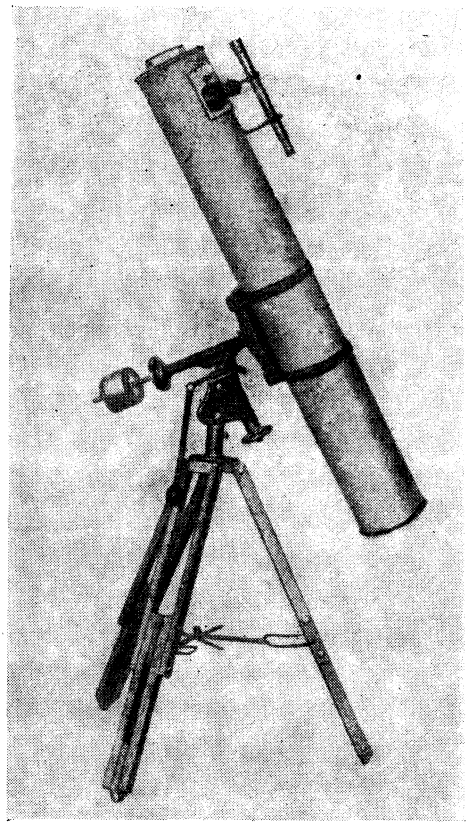


Рис. 27. Рефлектор работы А. А. Чикина диаметром 14 *см*

По вопросам, касающимся изготовления рефлекторов, А. А. Чикин, начиная с 1915 г., вел обширную переписку с провинциальными любителями астрономами. Он помогал многим из них, а также целым организациям не только советами, но и личным участием. Так, один из авторов этой книги, только что окончивший реальное училище, получил от А. А. Чикина в 1914 г. параболическое зеркало его работы (№ 8, $D = 16{,}5$ *см*, $F = 1{,}6$ *м*) и, воспользовавшись названной книгой, построил в 1915 г. в курской глуши рефлектор, в который заметил и кратковременные помутнения

атмосферы на Марсе в 1918 г. (рис. 28). Это явление было подтверждено Г. А. Тиховым, одновременно наблюдавшим Марс с помощью рефрактора $D = 38$ *см* в Пулкове.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции талант и знания А. А. Чикина, как и многих других ученых-самородков, нашли оценку со стороны государства.

А. А. Чикина следует считать отцом современных советских рефлекторов. Начиная с 1919 г. и до последнего дня жизни в 1924 г., он по приглашению основателя советской оптики академика Д. С. Рождественского плодотворно работал в Государственном оптическом институте (ГОИ). Чикин помогал молодым специалистам: Н. Г. Пономареву, который несколько лет учился у него работать в этом институте, а также Д. Д. Максутову и Н. П. Барабашову, начавшим постройку своих рефлекторов. Здесь он налаживает изготовление параболических зеркал, которые, как показали исследования, оказались лучше многих хороших заграничных, основывает первый оптический кружок. Его статьи по оптике были известны во многих странах. В те годы он исправлял также поврежденные объективы микроскопов, что было особенно важно, пока наша оптическая промышленность еще не наладила производство отечественных микроскопов.

Основоположник современного телескопостроения в России Александр Андреевич Чикин скончался 25 июня 1924 г. и был похоронен на Смоленском кладбище в г. Ленинграде.

Биограф А. А. Чикина, написавший в 1924 г. некролог, заканчивал его словами: «Представители Оптического института считают, что сейчас нет человека, способного заменить А. А. Чикина, но мы полагаем, что его ученики и те, которых он толкнул своей книгой на занятия оптикой, станут достойными продолжателями его дела». Его слова оправдались. Ученики далеко превзошли те пределы (30-сантиметровое зеркало), которых ценой кропотливого труда в условиях царизма достиг Александр Андреевич.

Наиболее выдающимся учеником А. А. Чикина был Николай Георгиевич Пономарев, который в 1941 г. первым из астрономов был удостоен Государственной премии.

Н. Г. Пономарев родился в 1900 г. в городе Уфе, в семье владельца небольшой мастерской. В 1917 г. там же окончил реальное училище. Под влиянием созданного в то

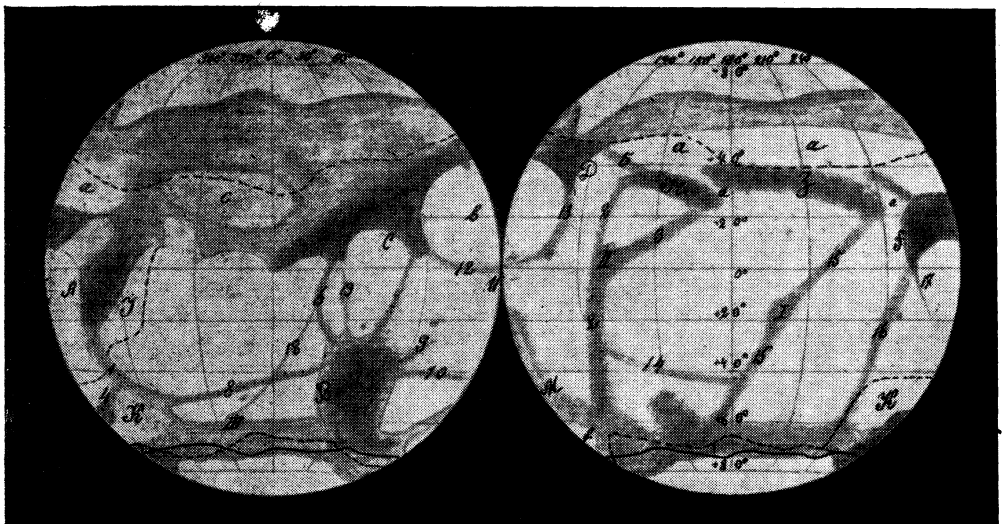


Рис. 28. Карта Марса по наблюдениям А. В. Маркова в 16,5-сантиметровый рефлектор с зеркалом А. А.Чикина (1918 г.)



Рис. 29.
Николай Георгиевич
Пономарев (1941 г.)

время в Уфе кружка любителей астрономии он намеревался избрать астрономию своей специальностью, но по настоянию отца поступил в Уфимский политехнический институт. Проучившись в нем два года, он почувствовал, что занятия в этом институте уводят его от интересующей области знаний. В эти годы у него завязалась оживленная переписка с А. А. Чикиным по поводу изготовления зеркал Указанное обстоятельство привело к тому, что, когда в Оптическом институте оказалась свободная вакансия практиканта-оптика, Н. Г. Пономарев бросает учение и переезжает в г. Петроград. Работая с А. А. Чикиным, он слушает в университете лекции по астрономии, физике и выполняет под руководством А. Н. Теренина и совместно с ним первую (из напечатанных) научную работу — сложное экспериментальное исследование оптического возбуждения в парах ртути.

При жизни А. А. Чикина Н. Г. Пономарев самостоятельно изготовлял параболические зеркала, в частности 20-сантиметровое зеркало для Одесской обсерватории. После смерти А. А. Чикина в 1924 г. он заменяет его в ГОИ. Будучи сотрудником ГОИ, он помогает Г. А. Шайну подгото-

вить метровый рефлектор к установке в Симеизе. В 1927 г. выполняет под руководством Г. А. Шайна работу «Исследование способом Гартмана симеизских объективов». К этому времени у Н. Г. Пономарева возникает мысль о конструировании и постройке своими силами первого советского крупного рефлектора. Так как его идея многим показалась тогда несбыточной, он переходит в Ленинградский астрономический институт, предоставивший ему возможность работать над ее осуществлением. Одновременно выполняет обязанности заведующего конструкторско-механическим сектором института. Н. Г. Пономарев создает в институте механические мастерские и привлекает к конструкторской работе Л. А. Сухарева и М. П. Померанцева. В вопросах разработки своего рефлектора он консультируется с А. А. Белопольским и Г. А. Шайном.

В 1928 г. Н. Г. Пономарев был зачислен в аспирантуру при Пулковской обсерватории по специальности астрофизика-конструктора. В 1931 г. он заканчивает ее, представив при этом проект конструкции 325-миллиметрового рефлектора, и возвращается в Астрономический институт, где уже ведется постройка такого рефлектора для будущей горной обсерватории. Он шлифует 325-миллиметровое параболическое зеркало и в 1932 г. выпускает первый советский рефлектор (рис. 30), который 7 ноября 1932 г. был установлен в Абастумани.

В дальнейшем, работая в Астрономическом институте, Николай Георгиевич начинает с целью подготовки к наблюдению полного солнечного затмения 1936 г. разработку стандартных коронографов и прецизионных целостатов. Кроме того, он ставит опыты по изготовлению пробного 325-миллиметрового диска для сварного «сотового» зеркала ребристой конструкции. Так как создание целостатов и больших сварных зеркал оказалось не под силу мастерским института, Н. Г. Пономарев в 1934 г. поступает на один из ленинградских заводов в качестве начальника первого в СССР конструкторского бюро астроприборостроения. После изготовления им малого солнечного телескопа для Пулкова с зеркалом диаметром 40 *см* его приглашают старшим научным сотрудником в Пулковскую обсерваторию. В 1936 г., воспользовавшись разработанными им прецезионными целостатами, он участвует в составе Пулковской экспедиции в Ак-Булаке в съемке хромосферных серпов затмения.

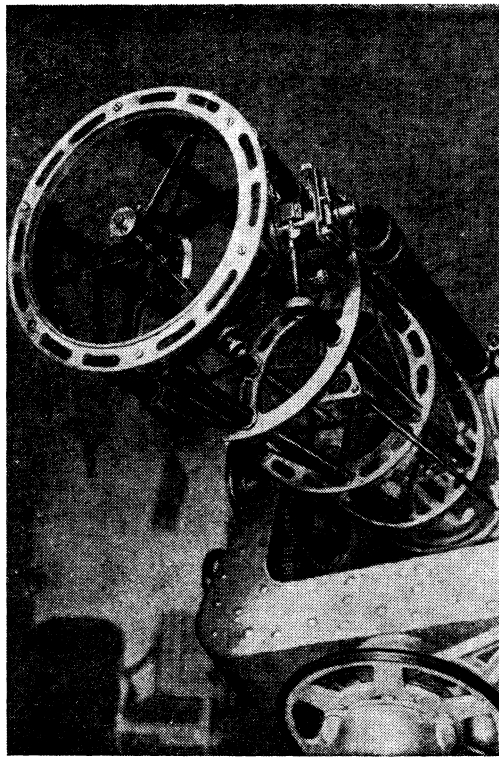


Рис. 30. Первый советский рефлектор Н. Г. Пономарева

До 1941 г. Н. Г. Пономарев изготовляет на заводе пробный метровый диск для сварного зеркала, а также заканчивает постройку двойного короткофокусного астрографа и устанавливает в Пулкове горизонтальный солнечный телескоп. К 1941 г. ему удалось сплотить вокруг себя хороший коллектив молодых конструкторов в составе Б. К. Иоаннисиани, разработавшего впоследствии ряд прекрасных приборов и удостоенного за это Ленинской премии, М. П. Померанцева и А. А. Сухарева — известных конструкторов, погибших в блокаду Ленинграда. Во время Великой Отечественной войны Н. Г. Пономарев остается вместе с заводом на оборонной работе в Ленинграде, но к концу 1941 г.

тяжело заболевает. В феврале 1942 г. его эвакуируют из Ленинграда. 18 июля 1942 г., находясь в Коврове Владимирской области, он умер вследствие полученного во время блокады тяжелого заболевания. Идеи Н. Г. Пономарева сейчас получают дальнейшее развитие в Пулковской обсерватории, фирме ЛОМО (Б. К. Иоаннисиани), научно-исследовательских институтах и на заводах, занимающихся астрономическим приборостроением.

Другой последователь А. А. Чикина — Н. П. Барабашов — один из крупнейших специалистов по планетоведению. Еще в студенческие годы под влиянием книги А. А. Чикина он сделал несколько параболических зеркал, самое большое из которых имело в диаметре 25 *см*. В 1918 г. он самостоятельно изготовил рефлектор.

Благодаря усилиям Н. П. Барабашова на Харьковской обсерватории в 1918 г. был построен небольшой рефлектор, с которым в течение 30 лет осуществлено восемь работ по исследованию новых звезд, Луны и Марса, причем некоторые из снимков Марса, полученные Барабашовым, немногим уступают классическим снимкам Г. А. Тихова 1909 г., сделанным на 76-сантиметровом рефракторе Пулковской обсерватории.

Овладев техникой приборостроения, Н. П. Барабашов в 1934 г. использовал свой опыт при создании совместно с Н. Г. Пономаревым советского спектрогелиоскопа.

В СССР сейчас имеется специальная отрасль оптико-механической промышленности, снабжающая обсерватории астрономическими приборами. Она занималась и занимается серийным выпуском приборов, разрабатываемых под руководством оптиков: члена-корр. АН СССР Д. Д. Максутова, проф. Г. Г. Слюсарева и конструкторов Б. К. Иоаннисиани, П. В. Добычина, М. Д. Афанасьева и многих других. Усилиями ученых созданы специальные приборы высокого качества — звездный интерферометр и интерференционный гелиометр (рис. 31) В. П. Линника, менисковый малосветосильный телескоп $D = 50$ *см* Д. Д. Максутова, П. В. Добычина и др., светосильный рефлектор $D = 25$ *см* с бесщелевым спектрографом О. А. Мельникова, Б. К. Иоаннисиани и много других уже упоминавшихся ранее телескопов. Первым завершающим этапом этой огромной работы явилось создание крымского рефлектора $D = 2{,}6$ *м*.

Большое значение в телескопостроении имеет обработка поверхностей зеркал и объективов. В этой области долго и пло-

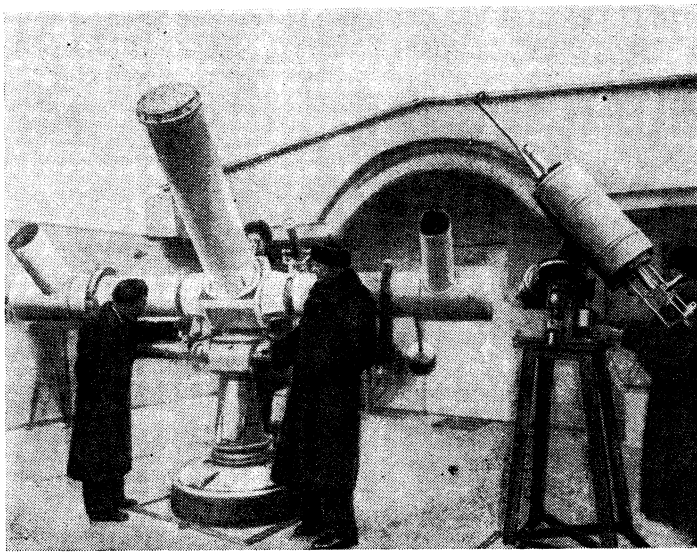


Рис. 31. Большой пулковский звездный интерферометр системы В. П. Линника

дотворно работал Д. Д. Максутов, рано заинтересовавшийся астрономией. Им изготовлены несколько параболических зеркал диаметром до 21,5 *см*, построен первый советский телескоп типа Кассегрена в Одессе с диаметром главного зеркала 21,5 *см*, и светосилой 1 : 5, а также ньютоновский рефлектор с зеркалом, имевшим в диаметре 27,5 *см*, с помощью которого он зарисовывал Марс во время его великого противостояния в 1924 г.

С 1930 г. Д. Д. Максутов участвовал в создании объектива крупного советского рефрактора диаметром 82 *см* для Пулковской обсерватории. Английская фирма «Грэбб», принявшая еще в 1913 г. заказ на изготовление этого объектива и не справившаяся с ним, окончательно отказалась от его выполнения в 1929 г., в частности из-за того, что не смогла получить от английских заводов достаточно хороших блоков стекла.

После нескольких лет усиленного труда на отечественных заводах оптической промышленности удалось

сварить два блока стекла высокого качества, которые Д. Д. Максутов признал годными для одного из крупнейших рефракторов в мире. Изготовление объектива, прерванное войной, было закончено в 1948 г.

В 1940—1941 гг. Д. Д. Максутов изготовил зеркало для солнечного телескопа Н. Г. Пономарева с поперечником 80 *см*. В 1941 г. он изобрел знаменитые менисковые системы телескопов.

Из оптических систем, изготовленных лабораторией Д. Д. Максутова, а также Государственным оптическим заводом, следует отметить два объектива полуапохромата диаметром 20 *см*, пять объективов диаметром 10 *см* для наблюдения затмений, два комплекта оптики для систем Шмидта диаметром до 40 *см* и относительным отверстием 1 : 2, а также ряд менисковых систем для Пулкова, Крыма, Алма-Аты, Москвы и несколько полуметровых менисковых телескопов разной светосилы, в том числе два телескопа для Крымской и Пулковской обсерваторий, в которых изображение небесного объекта выведено в неподвижную полярную ось, Абастуманский телескоп $D = 70$ *см* и др.

За создание Пулковского солнечного горизонтального телескопа вместе с Н. Г. Пономаревым и изобретение менисковых систем Д. Д. Максутову дважды присуждалась Государственная премия.

В настоящее время советская оптико-механическая промышленность производит новые оригинальные приборы. К их числу относится, например, гигантский рефлектор диаметром 6 *м*. Над созданием такого прибора работают сейчас ученые, инженеры и рабочие.

2. СПЕЦИФИКА РАБОТЫ ТЕЛЕСКОПОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Рефракторы

Ахроматические объективы стали создавать в различных местах после того, как Л. Эйлер доказал неправильность взглядов Ньютона на невозможность исправления хроматической аберрации линзовых объективов. Например, Фраунгофер изготовил несколько объективов больших размеров.

Русские обсерватории немедленно их использовали.

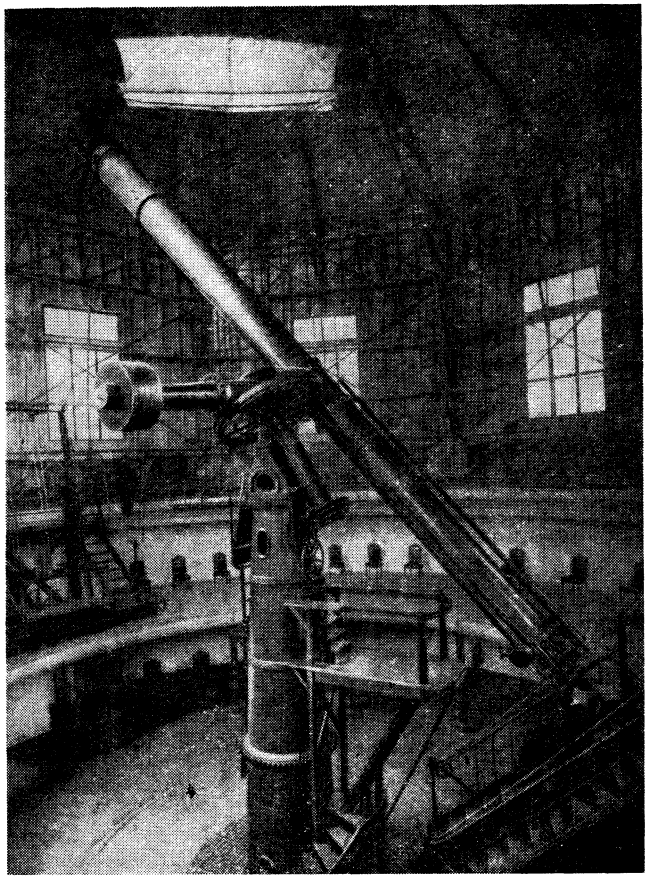


Рис. 32. Пулковский рефрактор (1885 г.) с объективом А. Кларка

В. Я. Струве, применив рефрактор с ахроматическим объективом диаметром 24,4 *см*, установленный в Юрьеве (Дерпте), одним из первых начал работы по определению параллаксов и расстояний до звезд и изучению двойных звезд. Впоследствии он продолжал их в Пулкове, будучи его директором, уже с помощью рефрактора Мерца — Малера с объективом $D = 38{,}5$ *см*, установленного там в 1839 г. и в течение 23 лет являвшегося одним из крупнейших в мире. Рефрактор системы Кларка диаметром 76 *см* (рис. 32), установлен-

ный в Пулкове в 80-х годах прошлого века, вновь оказался по размерам одним из самых больших в мире. Прибор имел большое фокусное расстояние, обеспечивающее получение изображений больших масштабов, высокие качества кронового и флинтового стекол и хорошо исправлял сферическую аберрацию. Благодаря этим качествам русские астрономы в период с 1880 по 1941 г. (в этом году труба рефрактора была варварски разрушена гитлеровскими войсками при обстреле Пулкова) провели с его помощью фундаментальные исследования движения в системах двойных звезд.

Академиком А. А. Белопольским на рефракторе была установлена коррекционная линза для фотографической ахроматизации инструмента (см. выше) и спектрограф и выполнены классические работы по спектроскопии звезд. В частности, он исследовал так называемые спектрально-двойные звезды, т. е. те двойные звезды, разделение которых не под силу телескопу при визуальном способе наблюдения; наличие у такой звезды невидимого яркого спутника обнаруживается с помощью получения ее спектра. Если мы имеем два светящихся объекта, представляющихся нам в виде одной звезды, но один из них движется по направлению к наблюдателю, а другой от него, то в спектре подобной звезды линии одинаковых химических элементов будут видны смещенными относительно их положения в спектре неподвижного источника света. Смещение происходит к красному концу спектра, если объект удаляется, и к голубому, если он приближается к наблюдателю.

Указанное явление было обнаружено А. А. Белопольским в спектре нескольких звезд. Из-за смещения в момент описанного выше движения двух звезд, представлявшихся в виде одной, все линии в спектре звезды казались раздвоенными. Когда же звезды занимали такое положение на орбитах, что они двигались перпендикулярно лучу зрения, в спектре звезды наблюдалась лишь одиночная усиленная линия. Австрийский физик Доплер (в применении к звуку) и вскоре за ним Физо (в применении к свету) теоретически, а А. А. Белопольский специальными измерениями, проведенными в Пулковской лаборатории, определили зависимость величины смещения линии в спектре от скорости движения объекта.

Впоследствии по способу Доплера — Физо были определены различные характеристики и величины орбит многих спектрально-двойных звезд.

В 1909 году Г. А. Тихов на том же рефракторе произвел исследования Марса.

Однако рефракторы, подобные пулковскому, достигли почти предела своих размеров из-за невозможности изготовления большего стеклянного объектива. Они страдают хроматизмом, ухудшающим их разрешающие способности, что особенно заметно на снимках планет.

Астрографы

Астрограф — это двойная или тройная труба, смонтированная на одной параллактической установке, одна из осей которой параллельна оси вращения Земли. Труба крепится на второй, перпендикулярной первой оси установки; вращая инструмент вокруг обеих осей, можно направлять его в любую точку неба. Фотографирование небесных объектов нередко продолжается часами, и при неподвижном инструменте наблюдаемые объекты, вследствие вращения Земли, уходят из поля зрения. Поэтому с первой осью соединяется часовой механизм, равномерно вращающий инструмент с востока на запад, благодаря чему фотографируемое светило остается в поле зрения инструмента. Так как при фотографировании необходимо, чтобы изображение объекта в продолжение всего времени съемки проектировалось точно в одно и то же место пластинки, одна из труб изготовляется ахроматизированной к визуальным лучам и снабжается окуляром с крестом нитей в поле зрения.

Оптические оси визуального и фотографических объективов устанавливаются параллельно, и поэтому наблюдатель, поставив в начале выдержки одну из звезд на крест нитей в поле зрения визуальной, или, как ее называют иначе, ведущей трубы, удерживает ее с помощью специальных микрометрических винтов, имеющихся в установке, в указанном положении в течение всего времени выдержки.

Примером оригинальной конструкции подобного телескопа может служить двойной короткофокусный астрограф (АКД) системы Н. Г. Пономарева (1941—1947 гг.), выпущенный советской оптической промышленностью (рис. 33). Он предназначался его автором в первую очередь для систематических повторных съемок неба, производимых с целью отыскания и изучения новых и переменных звезд, комет, а также для других фотографических работ. В частности, к такому астрографу в Пулкове приспособлена объек-

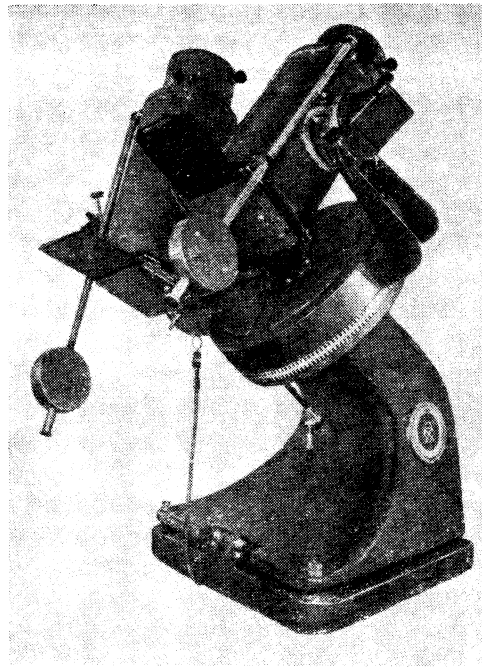


Рис. 33. Двойной короткофокусный астрограф АКД системы Н. Г. Пономарева

тивная призма нового типа, служащая для массового определения движения звезд по лучу зрения. Размеры пластинок и поля объективов позволяют в обеих камерах получать снимки углового размера $14° \times 20°$, а конструкция крепления камер на второй оси, так называемой оси склонения, дает возможность получать одновременно на приборе либо два тождественных снимка той же области неба (что удобно при отыскании новых объектов), либо, если повернуть одну из камер вокруг оси склонения, два снимка соседних участков неба.

Отражательные телескопы

Рассмотренные выше оптические инструменты, в большей или меньшей степени обладающие неустранимой хро-

матической аберрацией, вызывают систематические ошибки или приводят к потере проницающей способности инструмента, что требует иногда весьма длительной продолжительности фотографирования слабых объектов. Последнее относится к работе со щелевыми спектрофотографами, а первое — к фотографированию (с фильтрами и без фильтров) планет с целью изучения их природы. При работе со щелевым спектрографом, в котором фотографируемый объект виден на оптической оси прибора, зеркальные системы, лишенные хроматической аберрации, оказываются более выгодными, чем рефракторы.

В XVIII в. гигантские по тому времени телескопы-рефлекторы с тяжелыми металлическими зеркалами из специальных сплавов впервые стал строить В. Гершель. Его схема в принципе ничем не отличалась от схемы телескопа, построенного за 12 лет до него М. В. Ломоносовым в России.

В настоящее время изготовление бóльших, чем существующие, линзовых объективов по техническим условиям невозможно. Поэтому в центре внимания астрономов и оптиков вновь находится создание рефлекторов с наибольшим возможным входным зрачком.

Возникла необходимость в дальнейшем увеличения размеров главного зеркала телескопов. Поскольку сейчас зеркала делают стеклянными (с серебряным или алюминиевым покрытием), потребовалось начать изготовление огромных стеклянных блоков. К настоящему времени построены или строятся десятки телескопов с главным зеркалом размером более 1 *м*.

В 1919 г. американские оптики создали 2,5-метровый рефлектор с зеркалом из сплошного стекла для обсерватории на горе Вильсон в Калифорнии. Посредством этого рефлектора наблюдатели до последнего времени получали данные о слабейших небесных объектах. Однако этих данных оказалось недостаточно для разрешения многих проблем астрофизики, в том числе проблемы изучения туманностей, смещения к красному концу линий спектра и т. д.

Для этого был необходим телескоп значительно большего диаметра. Однако современная техника не располагала возможностью изготовления главного зеркала большого диаметра из сплошного стекла. Необходимо было найти новые пути. В 30-х годах XX в. правильное решение задачи дали советские ученые акад. И. В. Гребенщиков и

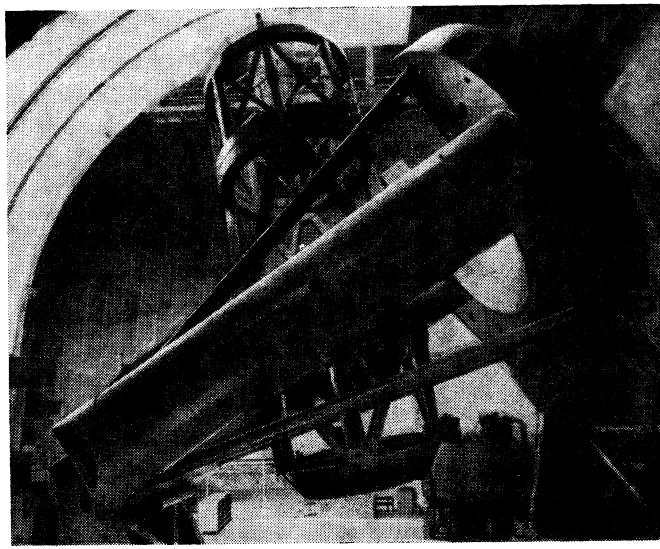


Рис. 34. Телескоп-рефлектор обсерватории на горе Паломар

Н. Г. Пономарев, предложившие применить в таких телескопах стеклянные зеркала ребристой структуры (по тыльной стороне), сваренные из отдельных элементов. В 1949 г. близкую идею осуществляют американские оптики, собравшие и опробовавшие новый гигантский телескоп с главным зеркалом ребристой, но не сваренной, а выплавленной структуры, диаметром 5 *м* (рис. 34).

При первом испытании он заснял объекты, которые в 4 раза слабее фотографируемых с 2,5-метровым телескопом, и позволил обнаружить островную вселенную, лежащую от Земли на расстоянии в миллиард световых лет. Однако полученные изображения не были вполне хорошими, чтобы уверенно отличить очень далекие островные вселенные от ближайших звезд. Улучшение оптики путем диафрагмирования краевой зоны зеркала имеет, как оказалось, решающее значение. Впоследствии зеркало телескопа было перешлифовано и дальнейшее испытание показало, что оно улучшилось. Ребристая структура, по-видимому, оправдывает себя.

В процессе работы над телескопом диаметром 2,6 *м* для

Крыма советские оптики применили метод придания зеркалу по тыльной стороне ячеистой структуры, которая, однако достигается не сваркой или выплавкой, а путем высверливания (для размещения механизмов разгрузки и снижения веса).

Как упоминалось в первой главе книги, более или менее анаберрационные системы двухзеркальных рефлекторов были рассчитаны Шварцшильдом, Риччи, Кретьеном, Максутовым и Куде. Наилучший из таких телескопов — телескоп Шварцшильда — оказался свободным от кривизны поля, но обладал астигматизмом.

Зеркально-линзовые системы

Необходимость увеличения размеров поля зеркальных оптических приборов при одновременном сохранении свойств ахроматизации привела к построению зеркально-линзовых систем. Одной из них, впервые вошедшей в астрономическую практику, явилась система Шмидта. При всех ее недостатках она обладает наилучшим полем и до настоящего времени широко используется.

В СССР в 1941 г. изобретены и созданы новые оригинальные менисковые телескопы системы Д. Д. Максутова. Самый большой из них с входным зрачком 70 *см*, построенный в Ленинграде, имеет очень удачную конструкцию, автором которой является Б. К. Иоаннисиани. Прибор работает на Абастуманской обсерватории. На Алма-Атинской обсерватории успешно работает аналогичный ($D = 50$ *см*) менисковый телескоп (рис. 35). Именно с этим инструментом были получены фотографии туманности Андромеды и многих других интересных объектов.

Однако построить телескопы системы Максутова и Шмидта с входными зрачками диаметром больше 1,4 *м* практически оказалось невозможным из-за необходимости установки в них огромных менисков и коррекционных пластинок из оптического стекла. Разработка конструкции зеркально-линзового телескопа, свободного от указанного ограничения, завершилась созданием в 1948 г. в СССР опытного образца такого прибора (АСИ-4). Его идея принадлежала Г. Г. Слюсареву, а конструктивное оформление — Б. К. Иоаннисиани.

Единственный экземпляр телескопа работал в Пулковской обсерватории (рис. 36). Это — бесщелевой

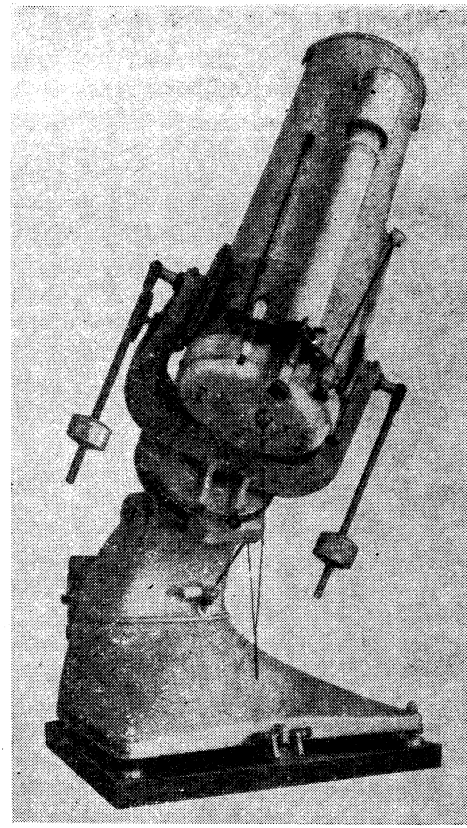


Рис. 35. Полуметровый менисковый телескоп АСИ-2 системы Д. Д. Максутова и конструкции Б. К. Иоаннисиани

спектрограф с входным зрачком размером 28 *см* и фокусом камеры 50 *см*. Главное сферическое зеркало его камеры имеет диаметр 32,5 *мм* и относительное отверстие 1 : 1,4, а зеркально-линзовая система, обращающая сходящийся пучок в примерно параллельный, вместе с оправой имеет поперечник 10 *см*. Размеры входного зрачка системы таковы, что виньетирование пучка на оси, равное 15%, дает потерю лишь 0,15 зв. вел.

Сферическая аберрация системы по исследованию А. В.

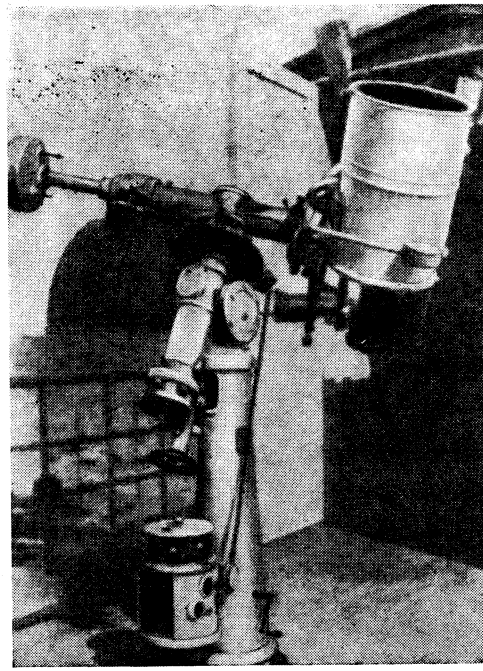


Рис. 36. Зеркально-линзовая камера АСИ-4 в Пулковской обсерватории

Маркова может быть охарактеризована технической постоянной 0,19 (по Гартману), что позволяет отнести этот фотообъектив к разряду хороших. Хроматическая аберрация камеры в 4 раза меньше, чем у цейссовского объектива «Тессар» равных размеров (рис. 37). Камера используется для фокальных снимков (фокус 15,03 *м*) туманностей с целью колориметрии и фотометрии последних. Она применяется систематически при фотографировании и фотометрировании лунных затмений, изучении поляризации Луны и малых планет и т. д. Длина всей камеры при фокусном расстоянии 1,5 *м*, составляет лишь 70 *см*, следовательно, прибор по величине много меньше других рефлекторов аналогичного диаметра. Поэтому он удобен, в частности, для экспедиционных работ.

Наличие внутри системы вторично суженного параллельного пучка позволило устанавливать в нем призмы прямого зрения с линейной дисперсией, составляющей 200 и 400 Å на 1 *мм* для области спектра с λ, равной 4360 Å. В

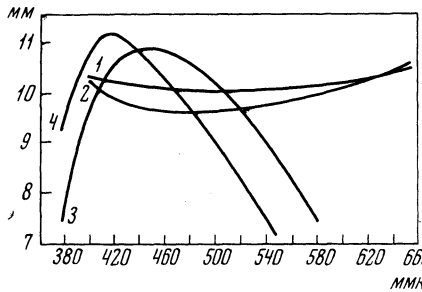


Рис. 37. Хроматические кривые астрографов: *1*— АСИ-4 (расчет), *2*—АСИ-4 (измерение, Пулково), *3*— Астро-Тессар (Симеиз), *4*— четырехлинзовый (Абастумани)

итоге использования прибора в Пулкове получено большое количество спектральных негативов для изучения переменных звезд и доказано существование звезд с массой, в 60 раз превышающей массу Солнца.

Специалисты-астрофизики считают, что данный бесщелевой спектрограф является наиболее эффективным из равных ему по силе.

Установки для изучения Солнца

Установки для исследования Солнца и его свойств как в обычное время, так и во время полных затмений отличаются от описанных выше. Огромная энергия, излучаемая светилом на Землю, требует прежде всего незначительной светосилы приборов.

Для изучения самого Солнца строят длиннофокусные, неподвижные телескопы с горизонтальным или вертикальным направлением главной оптической оси. Лучи Солнца попадают в объектив этого телескопа после отражения от двух плоских зеркал так называемой целостатной установки. Одно из зеркал с помощью часового механизма поворачивается вокруг оси, параллельной оси вращения Земли, чем достигается неподвижность изображения Солнца в фокусе прибора во все время наблюдения. Прибором такого типа является советский горизонтальный (так называемый малый) солнечный телескоп Н. Г. Пономарева.

Луч Солнца сначала попадает в нем на плоское зеркало, вращаемое посредством часового механизма в 2 раза медленней скорости вращения Земли вокруг оси, а затем отражается от него на плоское зеркало, стоящее на оптической оси параболического зеркала ($D = 0{,}4$ *м* и $F = 17$ *м*), которое может находиться в одном из двух положений. В первом положении оно посылает сходящийся пучок прямо в кассетное приспособление особого типа с автоматическим затвором впереди, позволяющим осуществлять выдержки до 0,001 *сек*. Во втором положении главное зеркало направляет пучок света в кассегреновское зеркало, удлиняющее фокусное расстояние телескопа, от которого свет отражается в другую кассету, что необходимо для фотографирования при фокусном расстоянии 60 *м*. Если параболическое зеркало находится в первом положении, то пучок света можно перехватить дополнительным плоским зеркалом и направить в приспособленный к инструменту спектрограф или спектрогелиокинематограф.

Этот телескоп еще в апреле 1941 г. был установлен в Пулкове Н. Г. Пономаревым, который весьма успешно фотографировал на нем солнечную грануляцию и получил несколько очень удачных снимков Луны. Разрушенный во время войны 1941—1945 гг., он был восстановлен по сохранившимся чертежам в 1949 г. (рис. 38) и сейчас вновь работает в Пулкове.

При экспедиционных наблюдениях полных солнечных затмений для исследований строения короны, а также протуберанцев (солнечных выступов) используются астрографы. Среди них особое значение имеют специальные затменные коронографы. За рубежом коронографы строились обычно в единичных экземплярах, по индивидуальным вкусам исследователей. Для наблюдения полного солнечного затмения 19 июня 1936 г. в СССР был поставлен вопрос о постройке пяти совершенно одинаковых коронографов для того, чтобы расположить их в разных частях полосы затмения и помимо обычных исследований яркости короны впервые получить возможность на основании промеров ее снимков судить о скорости смещения материи в короне и хромосфере.

Было решено построить коронограф с фокусным расстоянием 5 *м* и объективами диаметром 10 *см*. Объективы изготовлялись под руководством Д. Д. Максутова, а коронографы проектировались и осуществлялись Ленинградским

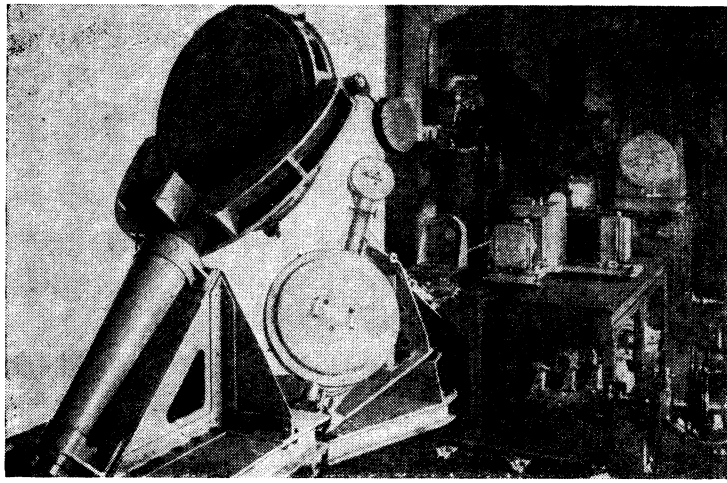


Рис. 38. Солнечный телескоп Н. Г. Пономарева в процессе изготовления

астрономическим институтом. В их разработке приняли участие Н. Г. Пономарев, Л. А. Сухарев и А. В. Марков. Приборы, испытанные сначала в Астрономическом институте, в дальнейшем успешно работали при наблюдениях солнечных затмений 1936, 1941 и 1945 гг.

По снимкам первого из затмений, сделанным с помощью четырех коронографов, Е. Я. Бугославская, С. К. Всехсвятский и А. Н. Дейч обнаружили большие скорости перемещения корональной материи.

Во время второго затмения М. С. Зельцер и А. В. Марков изучили струйчатое строение полярной хромосферы Солнца (рис. 39) и совместно с Е. Я. Бугославской установили непосредственный переход хромосферных истечений в струи короны, а также наличие быстрых движений хромосферных выступов. И лишь через три года аналогичное явление обнаружил, пользуясь так называемым внезатменным коронографом, американец Робертс. Следить за строением короны нужно также и вне затмений. Исследования показали, что ее строение определяется теми же активными областями Солнца, которые шлют на Землю потоки корпускул, влияющих на земную атмосферу.

Трудность внезатменных наблюдений короны заклю-

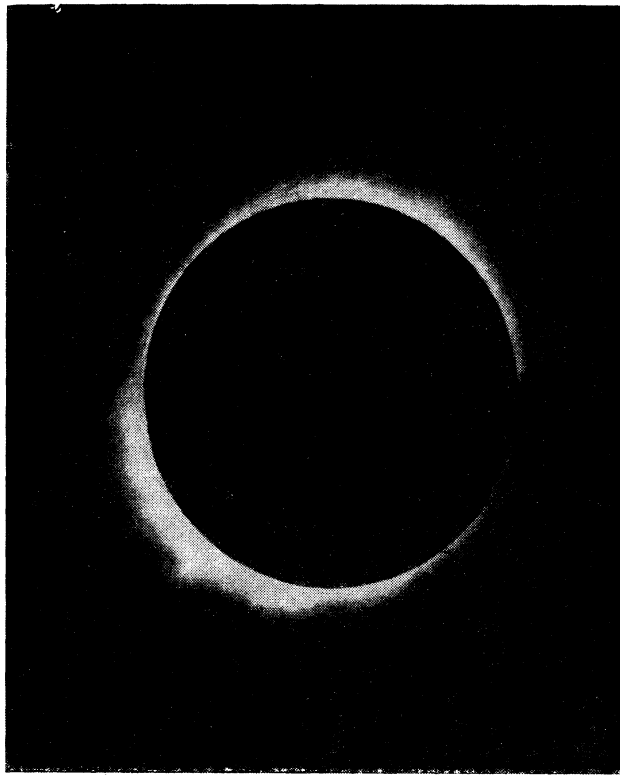


Рис. 39. Строение солнечной короны и полярной хромосферы. Фотография получена на советском стандартном коронографе Астрономического института АН СССР (полное солнечное затмение 21 сентября 1941 г., позитивный отпечаток)

чается в том, что яркость неба, окружающего Солнце, намного превышает яркость короны; она обусловливается рассеянием солнечного света в атмосфере и значительно уменьшается по мере увеличения высоты места наблюдения над уровнем моря.

Первые внезатменные наблюдения короны были выполнены Лио с помощью коронографа на высоте 2000 *м* над уровнем моря. Для того чтобы избежать вредного рассеяния света в трубе и объективе, Лио заменил обычный двойной ахроматический объектив простой линзой из бессвиль-

ного стекла, идеально отполированной. Кроме того, были приняты меры к удалению пыли из трубы. В фокальной плоскости линзы, на месте изображения Солнца, находился непрозрачный круглый экран, создававший в инструменте искусственное солнечное затмение, фотографируемое специальной камерой. Посредством такой установки Лио получил внезатменные снимки короны.

В СССР в последние годы внезатменный коронограф был установлен на горной станции ГАО АН СССР близ Кисловодска, затем на горной станции обсерватории АН КазССР близ Алма-Аты и в Верхних Саянах. В самое последнее время для горных станций ГАО АН СССР (Пулковской) близ Кисловодска и СибИЗМИР АН СССР (Иркутская область) построены самые большие и высококачественные коронографы в мире с параметрами объективов $D = 53{,}5$ *см*, $F = 8$ *м*. Они установлены на параллактической монтировке и имеют электрический часовой механизм. Наибольшие коронографы за рубежом, установленные в США (Клаймакс, Пик Сакраменто), имеют $D = 40$ *см*, $F = 7$ *м*.

Сравнительно недавно И. А. Прокофьева показала, что особая конструкция коронографа позволяет вести наблюдения эмиссионных корональных линий даже на небольшой высоте над уровнем моря, в частности в Пулкове, где был построен и успешно работает соответствующий прибор (а его модификация — в Абастуманской обсерватории).

Сейчас коронограф используется обычно в комбинации с интерференционно-поляризационным светофильтром (ИПФ), спектрографом, поляризатором и т. д. Применение в нем в качестве приемника излучения электронно-оптического преобразователя (ЭОП) позволило получить как инфракрасные снимки короны (А. А. Калиняк), так и ее спектр излучения (В. Г. Курт, М. Н. Гневышев, И. А. Прокофьева и другие астрономы СССР). Внезатменные наблюдения короны приняли систематический характер.

Выше мы упоминали о методике изучения солнечной хромосферы вне затмения. Хромосфера состоит из монохроматических излучений водорода, ионизированного кальция и некоторых других элементов. В начале XX в. за границей был построен специальный спектральный прибор, который в зависимости от того, каким методом (визуальным или фотографическим) производились наблюдения, назывался спектрогелиоскопом или спектрогелиографом.

Этот прибор представляет собой спектрограф особой конструкции с призмой или дифракционной решеткой. Его можно присоединять к телескопу или устанавливать неподвижно — горизонтально или вертикально. При этих условиях объектив, дающий на первой щели спектрогелиоскопа изображение Солнца, также устанавливается неподвижно. Лучи Солнца попадают в такой объектив, отражаясь от зеркала целостата, вращаемого посредством часового механизма. В фокальной плоскости камеры спектрогелиоскопа, где получается спектр Солнца, находится вторая щель, которая выделяет из спектра только одну линию, например линию H ионизированного кальция. Если мы приведем эту щель в быстрое движение в направлении дисперсии спектрографа, а за ней неподвижно укрепим окуляр или фотопластинку и заставим последние посредством какого-либо приспособления перемещаться по первой щели, синхронно с движением второй, то наблюдатель увидит в окуляр (а пластинка зафиксирует) изображение всего Солнца в свете одной монохроматической линии.

До Великой Октябрьской социалистической революции ни одного подобного прибора у нас не было. В 30-х годах, когда выявилась насущная необходимость в проведении систематических наблюдений за Солнцем для нужд народного хозяйства СССР, такие приборы были приобретены в Америке для Абастуманской, Крымской и Ташкентской обсерваторий. К тому же периоду относится и создание упомянутого выше советского спектрогелиоскопа, начатое в 1934 г. по инициативе Н. П. Барабашова и Н. Г. Пономарева. Так как оба участника работы имели значительный опыт в шлифовке зеркал и постройке приборов, то все части (зеркала, щели, движущийся механизм) изготовлялись в Харькове при их непосредственном участии. В 1935 г. в Харькове они закончили сборку первого советского спектрогелиоскопа. В 1938 г. он был превращен в спектрогелиограф.

Второй, более совершенный советский спектрогелиограф был построен на Крымской обсерватории проф. А. Б. Северным совместно с инженером-конструктором Г. А. Мониным. Этот прибор отличается от Харьковского синхронным движением призмы полного внутреннего отражения совместно с второй щелью, перемещающейся у первой. Последнее обстоятельство позволило получить более совершенные спектрогелиограммы.

Спектрогелиографы широко используются в астрономической практике, но они имеют и недостатки. С ними, например, невозможна одновременная съемка всей поверхности Солнца. Механические недостатки прибора вызывают искажение снимков.

Позднее для Крымской обсерватории под руководством А. Б. Северного и П. В. Добычина был построен большой оригинальный башенный солнечный телескоп, имеющий спектрографические и спектрогелиографические комбинации.

Способ получения монохроматического снимка Солнца в любом участке спектра стал возможным тогда, когда были созданы упоминавшиеся интерференционно-поляризационные узкополосные фильтры (ИПФ), принцип действия которых мы опишем ниже.

А. Б. Северный совместно с А. Б. Гильваргом изготовили и использовали в комбинации с внезатменным коронографом Крымской обсерватории при монохроматических снимках деталей Солнца интерференционный фильтр повышенного качества, пропускающий полосу шириной 1,8 Å (в последнее время — всего лишь 0,7 Å). Подобные фильтры, пропускающие полосы шириной 3 и 5 Å, существовали и за границей (Франция, США).

Интерференционные фильтры могут быть предварительно рассчитаны по положению полос пропускания на любую нужную область спектра. При той же ширине полосы пропускания они во много раз выгодней обычных фильтров.

Фильтр — это массивный блок, склеенный из нескольких пластин кварца или полевого шпата с прослойкой из соответственно ориентированных поляроидов и с дополнительным слабо поглощающим обыкновенным фильтром. Его устанавливают перед фокусом внезатменного коронографа. Одна пластина, изготовленная из двухкратнопреломляющего кварца или шпата, стоит между двумя поляроидами, причем от первого из них плоско поляризованный луч падает нормально грани пластины, вырезанной так, что ее грани параллельны главной оптической оси кристалла. Из-за различия показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей кристаллом или, другими словами, скоростей их распространения между лучами по выходе из пластины образуется разность фаз δ, являющаяся причиной возникновения вдоль спектра интерференционной картины. Разность фаз зависит от толщины пла-

стин следующим образом:

$$\delta = 2\pi \frac{nd}{\lambda},$$

где d — толщина, n — показатель преломления, λ — длина волны. Положение полосы пропускания определяется уравнением

$$\lambda = \frac{nd}{m},$$

где λ — целое число.

Отсюда следует, что одна пластина образует вдоль спектра несколько зон пропускания и ряд темных промежутков между ними. Если соединить в одном фильтре несколько прослоенных поляроидами кварцевых пластин, расположенных в порядке последовательного удвоения их толщины, то побочные максимумы пропускания в каждой из таких полос будут все более и более сужаться, а число их будет расти пропорционально толщине пластин. В результате совместного действия всех пластин через фильтр на нужную нам зону чувствительности фотослоя пройдет лишь 3 или 4 узких зоны пропускания.

В крымском приборе одна из них совпала с линией H_α водорода, а остальные были погашены действием дополнительного обычного светофильтра. Так как длина волны зоны пропускания зависит от температуры фильтра, а требовалось обеспечить совпадение ее с монохроматическим излучением линий водорода, фильтр был заключен в термостат. С этим фильтром были получены первые советские кинофильмы, позволившие А. Б. Северному сделать важные выводы о природе солнечных протуберанцев.

Опытный образец такого же, но еще более узкополосного фильтра, пропускающего лишь 0,5 Å, осуществлен С. Б. Иоффе под руководством академика В. П. Линника и сейчас используется при солнечных наблюдениях в Пулкове.

Применение широкополосных и просто интерференционных (типа Фабри — Перо) фильтров в Крыму без поляроидов при съемке туманностей позволило академику Г. А. Шайну и В. Ф. Газе получить в водородной линии снимки новых газовых туманностей, которые раньше не обнаруживались, благодаря перекрыванию их излучения фоном неба и излучением звезд, так как такой фильтр пропускал почти все монохроматическое излучение туманностей и гасил небо и звезды.

Астрофизическая измерительная аппаратура

Сбор материала в виде фотоснимков с помощью телескопов, а также непосредственные наблюдения — только первый этап исследования природы небесных тел. Вслед за этим необходимо возможно быстрее и точнее их измерить, определить мощность излучения, положение в пространстве и т. д. Для этих целей применяются специальные приборы: фотометры, предназначенные для промера яркостей и блеска светил, а также компараторы — измерительные машины для определения положения светил в пространстве по промерам фотоснимков. В результате методических работ, проведенных Ленинградским астрономическим институтом в 1930—1941 гг., в практику советской астрофизики были введены фотоэлектрический (В. Б. Никонов) и интерференционный (А. А. Калиняк и Л. А. Сухарев) методы, первые советские микрофотометры (А. В. Марков и В. Б. Никонов) для измерений яркости и блеска светил по их снимкам.

В 1935 г. В. Б. Никонов сконструировал для Абастуманской, Казанской и Московской обсерваторий первые советские электрофотометры — приборы для непосредственных промеров небесных объектов. В 1937—1947 гг. первые советские визуальные микрофотометры А. В. Маркова зарекомендовали себя на промерах негативов, полученных в физической лаборатории, а также снимков солнечной короны во время затмений 1941 и 1945 гг. Принцип действия вторых приборов можно уяснить из оптической схемы, изображенной на рис. 40.

Основной частью всякого визуального микрофотометра является кубик Люммера *Б*, пропускающий к глазу из двух перпендикулярных направлений два потока света, один из которых проходит сквозь измеряемый участок снимка небесного объекта, а второй — через фотометрический клин. Перемещая последний, измеритель уравнивает яркость двух полей кубика. Отсчеты клина показывают потемнение разных участков негатива и, следовательно, яркость небесных объектов. Иногда в качестве светоприемника в подобных приборах вместо глаза используется фотоэлемент. Есть еще объективные приборы конструкции В. Б. Никонова.

Измерение собственных движений звезд в пространстве, а также звездных параллаксов требует высокой точности

промера снимков — 0,1 *мк*, однако в заграничных приборах она доходила лишь до 1 *мк*. Перед Великой Отечественной войной ученику Н. Г. Пономарева Л. А. Сухареву, создавшему новый компаратор в Астрономическом институте, удалось достичь точности промера негатива 0,1 *мк*.

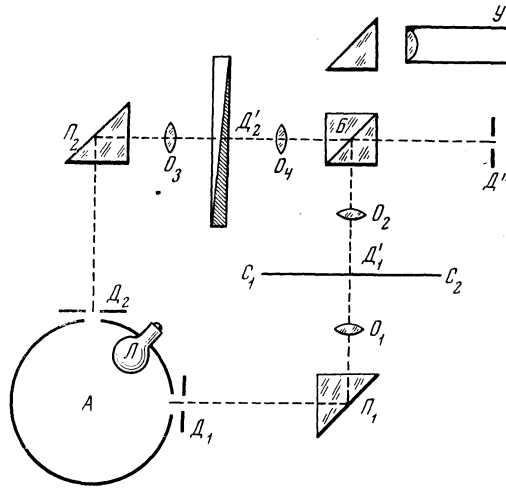


Рис. 40. Схема визуального микрофотометра А. В. Маркова для промера негативов

Развитие советской оптической промышленности привело в последние годы к созданию ряда оригинальных лабораторных приборов и телескопов. Наибольшим из них является отечественный 2,6-метровый отражательный телескоп ЗТШ имени акад. Г. А. Шайна, установленный в 1960 г. в Крымской обсерватории.

Таковы, в основном, итоги введения в астрофизику новых методов прикладной физической оптики. Астрофизика, возникнув в Советском Союзе немного более 30 лет назад, за время своего существования не только достигла уровня зарубежной науки, имеющей за собой более чем столетнюю историю и обладающей пока еще более мощными телескопами, но во многих разделах и опередила ее.

Современные ее достижения стали возможны лишь благодаря заботе Советского правительства и деятельности тех энтузиастов, которые много сил отдали развитию отечественного астрономического приборостроения.

Глава третья

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПОВ

1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ И ЕЕ ПРИЕМНИКИ

Как показывает название телескопа (от греч.— наблюдаю вдаль), этот прибор предназначен для рассматривания весьма удаленных предметов. Он «приближает» эти предметы в сотни и тысячи раз. Однако необходимо несколько обобщить и уточнить это определение, относящееся ко временам Галилея и Декарта.

Прежде всего следует отметить, что глаз вовсе не является единственно возможным приемником световой энергии, испускаемой небесными светилами и проходящей через телескоп. Такими приемниками могут быть фотографическая пластинка (щель спектрографа), катод электронного преобразователя, фотоэлемент, болометр, термопара и др. Лучистая энергия, испускаемая светилами, не ограничивается видимым участком спектра. Она может принадлежать к ультрафиолетовой или инфракрасной области спектра, если только материалы, принятые для изготовления оптических деталей, пропускают или отражают лучи этих частей спектра.

Попадая в телескоп от небесных объектов, лучистая энергия подвергается в нем сложному процессу перераспределения, после чего поступает в приемник — глаз, фоточувствительный слой пластинки или другое принимающее устройство — в измененном виде. Основное изменение заключается в том, что на приемнике создается «изображение» предмета, увеличенное во много раз и, кроме того, более или менее искаженное по сравнению с ним. Подобие между рассматриваемым в телескоп объектом и его изображением тем хуже, чем меньше угловой размер наблюдаемого пред-

мета. Например, изображения звезд, представляющихся невооруженному глазу точками, видны через астрономические объективы, по крайней мере теоретически, в виде ярких пятен, окруженных кольцами; на практике эта картина еще больше искажается дефектами изготовления системы и атмосферными помехами. Когда в трубу рассматривают большие предметы — Солнце, Луну, звездные кучи, туманности, эти искажения, как правило, мало заметны, до тех пор, пока наблюдатель ограничивается обозрением общей картины; но как только он приступает к детальному изучению какого-нибудь малого объекта, они сказываются тем сильнее, чем меньше детали. Создаются своего рода сложные оптические обманы, иногда вводящие в заблуждение астрономов. Например, при прохождении Меркурия через диск Солнца, в момент, когда планета как бы погружается в него, на темном диске Меркурия вследствие дифракции появляется яркая точка, производящая впечатление вулкана. В картине получивших широкую известность «каналов» на Марсе большую роль, несомненно, сыграли диффракционные явления. По-видимому, ими объясняется «раздвоение» каналов, наблюдавшееся и описанное известным астрономом Скиапарелли в 1882 г.

Отступление от подобия между изображением и предметом вызывается различными причинами: дифракцией света, проходящего через оптическую систему, аберрацией последней, несовершенством стекла линз и формы поверхностей, атмосферными помехами, вызванными движением воздушных слоев, отделяющих оптический инструмент от наблюдаемого объекта, и т. д. Если перечисленные явления вообще вредны для любого оптического прибора, то они особенно вредны для астрономических инструментов, к которым предъявляются наиболее высокие требования по сравнению с другими оптическими системами.

Естественно, что развитие астрономической оптики шло по пути преодоления всех указанных препятствий.

Теория изображения в оптических системах, если принимать во внимание и явления дифракции, представляет некоторые трудности, не столько по существу явления, сколько вследствие громоздкости математического аппарата, необходимого для его исследования. Однако и без сложных математических формул, на основании принципов распределения энергии световых волн, нетрудно получить достаточно ясное представление о дифракции и о том, как

связаны основные свойства оптических систем, например разрешающая сила, с характеристиками этих систем.

Дифракция и все ее последствия, обнаруживаемые в изображениях предметов, обладающих мелкой структурой, легко объясняются представлениями волновой оптики, высказанными впервые Гюйгенсом в конце XVII столетия и дополненными Френелем (1818 г.). В дальнейшем эти

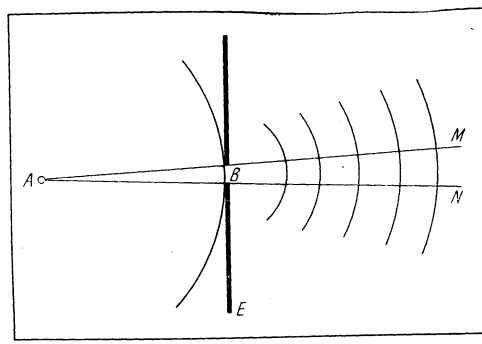


Рис. 41. Колебания, вызываемые одним центром

представления развивались, уточнялись, усложнялись, но существенного ничего не добавилось к тому, что было известно раньше.

Всякий источник света излучает энергию, распространяющуюся в виде волн. Всем хорошо известна аналогия с волнами на поверхности воды, вызываемыми падением камня. Но интерес представляют не те явления, которые вызывает изолированный импульс, а картина, поддерживаемая в течение продолжительного времени постоянным источником правильных колебаний. Таким источником может послужить камертон с прикрепленным к одной из его ножек острием, опущенным на поверхность воды.

Вокруг источника распространяются сферические волны. Если на пути распространения волн поставить экран (рис. 41), в котором пробито небольшое отверстие B, то из этого отверстия, как из нового центра, начинают распространяться такие же волны, как те, которые исходят от источника колебаний, но с более слабой амплитудой. Экран с двумя отверстиями (рис. 42) дает начало двум

новым системам волн, при встрече которых происходит так называемая интерференция, или наложение волн. В тех местах, где встречающиеся волны имеют противоположные направления движения и гребни одной системы волн совпадают с впадинами другой, поверхность воды остается неподвижной (узлы), а в местах, где совпадают гребни двух

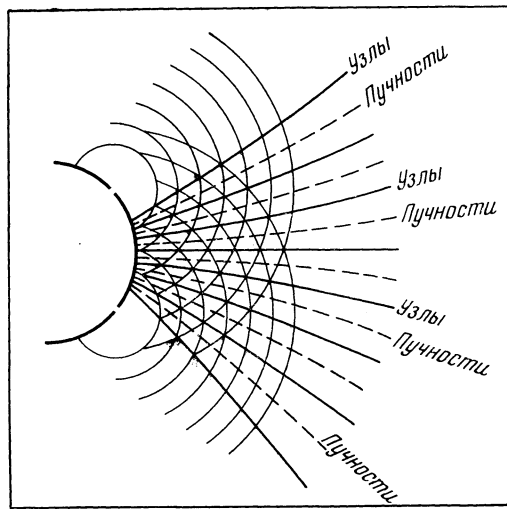


Рис. 42. Интерференция колебаний, вызываемых двумя центрами

систем или впадин, получаются «пучности». В результате интерференции создается особая картина, характерная для волновых процессов.

Дифракцию можно рассматривать как обобщенную интерференцию, при которой все элементы экрана представляют собой отверстия. Конечно, в таком представлении есть что-то парадоксальное: экран, состоящий из сплошных отверстий, является уже не экраном, а сплошной волной.

Однако этот принцип наложения элементарных волн является совершенно естественным дополнением к волновой теории Гюйгенса. Он был сформулирован Френелем и придал волновой теории силу, которой она была лишена без него. Это добавление Френеля позволило вести точные расчеты распределения интенсивности световой энергии при

любой форме поверхности волны и любых ее границах. Гюйгенс сам не обратил внимания на указанное свойство волновой теории, он слишком мало знал о только что открытом явлении дифракции. Даже о более простой интерференции в то время не подозревали, и лишь Эйлер в 1746 г. впервые создал представление «о световом луче как своего

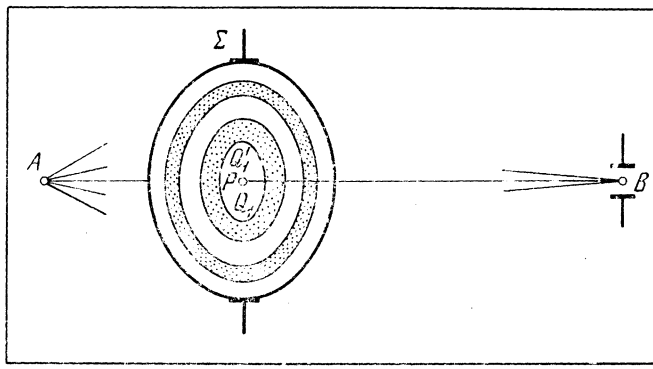


Рис. 43. Прямолинейное распространение света

рода конической струне, по которой распространяются продольные световые колебания»[1]. Отсюда вытекает возможность и необходимость интерференции.

Довольно простые соображения, принадлежащие Френелю, показывают, что когда точечный источник колебаний A излучает волны через большое круглое отверстие Σ в экране (рис. 43), то колебания, соответствующие зонам, окружающим прямую AB, соединяющую источник и центр зрачка глаза B, все взаимно уничтожаются, за исключением колебаний $Q_1 P Q_1'$, которые распространяются в непосредственной близости к этой прямой. Последние действуют согласованно, так как разность хода между всеми лучами, принадлежащими этой области, незначительна, и соответствующая разность фаз не превосходит полволны. Диаметр $Q_1 Q'_1$ зоны в экране, через которую проходят эти лучи, настолько мал, что создается впечатление прямолинейного распространения света. Таким образом, прямо-

[1] С. И. Вавилов. Микроструктура света. М., Изд-во АН СССР, 1950.

линейное распространение световой энергии является следствием интерференции пучков, и оно осуществляется только приближенно; чем длина волны меньше, тем «прямолинейнее» распространяется свет. Звуковые волны в тысячу раз больше, чем световые. Поэтому дифракционные явления значительно ярче выражаются при распространении звука, чем и объясняется свойство звука «обходить» препятствия, стоящие на его пути.

Однако, поскольку длина волны световых лучей не превышает полмикрона, отклонение от прямолинейности в световых лучах в обычных условиях не наблюдается. Только тонкие и сравнительно сложные опыты позволяют его обнаружить. Не удивительно поэтому, что прямолинейность распространения лучей многие столетия не вызывала никаких сомнений.

2. РАЗВИТИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Положение о прямолинейности лучей, законы отражения и преломления (даже в приближенной формулировке, известной еще во времена Птоломея), позволили создать новую науку математического характера, получившую название геометрической оптики. Первые шаги были проложены Кеплером, в «Диоптрике» которого приведены некоторые положения оптики параксиальных лучей (лежащих в непосредственной близости от оси и не требующих точной формулировки закона преломления) и описаны основные свойства линз, зрительных труб и микроскопов. Декарт, независимо от Снелля открывший точный закон преломления, указал, какую форму должны иметь преломляющие поверхности оптических систем, дал расчет и схему оформления астрономической трубы и микроскопа и даже подробно разработал специальный станок для шлифовки гиперболических поверхностей. Однако он не принимал во внимание явление дисперсии, которое в то время еще не было известно, а также и дифракционные явления. Естественно поэтому, что Декарт переоценивал возможности своих труб и предполагал, что на планетах и звездах можно будет наблюдать такие же предметы, как и на Земле, если только найдется опытный мастер, который сумеет построить трубу достаточно совершенную. Заботясь об удобстве наблюдателя, работающего с помощью астрономической трубы, обладающей необходимым для такой цели уве-

личением, он, по-видимому, первый предложил применять целый набор искателей с различными увеличениями.

Ньютон, открывший явление дисперсии света, указал на преимущественное значение, которое имеют хроматические аберрации среди всех остальных; в частности, он показал, что плохое качество изображений, даваемых астрономическими трубами, обусловлено хроматической аберрацией, а не сферической, как думал Декарт. Однако построив неправильную теорию, связывающую преломление с дисперсией, он пришел к неверному выводу о невозможности исправления хроматической аберрации в оптических системах, состоящих из линз. Ему принадлежат первые формулы, связывающие положения предмета и его изображения в параксиальной области и приближенное выражение сферической аберрации для сферической преломляющей поверхности. Им описано явление астигматизма тонких пучков.

Русский академик Эйлер в своих «Письмах» доказал (1760 г.) неправильность ньютоновского утверждения о невозможности исправления хроматической аберрации в линзовых системах и показал, как можно рассчитать ахроматический объектив микроскопа. Его коллега и последователь Эпинус изготовил такой объектив в 1784 г. Несколько раньше первые ахроматические объективы астрономических труб были построены Доллондом чисто эмпирическим путем.

В середине XIX столетия была решена полностью задача определения аберраций центрированных систем, а в дальнейшем методика расчета оптических систем стала развиваться на основании теории аберраций. Лишь в XX столетии эта методика постепенно вытеснила грубо эмпирические приемы изготовления оптических систем на основании многочисленных проб.

Но уже ранее было известно, что качество изображения оптической системы не определяется целиком ее аберрациями. Оказалось, что в идеально исправленных системах, например параболических рефлекторах, не удается получить точечных изображений звезд. Причина заключалась в явлениях дифракции. Эри (1834 г.) показал, как должно выглядеть изображение звезды в идеальном безаберрационном инструменте, если выполнить вычисления согласно принципу Гюйгенса — Френеля. Результаты вычислений совпадают с результатами непосредственных наблюдений

и измерений, как показали опыты Фуко для зрительных труб.

Дифракционные явления значительно усложняют изображение наблюдаемых объектов и затрудняют его истолкование. Однако в ряде случаев они сами могут быть использованы в специальных приборах для решений такой задачи, как определение угловых диаметров звезд и малых планет (Майкельсон).

3. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Законы параксиальной оптики

Как мы видели выше, в первом приближении можно считать, что в однородных средах свет распространяется прямолинейно; при преломлении на границе двух сред с показателями преломления n и n' положение преломленного луча определяется следующим образом:

1) преломленный луч ML' (рис. 44) находится в одной плоскости с падающим лучом LM и с нормалью MN к преломляющей поверхности в точке падения;

2) углы i и i', образуемые с нормалью падающим и преломленным лучами, связаны соотношением $n \sin i = n' \sin i'$.

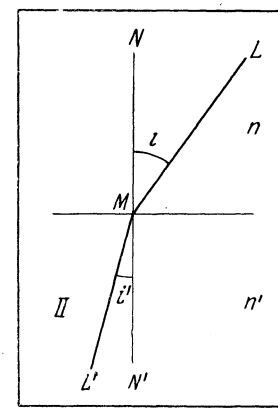


Рис. 44. Преломление луча

Эти законы выполняются также и при отражении лучей, но в этом случае мы полагаем $n' = -n$, тогда из второго закона вытекает $i' = -i$.

Все свойства оптических систем, относящиеся к воспроизведению изображений, являются следствием этих законов. Подавляющее большинство оптических систем обладает осью симметрии. Околоосевая область, окружающая ось симметрии в непосредственной близости от нее, называется параксиальной. Для этой области можно считать, что лучи образуют с осью и с нормалями к преломляющим или отражающим поверхностям бесконечно малые углы. Определение изображений бесконечно малых предметов

производится с большой простотой, потому что в этой области любая точка изображается строго в виде точки и отсутствуют аберрации. Следует, однако, помнить, что здесь рассматриваются только бесконечно малые предметы, расположенные бесконечно близко к оси. Такими бесконечно малыми являются зрачки и апертуры пучков: весь этот параксиальный мир, в сущности, является лишь предельным, не имеющим реального значения, точно так же, как

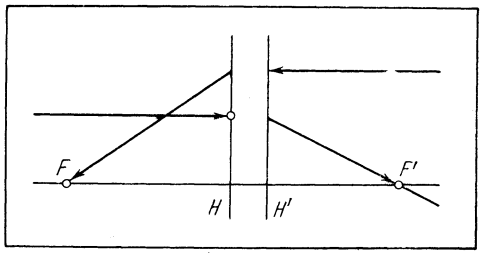


Рис. 45. Кардинальные точки оптической системы

геометрическая оптика является предельным случаем по отношению к более общей физической оптике и получается из нее переходом к бесконечно малым длинам волн.

Определение положения изображений точек, образуемых центрированными оптическими системами, т. е. системами, центры поверхностей которых лежат на одной оси, производится с помощью простых построений, вытекающих из свойств этих систем. Основные свойства сформулированы ниже.

Всякая центрированная оптическая система обладает четырьмя особыми точками, называемыми кардинальными, с помощью которых легко построить изображение отдельных точек предмета. Этими кардинальными точками служат: два фокуса — передний F (рис. 45), в котором пересекаются лучи, падающие справа на систему параллельно оси, и задний F', в котором пересекаются лучи, падающие аналогично слева,— и две главные точки H и H' пересечения с осью двух так называемых главных плоскостей. Эти плоскости обладают тем свойством, что они взаимно сопряжены (т. е. каждая точка, принадлежащая одной из этих плоскостей, изображается на другой) и что каждый отрезок, лежащий в одной из главных плоскостей, изображается на другой отрезком такой же величины и направления,

или, говоря короче, главные плоскости взаимно изображают друг друга в натуральную величину.

Обозначим через x расстояние от переднего фокуса до плоскости предмета OO_1 (рис. 46) и через x' — расстояние от заднего фокуса до плоскости изображения $O'O'_1$, считая

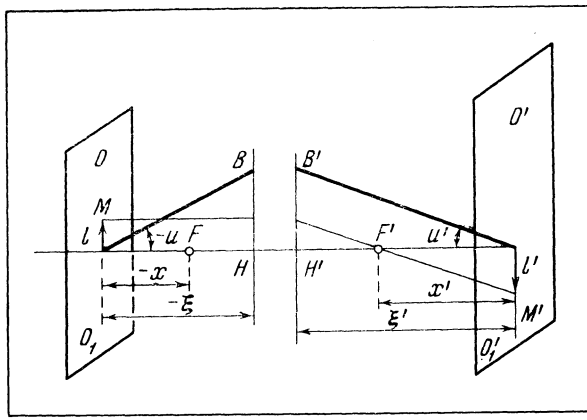


Рис. 46. Координаты луча, проходящего через оптическую систему

положительными x и x', если плоскости расположены правее соответствующих фокусов. Между величинами x, x', $f = \overline{HF}$, $f' = \overline{H'F'}$ существует соотношение

$$xx' = ff' ,$$

причем фокусные расстояния f, f' считаются положительными, когда фокус F (или F') лежит правее соответствующей главной плоскости H (или H').

Если ввести величины ξ и ξ' — расстояния от главных плоскостей до плоскостей предмета и изображения (см. рис. 46), то из предыдущей формулы получим:

$$\frac{f}{\xi} + \frac{f'}{\xi'} = 1 .$$

Пусть l и l'—ординаты сопряженных точек M и M' (положительные, если точки M и M' расположены выше оси). Обозначая отношение l'/l через β (поперечное увеличение),

имеем:

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}.$$

Если углы, образуемые лучом OB с осью до и после преломления, обозначить через u и u' (считая их положительными, когда луч направляется вниз), то между величинами u, l, f, u', l', f' существует соотношение Лагранжа — Гельмгольца:

$$ulf = -u'l'f'.$$

Можно показать, что имеет место также второе соотношение Лагранжа — Гельмгольца:

$$nul = n'u'l'.$$

Последняя формула верна для любой среды оптической системы и является выражением того, что поток световой энергии, проходящий через оптическую систему, остается постоянным. Действительно, этот поток для параксиальной области выражается формулой

$$\Phi = \pi \overline{B} n^2 u^2 l^2,$$

где $\overline{B}$ — некоторый коэффициент, пропорциональный яркости, который можно было бы назвать приведенной яркостью, не меняющейся вдоль всего луча и связанной с яркостью B соотношением $\overline{B} n^2 = B$.

Легко заметить, что выражение nul (так называемый инвариант Лагранжа) пропорционально корню квадратному из потока Φ.

Отметим еще, что для астрономических оптических систем обычно первой и последней средой является воздух, так что $n = n' = 1$ и тогда две последние формулы принимают более простой вид.

Все сказанное относительно потока верно лишь в предположении, что оптическая система не вызывает потерь проходящей через нее световой энергии.

Если обозначить через β угловое увеличение u'/u, то из соотношения Лагранжа — Гельмгольца можно вывести следующую формулу:

$$\beta\gamma = \frac{n}{n'}.$$

Кроме того, из сопоставления двух предыдущих формул вытекает $\frac{f}{n} = -\frac{f'}{n'}$. Если $n = n'$, то $f = -f'$. Если точка M находится на бесконечности и направление на нее образует с осью угол u, то расстояние $l' = F'M'$ от изображения до оси равно (рис. 47) $l' = fu$.

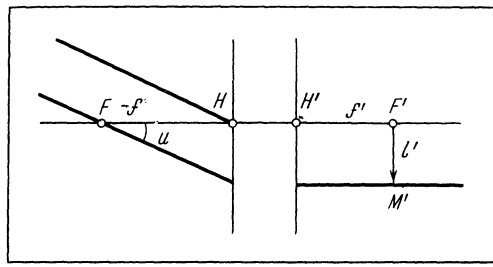


Рис. 47. Схема получения изображения бесконечно удаленного предмета

Эта формула особенно важна для астрономических оптических систем, так как наблюдаемые через них объекты являются практически бесконечно удаленными.

Наиболее важным частным случаем оптической системы является линза. Формулы, связывающие положения предмета и изображения, даваемого линзой, упрощаются, когда толщина линзы по сравнению с ее фокусным расстоянием настолько незначительна, что можно считать ее равной нулю. Впрочем, основные формулы для «бесконечно тонких линз» пригодны и для «толстых», если только учесть положение главных плоскостей в линзах. Если обозначим через s расстояние от линзы до предмета, через s'— расстояние от линзы до изображения, считая положительными эти расстояния, когда предмет (или изображение) лежит правее линзы, то величины s, s' и заднее фокусное расстояние f' будут связаны соотношением

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}.$$

Это соотношение непосредственно вытекает из формулы $\frac{f}{\xi} + \frac{f'}{\xi} = 1$ и верно не только для простой линзы, но и для группы линз, расположенных на близком расстоянии. Тогда

за f' следует принимать фокусное расстояние всей системы линз.

Фокусное расстояние бесконечно тонкой линзы определяется через радиусы кривизны r_1 и r_2 и показатель преломления n линзы по формуле

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right),$$

где r_1 и r_2 положительны, если центры кривизны расположены вправо от линзы.

Зрачки оптических систем

Качество оптических систем, как будет показано дальше, их разрешающая сила, поток, выходящий из системы, аберрации, глубина резко изображаемого пространства и т. д. во многом зависят от величины угла, образуемого крайним лучом, проходящим через систему, с осью последней. Этот угол называется апертурным. Определением его величины, т. е. угла поля зрения, а также вопросом виньетирования (диафрагмирования) световых пучков занимается теория так называемых зрачков оптических систем.

Световые пучки, проходящие через оптические системы, ограничиваются либо оправами линз или зеркал, либо специальными диафрагмами постоянного или переменного диаметра, как это бывает, например, в фотографических объективах. Та из оправ или диафрагм, которая ограничивает световой пучок, исходящий из точки предмета, находящейся на оси системы (а в случае бесконечно удаленных точек следует рассматривать пучок лучей, падающих параллельно оси системы), называется действующей, или апертурной диафрагмой. Чаще всего в астрономических приборах действующей диафрагмой является оправа первой линзы или зеркала. В этом случае эта оправа служит так называемым входным зрачком. В общем же случае входным зрачком называется изображение действующей диафрагмы всеми линзами или другими оптическими деталями (зеркалами, призмами), находящимися впереди. Таким образом, входной зрачок играет роль действительного или мнимого отверстия (диафрагмы), ограничивающего апертуру падающего на оптическую систему пучка.

Относительным отверстием объектива называют отношение диаметра входного зрачка объектива к его фокусному

расстоянию. Можно показать, что половина относительного отверстия в хорошо исправленных оптических системах как раз равна синусу апертурного угла в пространстве изображений, даваемых объективом, если только предмет находится на бесконечности.

Одной из самых существенных характеристик оптических систем является их линейное, или угловое, поле зрения. Для астрономических систем важно поле зрения, определяемое тем углом, внутри которого любой небесный объект изображается с достаточной резкостью, без заметного уменьшения интенсивности светового пучка по сравнению с интенсивностью его на оптической оси системы. Угол поля зрения зависит, с одной стороны, от размеров и взаимного расположения зрачков оптической системы, т. е. размеров линз и зеркал, и с другой стороны — от исправления аберраций наклонных пучков.

Аберрации центрированных оптических систем

Положение, на которое опирается один из законов оптики параксиальных лучей, а именно: равенство нулю или, точнее, бесконечно малым величинам углов, образуемых лучами с нормалями к преломляющим и отражающим поверхностям и с осью оптической системы, в реальных системах не осуществляется. Лучи, исходящие из точки в пространстве предметов, после прохождения через оптическую систему не пересекаются в точке, а образуют некоторую фигуру рассеяния. Изображения линий перестают представлять собой линии, а изображения предметов не резки и не подобны предметам. Задача вычислителя оптических систем состоит в том, чтобы довести величину кружков рассеяния, вызываемых аберрациями оптических систем, до таких величин, которые делали бы их незаметными для наблюдателя.

Пусть OO' (рис. 48) — центрированная оптическая система, A — точка-предмет на расстоянии $l=HA$ от оси. Назовем меридиональной плоскость, содержащую ось системы и точку A, и экваториальной — плоскость, содержащую ось и перпендикулярную меридиональной. Луч AB, не лежащий в меридиональной плоскости, определяется в пространстве предметов координатами m и M точки пересечения B с вспомогательной плоскостью, которая может быть произвольной, но обычно принимается за плоскость входного

зрачка, изображающую в пространстве предметов апертурную диафрагму оптической системы.

После прохождения через оптическую систему OO' луч пересекает плоскость выходного зрачка $P'P_1'$ (рис. 48), сопряженную с плоскостью PP_1, в точке B', а плоскость изображений Q в точке A'. Обозначим через A_0' «идеальное» изображение точки A, т. е. точку пересечения воображаемых параксиальных лучей, исходящих из точки A; другими словами

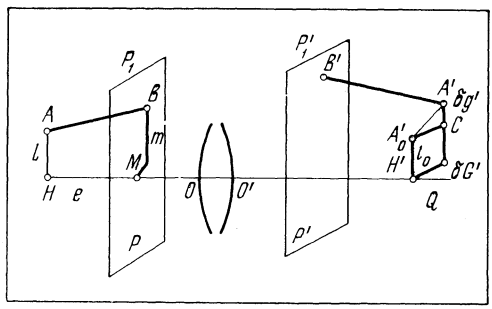


Рис. 48. Схема аберраций центрированной оптической системы

будем считать, что $H'A_0' = l_0' = \beta l$, где β — поперечное увеличение системы. Отрезок $A_0'A'$ представляет собой поперечную аберрацию луча AB. Проекции $CA' = \delta g'$ и $A_0'C = \delta G'$ этой аберрации на меридиональную и экваториальную плоскости называются меридиональной и сагиттальной составляющими аберрации.

Эти составляющие $\delta g'$ и $\delta G'$ суть функции от координат, определяющих луч, т. е. l, m, M. Эти три величины обычно малы по сравнению с расстоянием e от плоскости предмета до плоскости входного зрачка, так что отношения $w = l/e$, $\omega = m/e$ и $\Omega = M/e$ малы.

Отметим, что отношение $w = l/e$ представляет собой тангенс угла, образуемого с осью лучом, идущим от наблюдаемого объекта, иначе называемым полевым углом. Угол поля зрения — это удвоенное значение наибольшего возможного отношения $2w$.

Отношения $\omega = m/e$ и $\Omega = M/e$ связаны с апертурой системы в пространстве предметов. Если диаметр входного

зрачка равен $2m_1$, то $\omega_1 = m_1/e$ называется апертурным углом системы.

Величины $\delta g'$ и $\delta G'$ могут быть разложены в ряд по степеням малых величин w, ω и Ω и, как показывает теория, принимают вид: 1) $\delta g' = A\omega(\omega^2 + \Omega^2) + B(3\omega^2 + \Omega^2)w + (3C + D)\omega w^2 + Ew^3 +$ члены 5-го, 7-го порядка; 2) $\delta G' = A\Omega(\omega^2 + \Omega^2) + 2B\omega\Omega\omega + (C + D)\Omega\omega^2 +$ члены 5-го, 7-го порядка. Вместо апертурных углов ω и Ω, относящихся к пространству предметов, можно ввести апертурные углы ω' и Ω' в пространстве изображений. Вид формул для $\delta g'$ и $\delta G'$ останется прежним, но коэффициенты A, B ... будут иметь другие численные значения.

В первом приближении можно пренебречь членами 5-го порядка и более высокими в разложении этих функций. Пять коэффициентов A, B, C, D, E, входящих в выражения для обоих составляющих, обусловливают наличие пяти аберраций: A — сферической аберрации, B — комы, C — астигматизма, D — кривизны, E — дисторсии.

Сферическая аберрация при отсутствии других аберраций вызывает появление круглого ореола вокруг изображения точки с быстро уменьшающейся к краям яркостью. Она усиливает дифракционные кольца, которые при ее отсутствии оставались бы незаметными. Все эти явления уменьшают контрастность изображения и разрешающую силу оптической системы, как мы увидим дальше. Сферическая аберрация не зависит от угла поля w и поэтому постоянна по всему полю. В частности, она наблюдается и на оси оптического инструмента и этим отличается от всех остальных аберраций монохроматических лучей, которые в центре поля отсутствуют.

Если повернуть трубу таким образом, чтобы наблюдаемый предмет оказался в центре (угол w равен нулю), все аберрации, за исключением сферической, не зависящей от w, обращаются в нуль. Поэтому сферическую аберрацию необходимо исправить при расчете оптической системы.

На рис. 49 изображен ход лучей, выходящих из оптической системы, обладающей сферической аберрацией. Здесь OO' — оптическая система, PP' — плоскость изображения в параксиальной области; P_1P_1' — плоскость «наименьшего сечения», т. е. плоскость, в которой кружок рассеяния, изображающий точку-объект, имеет наименьшие размеры.

Кома пропорциональна первой степени полевого угла и второй степени апертурных углов. При круглом входном

зрачке кома вызывает появление около изображения точки кометообразного хвоста, яркость которого быстро уменьшается от острия к концу хвоста (рис. 50). При изменении знака у коэффициента комы пятно рассеяния не меняет формы, а только направление острия. Кома среди всех аберраций особенно вредна вследствие той асимметрии, которую

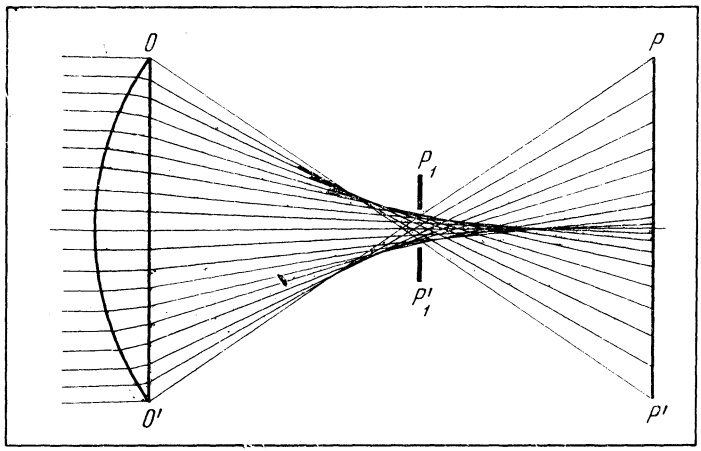


Рис. 49. Ход лучей при сферической аберрации

она создает в изображениях звезд и которая мешает найти точное расположение изображения звезды и приводит к ошибкам при определении координат. Кома в центре поля отсутствует, но так как она пропорциональна первой степени угла поля, то появляется в непосредственной близости от оси, например, в параболических рефлекторах. Особенно она велика в том случае, когда при значительном относительном отверстии ее специально не исправляли.

Астигматизм пропорционален второй степени угла поля и первой степени апертурного. Он проявляется в том, что пучок лучей, выходящих из системы, сходится не в точку, а стягивается дважды вдоль коротких прямых (фокальных) линий AA_1 и BB_1, перпендикулярных главному лучу пучка SS_1, и взаимно одна другой (рис. 51). В фокальной плоскости объектива вследствие астигматизма изображение точки представляется в виде эллипса маленьких раз-

меров равномерной яркости, длинная ось которого, лежащая в меридиональной плоскости, в три раза длиннее малой оси.

На рис. 51 изображены сечения астигматического пучка (верхняя часть рисунка) различными плоскостями, параллельными плоскости изображения. Этот рисунок показывает, как меняется фигура рассеяния при изменении плоскости установки.

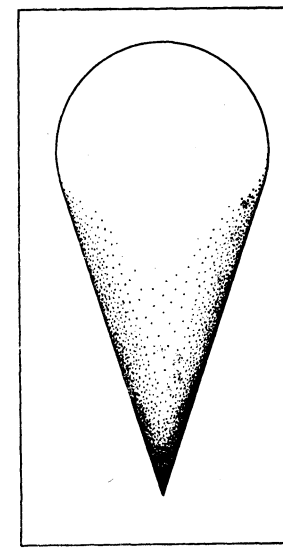


Рис. 50. Пятно рассеяния, вызываемое комой

Умеренный астигматизм безвреден для целей астрометрии, так как симметричность и равномерность пятна позволяют легко определить положение его центра с такой же точностью, как при полном отсутствии астигматизма. Однако он значительно ухудшает различаемость структуры наблюдаемых объектов и вследствие этого уменьшает разрешающую силу оптической системы. К счастью, астигматизм начинает обнаруживаться не сразу около оси системы, и его устранение необходимо только в тех случаях, когда требуется сфотографировать большой участок неба. В визуальных астрономических системах нет надобности в устранении астигматизма.

Кривизна поля, как и астигматизм, пропорциональна второй степени угла поля и первой степени апертурного. Но коэффициент кривизны поля входит в выражения для $\delta g'$ и $\delta G'$ с одинаковым значением 1, в отличие от астигматизма, где в выражении для $\delta g'$ фигурирует множитель 3. Поэтому пятно рассеяния, вызываемое кривизной, имеет вид окружности. Диаметр пятна можно изменять в зависимости от положения плоскости установки и довести его до нуля. Геометрическое место элементов поверхности, на котором точки предмета видны точками изображения, представляет собой сферическую поверхность, т. е. изображение плоскости является частью сферы. Поэтому рассматриваемой аберрации дано название кривизны поля. Этим свойством кривизна поля отличается от астигматизма, при котором

ни на какой поверхности нельзя получить резкого изображения плоского предмета.

Наличие двух аберраций одновременно — астигматизма и кривизны — вызывает появление кружков рассеяния эллиптического вида с различными значениями отношения длины осей (в зависимости от коэффициентов C и D). Для кривизны поля, как и для любой комбинации ее и астигматизма,

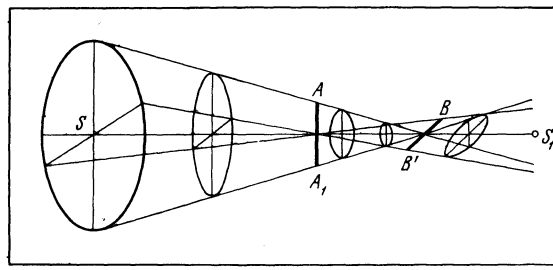


Рис. 51. Сечение астигматического пучка параллельными плоскостями

можно повторить все, что было изложено о вреде астигматизма. Но в отличие от него влияние кривизны можно устранить съемкой изображения не на плоскую, а искривленную соответственно радиусу кривизны поверхности изображения пластинку. Иначе говоря, если сферическая аберрация, кома и астигматизм объектива исправлены, то на сферических пластинках правильно подобранной кривизны можно получать вполне резкие изображения, как, например, в зеркально-линзовых системах Шмидта.

Дисторсия пропорциональна третьей степени угла поля и не зависит от апертурного. Из этого вытекает, что система, обладающая дисторсией, дает вполне резкое изображение точки. Зависимость величины $\delta g'$ исключительно от w означает, что это изображение расположено не там, где следовало бы по правилам параксиальной оптики. Чем дальше точка-объект находится от оси, тем больше расхождение между ее истинным изображением и «идеальным» положением. Так как между $\delta g'$ и w существует зависимость третьего порядка, то предмет и его изображение не имеют подобия (оно имело бы место, если бы $\delta g'$ зависело от w в первой степени). Квадрат с центром на оси изобража-

ется так, как показано на рис. 52. Если коэффициент дисторсии E положительный, увеличение на конце диагонали больше, чем в середине катетов; это так называемая подушкообразная дисторсия. Если коэффициент E отрицательный, дисторсия имеет бочкообразный характер.

Дисторсия является существенным недостатком при астрометрических работах, так как искажает истинное положение звезды, изображенной астрономическим прибором. Внесение соответствующих поправок на нее в некоторых случаях представляет неудобство, поэтому желательно исправление дисторсии в оптических системах, предназначенных для астрометрических целей.

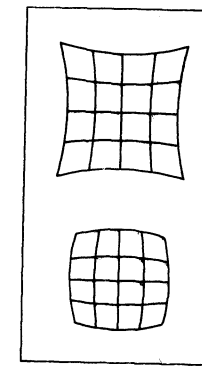


Рис. 52. Два вида дисторсии

Хроматические аберрации. Мы рассматривали выше аберрации монохроматического пучка лучей, относящихся к одной определенной длине волны. Но громадное большинство небесных объектов излучает свет широкого диапазона длин волн. Как известно, показатель преломления оптического стекла и других прозрачных материалов изменяется в зависимости от длины волны, вызывая в свою очередь изменение оптических свойств системы: фокусного расстояния, положения изображения, а также аберраций. Бывает, что аберрации оптической системы, исправленные для зеленых лучей, остаются чрезмерно велики для красных и синих. Хроматические аберрации можно разбить на две группы: первая относится к параксиальной области, вторая представляет собой хроматические разности тех или других аберраций. Например, хроматическая разность сферических аберраций обусловливается тем, что коэффициент A сферической аберрации меняется вместе с длиной волны.

В астрономических объективах первая группа наиболее важная. Она состоит из двух аберраций, соответствующих двум координатам изображения точки — по абсциссе и ординате. Аберрация, отсчитываемая вдоль оси абсцисс, называется хроматической аберрацией положения. Она происходит вследствие того, что абсцисса плоскости изображения зависит от длины волны. Вторая аберрация, связанная

с ординатой l предмета (или l' изображения), называется хроматической аберрацией увеличения и обусловливается тем, что поперечное увеличение β представляет собой функцию от показателя преломления.

Хроматические аберрации принято представлять в виде разности двух однотипных величин, например расстояний от последней поверхности системы до плоскости изображения, относящихся к двум определенным длинам волны. Обычно для визуальных систем берут длину волн, соответствующую красной линии C водорода ($\lambda_C = 656{,}1$ *ммк*) и фиолетовой линии F водорода ($\lambda_F = 486{,}1$ *ммк*). Хроматическая аберрация фотографических объективов определяется для других длин волн, причем выбор зависит от назначения объектива.

Хроматические аберрации, особенно аберрация положения, наиболее вредны в астрономических объективах с большими фокусными расстояниями. Расчет показывает, что простая бесконечно тонкая стеклянная линза с фокусным расстоянием f', показатель преломления для средней длины волны которой равен n, а дисперсия, т. е. разность показателей для указанных длин волн $n_F - n_C = \Delta n$, имеет хроматическую аберрацию положения бесконечно удаленного предмета

$$\Delta s' = s'_F - s'_C = -\frac{f'}{\nu},$$

где

$$\nu = \frac{n-1}{n_F - n_C} = \frac{n-1}{\Delta n}.$$

Показатель преломления n принято брать для длины волны $\lambda = 589{,}3$ *ммк* (желтая линия D натрия), однако максимум чувствительности глаза соответствует длине волны 555 *ммк*.

Для различных сортов оптического стекла величина ν меняется в пределах от 70 до 28. Для наиболее употребительного стекла крона К8 величина ν равна 64. Таким образом, хроматическая аберрация положения для астрономического объектива, состоящего из простой линзы, равна одной шестидесятой части его фокусного расстояния. Например, при фокусном расстоянии 1 *м* она составит 15 *мм*. Если принять, что диаметр линзы $D = 40$ *мм*, то поперечная аберрация AA', равная $\frac{f'}{\nu} \cdot \frac{D}{f'} = \frac{D}{\nu}$, будет $\frac{15}{2} \cdot \frac{40}{1000} = 0{,}3$ *мм* в наилучшей плоскости установки P_2 (рис. 53), лежащей посредине между фокусами лучей C и F. Такой кружок

виден в окуляре с фокусным расстоянием 10 *мм*, дающим общее увеличение 100, под углом 0,3/10·3440′ дуги, т. е. около 1°40′ (величина огромная). Однако надо учесть, что лучи *C* и *F* вызывают на сетчатке ощущение в 3—4 раза

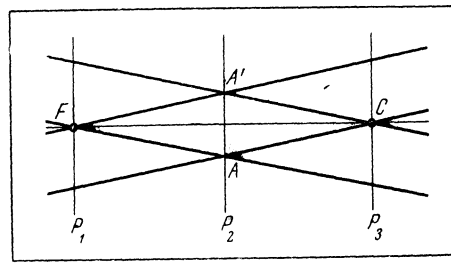


Рис. 53. Схема образования кружка рассеяния от хроматической аберрации

слабее, чем зеленые лучи, фокус которых совпадает с плоскостью пересечения лучей *C* и *F*. Поэтому действие хроматической аберрации не может быть определено только одним указанным углом. Опыт показывает, что глаз не замечает дефекта хроматизма до тех пор, пока угловая аберрация не достигнет значения 4—5′. В нашем случае аберрация в 20 раз больше этой пороговой величины.

Хроматическая аберрация $\Delta s'$ объектива из двух линз, находящихся на бесконечно близком расстоянии друг от друга, равна

$$\Delta s' = -F^2\left(\frac{1}{f_1'\nu_1} + \frac{1}{f_2'\nu_2}\right),$$

где F — фокусное расстояние всего объектива,
f_1' и f_2' — фокусные расстояния первой и второй линз,
ν_1 и ν_2 — коэффициенты дисперсии двух линз.

Применяя два сорта стекла с различными значениями дисперсии, можно добиться равенства нулю величины $\Delta s'$. Чем больше отличаются коэффициенты дисперсии, тем меньше оптические силы двух линз, из которых составлен объектив, и тем больше может быть его относительное отверстие. Поэтому заводы оптического стекла стремятся разрабатывать сорта стекол с возможно бо́льшим ν (кроны) и с возможно меньшим ν (флинты). Объективы, рассчитанные таким обра-

зом, что величина $\Delta s'$ равна нулю, называются ахроматическими.

Однако ахроматические объективы не вполне свободны от хроматической аберрации положения. Если лучи для длин волн 486 *ммк* и 656 *ммк* пересекаются в одной точке, из этого не вытекает, что лучи, соответствующие другим длинам волн, пересекают ось в той же точке.

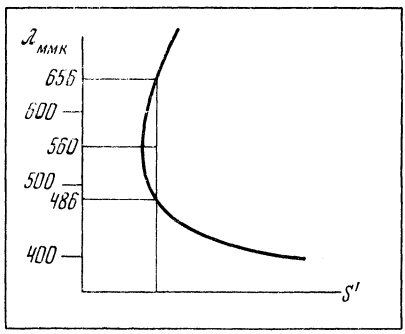


Рис. 54. Кривая вторичного спектра

Вычисления и измерения показывают, что кривая зависимости величины s' от длины волны λ имеет вид, представленный на рис. 54. Лучи фиолетовые и красные пересекают ось дальше, желтые и зеленые — ближе к объективу. Наилучшее изображение получается около минимума кривой, для длины волны 560 *ммк* (зеленая область спектра). Явление, иллюстрируемое кривой рисунка, называется вторичным спектром и обусловливается тем, что частные относительные дисперсии кронов и флинтов (т. е. отношения $P = \frac{n_p - n_e}{n_F - n_C}$, где e соответствует зеленой линии ртути) не равны. Оказывается, что, как бы ни комбинировали пары стекол из громадного списка изготавливаемых в настоящее время всеми заводами оптического стекла, величина вторичного спектра, характеризуемого величиной $\frac{s'_F - s'_D}{f'}$ при условии $s'_F = s'_C$, является постоянной и равной $^1/_{1700}$.

Например, объектив большого рефрактора Пулковской обсерватории с фокусным расстоянием 14 *м* имеет вторичный спектр $\frac{14\,000}{1700} = 8{,}3$ *мм*. Это создает в наилучшей фокальной плоскости F_e (рис. 55) кружок, определяемый величиной вторичного спектра, умноженной на относительное отверстие $2\omega' = \frac{D}{F}$, где D — диаметр входного зрачка объектива. При-

нимая $D = 80$ *см*, имеем для величины кружка $8{,}3 \times 80/1400 = 0{,}48$ *мм*. Впрочем, как и в случае простой линзы, нужно помнить, что величиной этого кружка рассеяния нельзя определить ощущения хроматической аберрации, так как яркость пучка, создаваемого лучами C и F, во много раз слабее, чем яркость центральной части пучка, где лучи значительно плотнее сконцентрированы, и, кроме того, глаз более чувствителен к ним. Все же вторичный спектр больших рефракторов превращает изображения ярких звезд в красивые отливающие всеми цветами радуги подобия драгоценных камней, исключающие всякую возможность точно измерять положения изображений.

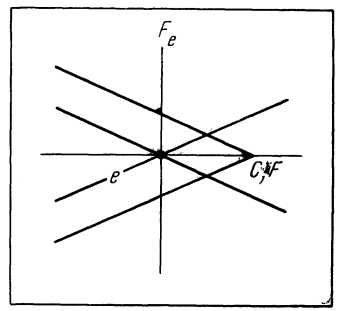


Рис. 55. Схема образования кружка рассеяния при наличии вторичного спектра

К вопросу о вторичном спектре мы вернемся ниже.

Второй из хроматических аберраций параксиальной области является хроматическая аберрация увеличений. Чтобы легче представить себе эту аберрацию, предположим, что хроматическая аберрация положения исправлена и что плоскости изображения для лучей C и F совпадают. Тем не менее лучи цвета C и F, излучаемые некоторой точкой A (рис. 56), лежащей на расстоянии l от оси, пересекают

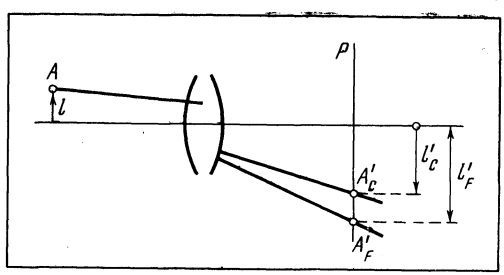


Рис. 56. Схема образования хроматической разности увеличений

плоскость изображения P' в различных точках A'_C и A'_F, находящихся на различных расстояниях l'_C и l'_F от оси. Отношение $\frac{l'_F - l'_C}{l'}$ определяет величину хроматической аберрации увеличений. Она зависит от величины l. Исправление этой аберрации особо важно для объективов, предназначенных для фотографии.

Хроматические аберрации второй группы, т. е. хроматические разности сферической аберрации, комы, астигматизма и т. д., играют второстепенную роль в большинстве оптических систем для астрономии, за исключением, пожалуй, некоторых зеркально-линзовых объективов. Поэтому мы не будем здесь на них останавливаться, так же как мы не останавливаемся на аберрациях монохроматических лучей высших порядков. Конечно, с этими аберрациями приходится считаться при расчете, но теоретическое изучение их представляет громадные затруднения, поскольку не существует сколько-нибудь законченных формул, выражающих зависимость этих аберраций от конструктивных элементов оптических систем.

Аберрации спектральных приборов. Особую категорию представляют оптические системы, образующие спектры звезд и других небесных объектов. Наличие диспергирующей призмы или дифракционной решетки лишает всю оптическую систему в целом своего основного свойства — симметричности около оси. В одном случае это свойство не нарушается, когда на призму или решетку падают лишь строго параллельные пучки со всех точек исследуемого объекта. На практике этого можно добиться, если призма стоит впереди объектива, и то о полной симметрии можно говорить только условно, так как дисперсия света нарушает ее.

Обычно пучки, падающие на призму, лишь приближенно параллельны, и это вызывает появление новых аберраций, тем больше искажающих спектр, чем больше отступление от параллельности. Причина этих искажений состоит в том, что сходящийся в точку (гомоцентрический) пучок после преломления на поверхностях призмы или отражения от решетки перестает быть гомоцентрическим. Появляются все аберрации монохроматических пучков и в первую очередь кома, первая из аберраций, вызываемых уходом светящейся точки от оптической оси системы (напомним, что кома пропорциональна первой степени угла поля). По этой же

причине при децентрировке оптической системы прежде всего появляется кома.

Принимая значительные размеры вследствие большого преломляющего угла призмы, она не может быть ничем компенсирована, так как появляется уже в центре поля зрения. Мы дальше увидим, что это явление может быть использовано для получения спектра с минимальными потерями.

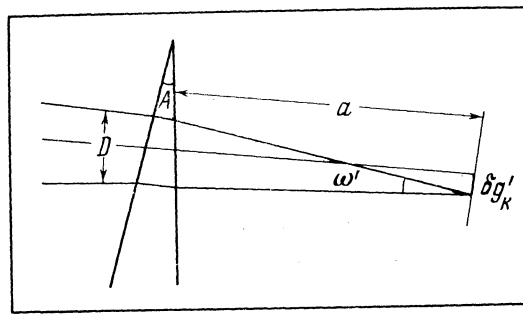


Рис. 57. Схема возникновения комы, вызванной клином в сходящемся пучке лучей

Влияние призмы на качество изображения тем сильнее, чем больше апертура сходящегося пучка, чем больше угол A у вершины и чем больше диаметр действующей части призмы.

Кома $\delta g'$ в меридиональном сечении, где она достигает максимального размера, определяется формулой:

$$\delta g' = \frac{3}{4}\frac{n^2-1}{n} AD\omega',$$

где D — высота рабочей части пучка (рис. 57).

Но даже незначительная сходимость пучка, определяемая углом ω', может вызывать заметную кому при большом угле A и больших размерах призмы. Кроме того, присутствие диспергирующей призмы, находящейся в почти параллельных пучках (т. е. в пучках, параллельность которых в параксиальной области соблюдается, а нарушается лишь аберрациями пучков конечной ширины), может вызвать в спектре ряд аберраций вследствие того, что призма или решетка нарушает компенсацию аберраций системы, предшествующей и следующей за параллельным ходом пучков. Это явление особенно сказывается в бесщелевых

спектрографах, у которых впереди оптической системы не стоит диспергирующая призма. Все существующие в настоящее время бесщелевые спектрографы (за исключением тех, в которых использована объективная призма) имеют небольшое поле, не превышающее 10′ дуги.

Аналогично действуют дифракционные решетки. Нарушение симметрии, вызываемое ими, обусловливается тем, что углы, образуемые пучком и нормалью к решетке, до и после преломления или отражения неодинаковы.

Таким образом, необходимо следить за тем, чтобы на диспергирующие элементы оптической системы, предназначенной для образования спектров, падали строго параллельные пучки не только в параксиальной области, но также и в области конечных апертур и углов поля зрения.

4. ДИФРАКЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ТОЧКИ

Как мы видели выше, геометрическая оптика дает только первое приближение к определению изображения светящейся точки, или, точнее, она описывает картину изображений, которые мы получили бы для бесконечно малых длин волн. Как ни мала длина волны видимого света (она заключается в пределах 0,4—0,8 *ммк*), ее влияние на изображение, даваемое оптическими системами, весьма ощутимо, и как раз оно ставит предел возможности различения мелких структур и деталей.

В геометрической оптике принято считать, что лучи распространяются самостоятельно и независимо друг от друга; волновая теория Гюйгенса и Френеля опирается на предположение о сложении импульсов с учетом разности фаз между ними. Если рассматривать несколько элементов волновой поверхности как самостоятельно светящиеся, то надо предполагать, что импульсы исходят от каждого элемента по различным направлениям. Возьмем некоторую точку P, для которой надо определить освещенность. Все импульсы достигают ее, но не одновременно, так как расстояния от нее разные. Разность фаз равна произведению разности путей от элементов до точки P на величину $2\pi/\lambda$. Если два импульса, идущие из двух элементов M и M_1, имеющих одну и ту же площадь, отличаются по фазе на $k\pi$ (т. е. если разность путей $MP - M_1P$ равна нечетному числу полуволн), эти импульсы уничтожают друг друга; если разность фаз составляет целое число π, импульсы склады-

ваются. В общем случае они складываются по правилам векторов, как силы, действующие на одну и ту же материальную точку.

Предположим, что на объектив, полностью исправленный в отношении сферической и хроматической аберраций, падает гомоцентрический или параллельный пучок лучей. Другими словами, на объектив падает сферическая или, в частном случае, плоская волна. Так как объектив

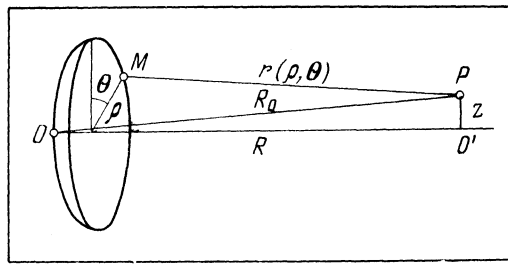


Рис. 58. Схема к определению расстояния элемента волновой поверхности до точки P плоскости изображения

исправлен в отношении аберраций, из него выходит сферическая волна с центром в изображении точки. Распределение освещенности в плоскости изображений можно получить следующим образом.

Рассмотрим некоторую точку P (рис. 58) на весьма малом расстоянии z от оси OO'. Чтобы определить амплитуду колебаний в этой точке, находим сперва разность фаз колебаний, исходящих из различных элементов поверхности волны, по отношению к фазе центрального элемента O.

Пусть r — расстояние от элемента M, определяемого полярными координатами ρ и θ, до точки P. Это расстояние, как показывает вычисление, связано с координатами ρ и θ формулой $r = R_0 + \frac{\rho z}{R}\cos\theta$. Искомая разность фаз $\Delta\varphi$ равна разности оптических путей, т. е. $\frac{\rho z}{R}\cos\theta$, умноженной на отношение $\frac{2\pi}{\lambda}$, где λ — длина волны. Таким образом,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{\rho z}{R}\cos\theta.$$

Сложение всех импульсов, вызываемых всеми элементами поверхности волны, приводит к следующей формуле для освещенности E в точке P:

$$E = \frac{4J_1^2(\eta)}{\eta^2},$$

где J_1 — функция Бесселя первого порядка. Величина η определяется формулой

$$\eta = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{z\rho_k}{R} = \frac{2\pi}{\lambda} z \sin\omega',$$

где ρ_k — радиус выходного зрачка объектива; R — расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости изображения; ω' — апертурный угол в пространстве изображений. Множитель 4 вставлен с тем, чтобы при $\eta = 0$ освещенность E равнялась единице. Функция E от η изображена на рис. 59.

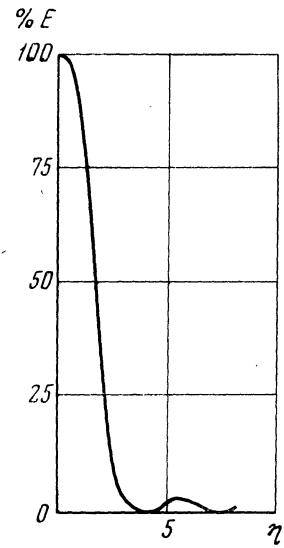


Рис. 59. Кривая распределения освещенности в поперечнике изображения точки безаберрационной системой вследствие дифракции

Из-за симметрии картины около оси изображение точки представляет собой круглое светлое пятно, с быстро уменьшающейся от центра к краям яркостью, окруженное попеременно светлыми и темными кольцами. Яркость светлых колец убывает все медленнее и медленнее. Яркость первого максимума в 60 раз меньше, чем яркость центра пятна, яркость второго — в 250 раз и т. д. Расчет показывает, что в центральном кольце концентрируется 84% всей энергии волны; в первом светлом кольце 7%, во втором 3% и т. д.

Практически можно считаться только с центральным пятном. В обычных условиях наблюдения звезд дифракционные кольца не видны, даже первое — этому препятствуют атмосферные помехи.

Влияние аберраций на дифракционное изображение точки. Метод расчета распределения энергии в дифракци-

онном кружке при отсутствии аберраций может быть применен и в том случае, когда выходящая из системы волна не сферическая, а деформированная. Если известна деформация волны, т. е. волновая аберрация N, то нужно прибавить ее к разности хода $\frac{\rho}{R} z \cos\theta$ и проделать то же сложение импульсов, как в предыдущем случае. Громоздкость

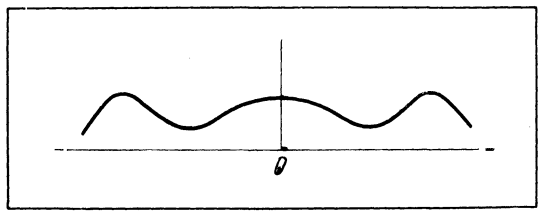


Рис. 60. Кривая распределения освещенности в поперечнике изображения точки в присутствии значительной сферической аберрации с учетом дифракции

вычислений увеличивается, и картина распределения энергии становится весьма сложной. Лишь в небольшом числе простых случаев вычисления были проведены до конца и привели к следующим выводам.

Небольшая сферическая аберрация вызывает уменьшение яркости центра пятна, но форма кривой (см. рис. 59) мало меняется, т. е. максимумы и минимумы остаются на своих местах; при этом яркость первого, второго и т. д. колец растет за счет яркости пятна. Это значит, что дифракционные кольца по яркости становятся сравнимыми с центральным пятном, диаметр пятна рассеяния может значительно расти.

Если сферическая аберрация велика, картина становится еще более неблагоприятной: темные кольца пропадают, кривая теряет свой максимум в центре, крайние кольца ярче центральных (рис. 60). В результате этих изменений качество изображения ухудшается, так как изображение точки увеличивается по своим размерам. Вычисления показывают, что распределение энергии по пятну рассеяния, найденное путем чисто геометрических изображений, т. е. без учета дифракции, очень сильно отличается от истинного распределения, определяемого на основании принци-

па Гюйгенса — Френеля, т. е. дифракционной теории, если аберрации малы. Но по мере того как размеры пятна рассеяния, вызываемого аберрациями, растут, оба указанных способа вычисления приводят к все более близким результатам, которые при больших аберрациях практически совпадают. Это положение почти очевидно из соображений здравого смысла, однако, несмотря на ряд попыток, доказать его со всей строгостью еще не удалось.

Когда рассматриваются оптические системы, обладающие аберрациями, значительно превосходящими по размерам диаметр дифракционного центрального кружка, например фотографические объективы для астрономических камер, можно совсем не принимать во внимание дифракционных явлений и рассчитывать распределение яркостей на основании чисто геометрических представлений.

5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОНКИХ СТРУКТУР

Каким бы увеличением ни обладала оптическая система (а его можно без труда довести до нескольких тысяч и десятков тысяч раз), она не может соответственно ему улучшать различимость деталей изображения. Астрономы неоднократно исследовали вопрос об оптимальном увеличении, при котором астрономический прибор давал бы наилучшее изображение, содержащее как можно больше подробностей рассматриваемого объекта, не вызванных, однако, каким-нибудь оптическим обманом. Результат этих исследований сводится к тому, что наиболее выгодные увеличения для визуальных наблюдений при больших диаметрах объективов или зеркал (порядка 1 *м*) колеблются в пределах 300—1000 и зависят от множества обстоятельств — состояния атмосферы, диаметра объектива, характера наблюдаемого объекта (звезда, планета, туманность, звездные скопления и т. д.), качества изображения, даваемого объективом в лабораторных условиях, и т. д. Решающее значение имеет обычно диаметр объектива, а это указывает на то, что предел разрешений ставит дифракция света.

Понятие разрешающей силы очень условно. После Рэлея его понимают следующим образом.

Рассмотрим изображение двух звезд одинаковой величины, т. е. вызывающих одинаковую освещенность на земле, разделенных небольшим угловым расстоянием. Вслед-

ствие явлений дифракции и других причин, которые могут видоизменить картину распределения освещенности, на приемник энергии, будь то сетчатка глаза или светочувствительный слой фотографической пластинки, накладываются рядом два пятна более или менее сложной структуры, например, структуры, определяемой кривой (см.

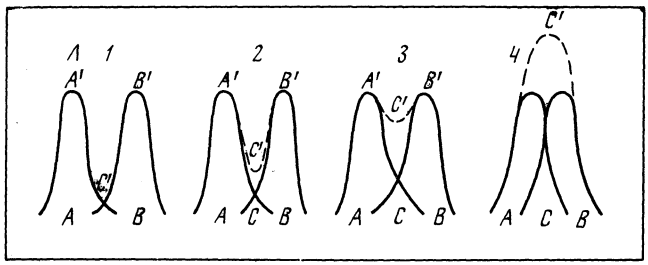


Рис. 61. Схема к объяснению понятия разрешающей силы

рис. 59) для дифракционного изображения точки, даваемого идеальным инструментом. Наблюдаемые звезды испускают свет независимо друг от друга или, как принято говорить, некогерентно. При этом освещенности, вызываемые обоими источниками света, складываются арифметически.

По мере того как изображения звезд приближаются друг к другу, общая картина распределения изменяется (рис. 61). В случае *1* и *2* наблюдатель отчетливо различает две звезды, в случае *3* он сомневается, в случае *4* он отчетливо видит лишь одну звезду: оба изображения слились в одно. Опыт показывает, что глаз разделяет две точки, если между максимумами, соответствующими картине сложения освещенностей, имеется провал, величина которого не менее 20% значения максимумов. Это так называемый критерий Рэлея, который иногда формулируют так: можно различить две звезды, если центральный максимум одной совпадает с первым минимумом другой. Эквивалентность обоих формулировок вытекает из свойств кривой, изображенной на рис. 59.

На основе этого критерия находят точное выражение для разрешающей силы астрономического объектива. Кривая показывает, что первый минимум соответствует значению

η, равному 3,83. А так как η представляет собой выражение

$$\eta = \frac{2\pi}{\lambda} z' \sin \omega' \leqslant 3{,}83,$$

мы получаем для z' формулу

$$z' = \frac{3 \cdot 83\lambda}{2\pi \sin \omega'}.$$

Но

$$\sin \omega' = \frac{D}{2F'},$$

где D — диаметр входного зрачка объектива; F' — его фокусное расстояние. С другой стороны, $z' = F' \alpha$, где α — наименьший разрешающий угол. Откуда

$$\alpha = \frac{z'}{F'} = \frac{3{,}83\lambda}{\pi D}.$$

Если выражать α в секундах, а λ принять равным 0,00056 *мм*, то

$$\alpha'' = \frac{140}{D}.$$

Величина α есть наименьший угол, определяющий угловое расстояние до двух звезд, которые могут быть непосредственно разделены наблюдателем.

Это не значит, что вообще невозможно обнаружить наличие двух звезд, если их угловое расстояние меньше полученного по последней формуле. Однако для обнаружения второй звезды нужно тщательно профотометрировать снимок и подвергнуть анализу полученные результаты. Если распределение отличается от того, которое дает изображение одной звезды, и нет оснований подозревать другие причины отклонения, можно рассчитать положение второй звезды (если известна ее звездная величина или блеск). Следует все же заметить, что указанный прием неточен из-за слишком большого влияния атмосферных помех.

Более надежным, так как не требует дополнительных сведений о наблюдаемой звезде, является прием определения диаметра малых планет или других небесных тел по дифракционной картине их изображений. В данном случае имеются в виду такие объекты, угловой диаметр которых сопо-

ставим с наименьшим разрешаемым углом больших астрономических труб (десятые доли секунды дуги). Наличие углового диаметра небесного тела меняет распределение освещенности в фокальной плоскости объектива по сравнению с тем, которое вызывает звезда-точка, и по изменению распределения можно определить диаметр светила. Такой метод был предложен акад. С. И. Вавиловым в 1933 г. в устной беседе с авторами. К сожалению, атмосферные помехи и зерно фотопластинки настолько искажают картину, что надежных результатов получить этим методом в настоящее время также невозможно.

За последнее десятилетие вопросу об оценке качества изображения, даваемого оптическими системами, было уделено большое внимание. Стало очевидным, что описанный выше критерий разрешающей силы (или способности), если его применять к другим тест-объектам, например к мире Фуко, состоящей из ярких полос равной толщины, разделенных темными промежутками той же ширины, обладает многими недостатками. Прежде всего разрешающая способность зависит от выбора тест-объекта, от контрастности между фоном и объектом и в некоторых случаях не является однозначной величиной. Кроме того, высокая разрешающая способность не гарантирует хорошей резкости изображения.

Другой критерий качества астрономических объективов был предложен Гауссом и позже (в несколько измененном виде) Гартманном. Он представляет собой некоторую функцию T от продольной сферической аберрации $\delta s'$:

$$T = \frac{200\,000}{F^2} \frac{\Sigma h^2 \delta s'}{\Sigma h},$$

где h — радиус зоны входного зрачка объектива, $\delta s'$ — продольная сферическая аберрация, соответствующая зоне h, F — фокусное расстояние объектива. Величина T, так называемая «техническая постоянная», есть не что иное, как средний взвешенный по зонам радиус кружка рассеяния, выраженный в секундах дуги.

Этот весьма условный критерий, не учитывающий дифракционной природы изображения, не позволяет судить ни о разрешающей способности, ни о резкости изображения.

Значительно более универсальным является недавно предложенный и уже получивший широкое распространение критерий частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), представляющей собой отношение значений контраста k изображения синусоидальной самосветящейся миры определенной чистоты к контрасту k самой миры. Под контрастом k понимают отношение $\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$, где I_{max} и I_{min} представляют собой максимальную и минимальную интенсивность на мире или на ее изображении, имеющем (за редкими исключениями) также синусоидальное распределение интенсивностей.

ЧКХ зависит и от частоты R, и от направления Ψ штрихов решетки. Обычно ограничиваются двумя направлениями Ψ: одно совпадает с направлением меридиональной плоскости (содержащим ось и миру, которая предполагается бесконечно малых размеров), а другое — экваториальной, перпендикулярной предыдущей.

ЧКХ изображают обычно в виде кривой; по оси абсцисс откладывают частоты R (число линий на 1 *мм* в пространстве изображений), по оси ординат — значение ЧКХ; последнее всегда равно единице при R, равном нулю. Кривые ЧКХ дают полное представление о том, как выглядит изображение любой периодической структуры, и на основании ее можно предсказать вид изображения любого объекта.

Вычисление ЧКХ по известным аберрациям системы не представляет трудностей и может быть легко и быстро осуществлено на современных электронно-вычислительных машинах.

6. СВЕТОВЫЕ ПОТЕРИ И БОРЬБА С НИМИ

При наблюдении слабо различимых объектов — туманностей, слабых звезд и т. д. — большое значение приобретает вопрос о световых потерях систем. Световая энергия, которая, попав из источника света на астрономический инструмент, не вошла в глазной зрачок наблюдателя, в лучшем случае бесполезна, а чаще всего приносит более или менее серьезный вред. Рассеиваясь по всем направлениям, она создает фон, ухудшающий видимость предмета, и ослабляет контрастность изображения. В редких случаях часть световой энергии после нескольких отражений вновь собирается в фокальной плоскости объектива или

вблизи его и вызывает вторичные изображения, ничем не отличающиеся по своему характеру от первичных. Их иногда принимают за несуществующие слабые звезды, планеты или туманности. Приходится принимать специальные меры, например многократную съемку, чтобы отличить ложные изображения (блики) от настоящих.

Световые потери делают невозможным наблюдение солнечной короны методом искусственного затмения, т. е. путем закрытия изображения Солнца непрозрачным диском или другими аналогичными способами. Рассеянный пузырьками стекол, царапинами на поверхности линз, отраженный от поверхностей свет забивает изображение короны, яркость которой в миллионы раз меньше яркости Солнца.

Преломляющие и отражающие поверхности оптической системы не только изменяют направление распространения световой энергии, но также меняют структуру световых пучков. Часть световой энергии поглощается оптической средой. Рассмотрим подробнее эти явления.

Световой пучок AH (рис. 62), падая на преломляющую поверхность, ограничивающую среды I и II с показателями преломления n и n', разделяется на три части: основная часть H_1C преломляется, небольшая часть H_1D отражается и, наконец, наименьшая часть рассеивается по всем направлениям — E, F, G и т. д. Рассеяние обусловлено качеством полировки поверхности HH_1, на которую падает пучок. Если поверхность идеально гладкая, энергия рассеянного пучка равна нулю. Чем хуже состояние полировки, чем больше число и величина царапин, тем больше количество рассеянного света. Рассеянная энергия обычно очень мала и ею можно пренебречь в практике применения астрономических труб, за исключением точных фотометрических исследований.

Распределение энергии между преломленным и отраженным пучками света происходит по закону Френеля. Если I — падающий поток, то отраженный и преломленный потоки I_0 и $I_п$ определяются формулами:

$$I_0 = I\left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2,$$

$$I_п = I\left[1-\left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2\right],$$

при условии, что угол падающего пучка с осью не превышает 30—40°. В этих формулах n и n' — показатели преломления сред I и II.

При переходе световых лучей из воздуха в стекло или из стекла в воздух отражается 4—8% энергии (минимум —

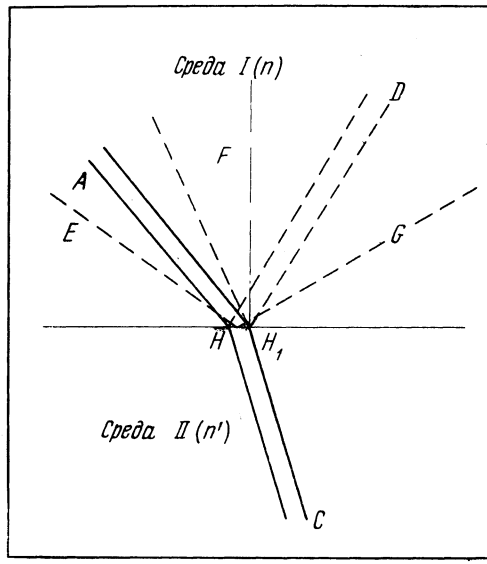


Рис. 62. Схема распределения светового пучка на границе двух сред

для кронов, максимум — для тяжелых флинтов). Проходя через простую линзу, световой пучок теряет на отражение 8—15% энергии (потерями при переходе через поверхности двух склеенных линз из различных сортов стекла можно пренебречь). В сложных оптических системах, например перископах, потери вследствие отражений достигают 80%.

Потери на отражающих поверхностях зависят от материала отражающего слоя и способа нанесения его на стекло или другую подкладку. Лучше всего отражают свеженанесенные серебряные фильмы — до 95%, но их отражающая способность уже через несколько дней падает до 80% и ниже. В последнее время разработано несколько приемов нанесения алюминиевых фильмов, обладающих большой прочностью и почти не тускнеющих со временем. Их отра-

жающая способность в течение многих лет удерживается в пределах 80% и не падает в ультрафиолетовой области спектра, как у серебра.

Преломленная часть светового пучка, распространяясь в прозрачной среде, отчасти поглощается ею. Если I_0 — яркость пучка в начале его пути в рассматриваемой среде, I_l — яркость после того, как пучок прошел путь l (в *см*), то между I_l и I_0 существует зависимость

$$I_l = I_0 (1 - k)^l,$$

где k — коэффициент поглощения среды. Для воздуха коэффициент k настолько мал, что его можно считать равным нулю, если l не превосходит многих метров. Его величина для видимой области спектра оптического стекла составляет несколько долей процента, но значительно увеличивается в ультрафиолетовой ($\lambda < 360$ *ммк*) и инфракрасной ($\lambda > 2000$ *ммк*) областях.

В толще стекла световая энергия, кроме поглощения, рассеивается от пузырей и включений, которые в отдельных сортах стекла содержатся в большом количестве, например в тяжелых кронах, применяемых в светосильных фотографических объективах.

Со времен первых зрительных труб достигнуты большие успехи в борьбе с перечисленными помехами. В эпоху Декарта поглощение света было значительно. На основании некоторых мест из «Диоптрики» можно сделать вывод, что коэффициент поглощения стекол был в десятки и даже в сотни раз больше, чем в настоящее время. Заводы оптического стекла путем тщательной обработки сырья и варки его по специальным рецептам добились громадного улучшения пропускной способности стекла; вместе с тем уменьшилось число пузырей и включений. Однако до последнего времени казалась невозможной борьба с потерями, вызванными отражением части пучка при преломлении.

Закон Френеля, вытекающий из общей теории распространения световой энергии, казалось, уничтожает в корне всякую надежду на устранение отраженного света и вредных бликов, вызванных им. Случай натолкнул исследователей на возможность обхода этого закона. Были обнаружены куски стекла, покрытые налетами, у которых количество отраженного света оказалось заметно меньше, чем следовало по формуле Френеля. Более тщательные иссле-

дования показали возможность почти полностью устранить потери вследствие отражения путем нанесения на стекло тонких слоев прозрачных сред.

Пусть AB (рис. 63) луч, падающий на поверхность MM_1, отделяющую воздух, в котором распространяется падающий луч, от стекла V с показателем преломления n. Предположим, что стекло покрыто тонким слоем прозрачного вещества с показателем преломления n'. Часть энергии луча отражается от слоя по направлению BA_1', другая часть преломляется по направлению BC и в точке C снова отражается и преломляется. Яркость отраженного луча DA_2' зависит от показателей n и n_1; ее можно вычислить по приведенным выше формулам Френеля. Оказывается, что если $n_1 = \sqrt{n}$, то яркость отраженного от слоя луча BA_1' равна яркости отраженного от стекла луча DA_2'. Если разность хода этих лучей равна половине длины волны света в слое, то при интерференции энергия лучей BA_1' и DA_2' взаимно уничтожается. Яркость отраженного света равна нулю, и вся энергия уходит в преломленный пучок. Толщина слоя должна быть порядка $\lambda/4$, т. е. чрезвычайно мала.

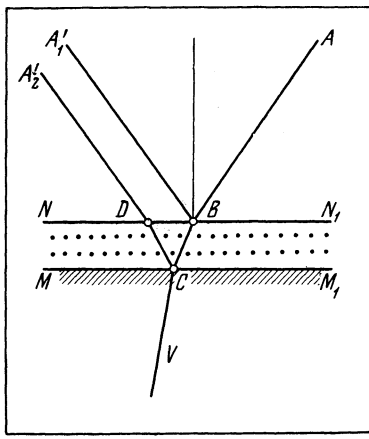


Рис. 63. Просветление оптики

В последнее время И. В. Гребенщиковым и А. А. Лебедевым был разработан ряд физических и химических способов для нанесения на стекло таких слоев. Потери, вызванные отражением, удается уменьшить в 3—5 раз. Процесс нанесения слоев, уменьшающих потери вследствие отражения, называется просветлением оптики. Этот способ значительно уменьшает рассеяние света и ослабляет блики, а в сложных системах, содержащих большое количество линз, на 30—50% увеличивает яркость прошедшего через них света.

7. РАЗВИТИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Рефракторы

С тех пор как Галилей навел свою трубу на небо, началось развитие астрономических рефракторов. В первое время они изготовлялись из линз случайной формы, и до Декарта никто не подозревал, что линзам следует придать определенную форму для получения хороших изображений. Впрочем, можно было в те времена с полным правом отнести дефекты изображения за счет плохого качества применяемого для изготовления стекла и неправильных поверхностей линз, так как еще никто не умел проверять качества поверхностей оптических инструментов.

Декарт, владея точным законом преломления, выяснил, что лучи могут сходиться в точку только при условии, что поверхностям приданы определенные формы; в частности, он особенно рекомендовал комбинацию плоской и гиперболической поверхностей.

К сожалению, Декарт не подозревал о существовании хроматической аберрации, так как явление дисперсии света, т. е. связь между показателем преломления и длиной волны или цветом, было еще неизвестно. Лишь Ньютон открыл это явление и вычислил хроматическую аберрацию линз; однако исходя из неверного предположения о постоянстве значения коэффициента дисперсии $\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$ для всех прозрачных сред, он сделал вывод, что исправление хроматической аберрации невозможно, и обратил все свое внимание на зеркала [2]. Он разработал для них специальные сплавы, открыл новую методику шлифовки и сам изготовил первое зеркало с параболической поверхностью, вполне пригодное для астрономических наблюдений [3]. С этого времени (начало XVII столетия) началось параллельное развитие рефракторов (линзовые системы) и рефлекторов (отражающие системы).

Упорный соперник Ньютона Гюйгенс не пошел по пути, указанному своим знаменитым современником, а нашел

---

[2] Подробнее об этом см. И. Ньютон. Лекции по оптике. Перевод и примечания С. И. Вавилова. М., 1946.

[3] Точное исследование этого зеркала, выполненное недавно в Англии, показало, что поверхность его ближе к сферической, чем к параболической. Малое относительное отверстие зеркала обеспечило удовлетворительное качество изображения.

собственную дорогу, впрочем, не особенно удачную. Он предложил давать линзам астрономических объективов громадные фокусные расстояния, исходя из того, что при одном и том же увеличении угловая хроматическая аберрация уменьшается пропорционально длине трубы (это правильно также и для вторичного спектра). По почину Гюйгенса стали делать длиннейшие астрономические системы, подвешенные на высоких мачтах и колеблющиеся от малейшего ветра. Естественно, что из-за трудностей управления телескопы Гюйгенса в скором времени исчезли из употребления.

Полвека спустя благодаря усилиям Эйлера и Эпинуса в России, Холла (1733 г.) и Доллонда (1758 г.) в Англии ошибка Ньютона была исправлена, появились первые ахроматические объективы в микроскопах и астрономических трубах. Эйлер разработал также методику расчета двухлинзовых объективов с исправленными аберрациями. Хотя при своих вычислениях он исходил из неправильного закона зависимости дисперсии от показателя преломления, можно считать, что с этих пор родилась наука о расчете оптических систем. Правда, технические затруднения еще далеко не были преодолены: оставался нерешенным вопрос об изготовлении хорошего оптического стекла, не было разработано хорошей методики проверки правильности формы поверхностей и испытания качества изображения, даваемого объективом. Оценка объектива производилась лишь на основании непосредственного наблюдения звезд. Следует, впрочем, отметить, что уже Декарт в одном из своих писем описывает метод, идея которого на два с половиной века предвосхищает хорошо известный астрономам «метод Гартмана»: используя картон с рядом отверстий перед объективом, Декарт изучал картину пересечения пучков с экраном по соседству с фокальной плоскостью.

Дальнейшее развитие рефракторов до последнего времени шло только в направлении улучшения качества стекла. Изготовление первоклассного оптического стекла стало привилегией нескольких мастеров-стекловаров, среди которых надо упомянуть основателя крупнейшей французской фирмы — Гинана. Они держали свои рецепты и методы в секрете. В настоящее время первоклассное оптическое стекло вырабатывается в ряде стран, в том числе и у нас. Однако, несмотря на большие успехи, достигнутые в этом направлении, за последние 50 лет наблюдается не-

который застой. Ни одного объектива диаметром больше метра нигде не изготовлено [4].

Пока не видно новых путей, которые позволили бы перейти этот предел. По-видимому, нет и достаточных причин, которые могли бы стимулировать желание его преодолеть. Длиннофокусные рефракторы из-за громадной величины вторичного спектра могут найти лишь весьма ограниченное применение. Съемка с их помощью дает расплывчатое изображение. Спектральные наблюдения в широкой области спектра вообще невозможны, так как узкая щель спектроскопа или спектрографа не пропускает все изображение звезды. Для астрометрических целей гигантские рефракторы не нужны, поскольку наилучшую точность дают инструменты средней силы. Гораздо более жизненными оказались большие зеркала, о которых мы расскажем немного позже.

Астрофотографические объективы

Успехи фотографической техники во многих областях науки побудили астрономов применять ее для своих целей. Съемки небесных объектов с помощью рефракторов, приспособленных для визуальных целей, не могли дать хороших результатов, так как фоточувствительный слой пластинок и пленок в конце XIX и начале XX в. имел максимум чувствительности около 430 *ммк*, в то время как наилучшая коррекция рефракторов соответствовала длине волны 560 *ммк*. С учетом этого обстоятельства сконструировали специальные объективы с астрофотографической коррекцией, т. е. с наилучшим исправлением аберрации для области 430 *ммк*. Были найдены возможности использовать и старые рефракторы, приставляя к ним добавочную линзу, с помощью которой можно было достигнуть фотографической коррекции. Параллельно с этим велись поиски путей устранения главного дефекта рефрактора — вторичного спектра.

Остаточная хроматическая аберрация, так называемый вторичный спектр — основной недостаток линзовых систем. Для двухлинзовых объективов, у которых расстоя-

[4] В настоящее время изготовлены две камеры Шмидта с коррекционными пластинками, диаметры которых соответственно равны 1,25 и 1,50 *м*. Но требования, предъявляемые к однородности стекла этих пластинок, значительно ниже, чем к стеклу объективов.

ние между линзами равно нулю или достаточно мало, величина вторичного спектра, т. е. расстояние Δ между фокусом зеленых лучей ($\lambda = 560$ *ммк*) и совмещенными фокусами красных и синих лучей ($\lambda = 656$ и 486 *ммк*), определяется формулой

$$\Delta = f' \frac{P_2 - P_1}{\nu_2 - \nu_1},$$

где P_i представляет собой относительную частную дисперсию стекла линзы i, т. е. величину

$$P_e = \frac{n_F - n_{560}}{n_F - n_C},$$

а

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}.$$

Каждое оптическое стекло характеризуется своими константами ν и P_e, которые на графике (рис. 64) изображены точкой с абсциссой ν и ординатой P_e. Все точки лежат на одной прямой или вблизи ее, что служит наглядным доказательством невозможности устранения вторичного спектра. Действительно, величина Δ пропорциональна отношению $\frac{P_2 - P_1}{\nu_2 - \nu_1}$, но это отношение как раз пропорционально тангенсу угла наклона прямой, соединяющей две точки (ν_1, P_1, ν_2, P_2), характеризующие стекла первой и второй линз.

Таким образом, какие бы сорта стекла не брать для изготовления астрономического объектива, величина вторичного спектра будет всегда одна и та же.

Устранить вторичный спектр можно было только изготовлением новых сортов стекла — флинтов с укороченной, по сравнению с обычными, фиолетовой областью. Аббе возглавил работу по изысканию новых сортов стекла на иенском заводе Шотта и вначале добился некоторых успехов: появились новые сорта стекол — курц-флинты. Из них изготовили объективы с уменьшенным примерно на 30—40% вторичным спектром. Под названием тройных апохроматов (*B* по каталогу Цейсса) были изготовлены объективы из трех сортов стекла, в том числе курц-флинта. Вторичный спектр был в них почти полностью устранен, особенно в видимой области спектра. На рис. 65 изображены кривые, характеризующие вторичный спектр простых ахроматов *1*, двух- и трехлинзовых апохроматов *2* и *3*. Последним

объективам присущи, однако, и серьезные недостатки. Радиусы кривизны поверхностей линз в них значительно меньше, чем в обыкновенных ахроматических объективах,

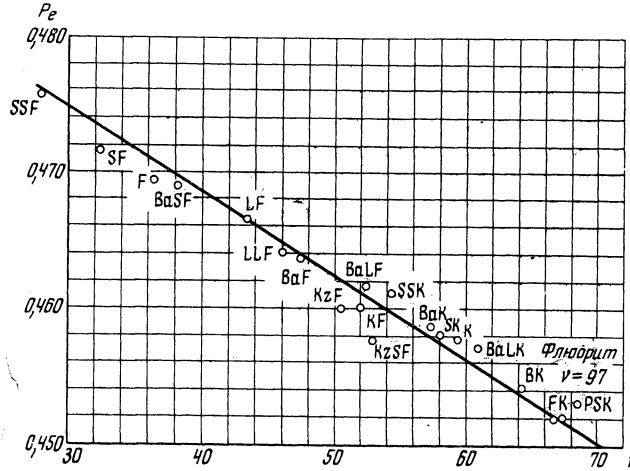


Рис. 64. График характеристики стекол применительно к вторичному спектру

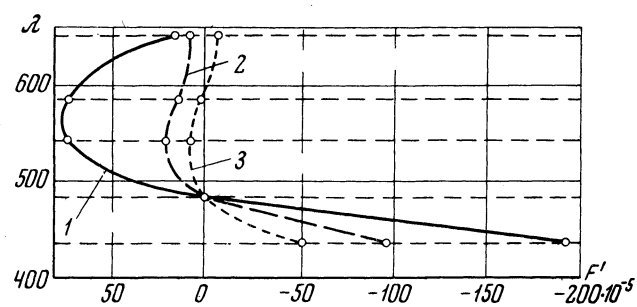


Рис. 65. График, характеризующий различные типы вторичных спектров

из-за того, что курц-флинты еще далеко не удовлетворяли поставленным перед ними требованиям. Это привело к чрезвычайной чувствительности объектива к децентрировкам. Под влиянием толчков, даже слабых, температурных воздействий и других неустановленных факторов объектив рас-

страивается, качество изображения становится плохим. Юстировка объектива настолько трудна, что может быть осуществлена только изготовившей его фирмой.

В настоящее время открываются, по-видимому, новые перспективы улучшения апохроматов. Уже давно известно, что кристалл флюорита обладает замечательными свойствами, особенно ценными для оптических систем: он прозрачен в ультрафиолетовой области спектра и, главное, его частная относительная дисперсия P имеет численное значение одного из употребительных кронов. При этом разность величин коэффициентов дисперсии этих стекол весьма большая (для флюорита 95, для соответствующего ему стекла 61), что позволяет получать большие радиусы кривизны. Объектив из флюорита и стекла не чувствителен к децентрировке, вторичный спектр в видимой области его спектра практически уничтожен.

Правда, естественный флюорит хорошего качества, пригодный для оптических деталей, встречается редко и лишь в небольших кристаллах. Применить его для объектива диаметром свыше 40—50 *мм* уже нельзя. Поэтому он находит применение лишь при изготовлении объективов микроскопов-апохроматов и для спектрографов, предназначенных для ультрафиолетовой области спектра. За последние годы найдена методика получения флюорита из растворов и получены кристаллы диаметром до 20 *см* достаточно хорошего качества. Можно ожидать, что они будут применяться при создании апохроматических объективов для астрономических целей.

Вторым материалом, обладающим такими же свойствами, как флюорит, является фтористый литий, который также выращивают из растворов. Методика его получения разработана, трудности обусловливаются недостаточной чистотой необходимого сырья.

Недостатком обоих материалов является их большой температурный коэффициент расширения, вызывающий заметное смещение плоскости изображения даже при небольших изменениях температуры. Это свойство флюорита и фтористого лития ограничивает их применение в точных астрономических приборах.

Известны и другие приемы уменьшения вторичного спектра, но они требуют создания сложных конструкций приборов и поэтому применяются редко. Так, астрономические объективы типа Пецваля, обладающие вторичным спек-

тром, укороченным примерно вдвое по сравнению с обычными двухлинзовыми, очень длинны и сложны.

Дальнейшее развитие фотографических объективов связано с увеличением их углов поля и светосилы. Были созданы объективы из трех линз с большими промежутками между ними — так называемые триплеты, относительное отверстие которых постепенно росло до 1 : 2, 1 : 1,5 и даже 1 : 1 (Д. С. Волосов). Они открывали новые возможности исследования небесного свода. В то время как обычные двухлинзовые рефракторы давали четкое изображение звезд в пределах угла 1—2°, триплеты и другие широкоугольные объективы обеспечивали необходимую резкость при углах до 5°, а более сложные четырехлинзовые объективы — даже до 10°. Это позволило снимать одновременно большие участки неба, организовать систематическое наблюдение над всем небесным сводом с целью обнаружения всяких изменений: появление новых звезд, малых планет, комет и т. д.

На рис. 66 изображены некоторые типы астрофотографических объективов из трех и четырех линз. Представляет интерес объектив типа Пецваля, первоначально предназначавшийся в качестве портретного. Он может быть превосходно исправлен в пределах угла до 5 — 6° от оси, обладает уменьшенным вдвое по сравнению с обычными рефракторами вторичным спектром. По своим свойствам он ближе к светосильным объективам, чем к широкоугольным.

К широкоугольным объективам, предназначенным для выполнения астрометрических задач, предъявляются весьма жесткие требования. Чтобы получить резкие изображения звезд в виде четких кружков, следует до предела исправить сферическую аберрацию, кому, астигматизм и кривизну, дисторсия также должна быть тщательно устранена, так как снимки используются для точных определений координат звезд. Хроматическая аберрация не может быть исправлена намного лучше, чем в двухлинзовых рефракторах. Но можно добиться того, что кривая вторичного спектра (см. рис. 54) достигнет своего крайнего значения по оси абсцисс при длине волны, к которой фотографические материалы наиболее чувствительны. Так, например, несенсибилизованные материалы максимально чувствительны к длине волн $\lambda = 430$ *ммк*, кривая вторичного спектра у которых достигает крайнего значения. Такое исправление объектива носит название астрофотографического и дает

довольно хорошие результаты, если не пользоваться слишком длиннофокусными объективами.

Обычно фокусные расстояния этих объективов не превышают 2 *м*. Их угловое поле, считая по обе стороны от оси,

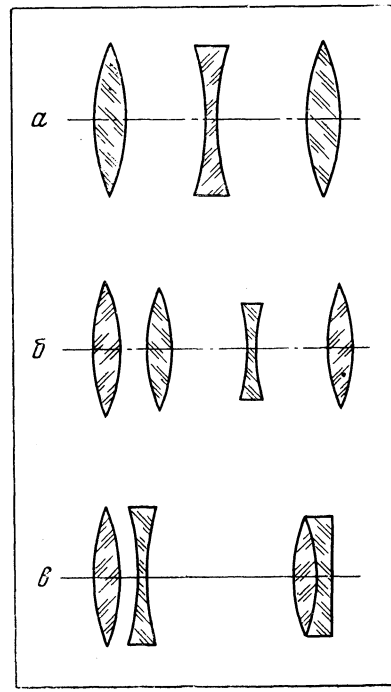


Рис. 66. Типы астрофотографических объективов:

а — триплет, *б* — четырехлинзовый, *в* — типа Пецваля

достигает 10°. Относительное отверстие колеблется в пределах 1 : 4 — 1 : 6. Для улучшения качества изображений ретушируют одну из крайних, чаще всего последнюю поверхность, т. е. придают ей форму, слегка отличную от сферической. Затем с помощью метода Фуко определяют, с какой степенью точности лучи, выходящие из оптической системы, собираются в одну и ту же точку. Этот метод основан на том, что в плоскости изображения передвигают лезвие ножа. В момент прохождения через точку схожде-

ния лучей оно отсекает все лучи, и для глаза, помещаемого за ножом, создается впечатление, что испытываемая оптическая система, ранее освещенная точечным источником света или узкой щелью, параллельной лезвию ножа, вдруг потухла. Если лучи не сходятся в точку, потемнение системы происходит постепенно, частями; по тому, как происходит потемнение, опытный мастер узнает, какие части поверхности требуют дополнительной ретуши.

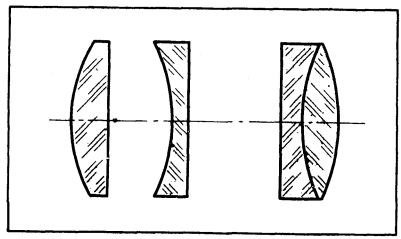


Рис. 67. Фотографический объектив «Индустар»

Для астрономических целей используют иногда обычные фотографические объективы «Индустар» (рис. 67), «Тессар» и др. с углом поля до 50° и относительными отверстиями 1 : 4 — 1 : 8, с фокусным расстоянием 50—100 *см*. Большие фокусные расстояния привели бы к слишком большим размерам фотопластинки.

Для обычной фотографии, в частности для архитектурных снимков, а также для целей аэрофотосъемки созданы широкоугольные объективы (М. М. Русинов) с углом поля до 90—120° и достаточно большими относительными отверстиями — от 1 : 6 до 1 : 8. Они могли бы представить большой интерес для астрономии, так как с помощью 10 объективов можно снять весь небесный свод, но имеют очень малый масштаб. Для значительного фокусного расстояния площадь их фотографической пластинки имела бы слишком большие размеры. Если, например, фокусное расстояние 1 *м* и угол поля 120°, то сторона пластинки равна 3,4 *м*. Практически допустимое фокусное расстояние для таких углов поля не может превосходить 150—200 *мм*.

Другое направление развития фотографических объективов — увеличение их светосилы. В астрономических исследованиях большая светосила нужна в редких случаях,

например для фотографирования туманностей. Она приводит к увеличению диаметра линз, и поэтому фокусное расстояние таких объективов не может превышать 200—400 *мм*, а масштаб их изображения невелик.

За последние годы достигнуты большие успехи в создании светосильных фотографических объективов. Еще в начале столетия относительное отверстие 1 : 4 считалось рекордным, а в настоящее время даже любители-фотографы

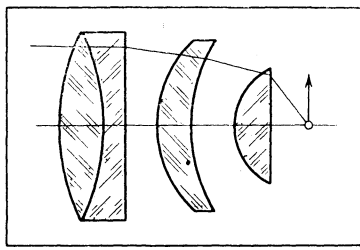


Рис. 68. Светосильный объектив спектрографа

широко пользуются объективами «Юпитер», «Зоннар» и т. д. с относительными отверстиями 1 : 1,5 и углом поля 30°. Для специальных целей изготавливаются объективы с относительным отверстием 1 : 1, а при ограниченном поле (5—10°) — 1 : 0,55 и 1 : 0,6. Это, по существу, увеличенные в десятки раз объективы микроскопов. Их применяют в камерах спектрографов (рис. 68). Предполагалось даже использовать в них иммерсионную жидкость, как в микроскопах, что позволило бы еще больше увеличить разрешающую силу. Но это сопряжено с большим неудобством — фоточувствительный слой соприкасается с жидкостью.

Использование современных светосильных объективов для съемки метеоров, для изучения спектра ночного неба, в качестве объективов для камер спектрографов и т. д. могло бы, по-видимому, принести для астрономии ценные результаты.

Перспективы линзовой оптики

Мы рассказали об оптических системах, состоящих из линз и применяемых в астрономии. В последнее время приходится иногда слышать высказывания о том, что линзовая оптика изжила себя и что будущее принадлежит исключительно зеркальным и, может быть, зеркально-линзо-

вым телескопам, хотя к последним многие относятся с недоверием.

Преимуществом линзовых систем является прежде всего относительная (по сравнению с зеркальными) нечувствительность к децентрировке, которая может быть вызвана толчками, односторонним нагреванием трубы, прогибом ее под собственным весом и весом оптической системы или спектральной аппаратуры, подвешенной к ней. При повороте оптической поверхности на угол α луч поворачивается, если поверхность преломляющая, на угол $(n-1)\alpha$, а если она отражающая — на 2α, т. е. примерно в 4 раза больше. Этот аргумент правилен только тогда, когда поверхность плоская или близка к ней. Совсем иначе обстоит дело, когда поверхность имеет большую кривизну. Мы видели выше, что тройные апохроматы *В* фирмы Цейсса, изготовленные из курц-флинта, чрезвычайно чувствительны к децентрировке. Чувствительность к небольшим наклонам или перемещениям линз тем больше, чем круче кривизна поверхностей, хотя это правило не всегда верно, и на самом деле существует довольно сложная зависимость между конструктивными элементами линзы и чувствительностью к децентрировке.

Однако, если исключить такие особенно чувствительные линзовые системы, как тройные апохроматы, а также отчасти широкоугольные объективы и некоторые другие, следует признать, что в общем зеркальные системы расстраиваются легче, чем линзовые. Последние меньше нуждаются в присмотре, у зеркальных же нужно периодически возобновлять отражательный слой.

У зеркальных систем (за исключением мало распространенных систем типа Ломоносова — Гершеля с наклоненным зеркалом) центральная часть зрачка закрыта, что вызывает, с одной стороны, потерю световой энергии, с другой,— ухудшение изображения вследствие усиления яркости в дифракционных кольцах, вызванной закрытием части зрачка. Линзовые системы лишены этого недостатка, который можно проиллюстрировать двумя кривыми распределения освещенности по диаметру дифракционного кружка (рис. 69). Одна из них соответствует случаю, когда диаметр нерабочей части зрачка равен 0, вторая — примерно 50% всего отверстия.

Увеличение интенсивности колец ведет к уменьшению контрастности картины. По своему действию диафрагми-

рование центра пучка очень напоминает действие сферической аберрации, однако последняя может быть устранена введением аберрации другого знака, а уменьшение контрастности, вызываемое виньетированием центра зрачка, ничем не может быть исправлено.

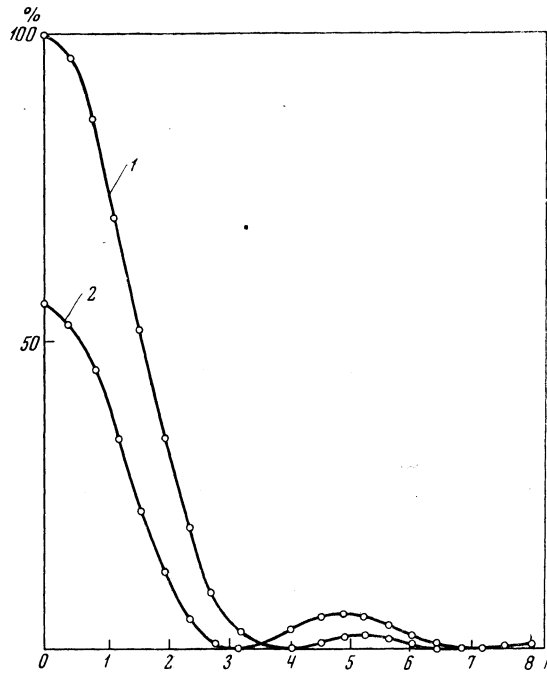


Рис. 69. Распределение освещенности в поперечнике изображения точки безаберрационной системой вследствие дифракции:

1 — при полном зрачке; *2* — при зрачке, примерно половина которого по диаметру закрыта

Окуляры

Окуляры считаются второстепенными частями оптических систем, и мало кто из астрономов-наблюдателей обращает внимание на свойства применяемого им окуляра. К ним предъявляют единственное требование — не создавать рефлексов, которые можно принять за изображения слабых звезд. Однако, как и остальные группы оптиче-

ских систем, окуляры за последние десятилетия подверглись существенным усовершенствованиям. К сожалению, новые типы широкоугольных окуляров, обладающих углом поля зрения, в два раза и более превосходящим поле обычных окуляров, весьма мало известны даже специалистам, работающим с оптическими приборами.

В телескопах до сих пор используются окуляры Рамсдена и Гюйгенса, существующие 300 лет без изменений. Они имеют крайне малое поле зрения (40°), расстояние от

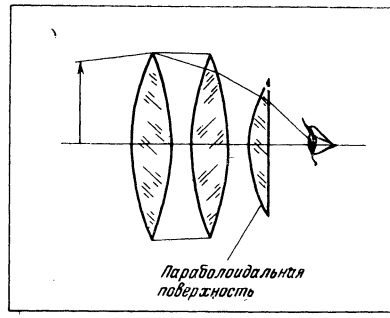


Рис. 70. Схема широкоугольного окуляра с параболоидальной поверхностью

последней линзы до выходного зрачка составляет в них лишь одну треть — одну четверть фокусного расстояния. Астрономы любят пользоваться сильными окулярами с фокусным расстоянием 5—10 *мм*, при котором зрачок глаза наблюдателя должен находиться всего в 1—3 *мм* от окуляра. Между тем ресницы удерживают глаз от окуляра в 10—12 *мм*, что приводит к уменьшению видимого поля. Наблюдатель, как следствие, невольно прижимает глаз к окуляру, вызывая тем часто болезненное прикосновение роговой оболочки к задней линзе.

Большая работа по усовершенствованию окуляров в отношении угла поля была проделана в ГОИ (Д. Ю. Гальперн). Некоторые современные окуляры с увеличенным до 60—70° и даже 90° углом поля (рис. 70) имеют расстояние от линзы до зрачка, равное более чем половине, иногда трем четвертям фокусного расстояния. Это удобно для наблюдений, а благодаря большому углу поля найти объект легче. Вследствие большого числа поверхностей такие окуляры могут

давать рефлексы, однако их можно значительно уменьшить путем просветления поверхностей линз, что в настоящее время осуществляется легко.

Заканчивая рассмотрение особенностей линзовой оптики, можно, несомненно, сказать, что линзовые системы средних размеров ($D = 30 \div 50$ *см*) еще долго останутся в большинстве отношений непревзойденными, если удастся получить кристаллы флюорита и фтористого лития хорошего качества большого диаметра. Их роль в качестве астрофотографических объективов очень велика, тем более, что флюорит прозрачен в ультрафиолетовой области спектра. По разрешающей силе и глубине проникновения в звездную сферу линзовые системы всегда будут уступать рефлекторам, диаметр которых (следовательно, и разрешающая сила) в несколько раз больше.

Зеркальные системы

Мы уже говорили, что перейти к рефлекторам и отказаться от линзовых систем предложил Ньютон, разуверившись в возможности исправить хроматическую аберрацию

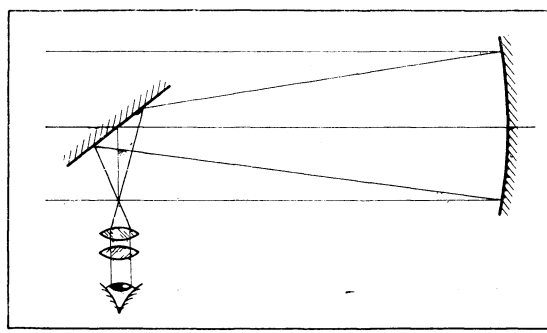


Рис. 71. Схема телескопа Ньютона

последних. Он разработал наиболее простую зеркальную систему, широко применяемую до сих пор, в особенности для самых больших телескопов. Схема ньютоновского телескопа приведена на рис. 71. Пучок параллельных лучей падает на параболическое зеркало, обладающее свойством собирать все лучи в точку — фокус. После отражения от

первого большого зеркала лучи собираются на втором малом зеркале, наклоненном под углом 45° к оси и направляющем пучки к окуляру.

Параболическое зеркало при условии точного изготовления дает на оси идеальное, совершенно лишенное аберраций (в том числе и хроматической) изображение наивысшего качества, какое может быть достигнуто оптическими средствами. Но это качество быстро нарушается вне оси, если только окуляр не компенсирует его. Параболическое зеркало, как, впрочем, и сферическое, обладает большой комой, если зрачок входа совпадает с самим зеркалом. Это и происходит в системе Ньютона. Формулы, позволяющие определить все аберрации третьего порядка сферического и параболического зеркал, имеют вид:

для сферического зеркала

$$2\frac{\delta g'}{r} = -\frac{\omega'^2 + \Omega'^2}{8}\omega' + \frac{3\omega'^2 + \Omega'^2}{4}w_1 - \omega' w_1^2,$$

$$2\frac{\delta G'}{r} = -\frac{\omega'^2 + \Omega'^2}{8} + \frac{\omega'\Omega' w_1}{2};$$

для параболического зеркала

$$2\frac{\delta g'}{r} = \frac{3\omega'^2 + \Omega'^2}{4}w_1 - \omega' w_1^2,$$

$$2\frac{\delta G'}{r} = \frac{\omega'\Omega' w_1}{2}.$$

В этих формулах r — параметр параболы (т. е. радиус кривизны у ее вершины, либо радиус кривизны сферического зеркала); ω' и Ω' — апертурные углы в пространстве изображений; w_1 — угол с осью главного луча наклонного пучка в пространстве предметов.

Как показывает сравнение формул, отличие между аберрациями параболического зеркала и сферического заключается в том, что первое не имеет сферической аберрации.

Отметим для сравнения, что минимальная сферическая аберрация простой линзы со сферическими поверхностями с фокусным расстоянием f' равна приблизительно (при $\Omega' = 0$)

$$\delta g' = -f'\omega'^3.$$

Для сферического зеркала, поскольку

$$f' = \frac{r}{2},$$

$$\delta g' = -\frac{f'\omega'^3}{8},$$

т. е. в 8 раз меньше, чем для простой линзы.

Этот результат сам по себе показывает, насколько меньшие аберрации возникают в отражательной системе по сравнению с преломляющей.

Отметим, что отступление N, отсчитываемое по нормали от параболической поверхности до сферической (при одинаковых радиусах кривизны у вершины), определяется формулой:

$$N = f' \frac{\omega'^4}{32}.$$

Для зеркала с $f' = 1$ *м*, $\omega' = \frac{1}{6}$ (относительное отверстие 1 : 3) $N = 23$ *мк*.

Если заменить сферу радиуса r другой сферой, подобранной таким образом, чтобы отступление от нее до параболической поверхности было минимальным, величина N не будет превышать одной четверти вычисленной по последней формуле величины, т. е. 6 *мк*.

Приведенные формулы показывают, насколько мало параболические поверхности астрономических рефракторов отличаются от сферических.

После того как изготовлено сферическое зеркало, точность поверхности которого легко может быть определена по описанному выше методу Фуко, его доводят ретушью до параболической формы, причем во время этого процесса приходится снимать не более десятка микронов стекла.

Зеркальные поверхности обладают большой комой, которая для меридиональной плоскости определяется формулой:

$$\delta g' = -\frac{3}{4} f'\omega'^2 w_1.$$

Но

$$f' w_1 = -l',$$

где l' — расстояние от изображения звезды до оси. Отсюда

$$\frac{\delta g'}{l'} = -\frac{3}{4}\omega'^2,$$

т. е. поперечная кома, выраженная в процентах от расстояния изображения до оси, равна трем четвертям квадрата апертурного угла. Например, при $f' = 1$ *м*, $\omega' = \frac{1}{6}$, $w_1 = 1°$ ($l' = -17{,}5$ *мм*) имеем $\delta g' = 0{,}36$. Кома становится достаточно малой (меньше 0,01) лишь при угле в 2′.

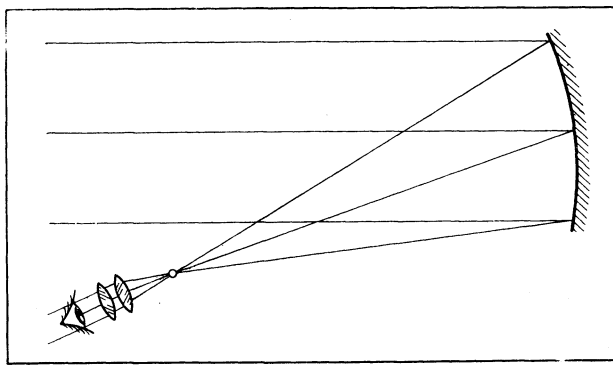


Рис. 72. Схема телескопа Ломоносова — Гершеля

Расчеты говорят о том, что кома является основным недостатком простых, т. е. состоящих из одного большого зеркала, отражательных систем. В телескопах ее можно устранить путем компенсирования комой обратного знака окуляра. Но использовать для фотографирования рефлекторы, состоящие из одной отражающей поверхности (не считая плоских), невозможно, если углы поля превышают несколько минут дуги.

Ломоносов и много позже Гершель предложили наклонить ось зеркала и вести наблюдение по схеме рис. 72. При этом зеркало работает всей своей поверхностью без виньетирования. Однако наклон его вызывает появление комы и астигматизма. Поэтому для работы по этой схеме поверхность зеркала должна иметь форму не центрированного параболоида вращения, а большого параболоида с осью, проходящей через фокус F. Эта задача весьма трудоемкая, еще не вполне решенная в настоящее время.

По схеме Кассегрена (1672), несправедливо раскритикованной Ньютоном, второе зеркало располагается соосно с первым. Ход луча, падающего из бесконечности параллельно оси, представлен на схеме рис. 73. Система Кассегрена при короткой длине, равной расстоянию между зеркалами, обладает большим фокусным расстоянием и

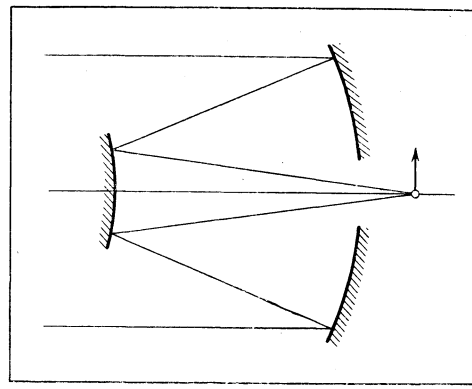


Рис. 73. Схема телескопа Кассегрена

поэтому удобна в обращении. Окуляр располагается в ней как в рефракторе, глаз наблюдателя направлен на рассматриваемый объект, в то время как в телескопе Ньютона наблюдатель смотрит на него по направлению, образующему угол 90°. Для устранения сферической аберрации Кассегрен предложил первое зеркало делать параболическим, как в схеме Ньютона, а второе — гиперболическим, с таким расчетом, чтобы в окончательном фокусе получить изображение без аберраций.

Система Кассегрена, как и система Ньютона, получила широкое распространение. Более того, в современных телескопах больших размеров, как правило, предусмотрена замена малого зеркала ньютоновской схемы гиперболическим зеркалом Кассегрена, что позволяет наблюдателю использовать два фокусных расстояния: одно короткое, соответствующее большой светосиле, другое длинное — для съемки в большом масштабе при малом относительном отверстии. К сожалению, наличие комы не позволяет использовать схему Кассегрена без существенных изменений

для фотографирования объектов большого углового размера.

Схема Грегори (рис. 74) отличается от кассегреновой тем, что малое зеркало в ней не выпуклое, а вогнутое и находится дальше от фокуса большого зеркала. Она дает

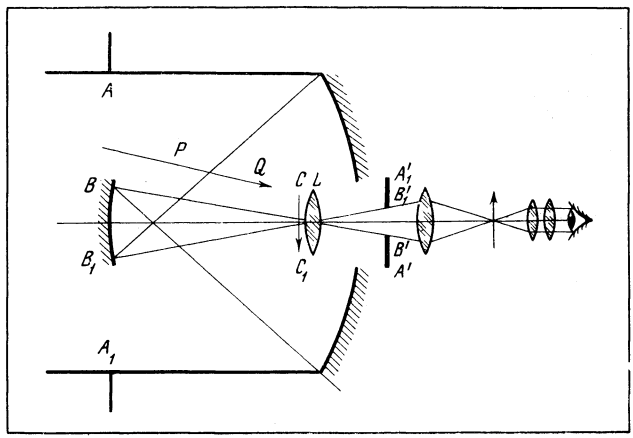


Рис. 74. Схема телескопа Грегори

изображение прямое, тогда как у Кассегрена оно обратное. Первое зеркало, по Грегори, параболическое, второе — эллиптическое; первый фокус эллипсоида совпадает с фокусом большого параболического зеркала, во втором фокусе получается окончательное изображение. При таком выборе формы зеркал кома не может быть исправлена. В общем схема Грегори обладает теми же положительными чертами, которые свойственны и схеме Кассегрена. Недостаток обеих схем заключается в том, что в окуляр или на фотопластинку (если системой пользуются в качестве фотографического объектива), могут попасть паразитные лучи, прошедшие в промежуток PQ, минуя первое зеркало. Они накладывают на изображение общий фон ненаблюдаемых участков неба (особенно, если в направлении PQ оказывается яркое светило), во всех случаях мешающий восприятию объектов, поскольку он ослабляет контрасты и резкость контуров изображения.

В обеих схемах часть паразитного света можно устранить диафрагмами, трубками и другими устройствами, но

они не всегда избавляют от него полностью. Однако существует прием, позволяющий целиком исключить паразитный свет. Для этого с помощью положительной линзы L, поставленной на некотором расстоянии от изображения CC_1, получаемого от системы двух зеркал, создают еще одно изображение плоскости AA_1, содержащей оправу малого зеркала, в некоторой плоскости $A'A'_1$. В этой плоскости ставят диафрагму, задерживающую все лучи, проходящие в промежутки AB и A_1B_1, т. е. все паразитные лучи. Лучи, попавшие на малое зеркало BB_1, свободно проходят через отверстие диафрагмы. Недостаток этой антипаразитной схемы — ее сложность и наличие двух линз, одна из которых может создать хроматическую аберрацию.

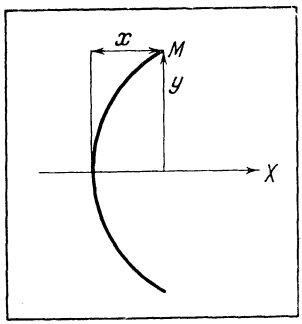


Рис. 75. Меридианная кривая оптической поверхности

Три классические двухзеркальные системы Ньютона, Кассегрена и Грегори просуществовали больше двух веков без изменения. Схема Ньютона не претерпела изменений, но системы Кассегрена и Грегори подвергались усовершенствованию. В начале XX в. Шварцшильд исчерпывающе исследовал систему двух зеркал, изыскивая возможности исправления максимального числа аберраций. Было очевидно, что параболическая форма поверхности большого зеркала не является наилучшей, ибо приводит к устранению лишь одной аберрации. Если применять асферические не параболические поверхности, то в принципе можно исправить три аберрации. Действительно, теория аберраций третьего порядка центрированных несферических поверхностей приводит к изложенным ниже выводам.

Коэффициенты деформации [5] являются параметрами, влияющими на аберрации третьего порядка и не влияющи-

[5] Напомним, что уравнение меридианной кривой, симметричной относительно оси поверхности, может быть написано в виде:

$$x = f(y) = ay^2 + by^4 + cy^6 + \ldots,$$

ми при этом на параксиальные элементы системы, т. е. на положение фокусов и главных плоскостей. Поскольку имеются две несферические поверхности, можно исправить две аберрации подбором коэффициентов деформации. Кроме того, при заданном фокусном расстоянии системы можно изменять в некоторых пределах радиусы кривизны отдельных поверхностей и расстояние между зеркалами. Это позволяет влиять и на другие аберрации, правда, в ограниченной мере, так как изменения радиусов и расстояния связаны между собой условиями конструктивного характера, например, удобным расположением плоскости изображения или предельной величиной диаметра малого зеркала и т. д.

Шварцшильд остроумным методом решения двух дифференциальных уравнений (выражающих условия отсутствия сферической аберрации и комы) рассчитал форму строго апланатического объектива из двух зеркал. Однако одновременное исправление астигматизма и кривизны оказалось невыполнимым. Можно только довести коэффициенты этих аберраций до некоторого минимума, не позволяющего, впрочем, получать большой угол поля.

В результате своих исследований Шварцшильд предложил конкретную систему типа Грегори из двух вогнутых зеркал (рис. 76) со следующими конструктивными элементами (приведены к фокусному расстоянию, равному единице): $F = 1$, $r_1 = 5$, $r_2 = 1{,}67$, $d = 1{,}25$, расстояние от второго зеркала до фокуса $m = 0{,}5$. Первое зеркало приближается по форме к гиперболоиду, второе к эллипсоиду. Относительное отверстие всей системы 1 : 3. Астигматизм

где x — абсцисса, отсчитываемая по оси симметрии, y — ордината точки M кривой (рис. 75), a, b, c — постоянные коэффициенты. Коэффициент $a = \frac{1}{2r_0}$ определяет преломление в параксиальной области, коэффициент b при четвертой степени y определяет аберрации третьего порядка, коэффициент c — аберрации пятого порядка и т. д. Коэффициенты b, c ... зависят от формы кривой. Например, для кривых, представляющих конические сечения, имеем:

$$x = \frac{x^2}{2r_0} + \frac{(1-e^2)\,y^4}{8r_0^3} + \frac{1\cdot 3\,(1-e^2)\,y^6}{2\cdot 4\cdot 6r_0^5} + \ldots,$$

где e — эксцентрицитет конического сечения. Коэффициент b равен

$$\frac{1-e^2}{8r_0^3}.$$

в 2,5 раза меньше, чем у параболического зеркала такого же диаметра и фокусного расстояния. Полезное поле около 3°. Недостатком является то, что изображение получается внутри системы.

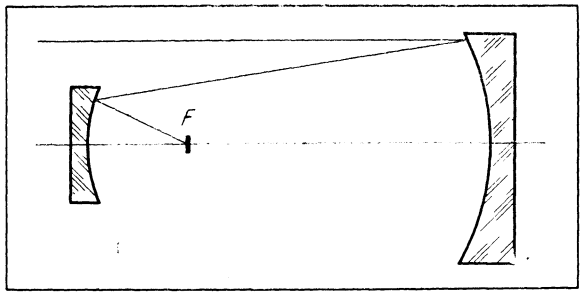


Рис. 76. Схема системы Шварцшильда

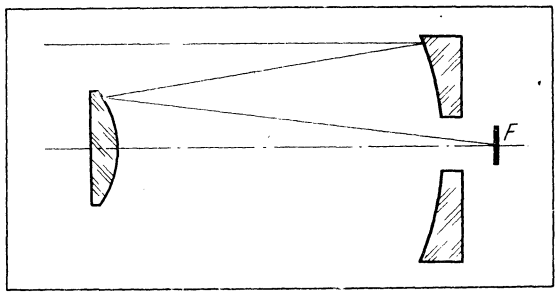


Рис. 77. Схема системы Кретьена — Ричи — Кудера

Несколько иным путем решал ту же задачу Кретьен. В результате вычислений он предложил систему (рис. 77) типа Кассегрена со следующими конструктивными элементами (приведены к фокусному расстоянию, равному единице): $r_1 = 0{,}952$; $r_2 = -0{,}645$; $d = 0{,}307$. Объектив был изготовлен Ричи для фокусного расстояния 3 *м* 45 *см* и диаметра входного зрачка 505 *мм*, т. е. относительное отверстие равно 1 : 7. Астигматизм устранен, кривизна поля в 6,8 раза меньше, чем оптическая сила всей системы, т. е. почти в 5 раз меньше, чем у нормального двухлинзового рефрактора. Поле зрения — около 4°.

Ряд других конструкций апланатических систем, в частности одна с большим сферическим зеркалом, был предложен Д. Д. Максутовым [6].

Новые попытки исправления четырех основных аберраций в системах двух зеркал особых успехов не принесли.

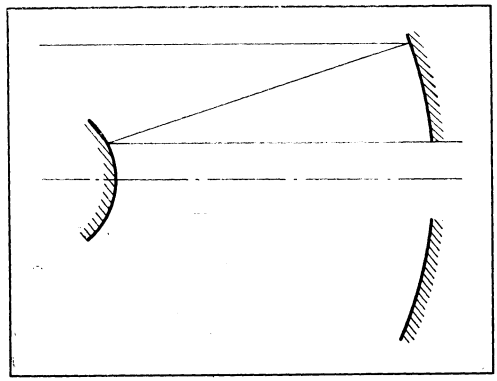


Рис. 78. Схема системы Мерсенна

По-видимому, возможности для этого исчерпаны. Если удастся добиться улучшения систем типа Шварцшильда и Кретьена, то лишь весьма незначительного.

Следует указать на интересную систему, предложенную в начале XVII в. Мерсенном. Она состоит из двух параболических зеркал (рис. 78), фокусы которых совпадают, так что она представляет собой телескопическую систему. Если ее поставить впереди объектива, то изображение увеличивается в k раз (k — увеличение системы Мерсенна). При этом должно быть соблюдено условие, что выходной зрачок системы не меньше входного зрачка объектива и совпадает с ним по положению.

Системы трех зеркал. Неоднократно делались попытки исправления аберраций третьего порядка с помощью систем трех зеркал (Поль, 1935 г.). Принципиальные возможности этих систем таковы, что они позволяют исправить все пять аберраций Зейделя; основной недостаток — боль-

[6] Д. Д. Максутов. Анаберрационные отражающие поверхности и системы и новые способы их испытания.— «Труды ГОИ», 1932, т. 8.

шое виньетирование. Работы последних лет показали перспективность дальнейшей работы над ними.

* * *

Заканчивая описание астрономических зеркальных систем, можно сказать, что они дают прекрасное качество изображения на оптической оси благодаря отсутствию хроматической аберрации. Они имеют еще одно преимущество над линзовыми системами — значительно больший диаметр. Напомним, что фирма ЛОМО в Ленинграде изготавливает в настоящее время самое большое зеркало в мире — диаметром — 6 *м*, и это не предел.

К сожалению, все системы, используемые в качестве объективов для астрофотографических работ, требуют обязательного применения несферических поверхностей, изготовление которых необычайно трудно, главным образом из-за отсутствия надежных и простых методов контроля.

В последнее время методы контроля совершенствуются. В частности, большое значение приобрел метод специально рассчитанных дополнительных компенсирующих линз или стекол, который позволяет использовать способ Фуко для любых, сколь угодно сложных поверхностей, а это значительно упрощает изготовление. Но поскольку большие уникальные инструменты чрезвычайно дороги, трудность изготовления несферических зеркал не оказывает существенного влияния ни на сроки изготовления, ни на стоимость всей установки с башней и прочими необходимыми приспособлениями.

Широкому распространению двухзеркальных апланатических систем препятствует еще один недостаток — отсутствие универсальности, которая в настоящее время требуется от всякого большого инструмента. Это значит, что один и тот же объектив при добавлении или смене некоторых второстепенных частей может служить для различных целей. Чаще всего необходимо менять в широких пределах фокусное расстояние. Система двух зеркал работает только при точном соблюдении определенных соотношений, связывающих расстояние между зеркалами с параметрами отражающих поверхностей. В принципе, конечно, можно рассчитать к ней добавочные приставки — системы линз и зеркал и решить поставленную задачу, однако это потребовало бы сложных и громоздких устройств и поэтому на практике не находит применения.

Возникновение идеи зеркально-линзовых систем относится к XVIII в. Первый телескоп Ньютона был уже такой системой, поскольку он имел два зеркала и окуляр, состоящий из линз.

Простейшей зеркально-линзовой системой можно считать отражающую линзу Манжена (рис. 79), использованную им в качестве проектирующей системы прожектора дальнего действия (для освещения далеких предметов) в 80-х годах прошлого столетия. То обстоятельство, что она была применена в прожекторе, а не в астрономическом объективе, случайно. Линза Манжена — менискообразная (центры поверхностей обращены в одну сторону) с отражающей поверхностью. С точки зрения оптической схемы она эквивалентна комбинации двух менисковых линз, одна из которых стоит перед зеркалом, другая—позади него, и лучи проходят через нее дважды. Эта линза играет роль компенсатора сферической аберрации. Недостаток ее — значительная хроматическая аберрация. Если в прожекторе ею можно было пренебречь из-за сравнительно большого размера источника света, благодаря чему лучи, идущие из различных точек, перемешиваются, то в астрономическом объективе эта же аберрация недопустима, так как небесные объекты имеют чрезвычайно малые угловые размеры.

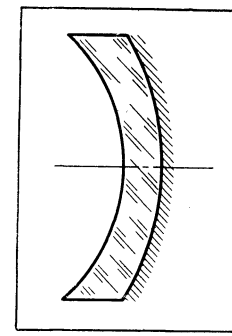


Рис. 79. Линза Манжена

Плодотворность идеи Манжена, лежащей в основе его системы, подтверждается неоднократным ее использованием как основной части светосильного зеркально-линзового фотографического объектива, обладающего большим углом поля зрения. Для исправления хроматической аберрации и астигматизма к ней добавляют несколько линз.

В большинстве существующих зеркально-линзовых систем (за исключением не получивших распространения медиальных труб Шупманна) функции линз и зеркал разделены таким образом: зеркала формируют изображение, а линзы

корректируют аберрации зеркал. При этом линзам стараются придать минимально возможную преломляющую силу, чтобы более четко разграничивать действие тех и других частей оптической системы. В линзе Манжена такое строгое разделение функций невозможно, и поэтому ее аберрации исправлены слабо.

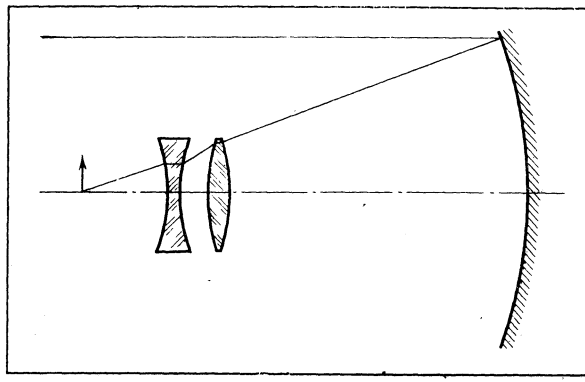


Рис. 80. Схема афокального компенсатора Росса

Идея афокальных компенсаторов зародилась в 1876 г., тогда в схеме Кассегрена предлагали применить две рядом расположенные линзы из одного и того же сорта стекла, составляющие афокальную (нулевой оптической силы) систему. Однако предложения, опубликованные в специальной литературе, так и остались неосуществленными.

В 1913 г. Росс применил афокальный компенсатор (рис. 80) на практике. Его вариант несколько отличался от прежнего, но принципиальной разницы между ними не было. Первый компенсатор имел целью исправить сферическую аберрацию и кому сферических зеркал, расположенных по схеме Кассегрена, а компенсатор Росса — кому параболического рефлектора, не влияя на его сферическую аберрацию, поскольку она равнялась нулю. Следовательно, в обоих случаях задача сводилась к устранению сферической аберрации и комы прибора [7].

[7] В афокальных компенсаторах несмотря на то, что они определяются тремя параметрами (три радиуса из четырех, четвертый вычисляется из условия, что система афокальна), можно исправить не три, как казалось бы естественным, а только две аберрации. Выбор этих двух

Компенсатор Росса при испытании показал, что он действительно исправляет кому параболического рефлектора, не влияя на качество изображения на оси системы, и не вводит хроматических аберраций, поскольку обе его линзы имеют одинаковую оптическую силу, но с обратными знаками и изготовлены из одного материала. Однако, устраняя кому, он в несколько раз увеличивает астигматизм параболического зеркала, из-за чего угол поля зрения системы «параболическое зеркало — компенсатор», хотя и увеличивается немного по сравнению с его значением для одного зеркала, не превышает 15′ (по 7—8′ с каждой стороны от оси).

Теория афокального компенсатора была разработана проф. В. Н. Чуриловским [8], который использовал ее для целого ряда комбинаций зеркал, например комбинации с одним простым сферическим зеркалом, с двумя несферическими зеркалами по схеме Кассегрена. В одном из последних вариантов ему удалось исправить все пять аберраций монохроматического луча, к сожалению, расположение оптических деталей оказалось при этом неудачным, вызвав сильное виньетирование световых пучков. Поэтому схема представляет лишь теоретический интерес. За последние десятилетия проблемы афокального и иных компенсаторов подробно и неоднократно изучали многие исследователи, особенно сотрудники ГОИ.

Большим шагом вперед явилось развитие зеркально-линзовых систем Шмидтом (1931 г.). Он предложил свою, ставшую теперь знаменитой, систему, в которой сочетаются две основные идеи, открывшие новые широкие возможности:

1) большому зеркалу придается сферическая форма;

2) в плоскости входного зрачка, проходящей через центр кривизны сферического зеркала, стоит афокальный компенсатор в виде пластинки, одна сторона которой плоская, вторая — асферическая и рассчитана так, чтобы исправить сферическую аберрацию большого зеркала.

Предложение Шмидта вызвало появление в свет обширной литературы, его система подверглась всестороннему теоретическому и практическому исследованию. Много-

---

аберраций произволен. Как правило, исправляют сферическую аберрацию и кому.

[8] См. «Труды Института точной механики и оптики», 1941, т. 1, вып. 4.

численные предложения, направленные к ее усовершенствованию, продолжают поступать до настоящего времени.

Крупное достоинство компенсатора Шмидта состоит в малой чувствительности к смещению и повороту. Он допускает применение стекла пониженной однородности.

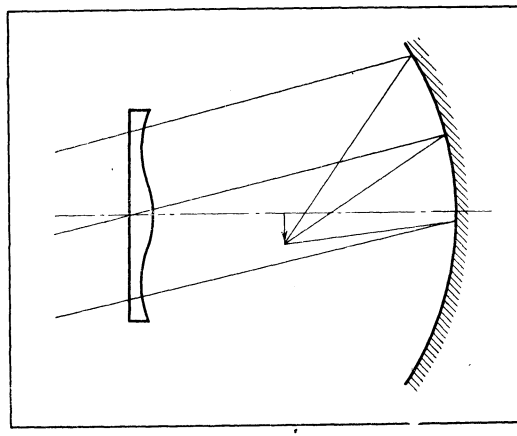


Рис. 81. Схема компенсатора Шмидта

Серьезный недостаток его — в большой трудности изготовления асферической, причем с большим отступлением от плоской поверхности. Положительные качества системы вытекают из того, что зрачок совпадает с центром кривизны зеркала. Это приводит к полному автоматическому уничтожению комы и астигматизма и получению весьма совершенных изображений. Причем и относительное отверстие, и угол поля зрения могут быть доведены до громадных, немыслимых прежде величин (1 : 1 и больше для относительного отверстия, 40° и больше для угла поля зрения — считая в обе стороны от оси). Изображение получается на сферической поверхности, радиус которой равен фокусному расстоянию системы.

Свойства системы Шмидта можно объяснить элементарным способом. Главный (центральный) луч наклонных пучков проходит через центр (рис. 81) сферического зеркала, поэтому весь пучок до и после отражения симметричен по отношению к побочной оси зеркала, в качестве которой служит одна из нормалей. Эта симметрия автоматически

устраняет кому и астигматизм. Сферическая аберрация уничтожается компенсатором, а хроматическая аберрация практически отсутствует. Плоско-параллельная пластинка в параллельном пучке не создает хроматической аберрации, а возникающие в связи с небольшим отступлением от плоскости призменные элементы обладают такими незначительными углами, что могут вызывать лишь ничтожно малую хроматическую аберрацию.

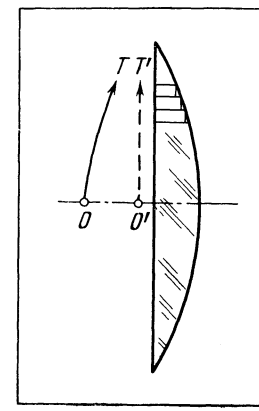


Рис. 82. Линза Пиацци-Смита

Последняя оставшаяся аберрация — кривизна, конечно, серьезно затрудняет применение системы для астрономической съемки. Фотографирование на специальных пластинках сферической формы связано с трудностями их обработки, а само изготовление сферических пластинок с равномерным светочувствительным слоем—технологически трудная задача. Часто берут плоские, очень тонкие пластинки, которым придают необходимую кривизну. Правда, этот процесс иногда вызывает их поломку.

Аберрация кривизны может быть исправлена, если не полностью, то в большой степени, применением дополнительной линзы Пиацци-Смита (рис. 82), расположенной в непосредственной близости от фокальной плоскости. Эта линза, действие которой объясняется простым способом, вызывает изменение кривизны изображения благодаря изменению своей толщины по диаметру. Как известно, плоско-параллельная пластинка толщиною d, поставленная на пути пучка, смещает изображение на величину $d\left(1-\frac{1}{n}\right)$, где n — показатель преломления ее стекла. Приблизительно можно считать, что $1-\frac{1}{n}=\frac{1}{3}$, т. е. смещение равно одной трети толщины пластинки.

Линза с переменной по высоте толщиной может быть уподоблена ряду плоско-параллельных пластинок, каждая из которых смещает изображение примерно на одну треть

соответствующей толщины. Очевидно, что можно рассчитать эту линзу таким образом, чтобы исправить кривизну, создаваемую стоящей перед ней передней оптической системой. Так на рис. 82 кривая линия OT изображается линзой Пиацци-Смита прямой $O'T'$. Однако этот прием не всегда применим. При больших апертурах выходящего пучка и значительной кривизне первичного изображения хорошего исправления получить нельзя. Этому препятствует появление неисправимых аберраций высших порядков, вызываемых большими углами падения и преломления лучей на коррекционной линзе.

Линзу Пиацци-Смита можно использовать также для уменьшения длины системы Шмидта, ставя ее на некотором расстоянии от фокуса, что позволяет исправить кому и астигматизм, вызванные укорочением расстояния между коррекционной пластинкой и зеркалом.

Благодаря своей исключительно большой светосиле система Шмидта применяется для целей, далеких от астрономии, например для проекции катода брауновских трубок на экранах телевизионных устройств. Кривизна изображения системы является здесь достоинством, так как катод имеет выпуклое сферическое дно, проектирующееся на плоский экран без аберраций (в первом приближении). Свойство кривизны может оказаться полезным при внедрении недавно разработанной новой методики проекции изображения в инфракрасных лучах на катод электронно-оптического преобразователя.

В последнее время были сделаны попытки добиться от системы Шмидта более высоких показателей, чем те, которые она в состоянии дать. В частности, пытались получить относительные отверстия 1 : 0,7, угол поля зрения — более 40°. Эти эксперименты не увенчались успехом. При слишком большом относительном отверстии появляются неустранимые сферическая и хроматическая аберрации, при больших углах компенсационное действие пластинки недостаточно: на краях изображения возникает заметная сферическая аберрация. Система Шмидта вследствие ее простоты не отличается гибкостью. Исправление перечисленных аберраций невозможно, потому что все ее параметры уже использованы.

Ряд новых предложений касался видоизменений системы Шмидта. Из них следует отметить комбинацию Шмидта — Кассегрена, представляющую собой систему Кассегрена,

впереди которой стоит пластинка Шмидта. В других случаях предлагалось искривить компенсационную пластинку, что приводит к уменьшению сферической и хроматической аберраций.

Не останавливаясь на многих предложениях, направленных на усовершенствование системы Шмидта, но не представляющих интереса для астрономии, назовем еще систему Райта. Она отличается от камеры Шмидта тем, что почти вдвое короче. Это преимущество достигается заменой сферической поверхности поверхностью сплюснутого эллипсоида, которую значительно труднее изготовлять. Кроме того, одновременное исправление комы и астигматизма в системе Райта невозможно, и ее угол поля зрения меньше, чем в системе Шмидта с теми же характеристиками. Другое серьезное достоинство камеры Райта заключается в том, что плоскость изображения в ней может быть вынесена из трубы.

В связи с большим распространением систем Шмидта, было затрачено немало труда на изготовление асферической поверхности пластинки, и в настоящее время достигнуты некоторые успехи.

Наибольшая в мире система Шмидта, имеющая диаметр входного зрачка 1,2 *м*, изготовлена для Паломарской обсерватории в 1950 г.

Менисковые системы. Д. Д. Максутов в 1941 г. предложил систему (рис. 83), обладающую тем преимуществом, что она свободна от недостатков системы Шмидта — трудности изготовления несферической поверхности и большой длины, равной двум фокусным расстояниям. Большое зеркало в его системе имеет форму сферы, а компенсатор представляет собой ахроматический мениск очень малой отрицательной оптической силы. Благодаря ей его сферическая аберрация может компенсировать аберрацию сферического зеркала. Подбор толщины мениска и расстояния между мениском и зеркалом позволяет исправить кому и получить апланатическую систему длиной в 2 раза меньше системы Шмидта. В этом — второе преимущество менисковых систем. Астигматизм и кривизну устраняют добавлением линзы Пиацци-Смита перед фокальной плоскостью. Большая кривизна поверхностей мениска, вызывающая появление сферической аберрации высших порядков, может быть исправлена легкой ретушью мениска или сферического зеркала.

Система Д. Д. Максутова используется для небулярной астрофотографии. Менисковая линза применена в ней как компенсатор кассегреновой системы. Кроме основной роли компенсатора, мениск служит для герметизации трубы

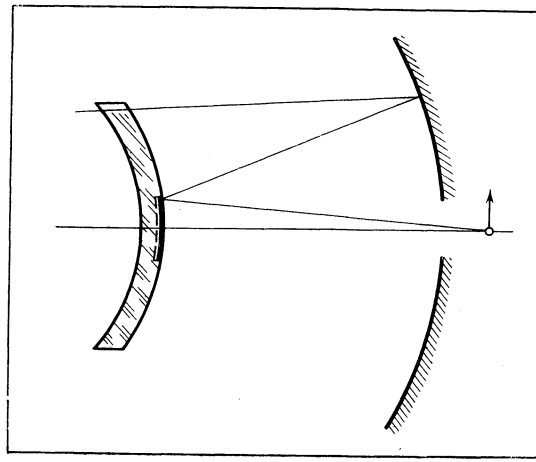


Рис. 83. Схема менисковой системы Д. Д. Максутова

и в качестве держателя второго сферического зеркала. Система обладает всеми достоинствами схемы Кассегрена —ее компактностью и удобством работы — и в то же время лишена отрицательных качеств — наличия несферических поверхностей, отсутствия апланатизма. Наибольшее удобство она представляет для использования в качестве телескопов для наблюдения небесных объектов. Малое зеркало по диаметру не превышает одной трети большого, так что потери света незначительны (11%), а дифракционная картина мало отличается от той, которую дает сплошной зрачок. Менисковые системы Д. Д. Максутова применены в телескопах МТМ-200, МТМ-500, АС-32, АЗТ-16, в телеобъективах МТО-500, МТО-1000 и ряде других приборов.

В литературе встречаются различные варианты аналогичных систем. Среди них есть и комбинация менисков с пластинкой Шмидта и другие. Однако сведений об изготовлении таких систем не имеется.

Отметим еще одну категорию зеркально-линзовых систем, отличающуюся тем, что в ней первым и основным ком-

понентом, определяющим диаметр входного зрачка, является простая линза. Система зеркал и линз небольшого диаметра играет здесь роль коррекционной части объектива. Такие системы, предложенные вначале Гамильтоном, а затем в конце прошлого столетия Шупманном, хо-

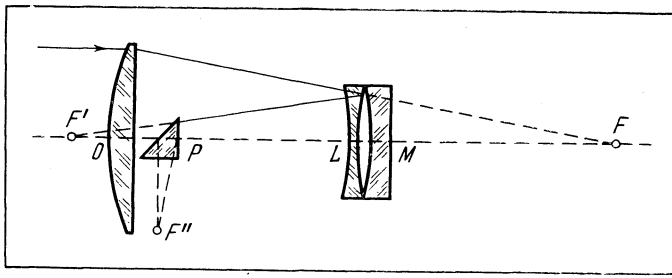


Рис. 84. Схема зеркально-линзовой системы Гамильтона

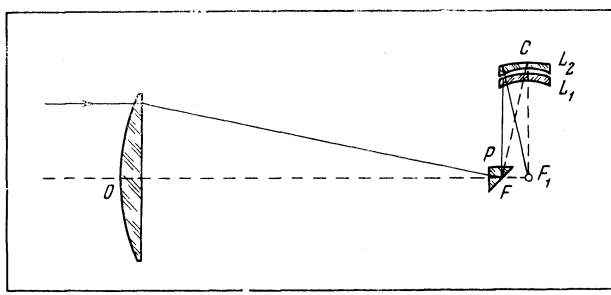


Рис. 85. Схема медиальной системы Шупманна

рошо поддаются исправлению от сферической и хроматической абберраций, причем вторичный спектр можно исправить полностью. На рис. 84 изображена система Гамильтона, на рис. 85 — медиальная система Шупманна.

Хотя объектив последнего типа был изготовлен, медиальные системы не получили распространения. Это можно объяснить двумя причинами: прежде всего не устранен один из главных недостатков рефлекторов, а именно невозможность перейти за тот диаметр, который определяется максимальными размерами дисков оптического стекла (не бо-

лее 1 *м*); кроме того, медиальные системы оказались весьма чувствительными к малейшей децентрировке. Указанные недостатки привели к тому, что после Шупманна не было сделано ни одной попытки вернуться к медиальным системам.

Системы с афокальным компенсатором в параллельном пучке. Наряду с компенсатором в виде деформированной пластинки или в виде менисковой линзы сейчас применяются

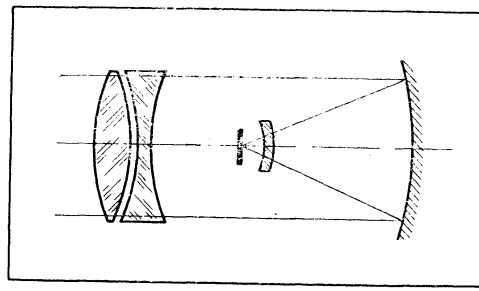


Рис. 86. Схема зеркально-линзовой системы с двойным афокальным компенсатором

афокальные компенсаторы, состоящие из двух (иногда четырех) линз, изготавливаемых из одного сорта стекла. Наличие четырех поверхностей (или восьми) вместо двух обеспечивает лучшее исправление аберраций по сравнению с ранее описанными компенсаторами. Но большие диаметры препятствуют их применению в длиннофокусных астрономических объективах (более 500 *мм* фокусного расстояния). Основное назначение объективов, снабженных двухлинзовыми компенсаторами,— исследование быстро двигающихся небесных тел: метеоритов, спутников и т. д. Объективы с двухлинзовыми афокальными компенсаторами (рис. 86) обладают большим относительным отверстием, доходящим до 1 : 0,7, и углом поля зрения 10—15° (при сферической поверхности изображения могут быть получены более значительные углы поля зрения — до 25—30°).

Нашли применение еще более сложные системы, необходимые для решения особых задач. Например, на рис. 87 приведена схема светосильного объектива (расчет ГОИ), создающего изображение на выпуклой поверхности ЭОП.

Компенсаторы для объективов с большим диаметром входного зрачка. Как мы видели выше, афокальные ком-

пенсаторы, как и другие менисковые или деформированные пластинки, могут применяться в сходящихся пучках.

Как показывают расчеты, их диаметры составляют от одной трети до одной шестой диаметра входного зрачка объектива. Другими словами, если диаметр компенсатора составляет, например, 1 *м* (максимальная величина, доступная стеклянной промышленности в настоящее время),

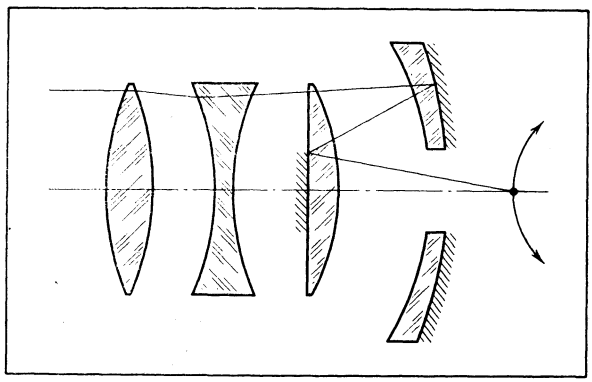


Рис. 87. Схема светосильной зеркально-линзовой системы с большим углом поля

то диаметр большого зеркала может быть доведен до 5—6 *м*. Правда, чем меньше диаметр компенсатора (при заданной величине входного зрачка), тем слабее его компенсационные возможности и меньше угол поля объектива.

После Ценгера, Симсона, Росса, о системах которых мы уже упоминали, многие ученые предложили различные конструкции с применением двухлинзовых афокальных, трехлинзовых и более сложных компенсаторов. Остановимся лишь на некоторых из них, представляющих интерес для астрономии. Одна из первых систем этого типа под названием АСИ-4 (рис. 88), рассчитанная и изготовленная ГОИ, используется в Пулковской обсерватории для работ, связанных с фотометрией небесных светил и определением спектрального класса звезд в качестве бесщелевого спектрографа. В ней после второго отражающего элемента пучки выходят параллельными. Предусмотрено

место для преломляющих призм прямого зрения. Диаметр зеркала в ней равен 35 *см*, фокусное расстояние 1,5 *м*, относительное отверстие 1 : 5,5.

Большой интерес для астрофотографии может представить зеркально-линзовый объектив, предложенный почти одновременно ГОИ в СССР и заводом Цейсса в Иене (ГДР). Он состоит из гиперболического зеркала и афокальной системы двух линз, диаметр которых может быть

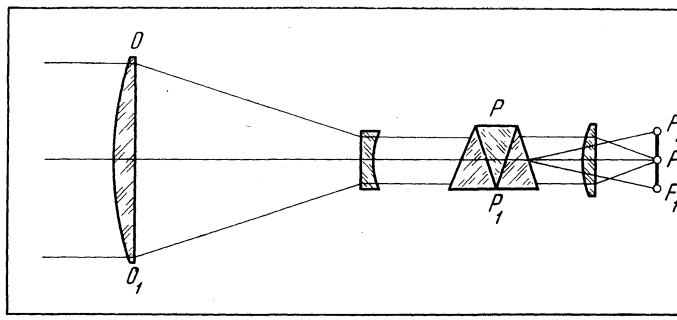


Рис. 88. Схема зеркально-линзовой системы АСИ-4. Система Кассегрена для упрощения заменена объективом OO_1

в 4—6 раз меньше диаметра зеркала. В объективе полностью исправлены сферическая аберрация, кома и астигматизм и остается неисправленной лишь кривизна. Относительное отверстие такого объектива при фокусном расстоянии 10 *м* может быть равным 1 : 4, а поле зрения 3—4° и даже больше, если применить сферическую фотопластинку или линзу Пиацци-Смита.

Если к системе Кассегрена с большим гиперболическим зеркалом приставить афокальный компенсатор, надлежащим образом рассчитанный, можно полностью устранить все аберрации.

Преимущество обоих названных объективов перед объективами Шмидта заключается в том, что диаметр их большого зеркала можно довести до 4—5 *м*, превысив диаметр объективов Шмидта в 3—4 раза. Однако внедрению объективов такого типа пока препятствуют трудности изготовления гиперболической поверхности с необходимой для астрономии точностью.

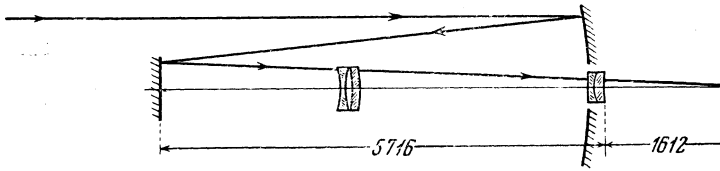
Набор приставок к параболоидальному зеркалу

Строительство больших уникальных телескопов с фундаментом, башней и сложнейшей аппаратурой связано с затратами крупных средств. Поэтому естественно требовать, чтобы эти инструменты обладали максимальной универсальностью, т. е. чтобы их можно было использовать для выполнения разнородных работ. Для этих целей нужен прежде всего широкий диапазон фокусных расстояний, углов охвата (угол поля зрения) и светосил. Универсальность телескопа должна быть достигнута без смены основной и самой ценной детали — большого параболического зеркала, путем введения в конструкцию по возможности легких и несложных приставок. Простейший эффект можно получить уже при переходе от ньютоновской схемы к кассегреновой путем добавления гиперболического зеркала, что приводит к увеличению фокусного расстояния в несколько раз. Значительно расширить масштабы используемых углов поля зрения и светосилы можно с помощью специально рассчитанных приставок, как, например, это было предложено ГОИ для зеркала диаметром 2,6 *м* с фокусным расстоянием 10 *м*.

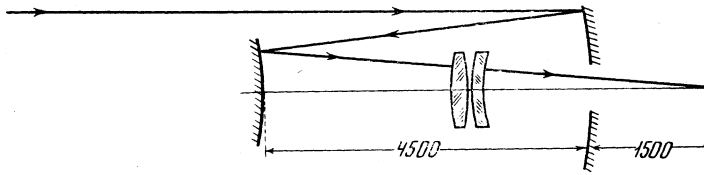
На рис. 89 показана схема пяти приставок, с помощью которых могут быть получены комбинации основных характеристик всего инструмента, приведенные в таблице.

№ системы	Фокусное расстояние, *м*	Относительное отверстие	Угол поля зрения	Диаметр изображения, *мм*	Диаметр кружка рассеяния для точки на оси, *мм*
1	40	1 : 16	40′	470	0,01
2	15	1 : 6	3°	750	0,01
3	6,55	1 : 2,6	2°	230	0,05
4	5	1 : 2	1°	170	0,01
5	3,1	1 : 1,25	2°	110	0,01

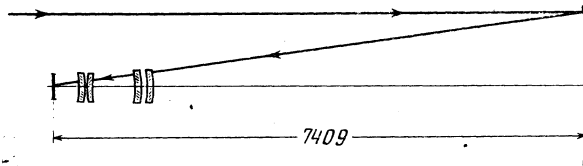
Как видно из таблицы, максимальное фокусное расстояние равно 40 *м*, а угол поля при этом — 40′, что соответствует диаметру светочувствительной пластинки 470 *мм*; минимальное фокусное расстояние равно 3,1 *м* при относительном отверстии 1 : 1,25; угол поля достигает 2° при диаметре пластинки 110 *мм*.



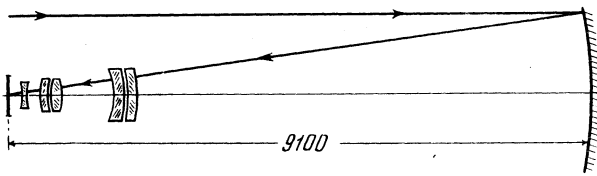
Система 1



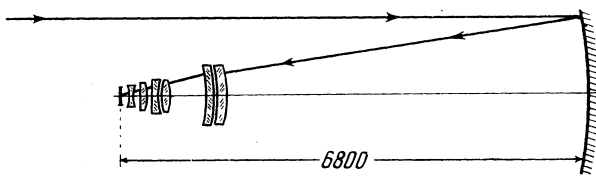
Система 2



Система 3



Система 4



Система 5

Рис. 89. Схема пяти приставок к параболоидальному зеркалу

Все приставки рассчитаны на высокое качество изображения, допускающее наличие кружка рассеяния диаметром не более 0,01 *мм*. Исключение составляет третья приставка, которая требует небольшой ретуши для достижения такого же качества.

Аналогичные наборы приставок могут быть рассчитаны для телескопов больших размеров. Поскольку некоторые приставки (особенно первые) содержат линзы или зеркала довольно больших диаметров, необходимо при разработке конструкции трубы и башни предусмотреть возможность установки, с необходимой высокой степенью точности, любой приставки из общего набора. Это связано с дополнительными усложнениями, затрудняющими в настоящее время применение этих систем.

Спектральные системы для астрономических целей

Как только появились спектрографы, их стали применять для спектрального анализа небесных светил, помещая спектральный прибор таким образом, чтобы плоскость, содержащая щель прибора, совпала с фокальной плоскостью астрономического объектива. Для обеспечения минимальных потерь в результате виньетирования вблизи от этой плоскости должна находиться коллективная линза, изображающая выходной зрачок объектива на диспергирующую систему спектрального прибора.

С этой же целью нужно подобрать такой спектральный прибор, чтобы относительное отверстие его объектива-коллиматора совпадало (или было несколько больше) с относительным отверстием астрономического объектива.

Вследствие турбулентности атмосферы и хроматических аберраций объектива изображение исследуемого небесного тела у щели дрожит и расплывается. Лишь небольшая часть световой энергии попадает в щель, особенно когда последняя суживается для увеличения разрешающей способности спектрографа. С помощью пучка оптических волокон надлежащей формы можно свет, падающий внутри некоторого круглого или прямоугольного контура, направить в тонкую узкую щель той же площади, не меняя при этом апертуры падающих пучков.

В более подробном описании спектральных приборов для астрономии нет необходимости, так как за исключени-

ем перечисленных выше особенностей они не отличаются от аналогичных приборов для физических лабораторий.

Следует остановиться лишь на одной специфической категории спектральных приборов — так называемых бесщелевых спектрографах, отличающихся от ранее описанных приборов тем, что они дают одновременно спектры большого числа звезд. Схема бесщелевого спектрографа отличается от схемы астрономического объектива тем, что впереди объектива стоит диспергирующая призма (рис. 90). В фо-

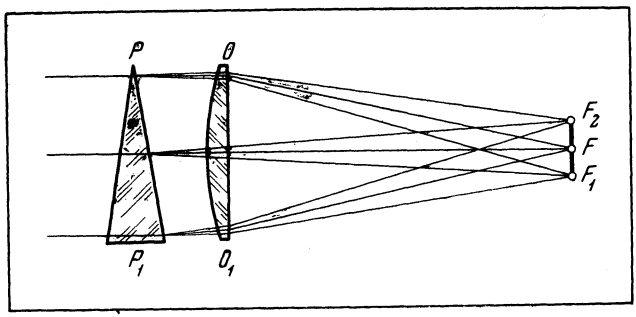


Рис. 90. Схема бесщелевого спектрографа с объективной призмой

кусе объектива каждое светило образует след в виде прямой линии — спектр; различными приемами (колебательным движением пластинки, добавлением цилиндрической линзы перед фокальной плоскостью и т. д.) этому спектру можно придать привычный вид полосы.

Однако для больших объективов требуются призмы значительных размеров, изготовление которых представляет известные трудности. Чтобы избежать этих трудностей, было предложено ввести призмы в пространстве с малыми поперечными размерами светового пучка. Поскольку призма при этом должна находиться в пространстве, где лучи параллельны между собой, необходимо в сходящемся после объектива пучке ставить отрицательную линзу, образующую с объективом телескопическую систему. После призмы второй объектив собирает лучи в фокусе, где образуются спектры небесных тел. Параллельность пучков после телескопической системы должна быть строго обеспечена, т. е. система должна быть хорошо откорригирована от аберраций.

Следует отметить, что угол поля зрения бесщелевых спектрографов обычно очень невелик и не превышает нескольких десятков минут.

Среди оригинальных отечественных конструкций бесщелевых спектрографов можно назвать две наиболее интересные системы.

Комбинируя систему Мерсенна с зеркальным рефлектором и вставляя спектральную призму в параллельном пучке, как это предложил О. А. Мельников и осуществил Б. К. Иоаннисиани, можно получить бесщелевой спектрограф, т. е. прибор, изображающий в своей фокальной плоскости все звезды в виде спектров.

Объектив АСИ-4, о котором мы уже упоминали, может служить астрофотографическим объективом и бесщелевым спектрографом.

Этот объектив следует рассматривать как макет большого прибора, так как при диаметре 70—80 *см* наилучшие результаты дают зеркально-линзовые системы с компенсатором в параллельном пучке, диаметр которого совпадает с диаметром входного зрачка. Системы типа АСИ-4 могут представить интерес для астрономических наблюдений при диаметрах входного зрачка не менее 1,5—2 *м*, когда объективы первого типа уже не могут быть осуществлены.

Перспективы развития астрономической оптики

Середина XX в. насыщена открытиями, которые предвещают успешное дальнейшее развитие астрономии, в частности астрономической оптики. В предыдущих разделах мы говорили, что некоторые весьма перспективные зеркально-линзовые системы в настоящее время не изготавливаются вследствие технологических сложностей обработки несферических поверхностей. Последние успехи в развитии автоматических высокоточных станков позволяют устранить это препятствие, и в скором времени можно ожидать появления значительно более мощных по всем характеристикам (диаметр, апертура, поле зрения) телескопов. Поскольку параллельно с этим будет расти чувствительность приемников, то, вероятно, удастся преодолеть одно из самых трудных препятствий на пути к познанию небесных тел — турбулентность земной атмосферы. Для многих объективов это позволит снизить продолжительность экспозиции до малых долей секунды.

Успехи в овладении космосом позволяют «обойти» атмосферные помехи путем организации астрономических станций на шарах, спутниках, специальных космических обсерваториях. Для новых объектов нужны особые телескопы, отличающиеся большой мощностью при ограниченных размерах и небольшом весе, но в настоящее время это не представляет уже непреодолимых трудностей.

Параллельно с увеличением светосилы астрофотографических и других аналогичных приборов, применение которых связано с изготовлением сложных асферических поверхностей, растет светосила спектральных инструментов благодаря появлению принципиально новых схем исследования спектров, основанных на интерференции двух или более световых пучков. Этот новый класс приборов не требует применения узких щелей, которые ограничивают светосилу спектральных приборов. Одна из основных идей, осуществленная в этих приборах и заключающаяся в том, что вместо регистрации самого спектра регистрируется некое преобразование его, может быть перенесена в область обычных оптических систем. Таким способом, согласно идее С. И. Вавилова, можно осуществить анализ дифракционного изображения небесного тела с тем, чтобы построить правильную его картину. Другими словами, нет необходимости стремиться к тому, чтобы «изображение» объекта было подобно объекту. Важно только, чтобы можно было его математически преобразовать и получить искомую структуру объекта. При этом отпадает надобность в круглом сплошном (или почти сплошном) зрачке и появляется возможность использования далеко расставленных объективов или щелей.

Глава четвертая

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ, ЭЛЕКТРОННЫЕ И ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

До недавнего времени все наши знания о Вселенной были основаны на анализе наблюдений и измерений видимого света, дошедшего до нас от небесных объектов. Видимый свет является весьма ограниченным участком обширного спектра электромагнитных колебаний, известных в настоящее время физикам. Изучение ультрафиолетового и инфракрасного излучений небесных объектов расширило наши познания о природе и физических условиях весьма отдаленных от нас источников. Совершенно очевидно, что, используя для наблюдений другие участки спектра электромагнитных волн, астрономы смогут получить дополнительные сведения о физических свойствах и природе небесных тел. Однако земная атмосфера не пропускает широкий диапазон волн электромагнитного спектра. Так, проницаемость ее на поверхности Земли сильно уменьшается для волн ультрафиолетового участка спектра длиной короче 3500 Å и достигает предела около 2950 Å. Для волн инфракрасной области спектра атмосфера частично непроницаема: она поглощает энергию в широком диапазоне спектра.

На рис. 91 изображен график проницаемости земной атмосферы для электромагнитных волн различной длины. Из него видно, что довольно большая область радиоволн, примерно от 1 до 4 *мм* и от 8 *мм* до 20 *м*, проникает через атмосферу Земли. Для волн, близких к 1 *см*, становится заметным изменение «прозрачности» атмосферы от дождя, снега и тумана. Волны более 20 *м* отражаются от ионизированных верхних слоев и не проходят сквозь атмосферу. Таким образом, из общего известного нам спектра электромагнитных волн

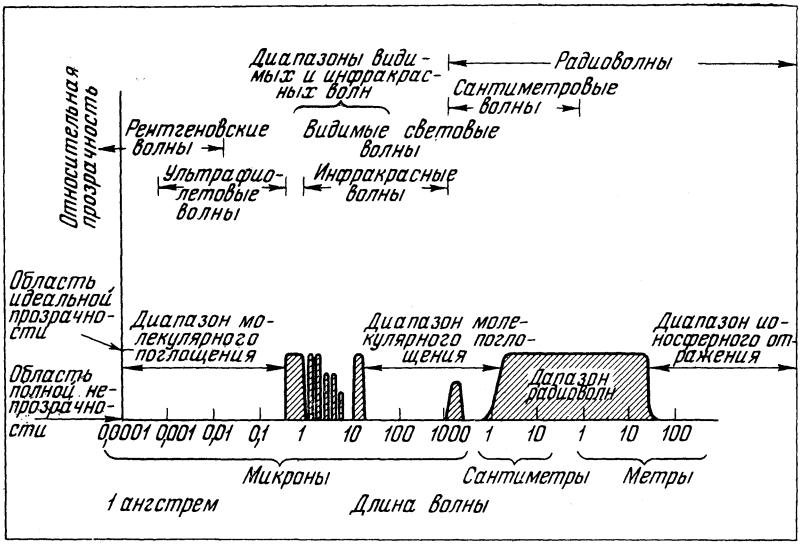


Рис. 91. График прозрачности земной атмосферы для электромагнитных волн

для астрономических исследований можно использовать сравнительно небольшой участок.

Радиоастрономические наблюдения могут производиться независимо от состояния атмосферы и условий видимости днем и ночью. Оптические же наблюдения возможны только в ясную погоду, в основном ночью.

Радиоволны слабо поглощаются межзвездным газом и межзвездной материей. Это дает нам возможность изучать более полно и подробно нашу звездную систему — Галактику, большая часть которой скрыта для визуальных наблюдений темными облаками межзвездной пыли. Путем исследования и измерения радиоизлучения от небесных объектов удалось определить такие их физические характеристики, которые недоступны оптическим наблюдениям.

С помощью радиотелескопов было обнаружено наличие отдельных космических источников радиоизлучения в Галактике. Эти источники были отождествлены с видимыми объектами и во многих случаях оказались туманностями, являющимися либо остатками сверхновых звезд, вспыхивавших когда-то в Галактике, либо внегалактическими об-

разованиями. Число известных дискретных источников радиоизлучения велико.

Уже первые радионаблюдения на волне 21 *см* показали ученым наличие радиоизлучения межзвездного водорода. Им удалось определить направление движения облаков межзвездного водорода и на основании этих данных более точно рассчитать скорость вращения Галактики. Можно предполагать, что вскоре удастся обнаружить монохроматическое излучение молекул других веществ — компонентов межзвездного газа.

Наши знания о Вселенной намного расширятся, если мы сможем достаточно подробно расшифровать ту информацию, которая попадает к нам от небесных объектов в виде радиоизлучения. Для его приема необходимы специальные устройства. Вся аппаратура, с помощью которой улавливается и регистрируется внеземное радиоизлучение, носит название радиотелескопа, а сама наука об измерении космического радиоизлучения — радиоастрономии. Между оптическими телескопами и радиотелескопами имеются существенные различия. Так, вместо линз или зеркал, применяемых в оптических приборах для собирания и фокусирования света, в радиотелескопах для этой цели применяются антенны. Вместо глаза или фотопластинки, в случае визуальных и фотографических наблюдений, здесь используется радиоприемник и и пишущее устройство, которое регистрирует радиосигналы.

Несмотря на ряд преимуществ перед оптическими системами, радиотелескопы обладают ничтожной разрешающей силой. Они пока еще не могут выделять отдельные источники радиоизлучения, имеющие малые угловые размеры. Энергия, излучаемая отдельными источниками, находящимися на расстоянии нескольких минут дуги друг от друга, улавливается радиотелескопом в виде суммарного радиоизлучения.

Для повышения точности измерений и увеличения разрешающей силы радиотелескопа применяют интерференционный метод с использованием нескольких антенн, разнесенных на расстоянии 100—200 и более длин волн, на которые рассчитана аппаратура. Но в настоящее время не построено радиотелескопа, который имел бы разрешающую силу, равную силе оптического телескопа, хотя проекты таких приборов начинают создаваться.

В оптическом телескопе разрешающая сила прямо пропорциональна диаметру зеркала или объектива, в радио-

телескопе она прямо пропорциональна площади или диаметру антенны. Если, например, для невооруженного человеческого глаза диаметр зрачка принять равным 3 *мм*, то это составит приблизительно 6000 длин световых волн. Чтобы получить в радиотелескопе такую разрешающую силу, какую имеет человеческий глаз, антенна также должна иметь диаметр, равный 6000 длинам волн. Так, для длины волны 1 *м* потребовалась бы антенна диаметром 6 *км*. А если бы, предположим, потребовалось рассчитать систему радиотелескопа с разрешающей силой, равной силе оптического телескопа с диаметром зеркала 5 *м*, то оказалось бы, что диаметр его антенны должен равняться диаметру земного шара.

Несмотря на малую разрешающую силу радиотелескопов, радиоастрономия и оптическая астрономия существенно дополняют друг друга. Удельный вес радиоисследований в астрономии пока сравнительно невелик, однако он быстро возрастает.

Развитие техники в радиоастрономии идет очень быстро. За сравнительно короткий промежуток времени, с момента первого обнаружения Янским в 1932 г. внеземного радиоизлучения на волнах 14—17 *м*, радиоастрономия сделала большие успехи, а сами радиотелескопы значительно усовершенствовались. Этому способствует бурное развитие техники приема и передачи метровых, сантиметровых и миллиметровых радиоволн, т. е. диапазона волн, используемых в современной радиолокационной технике.

Энергия радиоволн, попадающая от небесного объекта в радиотелескоп, ничтожно мала. Так, интенсивность радиоизлучения мощного источника в созвездии Лебедя на частоте 81 *Мгц* (волна 3,7 *м*) составляет $P = 13{,}5 \times 10^{-23}$ *вт/м²·гц*[1]. Для источника излучения в созвездии Кассиопеи $P = 22 \times 10^{-23}$ *вт/м²·гц*. Для слабых источников радиоизлучения в созвездиях Рыбы, Кита и ряда других интенсивность излучения на частоте 110 *Мгц* (волна 2,72 *м*) составляет только $P = 0{,}5 \times 10^{-24}$ *вт/м²·гц*.

Как во всякой электронно-усилительной аппаратуре, в радиотелескопе имеются внутренние шумы. Эти радиошумы дают усилительные радиолампы, элементы радиосхем, со-

[1] В качестве единицы потока излучения принят такой поток, который переносит мощность 1 *вт* через площадь 1 *м²* в интервале частот, равном 1 *гц*.

противления и пр. Они заглушают полезный сигнал при приеме радиоизлучения от небесного объекта. Чтобы улавливать из пространства наибольшее количество энергии радиоизлучения, увеличивают площадь антенны. Это создает условия для достижения максимальной чувствительности прибора.

Помимо внутренних шумов в радиотелескопе имеются обычно и внешние, так называемые индустриальные помехи от земных радиостанций, электрических моторов, систем зажигания в автомобильных двигателях и т. п. Кроме того,

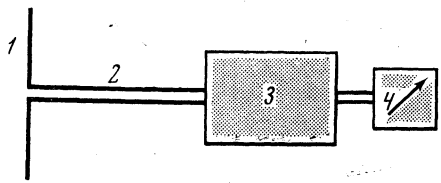


Рис. 92. Схема радиотелескопа:

1 — антенна; *2* — фидерная линия; *3* — радиоприемник; *4* — регистратор

наблюдаются радиошумы атмосферного и космического происхождения. Вместе с внутренними радиошумами схемы они понижают общую полезную чувствительность радиотелескопа.

Для уменьшения влияния внешних помех необходимо тщательно выбирать место установки радиотелескопа, особенно когда требуется высокая чувствительность. К радиоприемным устройствам телескопа предъявляются жесткие требования в отношении обеспечения минимальных внутренних радиошумов в радиосхемах.

Радиоприемные устройства, применяемые в настоящее время в радиоастрономии, позволяют измерять излучение, мощность которого составляет сотые доли процента от внутренних шумов радиотелескопа. Наименьшая энергия радиоизлучения, обнаруживаемая радиотелескопом, оказывается во много раз меньше энергии видимого света, регистрируемого фотопластинкой при помощи мощного оптического прибора большого диаметра. Отсюда можно заключить, что в некоторых случаях радиотелескоп превосходит по проницательной способности оптический телескоп даже при использовании в последнем чувствительной фотопластинки.

На рис. 92 показана принципиальная схема основных частей радиотелескопа. Применительно к ней построено дальнейшее описание отдельных частей прибора.

2. АНТЕННА РАДИОТЕЛЕСКОПА

Космическое радиоизлучение представляет электромагнитные волны всех длин широкого диапазона с самыми различными и независимо изменяющимися фазами их колебаний и носит название радиоизлучения непрерывного спектра. Пересекая провод антенны, эти электромагнитные волны образуют в нем переменные токи высокой частоты такого же широкого диапазона и фаз. Антенна телескопа избирает из общего непрерывного спектра радиоизлучения довольно узкую полосу волн, для которых амплитуда тока высокой частоты в антенне будет наибольшей. Другие радиоволны (длиннее или короче резонансной волны антенны) вызовут появление в ней токов высокой частоты с очень малой амплитудой, которые не смогут воздействовать на соответствующие усилители и регистрирующее устройство радиотелескопа.

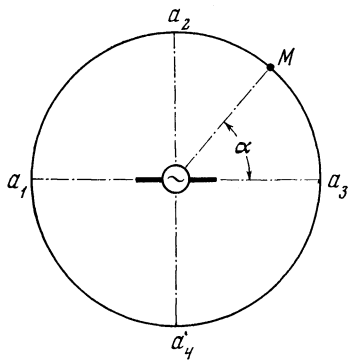


Рис. 93. Симметричный вибратор в центре окружности

a_1 и a_3 — направление оси вибратора, a_2 и a_4 — перпендикуляр к оси вибратора, α — угол между направлением приема или излучения и осью вибратора

Таким образом, антенна представляет собою монохроматор, который пропускает некоторую полосу спектра электромагнитных волн.

Простейший тип приемной антенны — так называемый симметричный полуволновой вибратор.

Одной из основных характеристик всякого электрического вибратора является его коэффициент направленного действия, т. е. свойство вибратора по-разному принимать энергию из пространства в зависимости от угла направления приходящей на вибратор электромагнитной волны. Коэффициент направленного действия обычно определяется диаграммой направленности вибратора, которая строится в полярных координатах. При ее построении из некоторого центра проводят линии под различными углами к оси размещения вибратора-антенны. На этих линиях откладывают отрезки прямой, длина которых соответствует интенсивно-

сти излучения в данном направлении. Их называют векторами направленности.

Для случая приема электромагнитной энергии они соответствуют величине принимаемого тока в вибраторе, как функции угла α для данного направления приходящей электромагнитной волны. Если два вектора направленности вибратора имеют величину, равную половине максимума излучения, и расположены симметрично относительно него, то угол α, образованный этими векторами, часто называемый углом раскрыва, определяет ширину диаграммы направленности (условно ее называют шириной диаграммы направленности по половинной мощности). На рис. 93 показано

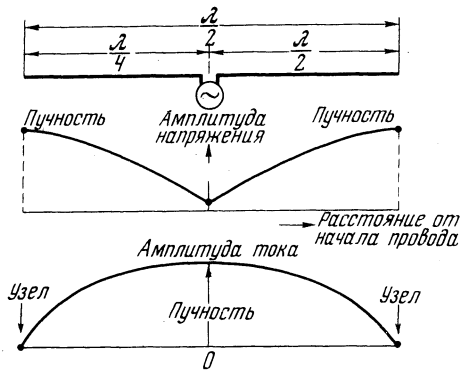


Рис. 94. Распределение тока и напряжения в полуволновом вибраторе

расположение симметричного вибратора в центре окружности. Вибратор может быть использован не только для приема, но и излучения энергии, т. е. для передачи радиоволн. Такая антенна имеет одинаковые диаграммы направленности для приема и передачи. Поэтому в некоторых случаях приемную антенну при изучении ее электрических свойств можно рассматривать как передающую, где вместо радиоприемника установлен генератор колебаний высокой частоты.

Рис. 94 показывает распределение высокочастотного тока и напряжения в полуволновом симметричном вибраторе, питаемом от генератора высокой частоты, при резонансе. Очевидно, что такое же распределение тока и напряжения

останется и в том случае, если генератор высокой частоты заменить радиоприемником, а сам вибратор подвергнуть облучению электромагнитной волной, соответствующей резонансной волне вибратора. Напряжение в центре вибратора на схеме не равно нулю, потому что в этой точке приложена электродвижущая сила высокочастотного генератора.

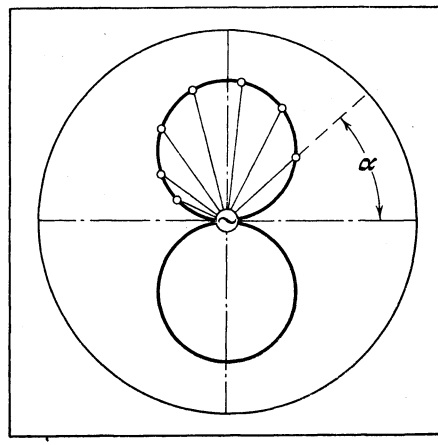


Рис. 95. Полярная диаграмма направленности симметричного вибратора

Собственная длина волны вибратора определяется равенством

$$\lambda_0 = 2l,$$

где l — полная геометрическая длина вибратора, *м*;
λ_0 — электрическая длина волны, *м*.

Резонансная частота вибратора в герцах равна

$$f_0 = \frac{C}{\lambda_0},$$

где C — скорость света, равная 3×10^8 *м/сек*; а в килогерцах

$$f_0 = \frac{1{,}5 \times 10^8}{l}.$$

Различают два типа диаграмм направленности излучения вибратора: 1) в его перпендикулярной плоскости, 2) в

плоскости, проходящей через вибратор. На рис. 95 изображена полярная диаграмма второго типа направленности излучения, имеющая вид восьмерки. Из нее видно, что максимум излучения лежит на перпендикуляре к оси вибратора. Вдоль оси вибратор не излучает и не принимает радио-

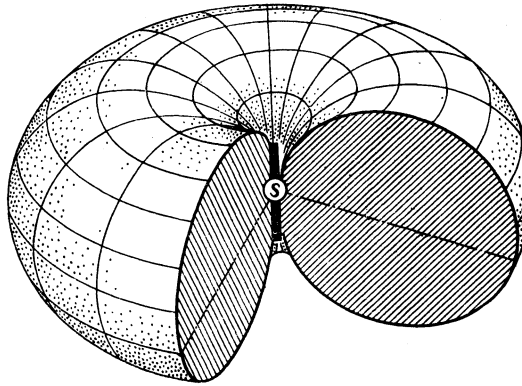


Рис. 96. Диаграмма пространственной направленности излучения симметричного вибратора

волн. Диаграмма пространственного излучения симметричного вибратора, подвешенного достаточно высоко над землей (рис. 96), показывает излучение радиоволн равномерно по всем направлениям. Направленность его можно улучшить применением комбинации вибраторов: увеличение числа

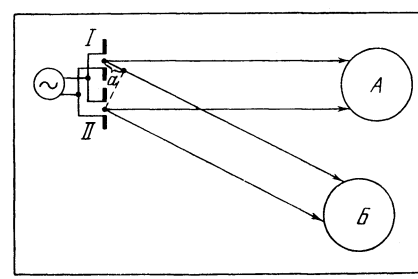


Рис. 97. Направленность излучения двух вибраторов, расположенных на одной линии

вибраторов по вертикали улучшает направленность в перпендикулярной плоскости, а расположение их в один ряд — в плоскости самих вибраторов.

Способ получения более острой направленности излучения при помощи двух вибраторов, расположенных на одной линии, виден из рис. 97. Вибраторы питаются током высокой частоты, подаваемым на них в одинаковой фазе. Тогда фазы излучения электромагнитной волны вибраторами также совпадают. В области *А*, где электромагнитные волны находятся в фазе, напряженности электромагнитного поля складываются, так как расстояние от обоих вибраторов одинаково. В области *Б* электромагнитные волны не совпадают по фазе, так как расстояние от вибраторов увеличилось на *а*. При сложении полей, не совпадающих по фазе, напряженность суммарного поля окажется меньше, чем в случае совпадения фаз. Если отрезок *а* равен $\lambda/2$, то поля будут сдвинуты по фазе на половину периода, т. е. на 180°, и напряженность электромагнитного поля станет равна нулю. Вследствие этого направленность излучения перпендикулярно оси вибратора сильно возрастает (область *А*), а вдоль оси — отсутствует.

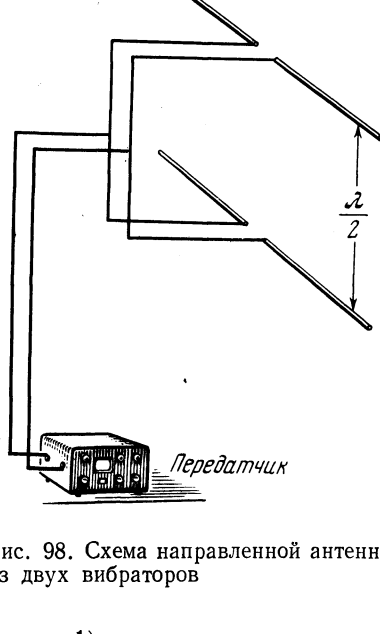


Рис. 98. Схема направленной антенны из двух вибраторов

Схема простейшей направленной антенны из двух вибраторов, расположенных один над другим на расстоянии полуволны, показана на рис. 98. Вибраторы питаются током высокой частоты, подаваемым в одинаковой фазе. Точное совпадение фаз тока в обоих вибраторах достигается одинаковой длиной соединительных проводов между ними и источником. В этом случае энергия излучается только перпендикулярно плоскости вибраторов в обе стороны, не распространяясь вверх и вниз. На рис. 99 дана диаграмма пространственной направленности излучения двухвибраторной антенны.

Диаграмма, изображенная на рис. 100, дает представление о направленности излучений в плоскости ряда вибраторов (диполей), расположенных вдоль оси xx' на расстоянии $\lambda/2$ один от другого. Количество вибраторов n равно соответственно 2, 4, 6, 8. Их оси расположены перпендикулярно плоскости чертежа. Из рисунка видно, что с увеличением числа вибраторов увеличивается направленность антенны. Очевидно, таким путем излучение может быть сосредоточено в пределах очень малого угла.

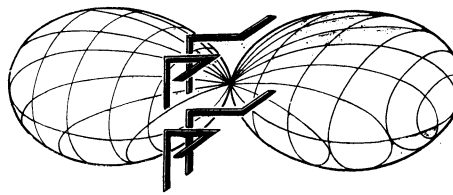


Рис. 99. Диаграмма пространственной направленности антенны из двух симметричных вибраторов

На рис. 101 показана антенна, смонтированная из 16 симметричных вибраторов, размещенных в четыре яруса по четыре вибратора в каждом. Расстояние между ярусами равно $\lambda/2$. Провода, соединяющие вибраторы двух соседних ярусов, перекрещиваются. Этим достигается совпадение токов по фазе в вибраторах. Расстояние между ярусами также равно $\lambda/2$. Все вибраторы питает ток в одинаковой фазе, для чего применено симметричное соединение проводов. В этой системе площадь, занимаемая вибраторами, называется полотном антенны.

Многовибраторная антенна дает излучение в двух направлениях, перпендикулярных полотну — вперед и назад. Чтобы получить излучение только в одном направлении, позади вибраторов помещают плоский металлический экран-сетку. В этом случае вся энергия излучения будет сосредоточена в узком конусе. Обычно отражательный экран располагается на расстоянии $\lambda/8$ от антенны. У антенны, имеющей высоту a и ширину b, лепесток диаграммы направленности излучения в вертикальной плоскости будет заключен в пределах угла около $60\ \lambda/a$ градусов, а в горизонтальной плоскости — $60\ \lambda/b$ градусов.

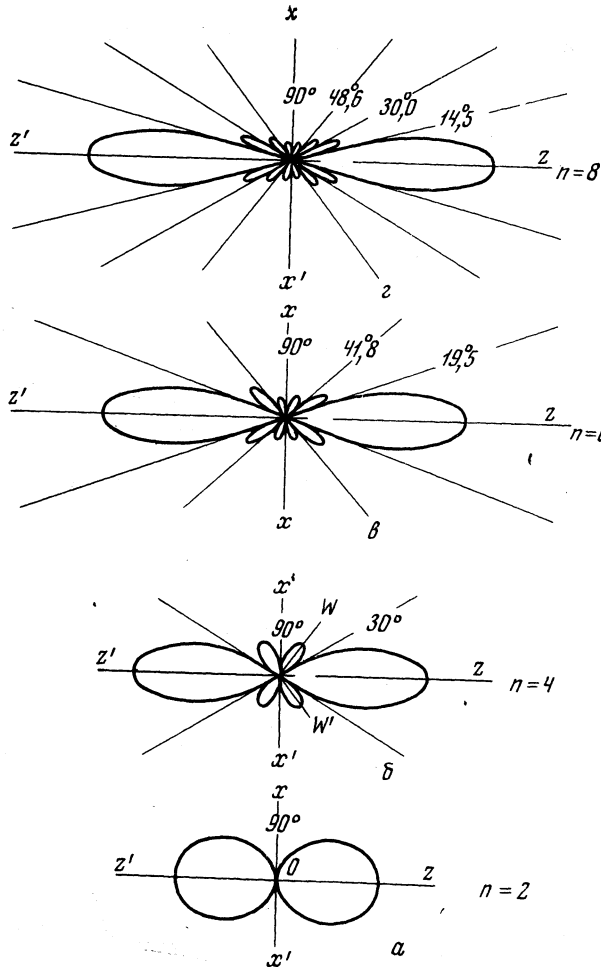


Рис. 100. Диаграммы направленности излучения для ряда вибраторов

Направленное действие антенны принято обозначать коэффициентом направленности G, который выражает отношение направленной излученной мощности к мощности

изотропного излучения (равномерное распространение во все стороны) при прочих одинаковых условиях. Значение G выражается равенством

$$G = \frac{P_A}{P_B},$$

где P_A — поток энергии от данной антенны в направлении максимального излучения на расстоянии R; P_B — поток энергии от изотропного излучателя на расстоянии R.

В обоих рассматриваемых случаях подводимая к антеннам мощность генератора высокой частоты одинакова.

Для полуволнового вибратора $G = 1{,}64$. Для многовибраторной антенны $G = 1{,}64n$, где n — число вибраторов. Увеличение числа вибраторов в антенне в n раз увеличивает остроту диаграммы направленности, и вследствие этого увеличивается энергия излучения в одном направлении. Если антенна используется для приема электромагнитных волн, то характеристика ее направленности остается такой же, как и в случае излучения. Вполне очевидно, что принимаемая энергия увеличивается также в одном направлении.

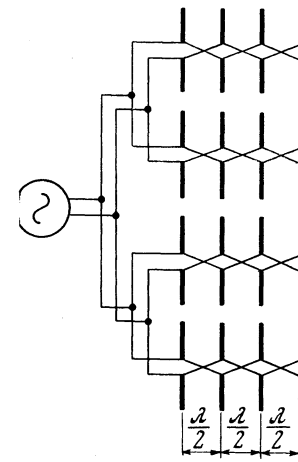


Рис. 101. Схема многовибраторной направленной антенны

Рассмотренный тип многовибраторной антенны относится к классу антенн с активными вибраторами, так как все вибраторы соединены проводами (фидерами) или с приемником, или с передатчиком. Длина соединительных фидеров тесно связана с рабочей длиной волны антенны. Имеются также типы антенн, в которых используются так называемые пассивные элементы, или пассивные вибраторы, совместно с активными, такая система применяется также для увеличения направленного действия антенны. В простейшем случае антенна может состоять из двух вибраторов— активного и пассивного. Ток во втором вибраторе может быть получен без помощи соединительных проводов от источ-

ника электромагнитных колебаний. Если к первому вибратору подводится ток высокой частоты, то созданное им электромагнитное поле само возбуждает электродвижущую силу во втором вибраторе, который, в свою очередь, становится источником излучения электромагнитных волн. Электромагнитное поле излучения в удаленной от вибраторов точке равно сумме излучений первого и второго вибраторов. Влияние пассивного вибратора на диаграмму направленности антенны зависит также от его длины и расстояния между пассивным и активным вибраторами. Если это расстояние d (рис. 102) имеет четверть длины волны или меньше и если длина l пассивного вибратора $A'B'$ немного больше половины длины волны, то он действует как отра-

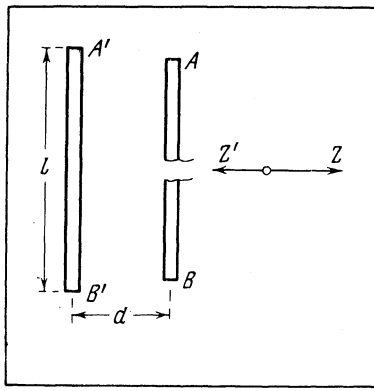


Рис. 102. Схема активного и пассивного вибраторов

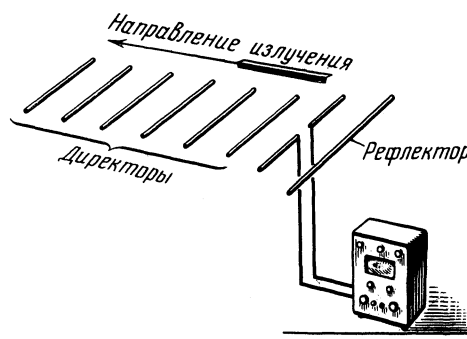


Рис. 103. Схема антенны с рефлектором и директорами

жатель, излучая концентрированную энергию в направлении Z, т. е. от пассивного вибратора к активному. Если l меньше половины длины волны, то излучение будет направлено от активного вибратора к пассивному, т. е. в сторону

Z'. Пассивный вибратор такого назначения, в отличие от рефлектора, называется директором.

Для получения более узкой направленности антенны часто применяют несколько или много пассивных вибраторов в различных комбинациях. Антенна с рефлектором и несколькими директорами (рис. 103) называется антенной типа волнового канала. При правильном выборе конструкции

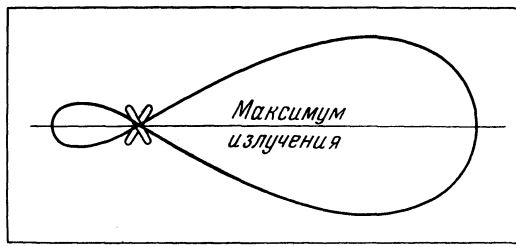


Рис. 104. Диаграмма излучения антенны типа волнового канала

в такой системе можно получить очень сильную концентрацию излучения в направлении директоров (рис. 104). Иногда для увеличения направленности применяют много пассивных вибраторов, расположенных по параболической кривой, как указано на рис. 105. Параболический рефлектор изготавливают обычно не из отдельных вибраторов, а из листового металла, подобно зеркалу в осветительных установках, или же из металлической сетки, натянутой на каркасе. Несмотря на то, что плоские многодипольные антенны широко применяются для различных целей, они имеют один серьезный недостаток: каждая антенна может работать лишь на одной определенной длине волны. Часто необходимо иметь узконаправленные антенны, работающие в широком диапазоне волн. Тогда применяют обычно параболическое зеркало, представляющее собой отражающую поверхность, изготовленную или из металлических листов, или из проволочной сетки, в фокусе которой помещена антенна, называемая облучателем. На рис. 106 показана схема оригинальной широкополосной (например, 200—300 *Мгц*, $\lambda = 1{,}5 - 1$ *м*) спиральной антенны и ее диаграмма излучения.

Другим типом антенны может быть система с параболическим зеркалом. Диаграмма направленности параболиче-

ского зеркала состоит из узкого главного лепестка с несколькими боковыми лепестками.

Угловая ширина главного лепестка обратно пропорциональна диаметру зеркала. Коэффициент направленного

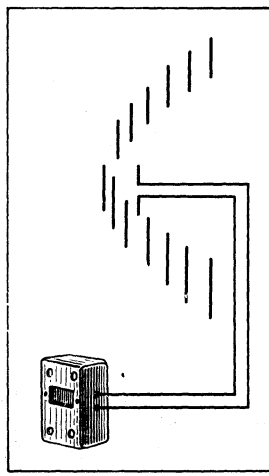


Рис. 105. Схема антенны с параболическим рефлектором из многих пассивных вибраторов

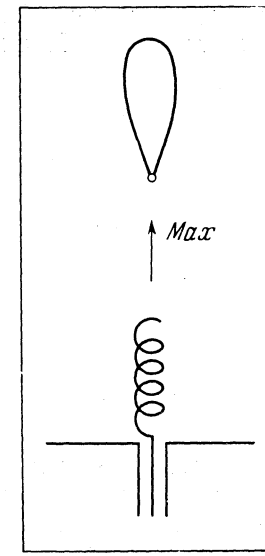


Рис. 106. Схема спиральной антенны и диаграмма ее излучения

действия антенны с параболическим зеркалом определяется равенством

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2},$$

где A — площадь круга, ограниченная краем зеркала;

λ — длина рабочей волны. Частоту настройки антенны можно менять сменой вибраторов, помещаемых в фокусе параболоида. При работе на более длинных волнах направленность ее действия ограничена диаметром зеркала: коэффициент направленности быстро уменьшается, когда длина волны становится близка к диаметру отражателя. Пока размеры вибратора малы по сравнению с диаметром рефлек-

тора, антенна действует эффективно. Для более коротких волн коэффициент направленности определяется точностью изготовления отражающей поверхности. Если зеркало сделано из металлической сетки, то коэффициент направленности и усиление антенны ограничиваются размером проволочных ячеек. Обычно форма параболы у отражателя поддерживается с точностью до 0,1 длины волны. С увеличением длины волны должен расти и диаметр зеркала. При этом условии коэффициент направленности остается прежним. Однако увеличение размеров зеркала удорожает и усложняет строительство радиотелескопа. Поэтому для волн больше 1 *м*, особенно для волн порядка 10 *м*, более целесообразными оказываются многодипольные антенны с активными или пассивными элементами.

Излучатель, изображенный на рис. 106, по своим электрическим качествам и характеристикам может конкурировать с разобранными ранее образцами. Это — спиральная антенна, используемая в последнее время в некоторых радиотелескопах. Она представляет собой проволочную спираль, закрепленную на металлической плоскости и соединенную с генератором (при излучении) или приемником (при приеме) энергии. Геометрическая длина витка близка в ней длине рабочей волны. Излучение такой спирали максимально сосредоточено в направлении ее оси.

Угол направленности излучения (или угол раствора диаграммы) зависит от длины спирали, уменьшаясь с ее длиной. Коэффициент направленности G для рабочей волны 10 *см* изменяется при этом в зависимости от угла α и длины спирали l следующим образом (см. таблицу).

l	α	G
0,5	58	3,5
1,2	43	4,67
6,0	20	10

Важным свойством спиральной антенны является ее широкополосность, т. е. способность работать в обширном диапазоне волн без замены излучателя. Например, радиотелескоп в штате Огайо работает на таком типе антенны в диапазоне частот 200—300 *Мгц* (волны 1,5—1 *м*). Для увеличения направленности применяют несколько рядов спиральных антенн. Как и у обычных антенн с несколькими вибраторами, коэффициент направленности спиральной антенны возрастает с увеличением числа спиралей.

Все рассмотренные антенны работают в диапазоне волн длиннее 1 *м*. Антенны для более коротких радиоволн (сверхвысокие частоты 300—30 000 *Мгц*) обладают некоторыми особенностями и конструктивными отличиями. Электромагнитные волны сверхвысоких частот, подобно оптическому лучу, распространяются только прямолинейно. Они мало подвержены характерной для длинных волн дифрак-

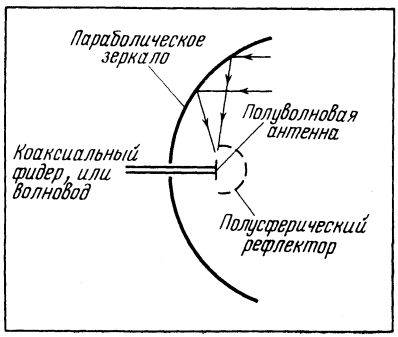


Рис. 107. Схема сечения параболоида вращения

ции, т. е. изменению направления распространения волны около края препятствия. Подобно световым лучам они хорошо фокусируются. Параболическое зеркало, при работе на сверхвысоких частотах, обладает большим коэффициентом направленности, поэтому и является самым распространенным типом антенны. На рис. 107 дана схема поперечного сечения параболического зеркала с вертикальным вибратором в его фокусе. Добавочный экран (контррефлектор) в виде полусферы, расположенный сзади вибратора, используется для добавочного направления излучения вибратора к поверхности зеркала. Применение его усиливает направленность антенны. Контррефлектор может иметь также вид пассивного элемента, направляющего излучение от главного вибратора на зеркало. Типичная диаграмма направленности антенны такого типа видна на рис. 108.

Другая форма параболического зеркала — параболический экран с открытыми или закрытыми торцами (рис. 109). Вибратор установлен в его фокусе.

На рис. 110 показаны антенны с отражателями и волноводами, открытыми на конце, применяемые для сверхвысоких частот. Антенны, работающие на дециметровых и сантиметровых волнах (сверхвысокие частоты), могут иметь

рупорные излучатели (рис. 111). Применение их имеет практический смысл только в высокочастотном диапазоне из-за ограничений, определяющихся размерами рупоров. Обычно стороны рупора (квадратного) должны быть в несколько раз

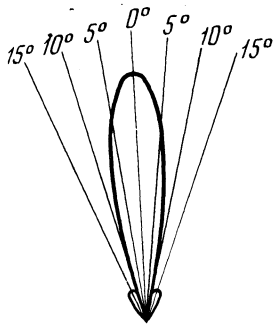


Рис. 108. Типичные диаграммы направленности параболоида

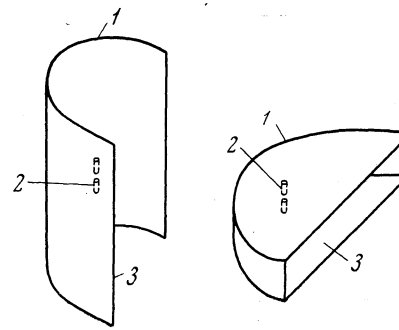


Рис. 109. Параболический цилиндр с открытыми и закрытыми торцами:

1 — параболическая поверхность; *2* — возбуждающая антенна в фокусе; *3* — раскрыв

больше рабочей длины волны. Эти системы излучателей для длинных волн занимали бы слишком большой объем. В них нет настроенных элементов, и поэтому они являются

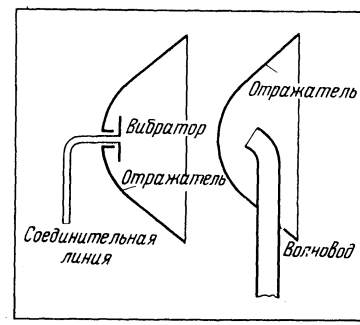


Рис. 110. Антенны для сверхвысоких частот

широкодиапазонными. Форма рупора может быть различной — круглой, квадратной или прямоугольной. Вместе с размером и углом раскрыва она сильно влияет на диаграмму излучения.

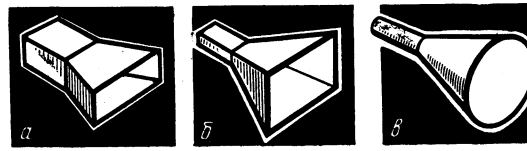


Рис. 111. Рупорные излучатели:
а — секториальный; *б* — пирамидальнй; *в* — конический

Часто рупорная антенна используется совместно с параболическим отражателем.

3. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ПРИЕМА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Сильно повысить разрешающую силу радиотелескопа можно применением интерференционного метода приема радиоизлучения (от $\alpha = 10°$ при использовании обычной антенны до $\alpha = 10'$ при интерференционном методе наблюдения). Для этих целей одинаковые антенны устанавливают друг от друга на расстоянии, равном 100 длинам волн и более (это расстояние называется базой радиотелескопа). Радиоприемник располагают на одинаковом расстоянии между антеннами и соединяют с ними специальным электрическим (коаксиальным) кабелем. В интерференционном телескопе используют интерференцию от ряда антенн (в нашем случае — от двух).

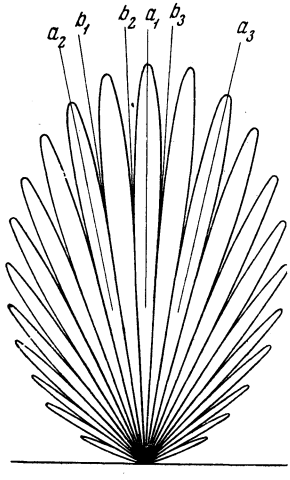


Рис. 112. Многолепестковая диаграмма направленности радиоинтерферометра

Существует радиотелескоп, в котором явление интерференции возникает в результате приема антенной, установленной на высоком прибрежном утесе, радиоволн, отраженных от морской поверхности.

На рис. 112 показана многолепестковая диаграмма направленности радиоинтерферометра.

Рассмотрим принцип действия радиоинтерферометра с разнесенными антеннами, схема которого показана на рис. 113. Косо падающие на антенны радиоволны проходят разные пути от источника. Вследствие этого фазы напряженности электрического поля волны в местах, где находятся обе антенны, не одинаковы. Электрические колебания в обеих антеннах будут также иметь различные фазы, создавая

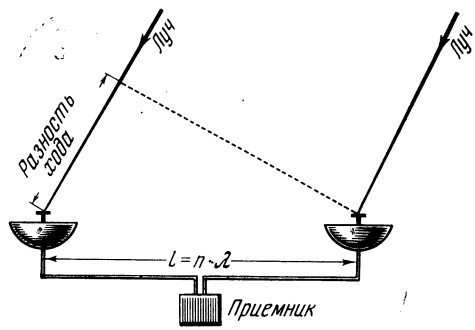


Рис. 113. Схема двухантенного радиоинтерферометра

различные напряжения на входе радиоприемника. Если разность фаз равна нулю, напряжения антенн складываются. Фазы, отличающиеся на 180°, создадут напряжения противоположного знака, и результирующее напряжение станет равным нулю. Таким образом на вход приемника попадает интерференция напряжений от обеих антенн.

Разность фаз электрического напряжения в антеннах зависит от расстояния между ними и угла падения лучей источника радиоизлучения на небе. Из-за вращения Земли источник радиоизлучения перемещается по небу, наклон радиолучей плавно изменяется, вследствие чего постепенно изменяется и разность фаз между интерферирующими напряжениями на входе радиоприемного устройства от нуля до 180°. Когда разность фаз достигает 180°, радиоизлучение источника не наблюдается. В следующий момент времени, когда положение источника радиоизлучения по отношению к неподвижной антенне изменится и разность фаз станет другой, на вход приемника снова поступит некоторая мощность (с максимумом при разности фаз, равной нулю). Таким образом, напряжение на входе приемника периодиче-

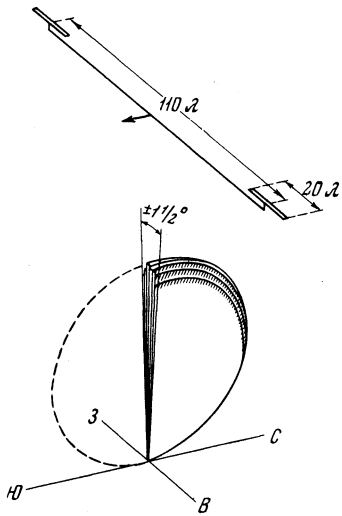


Рис. 114. Пространственная диаграмма направленности радиоинтерферометра с двумя антеннами

ски меняется. Возвращаясь к рисунку 112, где изображена многолепестковая диаграмма направленности, заметим, что в точках a_1, a_2, a_3 разность фаз интерферирующих волн равна 0°, в точках b_1, b_2, b_3 она соответствует 180°. Чем больше база интерферометра, тем больше лепестков имеет диаграмма, а их угловые размеры (ширина) меньше.

Однако концентрация энергии радиотелескопом увеличивается только в направлении базы. Перпендикулярно базе (т. е. в вертикальной плоскости) она остается такой же,

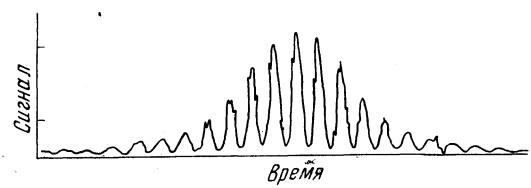


Рис. 115. Запись сигнала, полученного при прохождении источника радиоизлучения через лепестки диаграммы направленности радиоинтерферометра

как у каждой из антенн. Часть такой диаграммы направленности в пространственном изображении показана на рис. 114, где она соответствует положению базы антенны, изображенному на верху рисунка.

Если источник радиоизлучения имеет небольшие угловые размеры (меньше размеров каждого лепестка), то регистрирующий прибор запишет график принимаемого радиоизлучения в виде волнистой линии с максимумами и минимумами (рис. 115). Если угловые размеры источника радио-

излучения превосходят величину лепестков диаграммы направленности интерферометра, то запись имеет вид плавной линии, без максимумов и минимумов.

Морской интерферометр действует таким же образом, как и интерферометр с двумя антеннами. Разница заключается в том, что вместо двух антенн здесь действует одна, а для интерференции радиоволн используется отражающая поверхность моря. Один луч от источника радиоизлучения попадает на антенну, установленную на высокой горе, непосредственно, а второй — после отражения от поверхности моря. Для этого типа радиотелескопа разность фаз между интерферирующими лучами зависит и от высоты источника над горизонтом, и от высоты антенны над уровнем моря. Увеличение высоты антенны и уменьшение длины волны увеличивает разрешающую силу морского радиоинтерферометра. Увеличение высоты антенны влияет на разрешающую силу таким же образом, как увеличение базы в двухантенном интерферометре. Морской интерферометр позволяет вести наблюдения только тогда, когда море спокойно и источник радиоизлучения находится низко над горизонтом. В этом случае достигается наивыгоднейший угол падения радиолучей, при котором возможно появление интерференции. Если антенна имеет малую направленность в вертикальной плоскости, то наблюдения возможны и при больших углах над горизонтом.

Для увеличения разрешающей силы интерферометра применяют большое число антенн. Можно назвать, например, радиоинтерферометр в Австралии, вблизи Сиднея, который имеет 32 параболических отражателя с зеркалами диаметром 2 *м* каждое. Работая на волне 21 *см*, он дает ширину лепестка интерференционной диаграммы направленности около 3′ дуги, расстояние между лепестками — около 90′. Более подробно об этом типе радиотелескопа мы расскажем при описании его конструкции.

На рис. 116 схематически изображен ряд типов радиотелескопов с различными антеннами, начиная от простого вибратора и кончая интерферометром с 32 антеннами, и диаграммы направленности каждого из них. Для масштаба взят диск Солнца, радиоизлучение которого должны принимать антенны.

Помимо интерферометра с неподвижной диаграммой направленности за последнее время разработан тип интерферометра с меняющейся или, точнее говоря, с «качающейся»

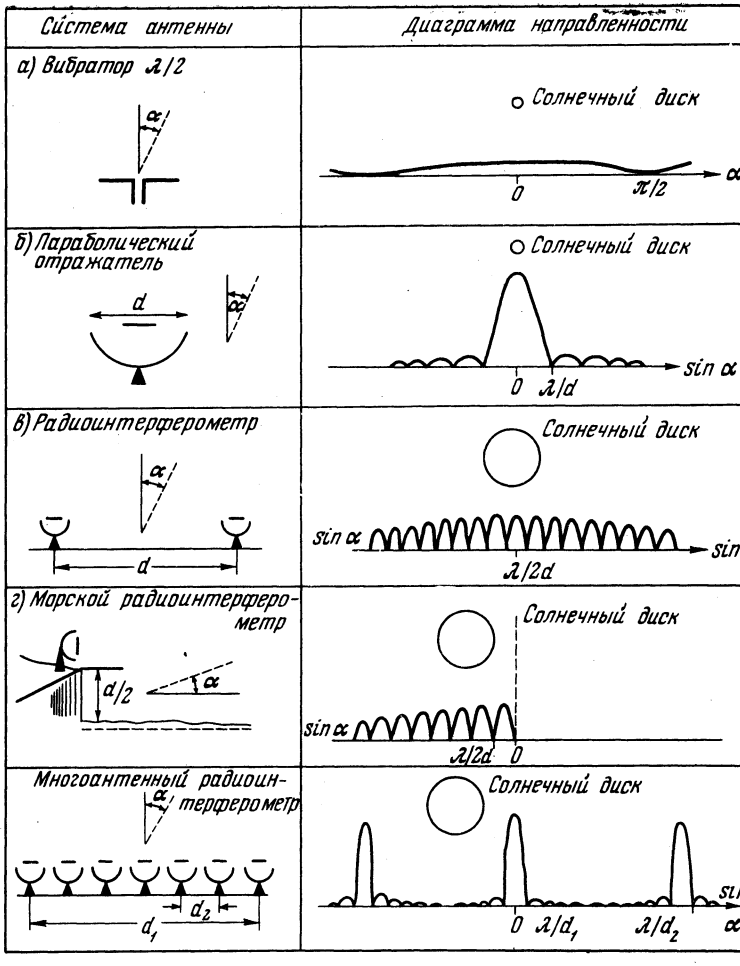


Рис. 116. Сравнительные характеристики различных типов антенн

диаграммой направленности. В обычном случае, когда многолепестковая диаграмма неподвижна, период интерференционной картины определяется временем перемещения источника радиоизлучения, вызванного вращением Земли, на угол, равный раствору одного лепестка. Продолжительность такого периода обычно составляет несколько минут.

Наблюдать чередования максимумов и минимумов интерференционной картины всех кратковременных излучений, длящихся тоже несколько минут, из-за этого не удается.

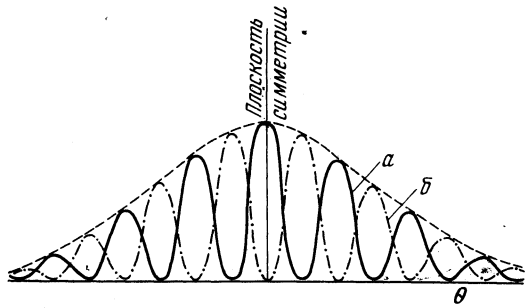


Рис. 117. Диаграмма направленности двух разнесенных антенн, соединяемых в фазе *а* и противофазе *б*

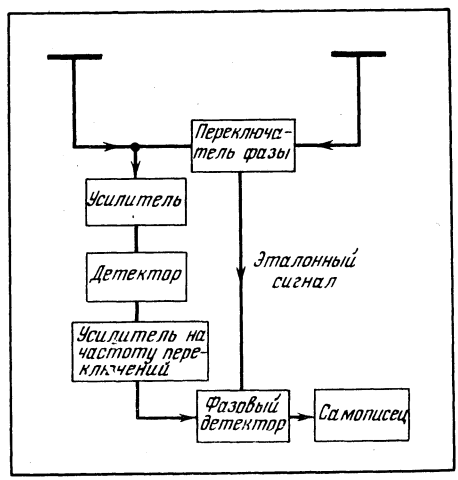


Рис. 118. Блок-схема системы с переключением фазы

Следовательно, нельзя использовать все возможности интерференционного метода.

Метод «качающейся» диаграммы позволяет сделать малым период интерференционной картины и получать ее от источника кратковременного излучения. «Качание» диаграммы направленности достигается периодическими из-

менениями фазы высокочастотного напряжения в одной из антенн. Это можно сделать двумя способами: 1) изменениями самой схемы радиоприемного устройства, например фазы гетеродина при раздельном преобразовании электрических колебаний от двух антенн, 2) периодическим, со скоростью 25—30 раз в секунду, включением отрезка провода длиной в половину волны в одну из кабельных линий, соединяющих антенну с приемником. В итоге происходит дополнительный сдвиг фаз приходящих сигналов, и на многолепестковой диаграмме направленности максимумы и минимумы периодически смещаются (меняют места). На рис. 117 приведены две диаграммы радиоинтерферометра, работающего с двумя антеннами, включаемыми в фазе *а* и противофазе *б*.

На рис. 118 показана блок-схема радиоинтерферометра с переключаемыми фазами, а на рис. 119 — запись радиоизлучения от источника в созвездии Кассиопеи, полученная радиотелескопом, в котором использовалась схема переключения фаз (рабочая волна 3,7 *м*). Для сравнения на рис. 120

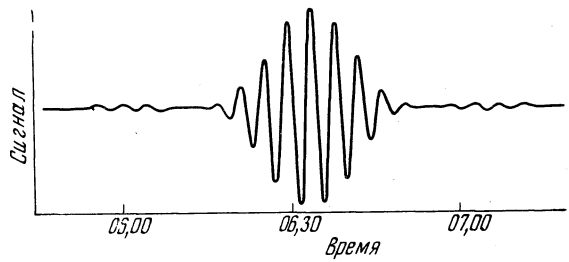


Рис. 119. Запись радиоизлучения, полученная на системе с переключением фазы (волна 3,7 *м*)

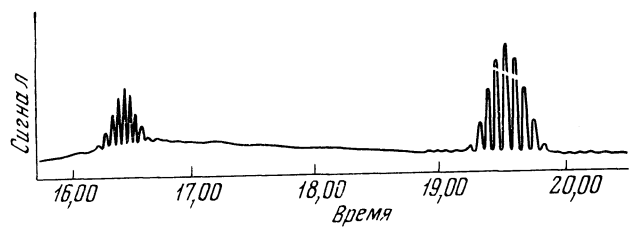


Рис. 120. Запись двух радиоизлучений, полученная при помощи обычного интерферометра

дан образец записи радиоизлучения, полученного обычным радиоинтерферометром без схемы переключения фаз.

Радиоинтерферометр с «качающейся» диаграммой (или переключением фаз) имеет ряд преимуществ перед системой с неподвижной диаграммой. К их числу относятся: 1) возможность регистрации кратковременного радиоизлучения; 2) значительное снижение влияния фона от галактического радиоизлучения при регистрации слабых по интенсивности источников; 3) малая чувствительность схемы к внешним электрическим помехам. Поэтому он наиболее пригоден для регистрации источников слабого радиоизлучения.

4. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ И ВОЛНОВОДЫ

В антенне радиотелескопа, улавливающей радиоизлучение, возникают высокочастотные электрические колебания, передающиеся в дальнейшем радиоприемному устройству. Для передачи энергии от антенны к приемнику служат электрические линии, называемые часто фидерными линиями или просто фидерами. Они могут достигать большой длины. Например, для радиоинтерферометра с базой 200 длин волн, при рабочей длине волны 10 *м*, длина фидерной линии достигает двух километров. Если такая линия обладает приемными свойствами, т. е. принимает и радиоизлучение и земные радиопомехи, то помимо полезных радиосигналов, поступающих от антенны, на вход радиоприемника попадут и посторонние помехи. Они уменьшат предельную чувствительность радиотелескопа, а в некоторых случаях сведут на нет все достоинства приемной антенны. Если в фидерной линии происходят большие электрические потери, то полезный сигнал на входе радиоприемника ослабевает, и его трудно различить на фоне собственных шумов радиотелескопа. Чтобы соединительная линия обладала минимальными приемными свойствами, она должна быть экранирована от воздействия электромагнитых волн.

Приступая к описанию систем соединительных линий, напомним кратко некоторые свойства электромагнитных волн. Обычно все волны принято разделять на два класса: 1) связанные волны, распространяющиеся вдоль соединительных линий, и 2) волны, излучаемые в пространство (радиоизлучение). Распространение электрической энергии по проводам вызывается движением вдоль них электромагнитной волны. При этом провода не несут электрической энергии, а только направляют движение электромагнитного поля,

распространяющегося вдоль проводника, со скоростью, близкой к скорости света. Индуцированное напряжение вызывает движение электронов (возникновение тока) в проводнике. Таким образом, напряжение и ток в проводе возникают только благодаря изменению электромагнитного поля. Эффект связанного распространения волн наблюдается в открытых металлических проводах, экранированных и коаксиальных линиях, в полых металлических трубах и т. д. Все эти устройства являются радиоволноводами, или просто волноводами, поскольку они направляют движение волн. Однако термин «волновод» применяется главным образом только к полым металлическим трубам круглого и прямоугольного сечения. Поэтому, упоминая о волноводах, мы будем подразумевать полые металлические трубы, служащие для направления электромагнитных волн.

Одна из наиболее употребительных систем соединительных линий — коаксиальная (коаксиальный кабель) — представляет собой провод, помещенный внутри трубы, являющейся наружным проводником, соосно с ней. Внутренний проводник изолируется от наружного шайбами или прокладками, расположенными на определенных расстояниях одна от другой и обладающими хорошими изоляционными свойствами и малыми электрическими потерями. Существуют коаксиальные кабели, где промежуток между внутренним и внешним проводниками сплошь заполнен изолирующим материалом. Часто внешнюю трубу заменяют металлической оплеткой. В этом случае коаксиальный кабель делается гибким.

Другой тип передающей линии — экранированный двухпроводный кабель. Он состоит из двух параллельных проводников, отделенных друг от друга изоляционным материалом и заключенных в медную оплетку — экран. Снаружи кабель покрыт резиной для предохранения от влаги и механических повреждений.

Эти два типа фидерных линий применяются главным образом при работе на сравнительно длинных волнах. Передача энергии более коротких волн, порядка 10 *см* и ниже, осуществляется волноводами из полых металлических труб. Одно из преимуществ волноводов перед коаксильными линиями состоит в том, что в них происходит меньше электрических потерь. К их недостаткам следует отнести ограниченную способность передачи частот не ниже критической (минимальной). Частоты ниже критической (или, иначе говоря,

волны длиннее критической) не проходят через волновод данного сечения. Волноводы редко применяются для передачи энергии волн длиннее 10 *см*, так как их размеры становятся слишком большими. Если, например, волновод прямоугольного сечения для передачи волны в 10 *см* должен иметь ширину 5 *см*, то для волны 1 *м* ширина его возрастает до 50 *см*, а для волны 10 *м* — до 5 *м*.

Волноводы могут иметь сечение самой разнообразной геометрической формы — квадратной, многоугольной, круглой, эллиптической и т. д. Помимо передачи энергии волноводы могут быть использованы в схеме радиоприемника для создания конструкции резонансных колебательных контуров, называемых объемными или полыми резонаторами. Принцип действия резонатора удобнее всего представить, рассматривая его как секцию волновода, замкнутого с обеих сторон отражающими перегородками. Под влиянием поступающих электромагнитных колебаний, например через отверстие в одной из перегородок, на внутренней поверхности оболочки возникают электрические высокочастотные токи. Они достигают наибольшей величины при определенных соотношениях между частотой тока и геометрическими размерами секции.

В секции возникают стоячие электромагнитные волны. Условия их возникновения определяются геометрическими размерами и структурой электромагнитного поля в резонаторе. В нем различаются два вида колебаний: электрические и магнитные. Настройка резонатора на заданную длину волны осуществляется изменением его геометрических размеров путем перемещения в резонаторе специального поршня. В настоящее время полые резонаторы широко применяются в радиоприемниках сверхвысоких частот. С их помощью достигаются: 1) высокая стабильность электрических параметров, 2) малые электрические потери, что дает возможность получать большое усиление сигнала в усилителях сверхвысоких частот. Схемы их включения будут приведены в главе о радиоприемниках.

5. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА АНТЕННЫ

Радиоволны, излучаемые небесными источниками, приходят к нам с беспорядочно распределенными фазами и частотами. Радиоастрономические наблюдения заключаются в том, что энергия этих хаотических колебаний, улавливае-

мых антенной в данном направлении на небесной сфере, измеряется на радиочастотах. Так как эта энергия приблизительно равномерно распределена на полосе частот Δf, то очевидно, что измеряемая мощность должна быть пропорциональна Δf и выражаться в ваттах на герц полосы пропускания приемника. Часто энергию, попадающую на приемную антенну, выражают через эквивалентную температуру антенны $T_э$. Представим себе, что приемная антенна расположена внутри однородной среды с температурой T. Тогда она явится источником энергии P, определяемой выражением:

$$P = KT\Delta f,$$

где K — постоянная Больцмана $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж* $\cdot$ *гр*$^{-1}$; T — абсолютная температура; Δf — полоса частот, в которой измеряется энергия.

Если сопротивление, равное сопротивлению антенны, нагреть до температуры T, то оно тоже будет давать энергию в виде непрерывного спектра частот, выражаемую тем же равенством $P = KT\Delta f$. Можно подобрать сопротивление, которое при температуре T давало бы такое же количество энергии, как и приемная антенна. Иначе говоря, можно считать, что антенна ведет себя как сопротивление, имеющее температуру T.

Сказанное непосредственно применимо к случаю приема антенной внеземного радиоизлучения. Принимаемая энергия приравнивается к энергии $KT_э\Delta f$, отдаваемой сопротивлением с температурой $T_э$. Величина $T_э$ представляет собой температуру той среды, в которую следует поместить антенну, чтобы она генерировала ту же энергию шумов, равную энергии данного внеземного источника. Таким образом, сравнением энергии антенны с энергией нагретого сопротивления, равного сопротивлению антенны, определяется эквивалентная температура источника радиоизлучения. Здесь могут быть два случая: 1) источник имеет угловую протяженность ω, бóльшую, чем угол α диаграммы направленности антенны. В этом случае температура источника $T_и$ равна $T_э$; 2) источник радиоизлучения имеет угловую протяженность ω, мéньшую, чем угол α. Тогда равновесие между антенной и нагретым сопротивлением наступит при равенстве отдаваемых ими энергий. Принимаемая антенной энергия в ω/α раз меньше энергии, которая принималась бы от источника, имеющего бóльшую угловую протяженность.

Поэтому равновесие энергии между сопротивлением и антенной наступит при той же $T_э$, если интенсивность излучения этого источника в α/ω раз превышает излучение более протяженного источника. Энергия излучения источника соответствует излучению абсолютно черного тела, имеющего температуру, равную

$$T_S = \frac{\alpha}{\omega} T_э .$$

Следовательно, сравнивая энергии антенны и нагретого сопротивления, зная угол α диаграммы направленности антенны, можно определить эффективную температуру источника радиоизлучения, имеющего меньшие угловые размеры чем α.

6. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПРИЕМНИКА И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Для того чтобы принимаемая антенной энергия могла привести в действие регистрирующее устройство, отмечающее ее количество, применяют электронные усилители. Они являются источником дополнительных хаотических электрических шумов, иногда значительно превышающих шумы приемной антенны. Наиболее ощутимы шумы, создаваемые тепловым движением свободных электронов в проводниках входа усилительной лампы (колебательный контур, соединительные проводники и т. д.) и шумы из-за флуктуаций анодного тока в усилительных лампах. (Флуктуации анодного тока определяются природой образования электронного тока в самих усилительных лампах.) Шумы возникают во всех усилительных каскадах приемника, но первый каскад оказывает на них наибольшее влияние, поскольку имеющиеся в нем электрические шумы усиливаются затем последующими каскадами усилителя.

Напряжение на входе усилительной лампы, эквивалентное уровню шумов, может быть подсчитано по формуле:

$$E_ш = \sqrt{4KTR\Delta f} ,$$

где K — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; R — активная составляющая сопротивления на входе усилителя; Δf — полоса частот.

Энергия шумов входной части приемника может быть выражена также через эквивалентную температуру T_R, при

которой сопротивление R на входе усилителя создает напряжение шумов, равное $E_ш$. Для сравнения различных приемников у каждого из них определяют так называемый «фактор шумов». Он показывает, во сколько раз данный приемник ухудшает отношение сигнала к шумам, по сравнению с гипотетическим идеальным совершенно не шумящим приемником. Фактор шумов зависит от конструкции приемника и возрастает при увеличении рабочей частоты. Так, увеличение частоты от 200 до 10 000 *Мгц* (волны от 1,5 *м* до 3 *мм*) изменяет фактор шумов от нескольких единиц до нескольких десятков. При частотах, превышающих 10 000 *Мгц*, фактор шума может стать больше 50. Связь между T_R, температурой сопротивления T и фактором шумов N можно выразить следующим равенством:

$$T_R = NT.$$

Очевидно, что если $N = 1$, то $T_R = T$. При приеме слабых радиосигналов, имеющих сплошной спектр, чувствительность радиотелескопа определяется соотношением:

$$T_э \geqslant \frac{T_R}{\sqrt{\tau \Delta f}},$$

где $T_э$ — эквивалентная температура антенны, соответствующая наименьшему различимому сигналу; T_R — эквивалентная температура входа приемника; τ — постоянная времени выходного прибора (инерция прибора); Δf — полоса пропускания частот приемника.

Из этого выражения видно, что чувствительность радиотелескопа возрастает с увеличением ширины полосы пропускания частот Δf и постоянной времени τ. Поэтому создается впечатление, что если произведение $\tau \Delta f$ достаточно большое, то можно сколько угодно уменьшить обнаруживаемый сигнал. В действительности существуют два затруднения, ограничивающие эти величины:

1. Ширина полосы Δf всегда мала по сравнению с радиочастотой приема радиоизлучения, поскольку интенсивность радиоизлучения измеряют на некоторой определенной частоте.

2. Постоянная времени τ не может быть очень большой. В литературе имеются указания на то, что ширина полосы Δf может достигать 40 *Мгц*, т. е. $4 \cdot 10^7$ *гц*, а величина τ —

порядка 2 *мин*. В этом случае

$$\Delta f\tau = 4 \times 10^7 \times 2 \times 60 = 4{,}8 \times 10^9;$$

$$T_э = \frac{T_R}{6{,}9 \times 10^4} = T_R\, 1{,}4 \times 10^{-5}.$$

Это дает возможность обнаружить радиоизлучение, мощность которого меньше 0,0014% мощности собственных шумов радиоаппаратуры. Если бы удалось постоянную времени τ увеличить до 1 часа, то чувствительность радиотелескопа могла бы возрасти примерно в 5,5 раза. Однако создание систем, обладающих такими большими τ, эффективно работающих в электронных схемах—задача не простая и в настоящее время еще полностью не решенная. Разработать схему современного радиотелескопа, рассчитанного на такую теоретическую чувствительность в течение длительного времени, очень трудно. Причина этого — непостоянство коэффициента усиления в аппаратуре радиоприема, а также изменения величины T_R. Эти факторы вызывают флуктуации сигнала на выходе приемника, которые иногда могут превышать величину самого сигнала. Для того чтобы приблизительно достигнуть условий теоретической чувствительности приемника, разработаны схемы радиометра, о которых будет сказано ниже.

7. СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ РАДИОПРИЕМНИКА

Энергия радиоизлучения, принимаемая антенной телескопа, усиливается в радиоприемнике. Основными его частями являются:

1) колебательные контуры (или полые резонаторы в сантиметровом диапазоне волн), настраиваемые на заданную длину волны, их назначение — выделить рабочую длину волны радиотелескопа из общего спектра частот и обеспечить необходимую полосу пропускания;

2) усилитель высокой частоты или резонансный усилитель с большим коэффициентом усиления;

3) детектор, преобразующий ток высокой частоты в ток одного направления;

4) усилитель после детектора, часто называемый усилителем низкой частоты. Этот усилитель непосредственно питает регистрирующее устройство. На рис. 121 показана функциональная, или скелетная, схема радиоприемника прямого усиления. В нем высокочастотный сигнал, полу-

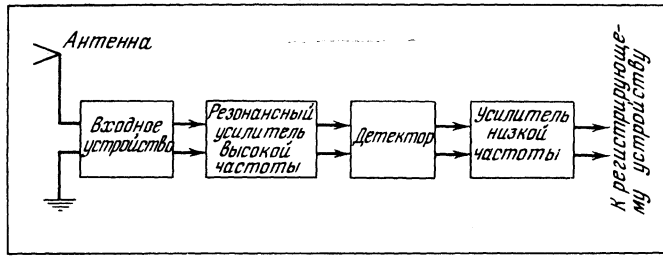


Рис. 121. Функциональная схема радиоприемника прямого усиления

чаемый антенной, только усиливается. Частота и форма принятых и усиленных (до детектора) сигналов сохраняются. Такие приемники редко применяются в радиотелескопах.

Другой тип радиоприемника для преобразования высокой частоты сигналов в пониженную, так называемую

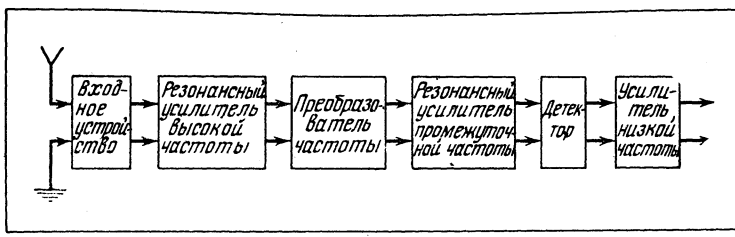


Рис. 122. Схема супергетеродинного радиоприемника

промежуточную частоту носит название супергетеродинного. Сигналы промежуточной частоты попадают в нем на детектор, выпрямляются и далее поступают на усилитель низкой частоты и т. д. (рис. 122). Преобразование частоты сигнала f_c в промежуточную частоту $f_п$ достигается в специальной усилительной лампе, к которой подводится высокая частота сигнала от антенны радиотелескопа и одновременно вспомогательная частота от специального маломощного генератора высокой частоты. Этот генератор называется гетеродином. Частота гетеродина $f_г$ связана с f_c и $f_п$ следующим соотношением:

$$f_п = f_г - f_c \qquad \text{или} \qquad f_п = f_c - f_г .$$

Таким образом, промежуточная частота оказывается ниже частоты сигнала, что облегчает дальнейшее усиление слабых высокочастотных токов. Супергетеродинный приемник имеет ряд преимуществ перед приемником прямого усиления, поскольку величина коэффициента усиления определяет чувствительность радиотелескопа. Особенно заметны эти достоинства при приеме очень коротких волн. С уменьшением длины волны, т. е. с повышением частоты радиосигнала, усилительная способность электронной лампы падает. Для данного типа усилительной лампы существует такая частота, при которой лампа перестает быть усилителем и становится в этом случае бесполезной. Преобразование частоты сигнала в частоту более низкую создает благоприятные условия, при которых лампа дает большее усиление. Очевидно, что, используя принцип преобразования частот, относительно просто построить приемник, который был бы чувствителен и к сверхвысоким частотам.

В зависимости от принимаемой радиотелескопом длины волны схема радиоприемника несколько видоизменяется, но в основном сохраняет принцип схемы супергетеродина.

В некоторых супергетеродинах, особенно в тех, которые работают на сантиметровом диапазоне волн, применяют двойное преобразование частоты, снижая тем самым полосу пропускания частот, что может быть необходимо, например, для выяснения структуры линии монохроматического радиоизлучения межзвездного водорода на волне 21 *см*.

Рассмотрим, как меняются элементы схемы приемной части радиоприемника в зависимости от рабочей длины волны. Для волн длиной больше 0,5 *м* (600 *Мгц*) применяются резонансные усилители высокой частоты (УВЧ). За ними в схеме следуют преобразователь частоты, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), детектор и т. д. (см. рис. 122). В этом случае (f_c = 600 *Мгц*) применение УВЧ дает заметный выигрыш в относительном уменьшении шумового фона приемника. Для частот свыше 1000 *Мгц* (волна короче 30 *см*) требуются специальные лампы. УВЧ не всегда применяется для этих частот, и первым каскадом приемника становится преобразователь частоты. За ним следует усилитель промежуточной частоты. При переходе на диапазон волн порядка 7,5 *см* (частота 4000 *Мгц*) ламповые смесители частоты заменяют кристаллическими детекторами-смесителями, за которыми также ставят усилитель промежуточной частоты, детектор и т. д. Кристаллический детектор состоит из кри-

сталла и металлического острия, соприкасающихся друг с другом (например, кремневого кристалла с вольфрамовым острием и др.).

На частотах от 4000 до 35 000 *Мгц* (волны от 7,5 до 0,8 *см*) вместе с кристаллическим смесителем в качестве гетеродина применяют особые электронные лампы, называемые отражательными клистронами. Они легко генерируют сверхвысокие частоты, чего нельзя достигнуть обычными усилительными лампами.

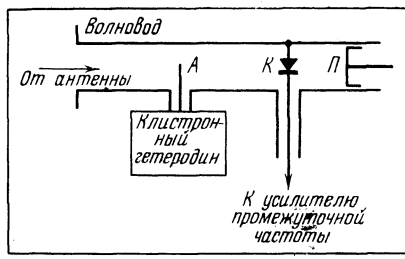


Рис. 123. Схема входного устройства радиоприемника сантиметровых волн

На рис. 123 показана схема входного устройства радиоприемника, обычно работающего на сантиметровых волнах в радиотелескопах. От антенны радиотелескопа сигнал подводится к волноводу. В тот же волновод при помощи штырька *А*, действующего в качестве излучателя, подаются электромагнитные волны от клистронного генератора-гетеродина. В конце волновода включен кристаллический преобразователь *К*. Роль контура настройки выполняет полый резонатор, образованный из конца волновода, закрытого поршнем *П*. Настройка резонатора на рабочую волну достигается перемещением поршня. Известно, что короткозамкнутый отрезок двухпроводной линии действует как колебательный контур. Таким же образом ведет себя и отрезок волновода, закрытый поршнем. Поршень устанавливается в такое положение, при котором к кристаллическому преобразователю подводится наибольшее напряжение сигнала. В цепи кристалла-детектора при этом получается наибольший ток. Промежуточная частота после детектора-смесителя усиливается УПЧ, затем выпрямляется вторым детектором и далее поступает на усилитель низкой частоты.

Почти во всех приемниках радиотелескопов после второго детектора ставят усилитель постоянного тока, исполь-

зуемый как усилитель низкой частоты. Обычно его собирают по самобалансирующей схеме, обеспечивающей неизменность нулевой линии на регистрирующих графиках в пределах достаточно долгого периода времени. Для записи сигналов применяют самопищущий миллиамперметр или другой регистрирующий прибор, который включается после усилителя постоянного тока и все время фиксирует величину сигнала в виде непрерывной записи на бумажной ленте.

В некоторых радиотелескопах, как, например, в радиоинтерферометре с качающейся диаграммой, для регистрации используют электроннолучевую трубку совместно с кинокамерой, которая производит фотографирование экрана этой трубки. При наблюдении источника радиоизлучения малых угловых размеров на экране трубки возникает синусоида, положение которой меняется с перемещением положения источника на небе. Такая регистрация сигналов производится длительное время, что дает возможность обнаружить угловую величину источника радиоизлучения.

Как указывалось ранее, достигнуть в радиотелескопе чувствительности, близкой к теоретической, удалось в результате разработки схемы радиометра. Основным недостатком применявшихся ранее схем было непостоянство фактора шумов усилительной схемы. Это вызывало флуктуацию сигнала на выходе радиотелескопа. В радиометре этот недостаток устраняется тем, что приемник периодически, например с частотой 30 раз в секунду, переключается с антенны на сопротивление, имеющее почти эквивалентную ей температуру. В отсутствие принимаемого сигнала напряжение на выходе детектора остается постоянным, появление сигнала вызывает переменное напряжение, частота которого равна частоте переключений антенны. Амплитуда этого переменного напряжения пропорциональна принимаемой энергии радиоизлучения. После детектирования сигнал поступает на дополнительный усилитель, настроенный на частоту 30 *гц*, затем выпрямляется детектором и попадает на усилитель постоянного тока с большой постоянной времени τ. Далее он подается на регистрирующее устройство, которое записывает его на ленте. Таким образом, регистрирующий прибор все время сравнивает эквивалентную температуру антенны с эквивалентной температурой сопротивления.

На рис. 124 показана принципиальная схема радиометра. Функцию переключения входа усилителя с антенны на

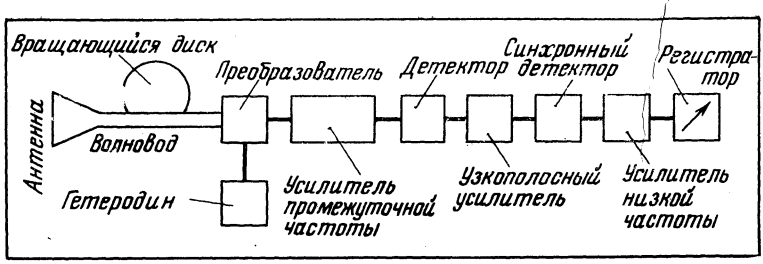


Рис. 124. Схема радиометра

эквивалент здесь выполняет диск, расположенный в волноводе вблизи преобразователя частоты и вращающийся со скоростью 30 *об/сек*. Одна половина диска изготовлена из материала, пропускающего электромагнитные волны, другая — полностью поглощающего их (выполняет роль эквивалента). При вращении диска электромагнитные волны то будут проходить к преобразователю, то полностью задерживаться диском 30 раз в секунду и, таким образом, модулироваться с частотой 30 *гц*.

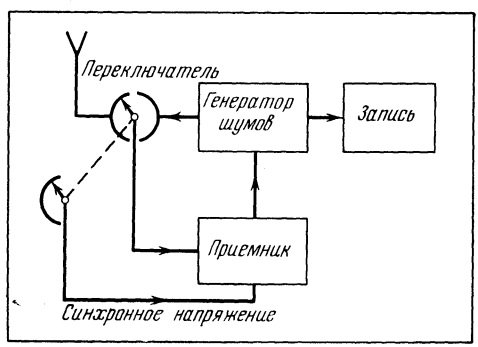


Рис. 125. Блок-схема установки с нулевым методом регистрации

Представляет интерес и другая схема радиометра, использующая нулевой метод регистрации интенсивности радиоизлучения (рис. 125), которая измеряется путем сравнения эквивалентной температуры антенны с эквивалент-

ной температурой вмонтированного в аппаратуре генератора шумов. Температура генератора шумов автоматически регулируется так, чтобы обе температуры оказались равными. Благодаря этому исключается ряд ошибок, связанных с нестабильностью усиления аппаратуры.

В качестве генератора шумов здесь используется двухэлектродная лампа-диод, работающая в режиме насыщения. Мощность шумов лампы зависит от тока ее накала. Мощность шумов на концах сопротивления R определяется равенством:

$$P = \frac{1}{2} eIR\Delta f,$$

где e — заряд электрона; I — анодный ток диода; Δf — полоса частот; R — сопротивление нагрузки диода.

Для регулировки мощности шумов применяется метод автоматической регулировки накала диода. Сравнение эквивалентных температур антенны и генератора шумов производится периодически, например 25 раз в секунду, с помощью особого переключателя. Общее усиление в приемнике достигает 10^7, что дает возможность заметить расхождение температур на 1° К.

В схеме используется линейный фазовый детектор, реагирующий на изменение фазы напряжения сигнала. На этот детектор подается вспомогательное синхронное напряжение, меняющееся синфазно с вращением переключателя антенны. Направление тока на выходе детектора зависит от того, в фазе или в противофазе находится сигнал и вспомогательное напряжение. Это напряжение включено так, что если температура источника шумов меньше температуры антенны, постоянное напряжение на выходе детектора растет. Это вызывает увеличение мощности накала диода и, следовательно, увеличивает мощность его шумов. Интенсивность принимаемого радиоизлучения, т. е. эквивалентная температура антенны, определяется по эквивалентной температуре проградуированного на мощность генератора шумов.

В заключение приведем схему радиоприемного устройства телескопа, построенного для наблюдения линии монохроматического излучения на волне 21 *см* (рис. 126). В отличие от предыдущих схем в ней имеется второй преобразователь частоты и узкополосный фильтр, пропускающий полосу частот в 40 *кгц*. Узкая полоса пропускания частот в радиоприемнике необходима для детального исследования

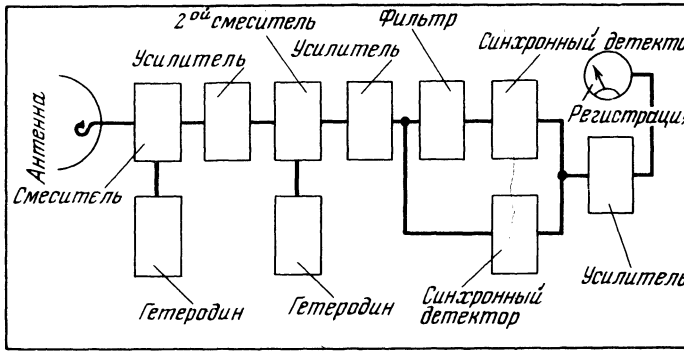


Рис. 126. Схема приемника

структуры линии. При наблюдениях антенна телескопа фиксируется в направлении небесного объекта. Перемещаясь в результате суточного вращения Земли, небесный объект пересекает диаграмму направленности антенны. На антенну попадает радиоизлучение разных частот, определяемых шириной полосы монохроматической линии $\lambda = 21$ *см*. Проходя через фильтр в 40 *кгц*, амплитуда сигнала меняется в зависимости от положения небесного объекта по отношению к диаграмме направленности антенны. Регистрирующее устройство записывает контур линии как функцию прямого восхождения.

8. КОНСТРУКЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Конструкции современных радиотелескопов можно разделить на две основные группы: в первую группу войдут телескопы со сложными приемными антеннами из большого числа вибраторов в виде прямых металлических стержней или проволочных спиралей, во вторую группу — телескопы с приемной антенной в виде параболического металлического рефлектора, сплошного или сетчатого. В зависимости от назначения телескопа антенна имеет азимутальное или параллактическое вращение. В первом случае движение происходит по двум координатам одновременно: по азимуту (в горизонтальной плоскости) и углу склонения (в вертикальной плоскости). Механическая конструкция радиотелескопа с азимутальной установкой проста и легка в выполне-

нии. Однако для сопровождения «цели» радиотелескоп необходимо перемещать по двум координатам одновременно. Это требует довольно сложной добавочной аппаратуры.

В оптической астрономии распространен тип телескопа с параллактической монтировкой, часовая ось которой параллельна оси земли. Такая монтировка более удобна, чем азимутальная, так как вращение телескопа на оси происходит с такой же угловой скоростью, с какой изменяется положение объектов на небесной сфере. Благодаря применению простейших механизмов вращения телескоп непрерывно следит за наблюдаемым объектом. Несмотря на преимущества параллактической системы в большинстве радиотелескопов используется все же более простая азимутальная установка. Некоторые конструкции радиотелескопов. построенных для исследования галактического излучения, подвижны только в вертикальной плоскости (по склонению). На рис. 127 изображена такая система с параболическим отражателем $D = 9{,}6$ *м*, $F = 6{,}28$ *м*, $\lambda = 1{,}9$ *м* (частота 160 *Мгц*). Зеркало смонтировано на оси, расположенной с запада на восток. Оно может быть направлено на любую точку неба в пределах углов склонений от —32,5 до +90° вдоль меридиана. Электромагнитная энергия, концентрируемая отражателем, направляется в отверстие цилиндра, установленного в фокальной плоскости зеркала. Антенна у отверстия цилиндра превращает энергию электромагнитных волн в высокочастотный ток, который через соединительные линии подводится к радиоприемнику, смонтированному на дне цилиндра. После усиления, преобразования и детектирования сигнал передается по кабелю в здание лаборатории, где регистрируется на бумажной ленте. Этот телескоп используется для изучения космического радиоизлучения и частично для изучения Солнца на радиочастотах.

Радиотелескоп, установленный вблизи Сиднея, имеет отражатель, представляющий собой часть параболоида в виде каркаса с натянутой металлической сеткой. Площадь отражателя 25 $м^2$. Прибор установлен на экваториальной монтировке. Ширина угла диаграммы направленности (для половинной мощности) порядка 2°,3 на волне 25 *см*. Вначале этот радиотелескоп использовался для наблюдения радиоизлучения Солнца на волнах 25 и 50 *см*. Позднее его применили для изучения межзвездного водорода на волне 21 *см*. Радиоприемник, собранный по схеме с двойным преобразо-

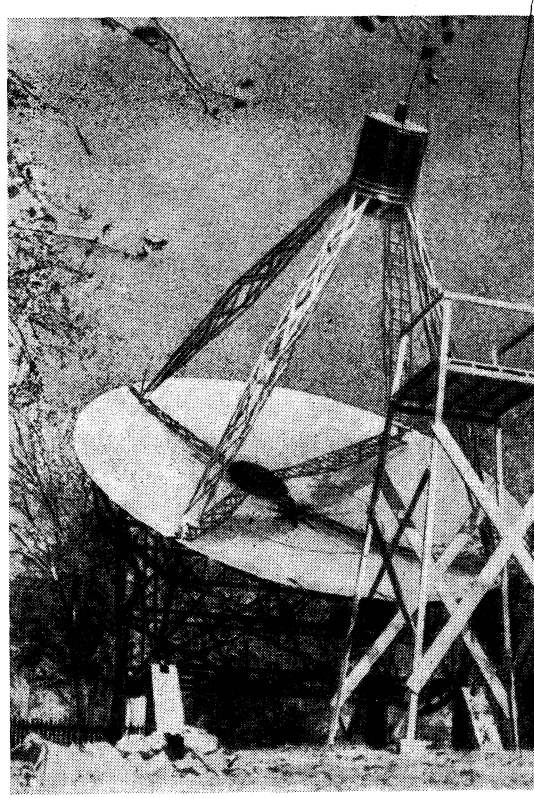


Рис. 127. Радиотелескоп со стальным параболическим отражателем

ванием частоты, при этих наблюдениях медленно и непрерывно перестраивается в прямом и обратном направлении в частотном интервале 1 *Мгц* путем изменения частоты второго гетеродина. Когда полоса приемника проходит через линию межзвездного водорода, на выходе приемника ток немного увеличивается. В схеме применен модуляционный метод, по типу радиометра. Облучатель (вибратор) радиотелескопа, установленный в фокусе параболоида, перемещается в фокальной плоскости, что расширяет пределы наблюдений по склонению на $\pm 10°$, с некоторым изменением направленности антенны.

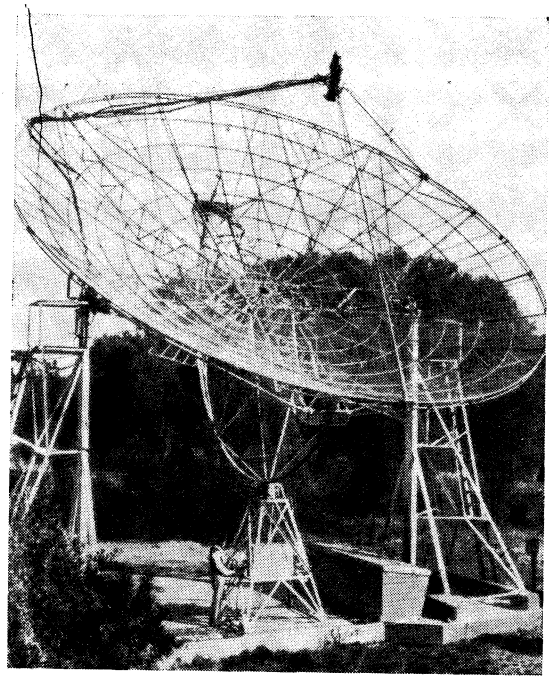


Рис. 128. Радиотелескоп в Потт Хилле для волны 21 *см*

Радиотелескоп с сеточной конструкцией параболического отражателя, установленный вблизи Сиднея, показан на рис. 128. Сетка отражателя ($D = 11\,м, \lambda = 21\,см$) натянута на каркас, ось направлена с запада на восток. В фокальной плоскости отражателя находится рупорная антенна с волноводом. Эта приемная система вместе с преобразователем частоты смонтирована в отдельном блоке, укрепленном тремя растяжками. Радиоприемник собран по схеме с двойным преобразованием частоты. Угол диаграммы направленности $\alpha = 1°$ (для половинной мощности). Основная усилительная и регистрирующая аппаратура размещена на специальной стойке под телескопом и связана с первым преобразователем коаксиальным кабелем.

На рис. 129 показан крупнейший радиотелескоп в Джодрелл Бенк (построен на полигоне Манчестерского универ-

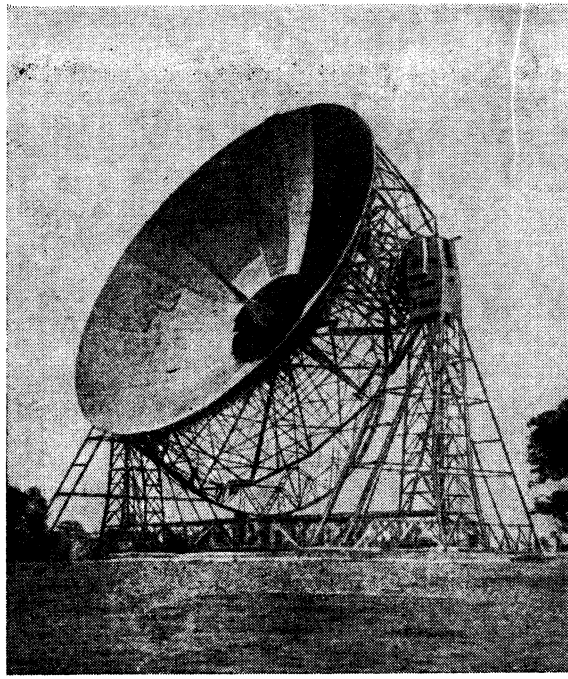


Рис. 129. Радиотелескоп в Джодрелл Бенк (Англия)

ситета в 1957 г.). Телескоп предназначен для приема космического радиоизлучения в диапазоне волн от 1 до 10 *м*, а также для изучения радиолокации Луны, ближайших планет, слежения за межпланетными ракетами и космическими станциями.

Диаметр параболоида радиотелескопа равен 76 *м* при глубине около 18 *м*. Платформа, на которой он установлен, имеет в поперечнике длину 98 *м*; горизонтальная ось находится на высоте 56,5 *м* над ней. При направлении телескопа на горизонт верхний край рефлектора возвышается над платформой на 98 *м*. Вес телескопа свыше 2000 *т*. Вращение по азимуту и углу склонения осуществляется при помощи автоматического устройства.

Радиоинтерферометр с 32 параболическими отражателями показан на рис. 130. Он установлен также в Сиднее для наблюдения радиоизлучения на волне 21 *см*. Каждый отра-



Рис. 130. Радиоинтерферометр с 32 параболическими антеннами

жатель имеет диаметр 2 *м*, расстояние между отражателями 7 *м*. Все отдельные радиотелескопы питают сигналами общий радиоприемник. Такой радиоинтерферометр обладает большой разрешающей силой. Главные лепестки его диаграммы направленности имеют угловую ширину 3′ и расположены на расстоянии 90′ друг от друга. Это позволяет исследовать распределение интенсивности радиоизлучения поверхности Солнца.

С помощью этого радиоинтерферометра было установлено, например, увеличение яркости к краю солнечного диска на волне 21 *см*.

Радиотелескоп с 48 спиральными антеннами работает в штате Огайо (США) на длинах волн от 1 до 1,5 *м*. Каждая антенна-спираль имеет диаметр 38 *см*, длину 3 *м* и содержит 10 витков провода. Все спирали смонтированы на стальном заземленном каркасе-экране длиной 49 *м*, шириной 3,6 *м* и соединены в группы по 6 шт., которые в свою очередь соединяются с приемником через ряд переходных трансформаторов.

Такая система включения антенн обеспечивает наилучшее согласование их сопротивлений с сопротивлением входа радиоприемника. Она улучшает характеристику направленности всей приемной системы. Антенна ориентиро-

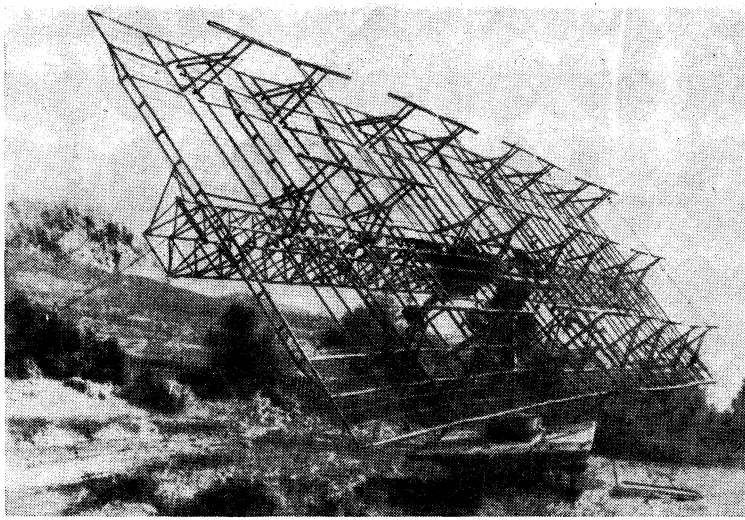


Рис. 131. Радиотелескоп с синфазной антенной (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР)

вана по меридиану и может устанавливаться на любое склонение от —40° в пределах ±90°. Поскольку спиральные антенны широкополосные, вся система работает без перестройки в диапазоне частот от 200 до 300 *Мгц*. На частоте 300 *Мгц* ширина диаграммы направленности (по половинной мощности) составляет 1°, 2 по прямому восхождению и 17° по склонению.

Радиотелескоп предназначен для приема излучения слабых источников.

Представление о некоторых типах конструкций отечественных радиотелескопов дает ряд изображенных ниже рисунков. Радиотелескоп с синфазной антенной (рис. 131) работает на волне 3,5 *м* в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР. Антенна имеет 24 полуволновых вибратора и металлический экран. Поворотное устройство азимутального типа. Две антенны и два радиоприемных устройства образуют сдвоенный интерферометр, дающий возможность определять координаты кратковременных вспышек радиоизлучения отдельных источников.

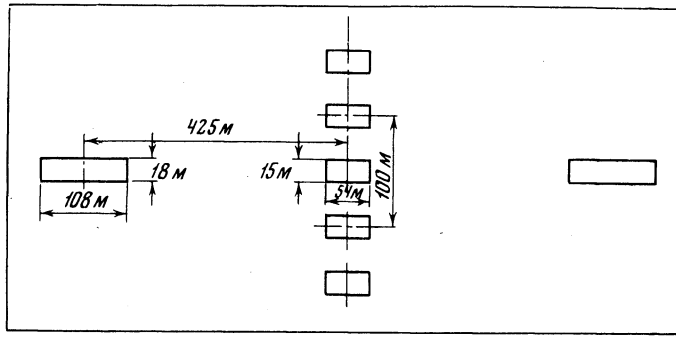


Рис. 132. План большого радиотелескопа Бюраканской обсерватории

В Армении, близ Бюракана, на плато Сараванд, закончено строительство первой очереди большого интерференционного радиотелескопа метрового диапазона. Он предназначен для точного измерения интенсивностей радиоизлучения и определения координат слабых дискретных источников. Проектная площадь его антенн составляет 8000 $м^2$. Их схематическое расположение показано на рис. 132.

Каждый отражатель имеет форму параболического цилиндра, выдержанную с точностью $\pm$ 5 *см*, ориентированного по оси восток — запад. Отражающая поверхность образуется из ряда омедненных стальных проволок, закрепленных на фермах, имеющих форму параболы. Вдоль фокальной линии размещается система облучателей, состоящая из ряда синфазных полуволновых вибраторов и контррефлекторов. Внешний вид одной из антенн радиотелескопа приведен на рис. 133.

В 1956 г. в Главной астрономической обсерватории АН СССР построен радиотелескоп сантиметрового диапазона с оригинальной конструкцией отражателя (рис. 134), собранной из 90 отражающих элементов, механически не связанных между собой и способных смещаться в различных направлениях. Большая точность параболической формы отражающей поверхности обеспечивается путем использования оптических методов контроля за положением каждого отражающего элемента при юстировке системы.

Отражающие элементы (90 шт.) имеют вид плоских алюминиевых листов высотой 3 *м* и шириной 1,5 *м*, распо-

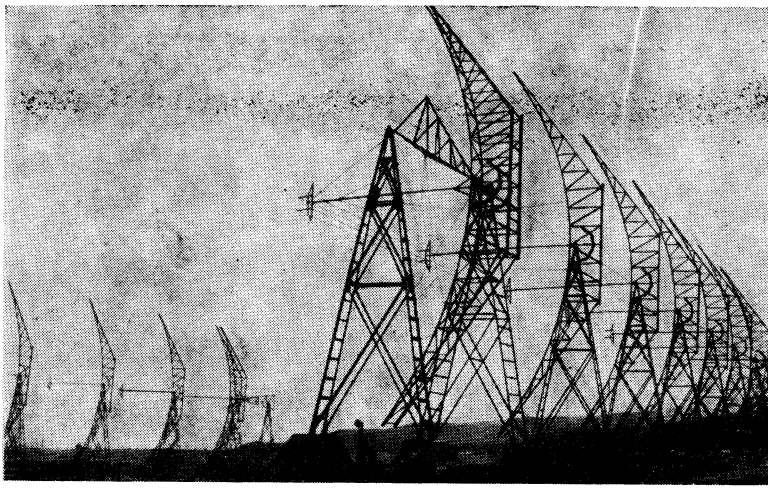


Рис. 133. Внешний вид антенны радиотелескопа Бюраканской обсерватории

ложенных по дуге около 80° окружности с радиусом 100 *м*. Каждый из них снабжен механизмами, которые могут перемещать его в радиальном направлении на 30 *см*, а также поворачивать вокруг горизонтальной и вертикальной осей. В фокусе отражателя находится параболический цилиндр с горизонтальной осью, выполненный в виде жесткой металлической конструкции. Он установлен на платформе, которая перемещается на четырех колесах по бетонной дорожке (направление север — юг), удаляясь или приближаясь к отражателю, что необходимо для фокусировки радиотелескопа. В фокальной плоскости (на фокальной оси цилиндра) можно устанавливать ряд отражателей для волн от 3 до 30 *см*.

Для установки антенны на высоте изменяют наклон каждого отдельного отражательного элемента — щита. Таким путем можно установить антенну на любую высоту от 0 до 80°. Азимут наблюдения может изменяться в пределах $\pm 40°$ от юга. Ширина диаграммы направленности (для половинной мощности) на волне 3 *см* равна $1{,}2 \times 1°$. С этим телескопом ведутся наблюдения за радиоизлучением Солнца на волнах 3 и 10 *см*, Луны и галактических источников.

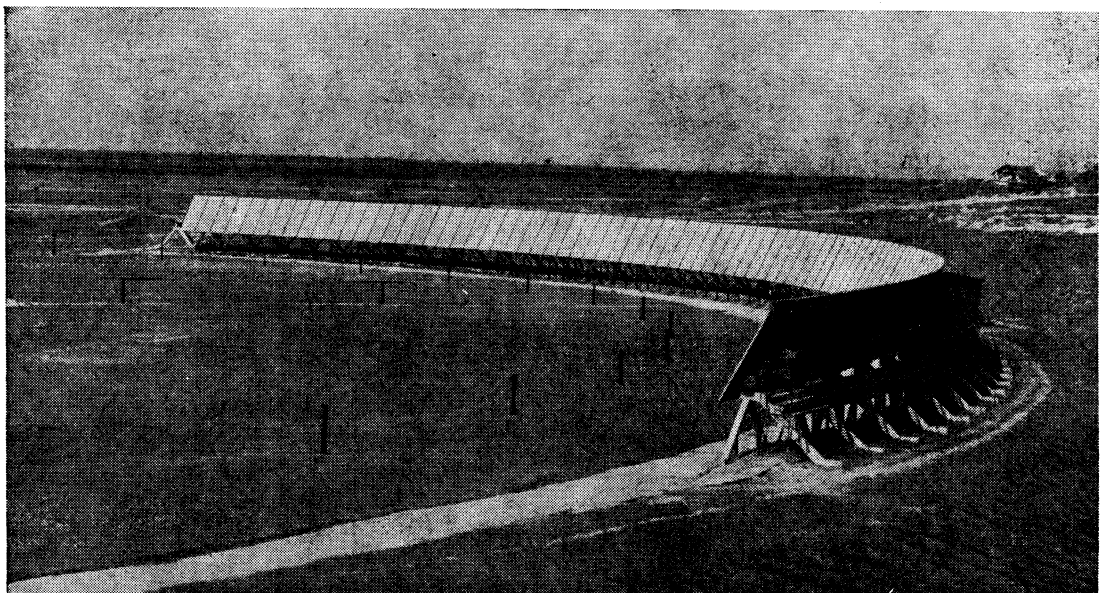


Рис. 134. Радиотелескоп Пулковской обсерватории с отдельными отражательными элементами

Заканчивая краткое описание существующих конструкций радиотелескопов, следует отметить, что в настоящее время работы по увеличению чувствительности радиотелескопов ведутся в двух направлениях: 1) создания конструкций с большой площадью различных типов антенн для приема радиоизлучения; 2) разработки усилительных систем высокой чувствительности с малым уровнем собственных шумов. Резкого уменьшения шумов в первых каскадах усиления радиочастот можно добиться применением новых типов усилителей сверхвысоких частот, получивших название молекулярных. Использование энергии молекул позволило создать принципиально новые приборы, обеспечивающие резкое уменьшение уровня шумов и значительное повышение отношения мощности сигнала к шуму. В молекулярных усилителях собственные шумы во много раз меньше собственных шумов в электронных лампах, особенно при усилении сверхвысоких частот. Это обеспечивает возможность приема чрезвычайно слабых радиоизлучений от небесных объектов. Усилители такого типа широко применяются, например, для исследования радиоизлучения Венеры, Юпитера и других космических источников, а также для связи с космическими кораблями. Применение их в предварительных каскадах усиления в схеме обычного радиометра позволило повысить чувствительность радиотелескопа почти в 12 раз, что равносильно увеличению эффективного диаметра радиотелескопа примерно в 3,4 раза.

9. ЭЛЕКТРОННЫЙ ТЕЛЕСКОП

За последние годы в науке и технике широкое развитие получили электронные методы усиления яркости изображений. Применение некоторых из них в астрономии позволяет значительно сократить время выдержки при фотографировании и увеличить проницающую силу современных оптических телескопов, а в ряде случаев вести наблюдения в таких областях спектра (инфракрасная область), в которых даже специальные фотографические пластинки мало пригодны.

Интервалы освещенностей изображений, с которыми приходится сталкиваться астроному при фотографировании небесных объектов, очень велики. Это обстоятельство определяет необходимое время выдержки фотопластинки для получения негативов хорошего качества. В зависимости от яркости объекта время выдержки может меняться от сотых, а

иногда и меньших долей секунды (для Солнца) до десятков часов (для слабых туманностей и пр.). Уменьшение времени выдержки, в частности при фотографировании планет, позволяет повысить качество изображения. Как известно, длительное фотографирование дает нечеткие изображения на негативах из-за помех от атмосферной турбуленции.

Время выдержки можно сократить или увеличением диаметра входного отверстия телескопа, что иногда бывает трудно сделать, или использованием фотоэлектрических светоприемников более чувствительных, чем фотопластинка. Их относительная чувствительность в большинстве случаев неизменна, в то время как у фотопластинки при длительных экспозициях она падает. Выигрыш в чувствительности по сравнению с фотопластинкой при средней освещенности регистрируемого изображения может быть около 300 раз.

В настоящее время в технике широко применяются три способа усиления яркости изображения: электролюминесцентный, электронно-оптический, телевизионный. Некоторые из них используются и в астрономии.

На основе первого способа разработаны электролюминесцентные усилители яркости (ЭЛУ). Они состоят из многослойной системы чередующихся между собою фотосопротивлений и люминофоров, питаемых электрическим током. Эти усилители, несмотря на чрезвычайную простоту обращения с ними и почти полное отсутствие в них элементов настройки, пока не используются в астрономии, так как обладают малой разрешающей способностью и относительно малой световой чувствительностью. Однако параметры ЭЛУ быстро улучшаются и, вероятно, скоро станут удовлетворять требованиям астрономических наблюдений.

Второй способ усиления яркости состоит в преобразовании оптического изображения с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) сначала в электронное, а затем снова в видимое.

Может быть использован также и принцип электронной фотографии (Э Ф). В ЭФ оптическое изображение проецируется на полупрозрачный фотокатод. Последний под действием света излучает электроны. В светлых местах изображения их излучается больше, в темных — меньше. Таким образом фотокатод образует электронный поток. При помощи добавочного электрического поля напряжением 20 *кв* поток электронов ускоряется и фокусируется на фотопластинке, образуя электронное изображение. При ударе электронов в фото-

эмульсию создается эффект, подобный действию света. Такой прибор может обладать весьма высокой разрешающей силой. Четкость получаемого на фотопластинке изображения ограничивается лишь ее зернистостью.

Спектральные характеристики различных фотокатодов показаны на графике рис. 135. В зависимости от материала

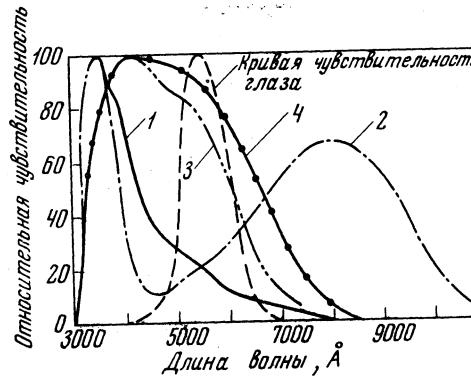


Рис. 135. График спектральных характеристик различных фотокатодов:

1 — сурьмяно-цезиевый; *2* — аксидно-кислородно-цезиевый; *3* — висмуто-цезиевый; *4* — многощелочной

фотокатода преобразователь может иметь различную чувствительность в разных лучах света, т. е. обладать различной спектральной чувствительностью. Так, например, широко распространенный сурьмяно-цезиевый фотокатод имеет максимум чувствительности в синих лучах. Кислородно-цезиевый фотокатод имеет два максимума чувствительности — первый в синих лучах, второй — в инфракрасных. Это дает возможность применять преобразователь для фотографирования изображения в невидимых глазу лучах света. Кислородно-висмутово-цезиевый фотокатод имеет максимальную чувствительность в зеленых лучах, подобно спектральной чувствительности человеческого глаза. Наиболее эффективным, как видно из графика, является многощелочной фотокатод.

Чтобы сравнить чувствительность фотопластинки и фотокатода как приемников света, необходимо определить общие для них качественные показатели. Обычно для сравне-

ния берут коэффициенты полезного действия, вводя понятие о квантовом выходе светоприемника. Для фотокатода это — число фотоэлектронов, излучаемых под действием одного кванта света, попадающего на его поверхность; для фотопластинки — число зерен металлического серебра, которое можно обнаружить после проявления. Квантовый выход окажется равен 100%, если каждый квант света вызовет излучение одного электрона или появление одного зерна металлического серебра в фотоэмульсии. Наибольшим квантовым выходом обладает сурьмяно-цезиевый фотокатод. В максимуме его спектральной чувствительности квантовый выход достигает 30% теоретического, принимаемого за 100%. Для чувствительной фотопластинки необходимо около 1000 квантов, чтобы получить одно зерно металлического серебра. Таким образом, квантовый выход фотоэмульсии составляет около 0,1%. Чувствительность фотокатода выше чувствительности фотопластинки в максимуме квантового выхода в 300 раз. Если считать средний квантовый выход фотокатода равным 10%, тогда выигрыш в светочувствительности снизится до 100 раз. Это значит, что полуметровый телескоп с фотокатодом, используемый в качестве светоприемника, окажется эквивалентным телескопу с зеркалом диаметром 5 *м*, но снабженному только чувствительной фотопластинкой.

Реальный выигрыш времени выдержки в результате применения ЭОП, очевидно, также может быть от 300 до 100 раз при масштабе увеличения 1 : 1.

Преобразователь для электронной фотографии впервые был изготовлен французским астрономом А. Лаллемандом в 1936 г. и использован для фотографирования слабо светящихся звезд и др. В связи с тем, что изображение на фотопластинке прибора является результатом воздействия на эмульсию не светового потока, а пучка фотоэлектронов, вылетающих из фотокатода, новый метод усиления яркости и фотографирования был назван электронной фотографией, а прибор — электронным телескопом.

На рис. 136 показан один из первых типов преобразователя изображения Лаллеманда. Преобразователь состоит из стеклянного сосуда, собранного из двух частей, соединенных между собой воздухонепроницаемым устройством. В первой его части оптическое изображение небесного объекта проецируется на сферическую поверхность сосуда, внутренняя часть которого образует полупрозрачный фотокатод *1*.

После сборки всего прибора и откачки из него воздуха фотокатод становится светочувствительным в результате обработки его цезием, сурьмой и др., которые вводят в колбу через отверсте *2*. Затвор *4*, управляемый внешним магнитным полем, препятствует проникновению цезия в области, занятые фотопластинами. При фотографировании затвор открывается. Для ускорения электронного потока, излучаемого фотокатодом, и увеличения его энергии служит электронная линза *3*. В преобразователе применена магнитная фокусировка при помощи короткой катушки с намотанной на нее изолированной проволокой *5*. Через катушку проходит электрический ток, и фокусировка производится регулированием его величины. Для обеспечения необходимой при фотографировании выдержки служит второй затвор *6*, управляемый внешним магнитным полем. Фотопластинки и контрольный люминесцентный экран укреплены во вращающейся кассете и помещены в ящике *7*. Замена пластинок при съемке производится поворотом кассеты, для извлечения их после окончания съемки прибор разбирают в месте соединения частей *8*. Контрольный экран предназначен для проверки качества фокусировки электронного изображения. Вторая часть сосуда содержит осушитель *9* и камеру с жидким воздухом *10*.

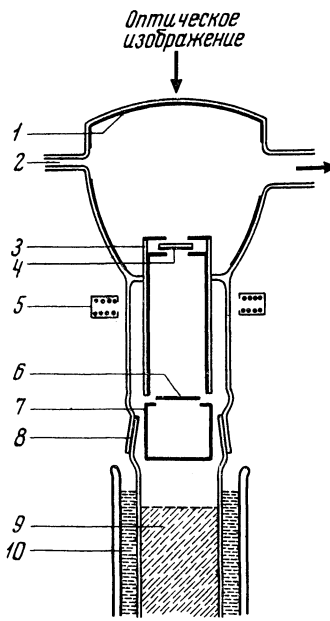


Рис. 136. Электронный усилитель яркости Лаллеманда

Фотоэмульсия в фотопластинках при длительном их хранении может выделять поглощенные ею газы. Они снижают вакуум в сосуде, ухудшают фокусировку преобразователя и отравляют фотокатод, вследствие чего падает его чувствительность. Для сохранения вакуума газы непрерывно откачиваются, даже во время фотографирования астрономических объектов.

Электронный преобразователь 120-сантиметрового телескопа в обсерватории Хаут Провенс (Франция) используется с 1956 г. для усиления яркости изображений при спектральных астрономических наблюдениях слабых объектов. Преобразователь установлен на спектрографе, смонтированном в прямом фокусе. Такой телескоп дает хорошие

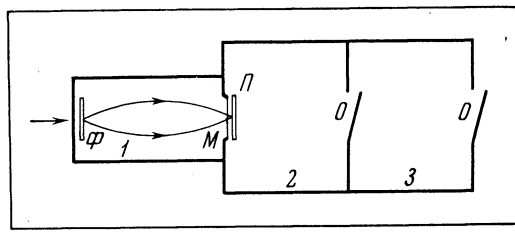


Рис. 137. Электронный преобразователь изображения с промежуточной металлической пленкой:

Ф — фотокатод; *М* — металлическая пленка; *П* — фотопластинка; *О* — окна; *1, 2, 3* — секции преобразователя

фотоснимки спектров астрономических объектов при экспозиции 15 *мин*. Обычная фотосъемка того же спектра на том же телескопе с использованием только фотопластинки потребовала бы значительно большей выдержки.

Дальнейшее усовершенствование электронного преобразователя привело к созданию конструкции из трех секций с промежуточной алюминиевой пленкой (рис. 137). Первая секция представляет собой камеру с высоким вакуумом, в которой помещается фотокатод. Вместо фотопластинки применена алюминиевая пленка толщиной в несколько микрон. Назначение ее — сохранять вакуум в первой секции и при фотосъемке пропускать электроны от фотокатода к фотопластинке, плотно прилегающей к пленке. Между пленкой и фотокатодом приложено высокое ускоряющее напряжение до 30—35 *кв*. Электроны под воздействием электрического поля приобретают большую скорость и легко проходят через металлическую пленку, бомбардируя фотоэмульсию на пластинке. Во второй и третьей секциях имеется промежуточный вакуум. Секции сообщаются между собою и с наружным воздухом через плотно закрывающиеся окна.

Фотопластинка постепенно проходит все секции и плотно прижимается к пленке. Ее движение происходит не сразу, а постепенно: вначале ее вставляют в третью секцию и наружное окно плотно закрывают. Из этой секции выкачивают воздух. Когда давление во второй и третьей секциях станет одинаковым, открывают второе окно и фотопластинку вводят во вторую секцию. После окончания съемки фотопластинку в обратном порядке вынимают из прибора. Все

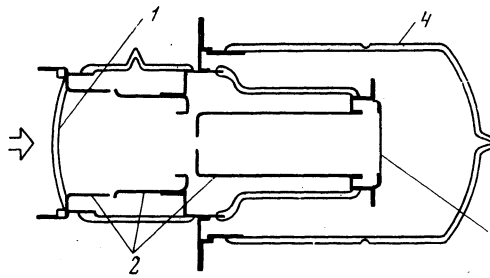


Рис. 138. Усовершенствованный электронный преобразователь изображения с промежуточной металлической пленкой:

1 — фотокатод; *2* — электронные линзы; *3* — пленка; *4* — защитный колпак

эти операции производят при помощи внешнего электромагнита, что, конечно, усложняет эксплуатацию прибора.

Усовершенствование преобразователя для электронной фотографии привело к некоторому упрощению его конструкции. На рис. 138 дана схема преобразователя из двух секций с промежуточной металлической пленкой. В первой секции постоянный вакуум, во второй, где при съемке помещается фотопластинка,— переменный. Прибор состоит из стеклянного сосуда. В первой части помещается полупрозрачный фотокатод и электронные линзы для фокусировки электронного изображения на пленку. Между фотокатодом и металлической пленкой приложено высокое напряжение порядка 15 *кв*. Толщина пленки колеблется от 5 до 10 *мк*. Для того чтобы пленка не пропускала воздух, она должна быть без отверстий, иметь одинаковую толщину и прочность, способную противостоять атмосферному давлению при замене фотопластинки, когда защитный колпак с преобразователя снимается. После установки фотопластинки вплот-

ную к пленке защитный колпак плотно закрепляют на баллоне преобразователя и откачивают воздух примерно в течение 1 *мин*, пока давление не снизится до 1 *мм* ртутного столба. После фотосъемки камеру постепенно заполняют воздухом, колпак снимают и фотопластинку вынимают из прибора.

Значительно чаще в различных областях науки и техники применяют электронно-оптические преобразователи с

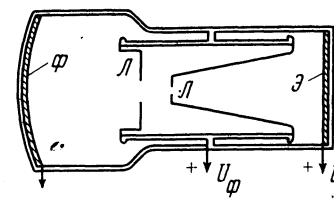


Рис. 139. Схема электронно-оптического преобразователя изображения с электростатической фокусировкой:

Ф — фотокатод; *Л* — электронные линзы; *Э* — экран; $U_Ф$ — фокусирующее напряжение; $U_У$ — ускоряющее напряжение

видимым выходным оптическим изображением, в том числе в астрономии для наблюдения и фотографирования объектов с малой светимостью. В ЭОП электронный поток после ускорения добавочным электрическим полем не попадает на фотопластинку, а фокусируется на люминесцентном экране. Энергия, выделяющаяся при ударе электронов об экран, превращается последним в световую энергию и дает на нем видимое изображение. Схема ЭОП с электростатической фокусировкой электронного потока показана на рис. 139. Использование такой фокусировки значительно упрощает конструкцию преобразователя, но одновременно с этим вносит некоторые геометрические искажения в усиливаемое изображение. Для уменьшения искажений применяют сферический фотокатод, обеспечивающий получение плоского и неискаженного изображения объекта.

В существующих конструкциях ЭОП размер выходного изображения может быть больше или меньше входного, но чаще масштаб увеличения делают равным единице. При уменьшении его электронный поток уплотняется, повышая яркость изображения на экране.

Увеличение яркости изображения сопровождается одновременным появлением на экране рассеянного света. Контрастность и четкость изображения ухудшаются. Для устранения этого недостатка люминесцентный экран с внутренней стороны, обращенной к фотокатоду, покрывают пленкой алюминия толщиной 0,08 *мк*. Электроны свободно

проходят через неё и достигают экрана, а рассеянный свет поглощается ею. В результате четкость и контрастность изображения на люминесцентном экране улучшаются.

Преобразователи с алюминированным экраном дают усиление яркости изображения в 30—40 раз при напряжении между фотокатодом и экраном 20 *кв*. Можно достичь еще

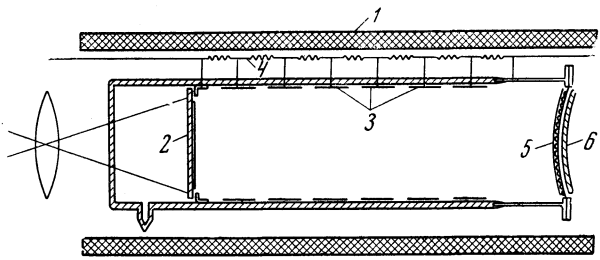


Рис. 140. Схема электронно-оптического преобразователя для контактной фотосъемки

большего усиления яркости изображения, если масштаб увеличения взять меньше единицы. Так, при значении его, равном $\frac{1}{10}$, плотность электронного потока возрастает в 100 раз. Если считать, что перенос изображения с фотокатода на экран при ускоряющем напряжении 15 *кв* дает повышение яркости в 10—20, то тогда общее усиление света достигнет 1000—2000 раз.

Иногда для рассматривания изображения после такого прибора ставят окуляр с небольшим увеличением (в 5—10 раз).

Преобразователи с уменьшенным масштабом изображения применяют редко, так как изображение экрана обычно не рассматривают визуально, а фотографируют. Для этого используют светосильные фотографические объективы, которые позволяют снизить большие световые потери. Например, при объективе с относительным отверстием 1 : 1 используется только около 8% света от экрана преобразователя, остальная часть бесполезно рассеивается, не попадая на фотопластинку. Таким образом, использование фотообъектива уменьшает реальное усиление яркости электронно-оптического преобразователя примерно до 7 раз.

В целях увеличения коэффициента использования света в ряде стран создан преобразователь для контактной фо-

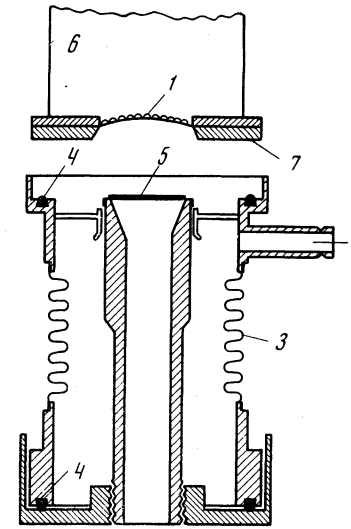


Рис. 141. Схема устройства для обеспечения контакта между фотопленкой и экраном:

1 — слюдяная пленка; *2* — отверстие для откачки воздуха; *3* — металлическая ребристая трубка; *4* — резиновые прокладки для герметизации; *5* — фотопленка; *6* — преобразователь; *7* — задняя стенка баллона преобразователя

топечати, имеющий достаточно тонкую и прочную прозрачную стенку, на которую наносится люминофор.

На рис. 140 показан один из вариантов его конструкции. В приборе применена магнитная фокусировка электронного изображения длинной катушкой *1* с большим числом витков изолированной проволоки, по которой пропускается электрический ток. Качество изображения получается хорошим даже при плоской форме фотокатода *2*.

Ускорение потока электронов обеспечивается системой колец *3*, размещенных внутри цилиндрической колбы преобразователя, на которые подаются электрические потенциалы от делителя напряжения *4*. Экран преобразователя *5* диаметром 10 *мм* выполнен из тонкой (10—15 *мк*) слюды. Под действием атмосферного давления пленка слегка прогибается и образует вогнутую сферическую поверхность. С внутренней стороны, в направлении к фотокатоду, слюдяная пленка покрыта алюминированным слоем люминофора, на котором образуется видимое изображение после преобразователя. При фотографировании изображения с экрана эмульсионная сторона фотопленки *6* плотно прижимается к нему. Так как толщина слюдяной пленки мала, фотоэмульсия находится очень близко к люминофору. Это обеспечивает достаточно четкое изображение на негативе. Разрешающая способность прибора не превышает 15 линий на 1 *мм*.

Для обеспечения плотного прилегания фотопленки к экрану преобразователя используют устройство, которое показано на рис. 141. При откачке воздуха в пространстве

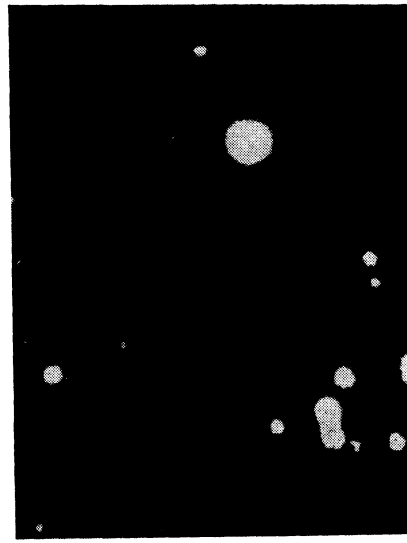


Рис. 142. Фотоснимок области скопления, полученный с фотоконтактной трубкой

между экраном и фотопленкой атмосферное давление плотно прижимает фотопленку к экрану. Достоинство этой конструкции в том, что максимальное давление на слюдяную пленку никогда не превышает атмосферного давления. Это обеспечивает и сохранность экрана при замене фотопленки. При напряжении на электродах преобразователя 20—25 *кв* достигается 50—60-кратное увеличение яркости изображения, во столько же раз уменьшается и время выдержки при фотосъемке.

Недостаток преобразователей, использующих для подложки экрана тонкую слюдяную пленку, заключается в невозможности увеличения диаметра выходного изображения. Если диаметр экрана больше 10 *мм*, прочность пленки становится недостаточной, и она разрушается под действием атмосферного давления.

В настоящее время преобразователи такого типа широко используются в астрономии для фотографирования звезд и туманностей. На рис. 142 показан фотоснимок области скопления NGC 869, полученный в Крымской астрофизиче-

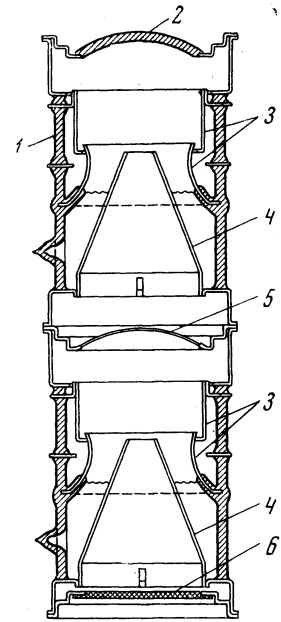


Рис. 143. Схема устройства двухкаскадного электронно-оптического преобразователя:

1 — баллон прибора; *2* — входной полупрозрачный фотокатод; *3* — фокусирующий электрод; *4* — анод под потенциалом 12—15 *кв*; *5* — двухслойный элемент; *6* — выходной люминесцентный экран

ской обсерватории в 1959 г. через оптический телескоп с диаметром входного отверстия 325 *мм* и относительным отверстием 1 : 15; экспозиция 10 *сек* на пленке ДН, самые слабые звезды 13^m—$13,^m5$.

Дальнейшая разработка и усовершенствование конструкций ЭОП привели к созданию каскадных схем. В них изображение на экране первого преобразователя проецируется светосильной оптикой на фотокатод второго, а с экрана второго преобразователя фотографируется фотокамерой. Такая схема дает сокращение экспозиции приблизительно в 12—15 раз. Однако наличие большого количества линз в промежуточной оптике вызывает появление рассеянного света, снижающего контрастность и четкость изображения.

Значительно большее усиление можно получить, если применить два преобразователя без промежуточной оптики. Для этой цели делают общую стеклянную пластинку малой толщины (0,05—0,02 *мм*), являющуюся основой для двухслойного элемента. На одну ее сторону наносят материал экрана первого преобразователя, а на другую — полупрозрачный фотокатод второго. Каждый каскад получает напряжение 12—15 *кв*, а двухкаскадный блок 24—30 *кв*. Фотографирование изображения с экрана такого преобразователя уменьшает время выдержки в 100—140 раз.

На рис. 143 показана схема двухкаскадного электронно-оптического преобразователя.

Для получения очень большого усиления яркости число каскадов доводят до 3—4. Однако дальнейшему увеличению их препятствуют технологические трудности изготовле-

ния, а также снижение контрастности изображения и увеличение помех в самом приборе. Так, в многокаскадных преобразователях (полезное усиление до 100 000 раз) темновые токи первого фотокатода вызывают внутренние помехи в виде светлого фона. Он образуется из большого числа светящихся точек, беспорядочно перемещающихся во всех направлениях по экрану. Каждая точка возникает от удара одного или нескольких электронов об люминесцентный экран. Очевидно, коэффициент усиления яркости 100 000 оказывается предельным. Дальнейшее его увеличение только ухудшает работу прибора. Минимальная освещенность изображения на фотокатоде, при которой возможно обнаружить изображение на экране преобразователя, составляет около 10^{-6} *лк*. Примерно такая же освещенность наблюдается на поверхности Земли в сильно облачную и безлунную ночь.

Помимо перечисленных конструкций ЭОП известны лабораторные образцы и других типов. К одному из них относится преобразователь, в котором используется метод вторичной эмиссии от ряда динодов, расположенных на одинаковом расстоянии в промежутке между фотокатодом и люминесцентным экраном. Диноды могут иметь форму тонких металлических пленок, обладающих достаточно большим коэффициентом вторичной электронной эмиссии. Поток электронов, летящий от фотокатода к люминесцентному экрану, выбивает много вторичных электронов из динодов. Это сильно увеличивает его плотность, вследствие чего происходит усиление яркости изображения на экране преобразователя.

В другом типе преобразователя с вторичной эмиссией электронов в качестве динодов используются мелкие металлические сетки. Принцип его действия не отличается от первого типа. Такие усилители яркости пока не нашли применения на практике, так как не обеспечивают хорошей четкости изображения.

В заключение следует отметить, что, например, применение ЭОП с разрешающей силой 0,1 *мм* дает выигрыш в выдержке, необходимой для получения фотографии небесного объекта.

10. ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Новым методом усиления яркости изображений, получаемых астрономическими приборами, является телевизионный. Телескоп в сочетании с телевизионным свето-

приемником получил название телевизионного телескопа.

По сравнению с электронно-оптическим преобразователем телевизионная система имеет ряд преимуществ:

1. Изображение от астрономического телескопа можно передавать на большие расстояния, что особенно удобно, когда телескоп расположен на большой высоте, в труднодоступном месте. В этом случае фиксирование и наблюдение изображения может производиться в обычных условиях любой обсерватории.

2. На контрольном экране кинескопа можно получить изображение во много раз большего размера, чем оптическое изображение на фотокатоде передающей телевизионной трубки.

3. Можно плавно регулировать масштаб, контрастность (до $\gamma \approx 10$—15) и яркость изображения при одинаковом времени выдержки во время фотографирования с экрана кинескопа.

4. Можно достаточно длительное время накапливать изображение в виде электрических зарядов на мишени трубки, а затем рассматривать или фотографировать его.

5. В телевизионной системе передаваемое изображение превращается в ряд электрических сигналов, следующих один за другим с большой скоростью. С видеосигналами можно производить любые манипуляции, например складывать их, вычитать и т. д., а полученные результаты рассматривать в виде изображения на экране кинескопа. На нем можно одновременно наблюдать явления, происходящие в данный момент в различных точках пространства; например, видеть деформированное изображение звезды и одновременно с ним изменение фототока фотоумножителя, вызванное колебаниями блеска звезды вследствие атмосферной турбуленции.

6. Использование свойства электронов изменять путь, скорость и направление движения под воздействием магнитных и электрических полей в системе телевизионного телескопа позволяет в принципе получать «спокойные» изображения звезд на экране кинескопа без видимых искажений от атмосферной турбуленции, которые характерны для оптических наблюдений.

К недостаткам телевизионного способа усиления яркости следует отнести некоторую сложность и громоздкость всего оборудования. Кроме того, в телевизионной системе

не всегда возможно уменьшать время выдержки фотопластинки при фотографировании изображения с экрана кинескопа. Время выдержки определяется не яркостью фотографируемого изображения, а длительностью передачи телевизионного кадра. Так, при длительности кадра $\frac{1}{50}$ *сек* фотографирование с выдержкой $\frac{1}{100}$ *сек* зафиксирует только часть передаваемого изображения.

Это объясняется тем, что в передающих телевизионных трубках используется эффект накопления изображения в виде электрического потенциального рельефа на их мишени. Время накопления равно продолжительности передачи кадра, т. е. $\frac{1}{25}$ *сек* или $\frac{1}{50}$ *сек*, в зависимости от используемого стандарта развертки изображения в телевизионной аппаратуре. Потенциальный рельеф представляет собой некоторую сумму мгновенных изображений, накопленных на мишени и осредненных за время передачи кадра.

Таким образом, уменьшение времени выдержки при обычном фотографировании изображения с экрана кинескопа (по сравнению с временем передачи телевизионного кадра) не увеличит разрешения прибора по времени. Правда, в принципе возможно получение фотоснимков с выдержкой короче $\frac{1}{25}$ *сек*, за счет усложнения телевизионной аппаратуры.

Основная часть телевизионной системы — передающая трубка, превращающая оптическое изображение в электрические сигналы. Через соответствующую аппаратуру эти сигналы передаются на приемную трубку-кинескоп, где превращаются в более яркое изображение. Сам принцип передачи изображения с фотокатода передающей трубки на приемный экран кинескопа здесь иной, чем в ЭОП, где электронное изображение целиком переносится на экран и превращается в видимое. В телевизионной аппаратуре передача изображения происходит последовательно во времени, от точки к точке. Здесь изображение развертывается в горизонтальном направлении — по строкам, и в вертикальном — по кадрам.

Рис. 144 иллюстрирует метод передачи изображения по точкам со светочувствительной поверхности передающей телевизионной трубки. Развертывающим элементом служит

электронный луч, с большой скоростью пробегающий по мишени. В приемной трубке электронный луч является воспроизводящим элементом. Он вызывает свечение отдельных точек экрана, превращая электрические импульсы в световые. Для передачи изображения необходима точная согласованность движения обоих лучей (в передающей и приемной трубках). Усилители электрических сигналов изображе-

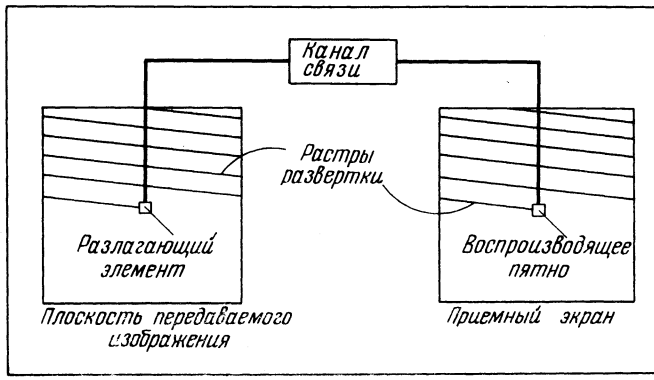


Рис. 144. Схема принципа телевизионной передачи

ния, устройства для одновременного движения электронных лучей, соединительные линии и пр. обозначены на рисунке общим названием канала связи.

В телевизионной практике используются различного типа передающие трубки. Наиболее чувствительная из них — суперортикон (рис. 145) — установлена в телевизионных телескопах, рассчитанных для наблюдений за небесными объектами сравнительно малой яркости. На рис. 146 показана схема ее устройства.

Основными узлами трубки являются три секции: переноса электронного изображения *1*, развертки и считывания изображения *2*, усиления видеосигналов *3*. Секция переноса состоит из полупрозрачного фотокатода *Ф*, на который проецируется оптическое изображение, и ускоряющего электрода *УЭ*, который уменьшает геометрические искажения электронного изображения при переносе его с фотокатода на мишень из тонкой пленки специального полупро-

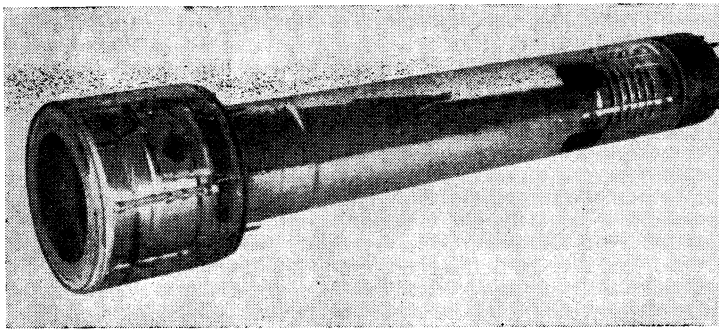


Рис. 145. Внешний вид суперортикона

водникового стекла. Для нормальной работы трубки температура мишени должна поддерживаться в пределах от +35 до +60° С. Если температура ее становится ниже указанного интервала, то трубка приобретает свойство некоторое время сохранять остаточное изображение предыдущего кадра после окончания его передачи. Повышение температуры сверх +60° С уменьшает электрическое сопротивление мишени, что ведет к понижению чувствительности трубки и ухудшению четкости передаваемого изображения. Таким образом, рабочий диапазон температур мишени весьма узкий, практически не превышает ±10° С от ее средней величины +40° С.

Предварительный нагрев трубки до указанной температуры осуществляется электрическим током, пропускаемым через катушку обогрева мишени. Температура в этой части трубки обычно контролируется с помощью термосопротивления и измерительного прибора, градуированного по шкале Цельсия. На рисунке термосопротивление не показано. Со стороны фотокатода, близко к мишени, расположена мелкоструктурная металлическая сетка мишени *СМ*, имеющая до 40 отверстий на 1 *мм* длины. Назначение ее — регулировать режим работы мишени при накапливании на ней электрических зарядов от передаваемого изображения. Важным фактором, влияющим на чувствительность трубки, оказывается расстояние между сеткой и мишенью. С увеличением его чувствительность трубки возрастает, но уменьшается выходной сигнал.

Оптическое изображение на фотокатоде трубки превращается в поток электронов, который фокусируется на мишени однородным магнитным полем длинной цилиндрической катушки *ФК* и электрическим полем в промежутке от фотокатода до мишени. При переносе электронного изображения на мишени возникают электрические заряды. Характер их распределения соответствует распределению света

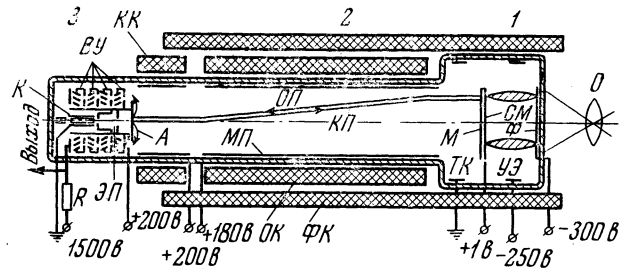


Рис. 146. Схема суперортикона

1 — секция переноса изображения; *2* — секция развертки изображения; *3* —секция усиления видеосигналов; *К* — катод; *ВУ* — вторично-электронный умножитель; *ЭП* — электронный прожектор; *А* — анод; *КП*— коммутирующий пучок; *ОП* — обратный пучок; МП— металлическое покрытие; *М* — мишень; *ТК* — тормозящее кольцо; *СМ* — сетка мишени; *Ф* —фотокатод; *О* — объектив; *УЭ* — ускоряющий электрод; *КК*—корректирующая катушка; *ОК* — отклоняющая катушка; *ФК*— фокусирующая катушка

в оптическом изображении на фотокатоде трубки. На мишени образуется потенциальный рельеф, который передается на ее другую сторону, где развертывается пучком медленных электронов, имеющих почти нулевые скорости при подходе к мишени. Для уменьшения скорости электронов используется тормозящий электрод *ТК*. Источником электронов развертывающего пучка является электронный прожектор *ЭП*, расположенный в секции усиления сигналов *ВУ*.

При движении электронного пучка вдоль мишени ее потенциальный рельеф компенсируется. Световые места изображения соответствуют бóльшим зарядам (бóльшему потенциальному рельефу) на мишени. Электронный пучок содержит определенное количество электронов. На участках мишени, имеющих больший электрический заряд, осаж-

дается больше электронов, чем на участках с малыми электрическими зарядами. Остаток электронов пучка *ОП* возвращается обратно и попадает в секцию усиления, представляющую собой пятикаскадный электронный умножитель *ВУ*. В разных точках мишени заряды распределяются различно, в зависимости от характера передаваемого изображения. Число электронов, отбираемых мишенью от пучка, становится непостоянным и меняется в соответствии с величиной потенциального рельефа на мишени. Таким образом, пучок электронов изменяется или модулируется сигналами изображения. После электронного умножителя сигналы изображения усиливаются в 500—1000 раз.

Для получения четкого изображения развертывающий электронный пучок фокусируется на мишени в пятно диаметром около 25 *мк*. Фокусировка достигается магнитным полем катушки *ФК* и электрическим полем, образующимся в пространстве между катодом прожектора *К* и фокусирующим электродом *МП*. Неточная сборка и перекос оси прожектора могут явиться источником дополнительных искажений при передаче изображения. Для устранения этого служит корректирующая катушка *КК*. С ее помощью ось электронного пучка совмещается с силовой линией продольного магнитного поля катушки *ФК*. Это улучшает четкость изображения и равномерность фона по всей площади передаваемого кадра.

Из-за большой сложности суперортикона и взаимной зависимости разных секций трубки, связанных между собой общим магнитным полем, выбор наилучшего режима работы в нем требует длительного времени. Зато потом этот режим остается долго неизменным при условии постоянства электрических напряжений в схеме питания отдельных элементов трубки.

Разрешающая способность трубок зависит от величины освещенности изображения на фотокатоде. Существует ряд типов трубок, рассчитанных на передачу достаточно ярких изображений: для освещенностей 10—20 *лк*, для средних освещенностей порядка 0,1—0,5 *лк* и для предельно слабых освещенностей около 10^{-6}—10^{-7} *лк*. В телевизионном телескопе обычно используют два последних типа трубок. Они будут рассматриваться и в нашем дальнейшем изложении.

Передающие телевизионные трубки рассчитаны в основном на четкость передачи 625 строк разложения. Для трубок, рассчитанных на слабые освещенности, такая четкость

обеспечивается при 0,5—0,3 *лк* (суперортиконы ЛИ17). Уменьшение освещенности до 0,1 *лк* дает четкость 550 строк, до $1 : 3 \times 10^{-3}$ *лк* — 100 строк. При этом сильно возрастают помехи от внутренних шумов в трубке, а изображение едва различимо. Такую освещенность называют пороговой, или предельной. Для трубок с большим расстоянием от сетки до мишени предел освещенности понижается до 10^{-4} *лк* и даже еще больше.

Передающие телевизионные трубки для предельно малых освещенностей состоят из двухкаскадного электронно-оптического преобразователя, соединенного с секцией переноса суперортикона. Выходной люминесцентный экран нанесен на тонкую стеклянную или слюдяную пластинку, с другой стороны которой нанесен фотокатод суперортикона. Такая трубка обеспечивает четкость изображения в 300—100 строк при освещенности порядка 10^{-6}—10^{-7} *лк*. С увеличением освещенности на фотокатоде трубки качество изображения растет. Однако для суперортикона с каскадами электронно-оптического усиления четкость изображения определяется также искажениями в самой трубке, вызываемыми дефокусировкой оптических изображений в двухслойных элементах (экран — фотокатод). Суперортикон с одним каскадом усиления обеспечивает наивысшую четкость 625 строк, с двумя каскадами — 450 строк. Как в электронно-оптических преобразователях, так и в высокочувствительных суперортиконах предел дальнейшему усилению яркости создает фон от темновых токов первого фотокатода.

Таким образом, предельное усиление яркости в этих трубках (ЭОП и суперортикон с каскадами ЭОП) оказывается практически одинаковым.

Кроме передающей трубки и питающей его оптики телевизионный телескоп имеет также ряд других устройств, необходимых для передачи изображений.

В телевизионной аппаратуре СССР для передачи изображений применяется стандарт в 625 строк разложения и частота 25 кадров в секунду. В ней используется метод чересстрочной развертки. Каждый кадр изображения передается дважды. Вначале передаются все нечетные строки до конца кадра, затем все четные. Длительность таких полукадров, или полей, составляет $\frac{1}{50}$ *сек*. Другой способ развертки — построчный, или прогрессивный. В этом слу-

чае изображение развертывается подряд. Строки передаются одна за другой. Четкость передаваемого изображения сохраняется, но частота кадров удваивается (50 кадров в 1 *сек*). Это вызывает увеличение полосы видеочастот при передаче изображения тоже в два раза. Максимальная частота видеосигналов (сигналов изображения) возрастает с $6{,}5 \times 10^6$ *гц* примерно до 13×10^6 *гц*.

Прогрессивная развертка изображения в телевизионном вещании не применяется, так как это сильно увеличило бы сложность устройства телевизора и, следовательно, его стоимость. Для астрономических целей применимы оба метода. Прогрессивную развертку предпочитают иногда из-за лучшей четкости получаемых изображений.

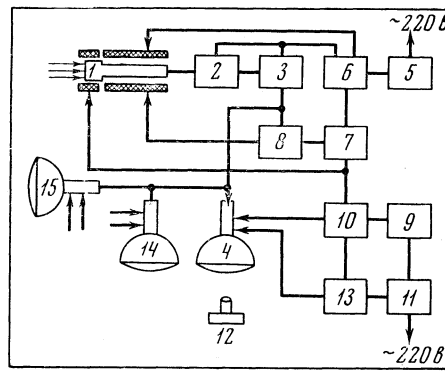


Рис. 147. Блок-схема телевизионного телескопа Пулковской обсерватории

Для примера на рис. 147 показана блок-схема первой модели телевизионного телескопа, построенного в Пулковской обсерватории, в которой используются и прогрессивная, и черезстрочная развертки. Изображение от телескопа с диаметром входного отверстия 285 *мм* проецируется на фотокатод передающей трубки *1* (суперортикон ЛИ17). Электрические сигналы от нее поступают на предварительный усилитель видеосигналов *2*, пропускающий без искажений частоты до 12 *Мгц*. Затем видеосигналы попадают на выходной усилитель *3* и на управляющий электрод кинескопа *4*

типа 31ЛК2Б с размером экрана 180 × 240 *мм*. Аппаратура питается от сети переменного тока. Постоянство питающих напряжений поддерживается стабилизаторами *5*. Выпрямители *6* дают постоянный ток как для передающей трубки, так и для всех блоков аппаратуры. Пилообразные напряжения для смещения электронного луча при развертке изображения в передающей трубке создаются блоком разверток *7*. Импульсы напряжения, необходимые для синхронного смещения электронных пучков в передающей трубке и в кинескопе, формируются блоком *8*. Кинескоп имеет свои блоки питания *9*, развертки изображения и синхронизации *10*. Стабилизация напряжения сети переменного тока осуществляется блоком *11*. Изображение с экрана кинескопа фотографируется камерой «Киев» *12* на кинопленку. При съемке используется синхронный электронный затвор *13*, обеспечивающий точную выдержку в $\frac{1}{25}$ или $\frac{1}{50}$ *сек* и позволяющий фотографировать один или два кадра. Он представляет собой генератор ждущей развертки, срабатывающий при подаче запускающего импульса в результате нажима кнопки. После этого устройства образуется выходной импульс напряжения, который увеличивает силу тока электронного пучка в кинескопе, в течение прохождения одного или двух кадров. В остальное время пучок имеет малую силу тока, и экран кинескопа затемнен.

Следует отметить, что получить хороший фотоснимок с временем выдержки в $\frac{1}{25}$ или $\frac{1}{50}$ *сек* без синхронного затвора трудно. Практически невозможно точно открыть затвор фотоаппарата при начале развертки кадра и закрыть его в конце. Небольшая ошибка во времени вызывает появление на фотоснимке белых или темных полос. Удовлетворительную фотографию изображения с экрана кинескопа можно получить при времени выдержки $\frac{1}{5}$ *сек* и больше. В этом случае несколько кадров фотографируются, накладываясь один на другой. Полосы становятся незаметными. Для моментальных снимков этот метод исключается.

Контроль за качеством телевизионного астрономического изображения и выбора моментов съемки объекта ведется с помощью второго кинескопа *14*, размещенного рядом с первым. Для удобства регулировки телевизионного телескопа и контроля положения оптического изображения и его

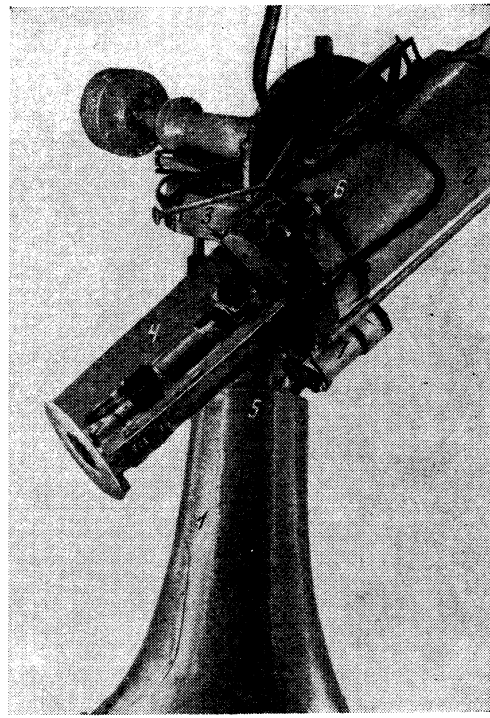


Рис. 148. Внешний вид телевизионного телескопа

фокусировки на фотокатоде передающей трубки используется третий кинескоп *15*. Он находится у самого телескопа. Первый телевизионный телескоп в Пулкове, смонтированный на параллактической установке АПШ-5, показан на рис. 148.

На колонке *1* смонтирована труба телескопа. *2* На ее конце насажен фланец *3*, в котором помещается главное зеркало диаметром 285 *мм*. На наружной части фланца находится держатель телевизионной камеры *4*, в которой закреплена магнитная фокусирующая система с передающей трубкой. Для оптической фокусировки телескопа, собранного по схеме Кассегрена, используется метод перемещения второго выпуклого зеркала с помощью винта, ручка которого *5*

размещена на трубе телескопа. Оптические искатели *6* и *7* используются для грубого и точного наведения телескопа на объект. Телевизионная камера соединяется с блоками аппаратуры соединительными кабелями.

Телевизионный телескоп обладает пятью эквивалентными фокусами — 9,5 *м*, 18 *м*, 32 *м*, 56 *м* и 125 *м*. Три первые можно использовать для наблюдения и фотографирования планет, два последние — для фотографирования деформированных атмосферной турбуленцией звездных изображений при изучении атмосферных помех. При максимальном оптическом фокусе телескопа 125 *м* изображение звезды на экране кинескопа имеет диаметр приблизительно 15 *мм*. Такой диаметр изображения соответствует эквивалентному фокусу телескопа 1060 *м* (составляется из оптического масштаба изображения, увеличенного в электронной аппаратуре в 8,5 раза).

На рис. 149 приведен фотоснимок изображения северного края диска Луны вблизи полнолуния. Он сделан с экрана кинескопа, при использовании оптического фокуса телескопа 18 *м*. Развертка построчная 25 кадров в секунду. Выдержка при фотографировании $\frac{1}{25}$ *сек* на кинопленке чувствительностью 90 ед. ГОСТа, относительное отверстие объектива фотоаппарата 1 : 2,5.

В литературе высказывались предположения о возможности создания автоматического прибора для фотографирования звездных изображений, не искаженных атмосферной турбуленцией. Предлагалось использовать выбросы фототока, часто наблюдаемые на осциллограммах при фотоэлектрической регистрации нестабильности звездных изображений, для управления скоростным фотозатвором при фотографировании изображения звезды. Предполагается, что мгновенное усиление яркости звездного изображения и, следовательно, фототока после фотоумножителя, происходит в моменты образования теоретического (самого минимального) дифракционного изображения звезды. Это должно соответствовать мгновенному отсутствию атмосферных помех. В эти моменты телескоп должен обладать максимальной, т. е. теоретической разрешающей способностью, а фотографируемое изображение обладать наибольшей четкостью.

Обычными оптическими и фотографическими средствами проверить это предположение оказывается трудно. Так,

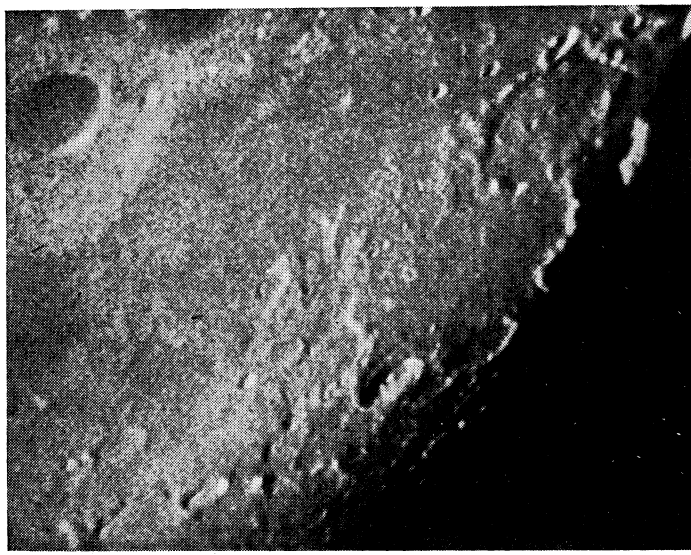


Рис. 149. Фотоснимок с экрана кинескопа изображения северного края диска Луны

для получения звездного изображения крупного масштаба, чтобы выявить его структуру при деформациях, необходимо использовать в телескопе малые относительные отверстия порядка 1 : 300 или 1 : 400. Это сильно ослабляет яркость изображения звезды и не дает возможности обычными фотографическими средствами получить негативы с нормальной плотностью почернения при выдержках в $\frac{1}{50}$ или $\frac{1}{25}$ *сек*. Кроме того, технически трудно на фотопластинке, установленной в кассете телескопа, одновременно спроецировать второе изображение с экрана электронного осциллографа, воспроизводящего форму фототока при нестабильности звездного изображения. Такую задачу сравнительно легко разрешить телевизионными средствами.

В соответствии с этими соображениями в 1959 г. телевизионный телескоп Пулковской обсерватории был приспособлен для получения фотоснимков одновременной регистрации светового потока и формы изображения звезды при ее нестабильности. При наблюдениях использовалась оптика 56-метрового фокуса, телевизионная аппаратура, описан-

ная выше, и, кроме того, блоки промышленной телевизионной установки ПТУ-3, которая использовалась для передачи изображения осциллограммы фототока. На рис. 150 показана блок-схема этой установки для двухканальной регистрации изображений на один общий экран кинескопа.

Изображение звезды после телескопа *1* попадает на алюминированное полупрозрачное зеркало *2*, которое пропускает 50% света, образуя изображение на фотокатоде первого суперортикона *3*. Остальные 50% света отражаются от зеркала и попадают на фотокатод фотоумножителя *4*, питаемый от блока *5*. Выходные фототоки после фотоумножителя подаются на усилитель постоянного тока *6*, а затем на электронный осциллограф (на пластины вертикального отклонения луча) *7*. Осциллограф снабжен генератором непрерывной развертки *8*, работающим в режиме синхронизации с часто-

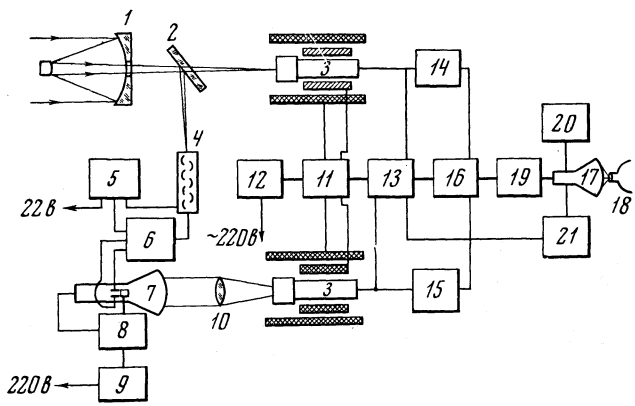


Рис. 150. Блок-схема телевизионного телескопа для одновременного фотографирования двух изображений

той кадров телевизионной системы (в нашем случае 25 кадров в секунду), и получает энергию питания от блока *9*. Изображение осциллограммы фототока на экране осциллографа проецируется объективом *10* на фотокатод второго суперортикона *3*, установленного в камере промышленной телевизионной установки ПТУ-3. Оба телевизионных канала (канал экспериментального телевизионного телескопа и канал ПТУ-3) синхронизированы между собой. Блоки *11* и *12* обеспечивают раздельное управление режимом пе-

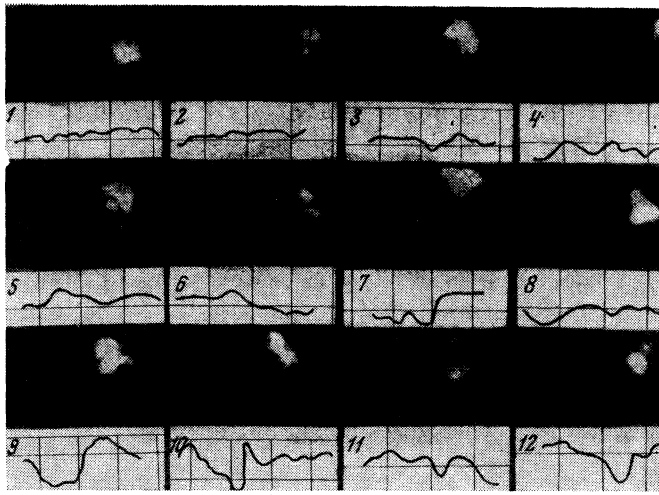


Рис. 151. Фотоснимки с экрана кинескопа изображения звезды α Волопаса и осциллограммы фототока ее блеска

редающих трубок и подачу напряжений. Для получения черезстрочного разложения на 625 строк при 25 кадрах в секунду используется синхрогенератор *13*. После усилителей *14* и *15* видеосигналы попадают на блок электронной коммутации *16*, при помощи которого на экране кинескопа *17* одновременно возникают два изображения от двух передающих трубок. Верхнюю половину экрана занимает деформированное звездное изображение, нижнюю — изображение осциллограммы фототоков после фотоумножителя. С помощью камеры *18*, снабженной электронным затвором для получения однокадровых снимков, изображение фотографируют с экрана кинескопа. Блоки *19* и *20* являются дополнительным усилителем и источником питания для кинескопа, а блок *21* служит для разверток изображения в кинескопе.

На рис. 151 приводятся фотоснимки (выдержка $\frac{1}{25}$ *сек*) изображений с экрана кинескопа звезды α Волопаса и осциллограмм фототока, полученных с двухканальным телевизионным телескопом. Из анализа отдельных кадров можно сделать вывод, что никакой связи между изменением фототока и формой изображения звезды не намечается.

В некоторых конструкциях телевизионного телескопа питающей оптикой является рефрактор. Такие системы дают большой эффект при наблюдениях, когда световой фон неба достаточно велик, например при вечерних или утренних наблюдениях планет или звезд.

С экрана кинескопа этого телевизионного телескопа производилась опытная фотосъемка (с выдержкой $\frac{1}{25}$ *сек*) Юпитера и его спутников за несколько минут до восхода Солнца, а также изображений Юпитера, Венеры и Луны в полдень. В аппаратуре телескопа был использован суперортикон с двумя каскадами усиления изображений, названный за его высокую чувствительность «кошачьим глазом». Схематическое расположение блоков аппаратуры и телескопа в башне показано на рис. 152.

В астрономической башне Витенбергского колледжа в США смонтирован такой телескоп-рефрактор с диаметром объектива 250 *мм*, окулярное увеличение обеспечивает оптический фокус 15 *м*. Подробные сведения о его конструкции в литературе не публиковались.

Помимо усиления яркости изображения и уменьшения времени выдержки при фотографировании небесных объектов телевизионные системы в сочетании с оптическими телескопами в некоторых случаях могут служить в какой-то мере и компенсаторами атмосферных помех при астрономических наблюдениях. В 1957 г. такой телевизионный телескоп построен в обсерватории Деуера (США).

Блок-схема этой установки приведена на рис. 153. Питающая оптика состоит из зеркала *1* диаметром 600 *мм* и отрицательной линзы *2*, доводящей фокусное расстояние до 15 *м*. Изображение от телескопа попадает на цветоизбирательное зеркало *3*. Часть света (50%), отражаясь от него, образует изображение на фотокатоде суперортикона *4*, остальная часть, проходящая через зеркало,— на двух взаимно перпендикулярных щелях компенсатора *5*. За щелями расположены два фотоумножителя *6*. Их выходы соединены с усилителями постоянного тока *7*. Сигналы после усилителей подаются на две пары катушек с изолированной проволокой, расположенных вокруг секции переноса трубки. Оси катушек взаимно перпендикулярны. Смещение оптического изображения на щелях меняет световой поток на фотокатодах умножителей и увеличивает или уменьшает магнитное поле в катушках. Изменение поля смещает электрон-

ное изображение в секции переноса суперортикона. Подбором фазы и величины тока в катушках электронное изображение в секции переноса можно сместить в направлении, противоположном смещению оптического изображения на

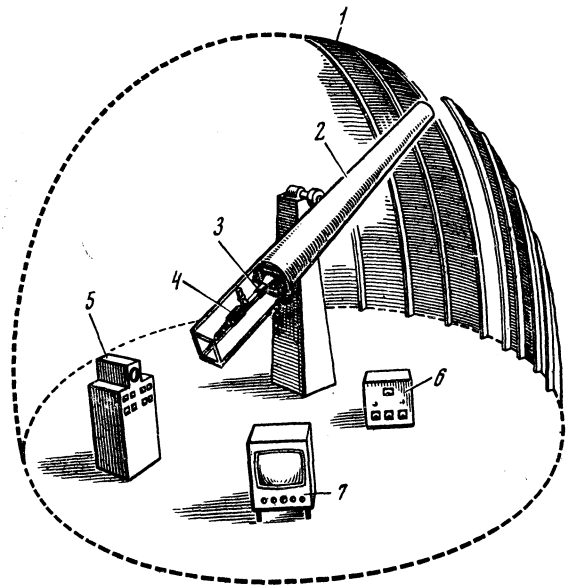


Рис. 152. Схема блоков телевизионного телескопа для дневного фотографирования небесных объектов:

1 — купол астрономической башни; *2* — труба рефрактора; *3* — окуляр, строящий изображение светила на фотокатоде; *4* — передающая телевизионная трубка; *5* — вспомогательная аппаратура; *6* — источники питания для трубки и усилителя; *7* — кинескоп

щелях и фотокатоде трубки. При соответствующей регулировке усиления в фотоэлектрических усилителях электронные изображения на мишени передающей трубки и на экране кинескопа *8* становятся неподвижными. В комплект аппаратуры входят и остальные блоки *9*, *10*, *11*, *12*, необходимые для передачи и приема изображения.

Четкость передачи изображения здесь более высокая, чем при телевизионном вещании. Отдельные мелкие детали изображения видны яснее, чем при непосредственном наблю-

дении их через окуляр телескопа. Поэтому телевизионная аппаратура наиболее полно обеспечивает использование теоретической разрешающей способности оптической части телескопа.

Описанная система компенсирует помехи от смещения изображения только в фокальной плоскости. Беспорядочные смещения изображения в других направлениях, например перпендикулярных к фокальной плоскости, она не может

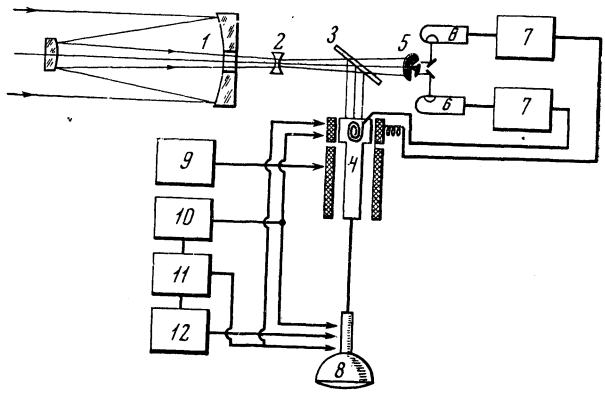


Рис. 153. Блок-схема телевизионного телескопа с компенсатором атмосферных помех

компенсировать. Это же относится и к объектам, имеющим достаточно большие угловые размеры (особенно при больших масштабах увеличения), таким, как Луна и др.

Ближайшей задачей развития телевизионных средств обнаружения и фотографирования крайне слабых по освещенности объектов является увеличение чувствительности передающих телевизионных трубок. Возможный путь ее решения — увеличение времени накопления изображения в виде потенциального рельефа на мишени трубки. Светочувствительность трубки в этом случае будет расти пропорционально времени.

Существующие высокочувствительные трубки типа суперортикон, работая в нормальных условиях (разложение 625 строк, частота 25 кадров), имеют время накопления $\frac{1}{25}$ *сек*. В этом режиме легко довести время накопления до 1 *сек*. Охлаждение трубки при соответствующем новом режиме работы позволяет удлинить время до 20 *сек*, а примене-

ние мишени с большим сопротивлением (электрическим) — до 20 *мин*. В США существуют специально разработанные лабораторные образцы трубок, в которых время накопления доведено до 1 *час*. Предел освещенности, при котором трубка может передавать изображение объекта,— около 10^{-8} *лк*.

В литературе публиковались теоретические расчеты по определению предельно малых звездных величин небесных объектов, которые могут быть зарегистрированы при хороших атмосферных условиях с телевизионными системами, смонтированными на оптическом телескопе с диаметром объектива 5 *м*. В этом случае сверхчувствительные передающие телевизионные трубки должны обладать временем накопления порядка 1 *час* 30 *мин*. Расчеты показывают, что при наличии помех в виде обычного фона от свечения ночного неба, в 50-метровом фокусе телескопа теоретически возможно зарегистрировать или обнаружить небесные точечные объекты со светимостью до 27 зв. вел., а при отсутствии помех (внеатмосферные снимки) — до 34 зв. вел. Из сказанного следует, что дальнейшее развитие современных электронных методов обнаружения слабых небесных объектов имеет большие перспективы.

Телевизионные телескопы открывают новые возможности расширения границы спектрального участка при фотографировании небесных объектов в инфракрасной области с длиной волны свыше 1,5 *мк*, в которой фотоэмульсия и фотокатод с внешним фотоэффектом не могут зарегистрировать изображения. Граница инфракрасной области спектральной чувствительности фотопластинки обычно не превосходит 0,7—0,8 *мк*, применение специальных эмульсий, сравнительно малой чувствительности, сдвигает ее до 1,1—1,2 *мк*. Электронные приборы с кислородно-цезиевым фотокатодом обладают спектральной чувствительностью до 1,1—1,2 *мк*, с максимумом чувствительности 0,75—0,8 *мк*. В последнее время в технике применяются телевизионные передающие трубки, рассчитанные для работы в более далекой инфракрасной области, чем предыдущие светоприемники. Такие трубки известны под названием инфракрасный видикон. В них в качестве светочувствительного элемента используется фотосопротивление из сернистого свинца. Рабочая спектральная область у инфракрасного видикона простирается приблизительно от 0,4 до 2,3 *мк*, что значительно больше по сравнению с фотопластинкой и кислородно-цезиевым фотокатодом.

В инфракрасном телевизионном телескопе оптическое изображение фокусируется на мишени видикона. Для выделения необходимой спектральной области перед ней помещается инфракрасный фильтр, например из специального сорта стекла или из кремния. Все световые волны короче 0,8—0,9 *мк* на видикон не попадают, а на мишень трубки проходят волны инфракрасного излучения длиннее 0,9 *мк*. Мишень трубки представляет собой тонкий слой полупроводника, имеющий большое сопротивление. При наличии на ней инфракрасного изображения электрическое сопротивление мишени в светлых местах уменьшается, в темных остается большим. Так на мишени фиксируется передаваемое изображение в виде перераспределения электрических сопротивлений по всей ее площади.

При передаче инфракрасного изображения через телевизионную систему происходит ряд трансформаций:

1. Инфракрасное изображение после фильтра попадает на мишень видикона и образует на ней электронное изображение, которое развертывается электронным лучом. Его источником является специальный подогревный катод, смонтированный в самой трубке. В результате движения луча при развертке трубка генерирует серии электрических быстро следующих один за другим сигналов изображения.

2. Видеосигналы поступают на электронные усилители, после чего их мощность сильно возрастает. На экране кинескопа образуется яркое изображение наблюдаемого объекта, но уже в видимой области спектра. Это изображение фотографируется на обычной фотоэмульсии, которая может быть не чувствительной к инфракрасным лучам. Однако энергетическая чувствительность инфракрасного видикона сравнительно мала. Это вынуждает применять в питающей оптике, при ее скромных размерах, малые фокусные расстояния.

При использовании инфракрасной передающей трубки высокого качества телевизионная система обеспечивает передачу изображения с четкостью 600 строк с кадра размером 12 × 16 *мм*. Ширина строки составляет около 20 *мк* (в 1 *мм* 50 строк).

Максимум спектральной чувствительности системы инфракрасного видикона и кремневого фильтра находится вблизи длины волны 1,2 *мк*. Около длин волн 0,9 и 2,3 *мк* чувствительность снижается до 3% от максимума.

Земная атмосфера является своеобразным оптическим фильтром с переменными характеристиками. В инфракрасных лучах заметно сильное поглощение излучения, неодинаково расположенное по спектру волн. Причиной этому — наличие в атмосфере Земли паров воды, углекислого газа, метана и пр. Известны полосы поглощения энергии в земной атмосфере в пределах длин волн 1,2—1,5 *мк*, 1,8—2 *мк* и т. д., попадающие в область спектральной чувствительности телевизионного светоприемника. Вследствие этого атмосферное поглощение вызывает некоторую неопределенность в учете рабочей спектральной характеристики устройства в целом.

К этому следует добавить, что ширина и интенсивность полос поглощения энергии в земной атмосфере сильно меняются из-за ее влажности, температуры и т. д. Таким образом, при инфракрасном фотографировании небесных объектов в указанной выше спектральной области будет сохраняться неизменность спектральных характеристик по всему пути прохождения излучения от небесного объекта до мишени видикона (включая атмосферу Земли) только при одинаковости метеорологических условий в моменты наблюдений.

В заключение следует сказать, что телевизионная аппаратура, в том числе передающие трубки, непрерывно улучшается. Увеличиваются их светочувствительность и разрешающая способность, расширяются границы спектральной чувствительности. В некоторых типах трубок увеличивается и время накопления потенциального рельефа на мишени. Все это повышает возможности телевизионных телескопов. Вероятно, в недалеком будущем астрономы смогут обнаруживать и фотографировать в различных областях спектра такие слабосветящиеся объекты, которые при существующих фотографических методах наблюдений пока совершенно недоступны им. Расширение спектральных границ применения телевизионных телескопов и способов усиления яркости приведет, по-видимому, к глубоким качественным изменениям в астрономических наблюдениях, аналогичным тем, какие вызвало в свое время использование фотопластинки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние десятилетия отмечены крупными достижениями в развитии астрономического приборостроения.

За время Советской власти наша страна от мелкого кустарного производства небольших, зачастую несовершенных телескопов, перешла к плановому созданию значительных по размеру и оригинальных по идее телескопов и вспомогательных приборов. Как указывалось выше, отечественная промышленность поставляет астрономические приборы общего и специального назначения, в частности отражательные телескопы с поперечниками зеркал до 2,6 *м*. Ведутся работы по созданию еще более мощных средств для астрономических наблюдений.

Увеличение диаметра зеркал до нескольких метров зависит от успехов в разработке принципиально новых материалов и технологии их изготовления. Здесь мы также имеем существенные успехи как в области специального стекловарения, так и в отношении поисков заменителей стекла для больших астродисков зеркал телескопов, например особой стали, специальных стекол и керамик или сплавов металлов[1]. Главное преимущество в последнем случае заключается в ослаблении роли так называемого «эффекта края», т. е. неравномерной деформации зеркала, происходящей под влиянием изменения температуры частей зеркала различной толщины. Этот эффект очень значителен для зеркал из простого стекла, например крона. Однако вопрос о наиболее выгодном сорте материала для зеркала телескопа (как и для конструкции его тыльной стороны и разгрузки) приходится рассматривать вместе с вопросом обработки его рабочей поверхности, и поэтому в настоящее время мы еще не можем правильно ответить на указанную пробле-

[1] См.: Ю. С. Стрелецкий. Рефлектор с металлическим зеркалом.— «Наука и жизнь», 1962, № 5.

му. В частности, выгодным оказывается материал, который можно так подвергнуть зональному подогреву электрическими грелками, что его рабочую поверхность можно полировать по поверхности сферы, что быстрее, дешевле и легче контролируется. После снятия грелок и отстойки зеркало, охлаждаясь, принимает необходимую параболическую поверхность. Успешные опыты в этом отношении проделаны в Парижской обсерватории (А. Кудер) и ведутся сейчас в ряде других.

Для будущего прогресса астрономии необходимо также стремиться создать телескопы с объективами, позволяющими одновременно изучать большие участки неба, т. е. широкоугольные системы. Зеркально-линзовые системы, созданные в 30—50-х гг. в Советском Союзе, Америке и некоторых других странах, частично или даже полностью отвечают этим требованиям.

Совершенствование и увеличение размеров радио-, телевизионных и электронных телескопов, безусловно, необходимо для прогресса астрономии. Использование новых методов прикладной физической оптики уже привело зарубежную и советскую астрономию к очень важным открытиям, описанным в данной книге. Развитие работ в этом направлении, в частности с применением интерференционных методов, послужит дальнейшим успехам науки.

Большое значение приобретает сейчас применение автоматики при наблюдениях и измерениях излучений небесных объектов. Такие системы уже подготовлены, внедряются и в ближайшее время будут широко использованы в астрономических работах.

Решение упомянутых и еще многих других вопросов позволит мировой и отечественной астрономии значительно расширить познания о Вселенной.

В будущем, с дальнейшим развитием оптики вообще и астрооптики в частности, безусловно, найдут широкое применение новейшие оптические волноводы или, иначе, световоды. Их теоретическая и практическая разработка привела к организации совершенно нового раздела оптики как науки — волоконной оптики.

ЛИТЕРАТУРА

Альтшуллер С. Вооруженный глаз. М., изд-во «Московский рабочий», 1952.

Аргунов П. П. Катадиоптрический телескоп с предфокальным зеркально-линзовым корректором.— «Оптико-механическая промышленность», 1965, № 6.

Белопольский А. А. Астрономические труды. М., Гостехиздат, 1954. Научно-биографический очерк и комментарии О. А. Мельникова.

Берри А. Краткая история астрономии. М. ОГИЗ, 1946.

Богатов Г. Б. Телевидение на земле и в Космосе. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Вейнберг В. Б., Багатырева В. В. и Иванова Л. И. Передача изображения по многочисленным световодам (волокнистая или волоконная оптика).— «Оптико-механическая промышленность», 1960, № 7.

Виткевич В. В., Чихачев Б. М. Некоторые радиоастрономические станции за рубежом.— «Астрономический журнал», 1956, т. 33.

Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки истории астрономии в России. М., Гостехиздат, 1956.

D. Gabor. Information and Optics.— «Progress in Optics», 1960, vol. I, Chapter IV. Amsterdam, Holland, North Holland Pub. Co.

Гурзадян Г. А. Радиофизика. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1956.

Дмитров Г. и Бекер Д. Телескопы. М.—Л., ОГИЗ, 1947.

Иоаннисиани Б. К. Зеркальный телескоп с зеркалом 2,6 метра имени акад. Г. А. Шайна.— «Оптико-механическая промышленность», 1958, № 4.

Иоаннисиани Б. К. Отечественные астрономические инструменты. М., изд-во «Знание», 1958.

King H. C. The History of the Telescope. Charles Griffin a. Co. LTD. Cambridge, London, 1958.

Кларк А. История астрономии в XIX столетии. Изд. «Матезис», Одесса, 1913.

Куликовский П. Г. М. В. Ломоносов — астроном и астрофизик. М.— Л., Гостехиздат, 1950.

Купревич Н. Ф. Телевизионная техника в астрономии. М.— Л., Госэнергоиздат, 1958.

Максутов Д. Д. Астрономическая оптика. М.— Л., ОГИЗ, 1946.

Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Под ред. Г. Г. Слюсарева. М., изд-во «Мир», 1964.

Мельников О. А. К истории развития астроспектроскопии в России и в СССР.— В сб. «Историко-астрономические исследования». Т. III. М., Гостехиздат, 1957.
Мельников О. А. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т. 1. М.— Л., Гостехиздат, 1951.
Михельсон Н. Н. Современные телескопы.— «Природа», 1957, № 3.
Муратов С. В. Телескоп. Его устройство и действие. Л., 1925.
Мюллер Р. Л. Материал близкого будущего.— «Природа», 1964, № 8.
Навашин М. С. Телескоп астронома-любителя. М., Физматгиз, 1962.
Настоящее и будущее телескопов умеренного размера. Сб. статей. М., ИЛ, 1960.
Невская Н. И. Федор Александрович Бредихин. М.— Л., изд-во «Наука», 1964.
Паннекук А. История астрономии. М., изд-во «Наука», 1966.
Первые панорамы лунной поверхности. М., изд-во «Наука», 1966.
Первые фотографии обратной стороны Луны. М., Изд-во АН СССР, 1959.
Перель Ю. Г. Выдающиеся русские астрономы. М.— Л., Гостехиздат, 1951.
Пономарев Н. Г. Новый метод изготовления стеклянных дисков для астрономических зеркал.— «Бюллетень Астрономического института АН СССР», 1934, № 36.
Радунская И. Л. Радиоспектроскопия. М., Госэнергоиздат, 1958.
Раскин И. М. Выдающийся русский техник-новатор И. П. Кулибин. М., «Знание», 1951.
Селешников С. И. Советские астрономические инструменты.— «Природа», 1959, № 9.
Соломонович А. Е. Новый мощный радиотелескоп.— «Вестник АН СССР», 1958, № 5.
Соломонович А. Е. Что такое радиоастрономия. М., Госкультполитпросветиздат, 1958.
Стейнберг Ж., Леку Ж. Радиоастрономия. М., ИЛ, 1963.
Телескопы. Сб. статей. Под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхёрста. М., ИЛ, 1963.
Тихов Г. А. Шестьдесят лет у телескопа. М., Гос. изд-во детской лит-ры, 1959.
Хайкин С. Э. Радиоастрономия.— «Радиотехника», 1955, № 10.
Henize K. G. The Baker-Nunn Satelite-tracking Camera.— «Sky and Telescope», 1956, vol. 16.
Чечик П. О. Радиотехника и электроника в астрономии. М., Госэнергоиздат, 1950.
Чикин А. А. Отражательные телескопы. Пг., изд. Русского общества любителей мироведения, 1915.
Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.— Л., изд-во «Машиностроение», 1966.
Шишаков В. А. Простейший самодельный телескоп и наблюдения с ним. Изд. Московского планетария, 1940.
Шкловский И. С. Радиоастрономия. М., Гостехиздат, 1953.
Щеглов П. В. Электронная телескопия. М., Физматгиз, 1963.

Оглавление

Предисловие 3

Введение. Чем занимается астрономия 5

Глава первая. **Телескоп и успехи астрономии (исторический очерк)** 15

1. Однолинзовые телескопы XVII—XVIII вв. 15
2. Зеркальные телескопы XVII—XVIII вв. и их значение для развития астрономии 26
3. Наблюдения с рефракторами в XVIII—XX вв. с двумя и более линзами 38
4. Наблюдения с рефлекторами в XIX—XX вв. 61
5. Открытия с зеркально-линзовыми телескопами в XX в. 92
6. Достижения астрономии с помощью радиотелескопов . . 102
7. Наблюдения с телевизионными и электронными телескопами 110

Глава вторая. **Астрономические приборы в России и СССР и результаты их работы** 116

1. Отечественные конструкторы телескопов 116
2. Специфика работы телескопов и результаты наблюдений . . 132

Рефракторы 132
Астрографы 135
Отражательные телескопы 136
Зеркально-линзовые системы 139
Установки для изучения Солнца 142
Астрофизическая измерительная аппаратура 150

Глава третья. **Оптические системы телескопов** 152

1. Распространение световой энергии и ее приемники . . . 152
2. Развитие геометрической оптики 157
3. Законы геометрической оптики 159

Законы параксиальной оптики 159
Зрачки оптических систем 164
Аберрации центрированных оптических систем 165

4. Диффракционное изображение точки 178
5. Оценка качества изображения тонких структур 182
6. Световые потери и борьба с ними 186
7. Развитие астрономической оптики 191

Рефракторы 191
Астрофотографические объективы 193
Перспективы линзовой оптики 200
Окуляры 202
Зеркальные системы 204
Зеркально-линзовые системы 215

Набор приставок к параболоидальному зеркалу 227
Спектральные системы для астрономических целей 229
Перспективы развития астрономической оптики 231

Глава четвертая. **Радиотелескопы, электронные и телевизионные телескопы** 233

1. Общие сведения 233
2. Антенна радиотелескопа 238
3. Интерференционный метод приема радиоизлучения . . . 252
4. Соединительные линии и волноводы 259
5. Эквивалентная температура антенны 261
6. Эквивалентная температура приемника и его чувствительность 263
7. Схемы усилителей радиоприемника 265
8. Конструкции радиотелескопов 272
9. Электронный телескоп 282
10. Телевизионный телескоп 294

Заключение 315

Литература 3

Олег Александрович Мельников,
Георгий Георгиевич Слюсарев,
Александр Владимирович Марков,
Николай Федорович Купревич

Современный телескоп

Утверждено к печати
редколлегией научно-популярной литературы
Академии наук СССР

Редактор *В. И. Алексеев*
Художник *А. А. Кущенко*
Технический редактор *Т. В. Алексеева*

Сдано в набор 20/IV 1967 г. Подписано к печати 14/XI 1967 г.
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага № 1. Усл. печ. л. 16,8. Уч.-изд. л. 15,6.
Тираж 15000 экз. Т-14789. Тип. зак. 2759 Цена 1 р. 26 к.

Издательство «Наука». Москва, К-62, Подсосенский пер., д. 21
2-я типография издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Строка	Напечатано	Должно быть
19 сн.	$A = 1 : 9{,}5$	$A = 1 : 10{,}5$
12 сн.	$D = 21{,}5$ *см*,	$F = 215$ *см*,
11 сн.	$F = 40$ *см*.	$F = 400$ *см*.
10 сн.	Ввойных звезд,	двойных звезд,
21 св.	$1^m{,}08$ *кпс*	$1^m{,}08$ *кпс*
1 св.	Ф. Бааде	Ф. Балдэ
13 сн.	туманность NGC 2262	туманность NGC 2261
16 св.	Г. Ааро	Г. Аро
9 св.	и Куде.	и Кудером.
4 сн.	β	γ
7 св.	$+ 2B\,\omega\Omega\omega + (C + D)\,\Omega\omega^2$	$+2B\,\omega\Omega\,w + (C + D)\,\Sigma w^2$

1р. 26 к.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»