

Министерство просвещения РСФСР  
ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. П. И. ЛЕБЕДЕВА-ПОЛЯНСКОГО

Е. П. РАЗВИТНАЯ

ЛЕКЦИИ  
ПО АСТРОНОМИИ

(ПОСОБИЕ  
*ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПЕДИСТИТУТА,*)

ВЛАДИМИР  
1968

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемые вниманию читателя «Лекции по астрономии» представляют собой большую часть курса общей астрономии, который автор читал на протяжении ряда лет студентам-физикам физико-математических факультетов сначала в Тобольском, а затем во Владивостокском пединститутах. Они рассчитаны на 50 часов и предназначаются в качестве учебного пособия для студентов физических отделений пединститутов, для которых курс астрономиидается в объеме 110 часов (лекций — 70 часов, лабораторных занятий — 40 часов).

В «Лекциях» изложен не весь материал, определяемый действующей на физико-математических факультетах пединститутов программой по астрономии; в них не вошли следующие вопросы и разделы астрономии: «Небесная сфера и системы небесных координат», «Измерение времени», «Вопросы практической астрономии», «Вопросы небесной механики».

«Лекции по астрономии» для студентов-физиков пединститутов преследовали следующие основные цели: дать возможно больше сведений о развитии представлений о строении мира (не выходя за рамки программы) и уделить значительное место изложению методов и результатов астрофизики. (При этом при рассмотрении некоторых вопросов пришлось просто ссыльаться на отдельные физические явления, не давая им достаточного объяснения).

Некоторый отход от принятого порядка изложения вопросов по курсу общей астрономии диктуется особенно-

ностями распределения учебного времени, отводимого на астрономию действующими на физических отделениях физико-математических факультетов педагогических институтов учебными планами.

При изложении материала в «Лекциях» автор стремился к тому, чтобы при чтении книги, независимо от ее назначения, у читателя создалось целостное представление об окружающем нас мире. Некоторые термины (небесная параллель, северное полушарие и др.) применяются без объяснения, так как должны быть знакомы читателю из средней школы, кроме того, незнание их не мешает пониманию излагаемого материала.

В предлагаемых «Лекциях по астрономии» широко использованы (иногда без специальных ссылок) следующие книги и пособия: В. А. Амбарцумян, Э. Р. Мустафев, А. Б. Северный, В. В. Соболев, Теоретическая астрофизика, Гостехиздат, М., 1952; Д. Я. Мартынов, Курс практической астрофизики, Физматгиз, М., 1960; Курс общей астрофизики, «Наука», М., 1966; В. И. Мороз, Физика планет, «Наука», М., 1967; Строение звездных систем, «Иностранный литература», М., 1962; С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер, Межзвездная среда, Физматгиз, М., 1963 и др.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить заведующего кафедрой теоретической физики Владимирского педагогического института им. П. И. Лебедева-Полянского профессора Д. И. Пенnera, прочитавшего «Лекции» в рукописи и сделавшего много ценных замечаний, а также кандидата физико-математических наук А. В. Артемьева и доцентов М. Г. Григорьева и Б. Ф. Градусова, профессоров, занимавших большую работу по рецензированию книги. За все критические замечания и предложения, которые пришлют читатели, автор будет весьма признателен.

И действительно, в первые моменты может показаться, что звезд на небе бесчисленное множество («не сосчитать») и что невозможно разобраться в том, что видишь. Но это лишь в первый момент. Присмотревшись, человек начинает разбираться в звездном узоре. Он уже выделяет самые яркие звезды, отмечает, что цвет у звезд различный: одна желтая, другая красноватая, третья кажется ослепительно белой; видит светлую полосу, протянувшуюся почти через все небо — Млечный Путь. Очень скоро наблюдатель замечает характерные фигуры, образуемые звездами различных со- звездий.

Вглядываясь в небо, можно увидеть «падающую звезду» — метеор (раньше так и думали, что звезды могут «падать»), скопления звезд, туманности.

Кроме звезд на небе в разное время наблюдаются пять ярких светил, которые светят в отличие от обычных звезд ровным спокойным светом (не мерцают); некоторые из них своим блеском заметно превосходят самые яркие звезды — это планеты. По небу движутся Солнце и Луна. Каждый замечал изменчивость лунного вида, ее «исчезновения» с небесного свода на несколько дней, новые появления в небе («народилась» новая Луна).

## ГЛАВА I

### ВВЕДЕНИЕ

#### § 1. Что изучается в астрономии

Каждый вечер, если небо не закрыто облаками, на着他у взору открывается величественная картина звездного неба. Вот как сказал об этом М. В. Ломоносов:

Открылась бездна, звезд полна,  
Звездам числа нет, бездне дна.

И действительно, в первые моменты может показаться, что звезд на небе бесчисленное множество («не сосчитать») и что невозможно разобраться в том, что видишь. Но это лишь в первый момент. Присмотревшись, человек начинает разбираться в звездном узоре. Он уже выделяет самые яркие звезды, отмечает, что цвет у звезд различный: одна желтая, другая красноватая, третья кажется ослепительно белой; видит светлую полосу, протянувшуюся почти через все небо — Млечный Путь. Очень скоро наблюдатель замечает характерные фигуры, образуемые звездами различных со- звездий.

Вглядываясь в небо, можно увидеть «падающую звезду» — метеор (раньше так и думали, что звезды могут «падать»), скопления звезд, туманности.

Кроме звезд на небе в разное время наблюдаются пять ярких светил, которые светят в отличие от обычных звезд ровным спокойным светом (не мерцают); некоторые из них своим блеском заметно превосходят самые яркие звезды — это планеты. По небу движутся Солнце и Луна. Каждый замечал изменчивость лунного вида, ее «исчезновения» с небесного свода на несколько дней, новые появления в небе («народилась» новая Луна).

Многие из нас были свидетелями интересных явлений — солнечного и лунного затмений. Особенно впечатляет картина полного солнечного затмения.

Иногда на небе появляются совсем необычные светила: в виде туманного расплывчатого пятна, от которого тянется на большое расстояние светлый хвост — это кометы.

Расположение звезд относительно друг друга практически не меняется на протяжении многих сотен лет, звезды как бы остаются неподвижными, а планеты и Луна, а также кометы движутся от звезды к звезде, перемещаясь по созвездиям.

Звездное небо как одно целое медленно вращается вокруг Земли.

Все это видел человек на небе уже в глубокой древности. Видел и пытался выяснить, что представляют собой небесные тела, как в действительности устроен мир. Возникла наука о небесных телах — астрономия.

С изобретением телескопа, с применением фотографии, с использованием многочисленных приборов и инструментов, с применением новых методов исследования чистый мир, и сейчас астрономы «видят» значительно дальше и дальше, чем это можно сделать невооруженным глазом. В настоящее время мы многое знаем об устройстве той части Вселенной, в которой находимся; ученые научились измерять небесные тела, взвешивать их, определять физические условия на них, измерять и вычислять расстояния до них; люди научились делать небесные тела (искусственные спутники Земли, искусственные планеты).

Многочисленные сведения об окружающем нас мире, выявленные в результате огромной работы многих исследователей, трудившихся на протяжении тысячелетий, которые постоянно пополняются, расширяются, уточняются, позволяют нарисовать в общих чертах картину строения Вселенной.

Всем нам известно, что мы живем на Земле. Земля — планета, небесное тело шарообразной формы, поперечник которой составляет около 13 тысяч километров. Земля вращается вокруг некоторой оси и движется вокруг Солнца, делая один оборот за год. Расстояние от Земли до Солнца составляет 150 миллионов километров.

Солнце — звезда, горячее самосветящееся тело, поперечник которого в 109 раз больше поперечника Земли. Вокруг Солнца, подобно Земле, на различных расстояниях движется еще восемь планет. Они образуют солнечную систему. Кроме планет, в солнечную систему входят малые планеты, кометы, метеорные тела, спутники планет.

Солнце — типичная звезда, каких очень много во Вселенной. Расстояния между звездами во много раз больше размеров солнечной системы. Так, самая близкая к нам после Солнца звезда находится от нас в 270 000 раз дальше, чем Солнце. Это Проксима из созвездия Центавра. Свет от нее идет до нас 4,3 года (расстояние от Солнца до Земли свет проходит за 8 минут). Звезды, часть которых мы видим на небе, образуют в пространстве скопление — Галактику, или систему Млечного Пути. В Галактику входит примерно 100 млрд. звезд. Основная масса этих звезд концентрируется в гигантский диск, поперечник которого составляет около 100 тысяч световых лет.

За пределами нашей Галактики находятся другие галактики. Одну из них можно видеть невооруженным глазом в созвездии Андromеды в виде туманного пятна, она известна под названием Туманность Андromеды. В настоящее время человек с помощью мощнейших телескопов и радиотелескопов проникает в глубины Вселенной на расстояния до 10 млрд. световых лет. Область Вселенной, доступную астрономическим наблюдениям, принято называть Метагалактикой.

Обо всем, что мы видим на небе и что мы знаем об окружающем нас мире небесных тел, мы узнаем из астрономии.

## § 2. Предмет и основные задачи астрономии

Астрономия — это наука о небесных телах. Современная астрономия изучает строение, движение, взаимную связь, образование и развитие небесных тел и их систем. В результате мы получаем представление о строении и развитии доступной нашим наблюдениям части Вселенной. Поэтому можно сказать, что астрономия — это наука о строении и развитии Вселенной.

Слово «астрономия» произошло от греческих слов «*астрон*» — светило и «*номос*» — закон. Первоначальным назначением этой науки было изучение законов движения небесных светил. Последнее диктовалось практическими нуждами человека. Так, в Египте, где нет явно выраженной смены времен года, нужно было по каким-то признакам узнавать время посева и готовиться к сowingанию разлившихся вод Нила для будущих поливов. Такие признаки были обнаружены на небе: разлив Нила наступил вскоре после появления на небе самой яркой из звезд Сириуса после периода его невидимости. У скотоводов, а позднее торговцев и мореходов возникла потребность в способах ориентировки в пустыне и в море. Развитие общества вызвало к жизни летоисчисление и календарь.

Эти и другие практические задачи решала астрономия. Именно поэтому все народы на самых ранних ступенях своей истории (3—4 тысячелетия назад) достигли определенных успехов в развитии астрономических знаний. Таким образом, астрономия является одной из древнейших наук на Земле. Рассматривая вопрос о последовательности происхождения наук Ф. Энгельс писал: «Сперва астрономия, которая уже из-за времени года абсолютно необходима для пастушеских и земледельческих народов. Астрономия может развиваться только при помощи математики. Следовательно, приходилось заниматься и последней. Далее на известной ступени развития земледелия и в известных странах (поднимание воды для орошения в Египте), а в особенности вместе с возникновением городов, крупных построек и развитием ремесла, развилась и механика... Итак, уже с самого начала возникновение и развитие наук обусловлено производством!»<sup>1</sup>

Основные задачи современной астрономии можно сформулировать следующим образом:

1. Изучение движения и распределения небесных тел и их систем.

2. Изучение физических свойств небесных объектов и материи, находящейся в пространстве между ними.

3. Изучение вопросов образования и эволюции как отдельных небесных тел, так и образуемых ими систем.

### § 3. Разделы астрономии. Связь ее с другими науками

В настоящее время астрономия делится на ряд тесно связанных друг с другом разделов, каждый из которых в качестве главной задачи решает одну из названных выше.

С первой задачей связаны следующие разделы. *Астрометрия* рассматривает методы астрономических измерений, на основе которых определяются точные положения светил, географические координаты, производится измерение времени, осуществляется ориентация на Земле. Астрометрия делится на *сферическую* и *практическую* астрономию и *функциональную* астрометрию. *Теоретическая астрономия* излагает методы определения орбит небесных тел и составления их эфемерид (видимых положений).

*Небесная механика* изучает действительные движения небесных тел на основе закона всемирного тяготения.

В теоретической астрономии и небесной механике основным объектом исследований являются тела солнечной системы.

*Звездная астрономия* занимается изучением закономерностей в распределении и движении звезд и звездных систем. Вторая задача решается в *астрофизике и звездной астрономии*.

Астрофизика занимается изучением физических условий и свойств небесных объектов. Она разделяется на *практическую* астрофизику, которая разрабатывает методы астрофизических исследований, и *теоретическую* астрофизику, которая объясняет результаты наблюдений на основе достижений теоретической физики. В зависимости от специфики применяемых методов в астрофизике выделились в самостоятельные разделы *радиоастрономия*, *рентгеновская* и *гамма-астрономия* и др. Вопросы образования и эволюции небесных тел и их систем рассматривает *космология*. Общие закономерности строения и эволюции Вселенной изучает *космология*.

Все разделы астрономии тесно связаны друг с другом, поэтому любое разделение астрономии на разделы достаточно условно. Кроме того, астрономия связана со многими другими науками.

<sup>1</sup> Ф. Энгельс, Диалектика природы, Изд.-во полит. лит., М., 1964, стр. 157.

Прежде всего следует отметить тесную связь астрономии с философией. До выделения философии в самостоятельную науку, что окончательно произошло в эпоху Возрождения, философия тесно переплеталась с естествознанием. Крупнейшие древнегреческие мыслители одновременно были философами, астрономами, физиками, математиками. Астрономические исследования тесно связывались с философскими воззрениями у многих видных мыслителей средних веков и более позднего времени (Джордано Бруно, Франсис Бэкон, Рене Декарт, Бенедикт Спиноза, Иммануил Кант и др.).

Связь астрономии с философией никогда не прекращалась. Борьба между материализмом и идеализмом, между действительным знанием и половицей велась на протяжении всей истории науки о небе и сейчас ведется с особой остротой во многих разделах астрономии, в частности, в космогонии и космологии. Только астрономия, стоящая на позициях диалектического материализма, может дать правильное научное толкование явлений и процессам, имеющим место во Вселенной.

Уже на заре своего возникновения астрономия была связана с математикой. Эта связь астрономии и математики очень тесна и в настоящее время, но особенно теперь она была примерно до середины XIX в., когда каждый крупный математик находил в астрономии материала для дальнейшего ее развития. Таковы, например, Алексис Клеро, Жан Л. Даламбер, Фридрих В. Бессель, Карл Ф. Гаусс и др., сделавшие значительные исследования в астрономии. Можно сказать, что астрономия была математической наукой.

В настоящее время достижения астрономии используются во многих науках, в частности, в науках, связанных с изучением Земли (геология, география, геодезия, картография и др.). Но особенно сильна связь астрономии с физикой. Методы физики находят самое широкое применение в астрономии. Начиная с середины XIX в., когда был открыт спектральный анализ, астрономия все более и более становится наукой физической. Связь астрономии и физики исключительно плодотворна. Астрономы дают физикам огромный наблюдательный материал и получают от физиков теории. В космосе физики находят такие лаборатории, каких нет на Земле. Отдельные положения современной физики проверяются и

подтверждаются исключительно на астрономическом материале.

До недавнего времени астрономия была по существу наукой чисто наблюдательной. Астрономы были лишены возможности поставить опыт (если не считать изучения метеоритов). В последние годы, с момента создания первого искусственного небесного тела и осуществления радиолокации Луны и планет, астрономия начала превращаться в науку *экспериментальную*.

#### § 4. Значение астрономии

Астрономия как наука возникла для удовлетворения практических нужд человека. Решение целого ряда практических задач осуществляется астрономия и в наше время. К числу таких задач относится обеспечение общества точным временем. Специальные лаборатории — *службы времени* организуются в большинстве случаев при астрономических обсерваториях. Вычисление и составление календаря, определение географических координат различных пунктов на Земле, без чего невозможна составление географических и топографических карт, основано на астрономических знаниях. На практике широко используются астрономические способы ориентировки. Развитие астрономии способствует прогрессу в физике, химии, технике. Достаточно указать на достижение в области ракетной техники, завершившееся созданием искусственных небесных тел и космических кораблей, которое в свою очередь вызвало мощное развитие радиоэлектроники.

Это практическое значение астрономии.

Исключительное значение имеет астрономия для формирования *научного мировоззрения*.

Наблюдение звездного неба, движений Солнца, Луны, планет, появляющихся время от времени комет и других небесных объектов и явлений без научных знаний может привести (и в действительности приводило) к неправильным толкованиям об устройстве окружающего мира и к религиозным верованиям, тесно связанным со всевозможными суевериями. Астрономия, изучая физическую природу небесных тел, выявляя действительные законы строения и движения их и их систем, утверждает единство мира, доказывая, что мир материа-

Лен, что Вселенная бесконечна в пространстве и времени, что все процессы во Вселенной протекают как результат естественного развития без вмешательства каких бы то ни было сверхъестественных сил.

В течение многих веков в астрономии велась ожесточенная борьба между материализмом и идеализмом, и в этой борьбе победа всегда была на стороне материализма.

Таким образом, на огромном фактическом материале об окружающем нас мире астрономия утверждает диалектико-материалистическое мировоззрение.

### § 5. Звездное небо

На окружающий нас мир мы смотрим с Земли и всегда нам кажется, что над нами простирается сферический купол, усеянный звездами. Именно поэтому и возникло в далекие времена представление о хрустальном небесном своде. В действительности никакого свода нет, а впечатление о небе в форме сферы объясняется особенностю нашего глаза не улавливать разницы в расстояниях, если эти расстояния превосходят половину километра. Наблюдаемые нами звезды находятся на самых различных расстояниях, значительно превышающих 0,5 км, поэтому нам кажется, что все звезды и другие небесные объекты расположены на одинаковых от нас расстояниях, т. е. как бы на поверхности некоторой сферы, в центре которой всегда находится наблюдатель.

Так (рис. 1), независимо от того, на каком расстоянии от нас расположены две звезды А и В, нам будет казаться, что расстояния до них одинаковы,  $Oa = Ob$ . Несмотря на то, что в действительности никакой сферы нет, в астрономии сохранилось понятие небесной сферы, как некоторой воображаемой сферы произвольного сколь угодно большого радиуса, в центре которой всегда находится (или мыслится) наблюдатель. На небесную сферу как бы проектируется все, что видят человек в окружающем пространстве: звезды, Солнце, Луна, планеты, искусственные небесные тела и др. На небесной сфере фиксируются воображаемые точки и линии, что позволяет отмечать на сфере видимое положение любого небесного объекта.

Следует заметить, что на небесной сфере можно иметь дело лишь с угловыми расстояниями между объектами, т. е. со значениями углов, которые образуют направления из глаза наблюдателя на данные объекты. Так можно указать, что расстояние между звездами А и В (рис. 1) составляет  $60^\circ$ , и ничего не знать о действительном расстоянии АВ между ними.

Звезды сохраняют в течение долгого времени относительное расположение на небе. За эту кажущуюся особенность не менять свою положения относительно друга в течение многих сотен, а для подавляющего числа звезд и в течение тысяч лет в древности звезды были названы *неподвижными*.

В действительности все звезды движутся, обладают *собственными движениями*, но так как звезды находятся от нас на очень больших расстояниях, измеряемых многими световыми годами, то их годичные смещения на звездном небе составляют лишь доли угловой секунды. Самое большое собственное движение в  $10''/27$  имеет одна из звезд в созвездии Змееносца.

Так как звезды сохраняют относительное расположение, то уже в древности люди использовали их в качестве ориентиров, в связи с чем выделили на небе характерные сочетания звезд и называли их созвездиями. Сейчас под созвездием понимается определенная область неба с видимыми здесь звездами. Границы созвездий строго определены, они проходят по небесным параллелям и кругам склонения. На всем небе отмечено 88 созвездий, которые полностью занимают звездное небо. Среди названий созвездий имеются названия животных (Большая Медведица, Лев, Рыбы), имена героев греческих мифов (Персей, Андromеда, Кассиопея), названия предметов, которые напоминают фигуры, образованные яркими звездами созвездия (Северная Корона, Треугольник).

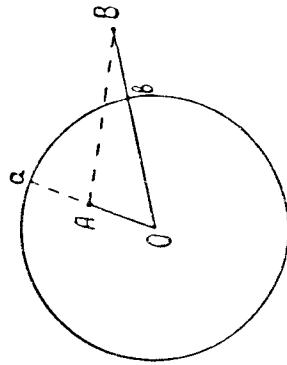


Рис. 1. К измерению на небесной сфере.

Общее число звезд, видимых человеком невооруженным глазом (без бинокля или телескопа), на всем небе составляет около 6000, а на одной половине его мы видим лишь около 3000 звезд.

Не все звезды имеют одинаковую яркость, одни казутся очень яркими, другие слабыми. Говорят, что звезды имеют разный блеск Е, который характеризуется видимой звездной величиной  $m$ . Под блеском звезды понимается освещенность, создаваемая светом звезды (§ 30). В древности, когда человек пользовался только невооруженным глазом, все звезды по блеску были разделены на 6 групп: самые яркие звезды были отнесены к звездам первой звездной величины (обозначается  $1^m$ ); менее яркие — к звездам второй звездной величины; к звездам шестой звездной величины были отнесены самые слабые звезды (см. § 30). При этом блеск звезд первой звездной величины ( $E_1$ ) считали в 2,5 раза (сейчас в 2,512 раза) больше блеска звезд второй звездной величины ( $E_2$ ); блеск звезд второй звездной величины в 2,5 раза больше блеска звезд третьей звездной величины ( $E_3$ ) и т. д., т. е.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_2}{E_3} = \dots = \frac{E_5}{E_6} = 2,512,$$

откуда легко получить соотношение между блеском двух звезд любых звездных величин. Например,

$$\frac{E_1}{E_3} = 2,512^2, \quad \frac{E_2}{E_6} = 2,512^4.$$

Если обозначить звездную величину некоторой звезды А через  $m_A$ , а ее блеск через  $E_A$  и для другой звезды В соответственно  $m_B$  и  $E_B$ , то отношение блеска этих звезд будет равно

$$\frac{E_A}{E_B} = 2,512^{m_B - m_A}. \quad (1)$$

С помощью видимой звездной величины выражается блеск любого светила, причем небесные тела более яркие, чем звезды первой звездной величины, имеют пульсацию или отрицательную звездную величину. Блеск небесных объектов, не наблюдавшихся невооруженным глазом, выражается звездными величинами больше шести. Из всех светил наибольший блеск имеет Солнце, его

видимая звездная величина выражается числом —  $26^m,8$ , а Луна в полнолунье имеет блеск —  $12^m,7$ . После Луны наиболее яркими являются планеты. В таблице 1 приведены значения видимой звездной величины планет (в наибольшем блеске) и некоторых ярких звезд.

Таблица 1

Название светила	Видимая звездная величина $m$
Солнце	$-26^m,8$
Луна	$-12,7$
Венера	$-4,4$
Юпитер	$-2,5$
Марс	$-1,9$
Меркурий	$-1,2$
Сатурн	$+0,2$
Уран	$+5,7$
Сириус	$-1,4$
Вега	$+0,1$
Капелла	$+0,2$

С XVII века отдельные звезды созвездия стали обозначаться буквами греческого алфавита  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т. д., как правило, в порядке убывания блеска. Поэтому для большинства созвездий звезда альфа ( $\alpha$ ) является самой яркой среди звезд этого созвездия. Если нужно было обозначить еще какие-то звезды, но не хватало букв греческого алфавита, то для следующих звезд использовали буквы латинского алфавита, а затем порядковые номера.

Наиболее ярким или чем-либо примечательным звездам, кроме буквенного обозначения, даны собственные имена (обычно арабские, греческие и римские). Так, звезда альфа из созвездия Большого Пса называется Сириус, а Лиры — Вега, г Большой Медведицы — Алкор и т. д.

Даже невооруженным глазом можно заметить разный цвет звезд. Вега — белая звезда, Проклон ( $\alpha$  Малого Пса) — желтоватая, Альдебаран ( $\alpha$  Тельца) и Бетельгейзе ( $\alpha$  Ориона) — красные. Наше Солнце — желтая звезда.

В каждом созвездии число звезд, видимых невооруженным глазом ( $m \leq 6^m,0$ ) разное. В созвездии Большой

Медведицы их 125, в Лебеде — 150, а в Малой Медведице только 20.

## § 6. Суточное движение звездного неба

Если заметить положение каких-либо звезд по отношению к земным предметам, а потом посмотреть на них через час-два, то легко обнаружить смещение их к западу. Получается, что весь небесный свод вращается, как одно целое, вокруг некоторой воображаемой оси, проходящей через глаз наблюдателя. Так как одно обрашение звездного неба совершает за сутки, то это движение неба и светил называется *суточным вращением*. Вообразимася ось вращения звездного неба называется *осью мира*, с небесной сферой она пересекается в двух точках, *полюсах мира*. Один из них, северный полюс мира, в любом пункте северного полушария Земли всегда находится над горизонтом; противоположный, южный, полюс мира для северных широт располагается под горизонтом. Северный полюс мира легко отыскать на небе, около него находится звезда Полярная, *α* Малой Медведицы. Любое светило в порядке суточного движения описывает на небесной сфере вокруг северного полюса мира окружность — небесную параллель. Угловой радиус параллели Полярной составляет всего 58°, поэтому при наблюдении невооруженным глазом она кажется исподвижной и указывает приблизительное положение северного полюса мира и одновременно направление на север.

Суточные круги звезд различны. Чем ближе звезда к полюсу, тем меньше угловый радиус ее параллели. Суточные круги северных околополярных звезд в северном полушарии Земли всегда находятся над горизонтом, такие звезды у нас никогда не заходят. К числу находящихся звезд относятся звезды созвездия Большой Медведицы. Дальше расположены звезды, которые восьмехалят и заходят. Эти звезды часть суток проводят над горизонтом и часть суток под горизонтом. Звезды, стоящие от полюса мира на 90° и движущиеся по самой длинной параллели, *небесному экватору*, бывают над горизонтом равно полсуток. Чем дальше от северного полюса мира отстоит звезда, тем короче ее суточный путь над горизонтом, тем меньшую часть суток она бы-

вает над горизонтом. Около южного полюса мира расположены звезды, которые в северном полушарии Земли никогда не видны.

Жители южного полушария Земли наблюдают звезды, расположенные близ южного полюса мира, и никогда не видят северные околополярные светила.

Суточное вращение светил — явление кажущееся, оно является следствием вращения Земли вокруг своей оси. Земля вращается с запада на восток, а нам кажется, что вращается звездное небо в противоположном направлении, т. е. с востока на запад. Ось мира поэтому параллельна оси вращения земного шара.

Вместо слов «с запада на восток» или «с востока на запад» в астрономии принято указывать направление вращения словами: «против часовой стрелки» или «по часовой стрелке». О направлении вращения Земли надо сказать: «Земля вращается в направлении против часовой стрелки, если смотреть на нее со стороны северного полюса». Говоря о направлении суточного вращения звездного неба, надо обязательно указать, по отношению к чему рассматриваем это движение. Звезды в порядке суточного вращения движутся в направлении по часовой стрелке, если их движение рассматривать с северного полюса мира. Со стороны южного полюса мира вращение звездного неба происходит в направлении против часовой стрелки.

## § 7. Некоторые созвездия

Изучение звездного неба удобно начинать с созвездия Большой Медведицы. Это созвездие в наших широтах никогда не заходит, а семь ярких звезд его, образующих ковш, обычно знает все. Ковш Большой Медведицы занимает лишь небольшую часть всей площиади этого созвездия (рис. 2).

Границы созвездий следует рассматривать с помощью карт из звездных атласов, поэтому здесь мы не будем говорить об областях, занятой тем или иным созвездием, а только о наиболее характерном расположении ярких звезд рассматриваемого созвездия.

Звезды ковша Большой Медведицы обозначены греческими буквами последовательно (рис. 2)  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,

$\zeta$ ,  $\eta$  (альфа, бета, гамма, дельта, эпсилон, дзета, эта), а не в порядке убывания их блеска. Все эти звезды примерно второй звездной величины ( $m_\alpha = 1^m\!:\!80$ ,  $m_\beta = 2^m\!:\!36$ ,  $m_\gamma = 2^m\!:\!44$ ,  $m_\delta = 1^m\!:\!78$ ,  $m_\epsilon = 2^m\!:\!04$ ,  $m_\zeta = 1^m\!:\!87$ ), за исключением самой слабой звезды  $\delta$ , которая является звездой третьей звездной величины ( $m_\delta = 3^m\!:\!31$ ). Звезда  $\zeta$  имеет собственное имя Мидгар, рядом с нею видна слабенькая звездочка Алькор, которую видят лишь люди с

чрез звезды Мицар и Полярную и продолжить ее на такое же угловое расстояние дальше от Полярной (рис. 4). Кассиопея расположена в Млечном Пути, и ее пять основных звезд (2—3 величины) красиво сверкают на фоне Млечного Пути.

Созвездие Кассиопеи так же, как и Большой Медведицы, является незаходящим в наших широтах. Когда

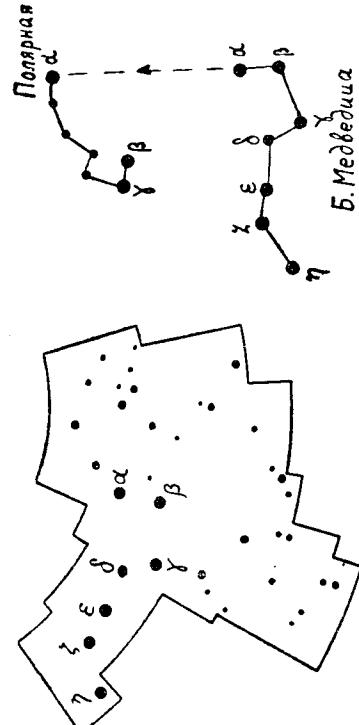


Рис. 2. Созвездие Большой Медведицы.

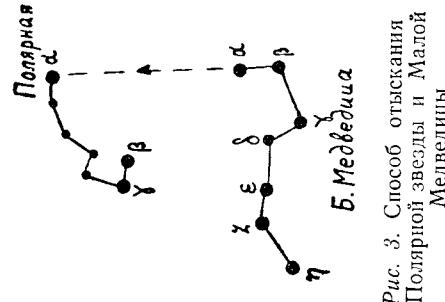


Рис. 3. Способ отыскания Полярной звезды и Малой Медведицы

хорошим зрением. По ней можно проверять остроту зрения.

По ковшу Большой Медведицы легко найти Полярную звезду и созвездие Малой Медведицы. Для этого надо провести линию от звезды  $\beta$  к  $\alpha$  (рис. 3) и отложить на ней угловое расстояние между  $\beta$  и  $\alpha$  примерно 5 раз. Звезда Полярная самая яркая в созвездии Малой Медведицы и расположена в конце ручки ковша, образованного наиболее яркими звездами этого созвездия. По размерам этот ковш меньше ковша Большой Медведицы, и ручка его всегда повернута в сторону, противоположную той, куда смотрит ручка ковша Большой Медведицы. В Малой Медведице звезды  $\alpha$  и  $\beta$  второй звездной величины,  $\gamma$  — третьей величины, остальные много слабее.

Чтобы отыскать созвездие Кассиопеи, напоминающее своими яркими звездами букву  $W$ , надо провести линию

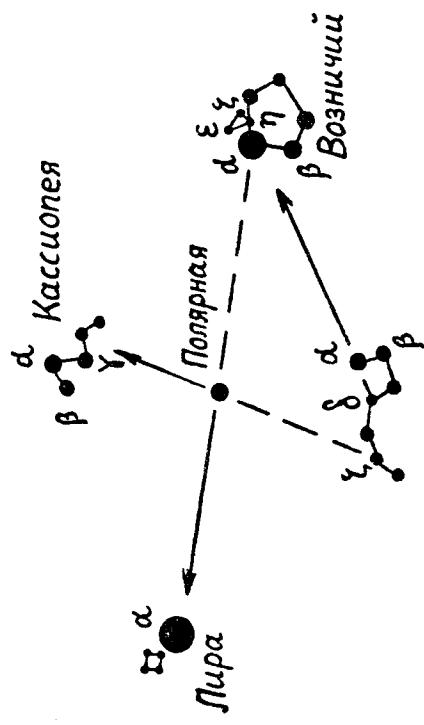


Рис. 4. Нахождение созвездий Кассиопеи, Возничего, Лира.

Большая Медведица кульминирует вблизи зенита, Кассиопея занимает самое низкое положение под полюсом мира в северной стороне неба, и наоборот.

Если провести линию через звезды  $\delta$  и  $\alpha$  Большой Медведицы, то встретим одну из самых ярких звезд неба, более яркую, чем звезда ковша Большой Медведицы, звезду Капеллу из созвездия Возничий (рис. 4). Это звезда нулевой звездной величины ( $m = 0^m\!:\!2$ ) желтоватого цвета. Капелла в переводе означает козу, около нее можно увидеть три звездочки, образующие небольшой равнобедренный треугольник (звезды  $\varepsilon$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ), которые называются «козлятами». Характерная фигура Возничего — поэти правильный пятиугольник. Возничий, как и Кассиопея, расположен в области светлой полосы Млечного Пути.

Продолжив отрезок линии Капелла — Полярная за Продолжив отрезок линии Капелла — Полярная за

встретим самую яркую ( $m=0^{m,1}$ ) звезду северного неба белую Вегу из маленького созвездия Лирь (рис. 4). Линия Капелла — Вега почти перпендикулярна линии Большой Медведицы — Кассиопея.

В наших широтах<sup>1</sup> Капелла и Вега никогда не заходят и поэтому вместе с созвездиями Большой Медведицы и Кассиопеи служат хорошими ориентирами, пользуясь которыми легко можно отыскать целый ряд других созвездий.

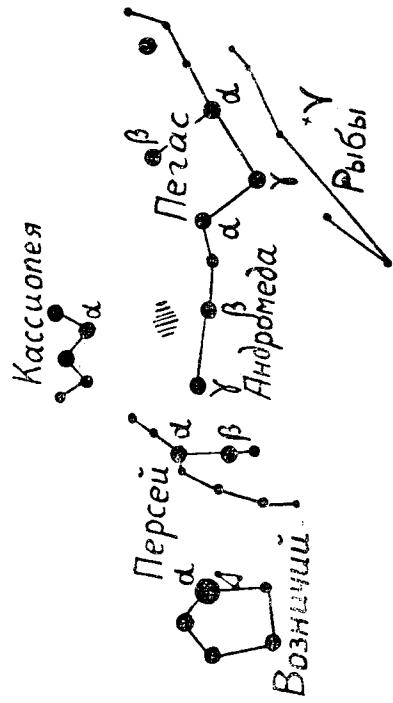


Рис. 5. Расположение созвездий Персея, Андромеды, Пегаса, Рыб и Кассиопеи.

Зуясь которыми легко можно отыскать целый ряд других созвездий.

Между Возничим и Кассиопеей в области Млечного Пути расположено созвездие Персея (рис. 5), очертания которого напоминают стул с отламывающейся спинкой, наклоненной к Кассиопеи.

Среди звезд Персея интересна звезда β — Алтоль. Это переменная звезда с периодом изменения блеска около трех суток, блеск ее изменяется в пределах от  $2^m,2$  до  $3^m,5$ .

Вправо от Персея тянется цепочка из трех звезд втрой величины из созвездия Андромеды, при этом звезды α Персея, γ, β и α Андромеды образуют почти прямую линию, находясь на равных расстояниях друг от друга. В созвездии Андромеды под прямым углом к линии γβα от звезды β в сторону к Кассиопеи на расстоянии, рав-

<sup>1</sup> Широта больше  $44^\circ$  для Капеллы и больше  $51^\circ$  для Веги.

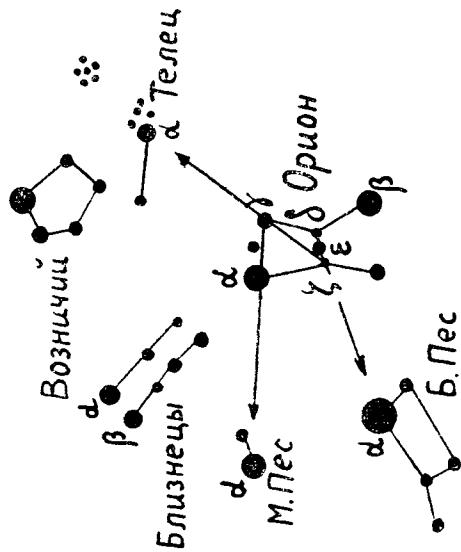


Рис. 6. Положение созвездий Тельца, Близнецов, Большого Пса, Малого Пса относительно Ориона.

только значительно больших размеров. Персей, Андromеда, Пегас хорошо наблюдаются в осенние месяцы, в это время вечером они находятся в восточной стороне неба.

С Андромедой и Пегасом граничит довольно обширное, но беднее достаточно яркими звездами созвездие Рыб. Оно для нас интересно тем, что в нем находится так называемая точка *весеннего равноденствия*, в которой Солнце бывает 21 марта, переходя из южного небесного полушария в северное. Точка весеннего равноденствия находится почти точно на продолжении левой стороны квадрата Пегаса αγ на таком же угловом расстоянии, как γУ.

Зимние вечера — самое удобное время для наблюдения созвездий Ориона, Близнецов, Большого Пса, Мало-

го Пса, Тельца (рис. 6). Орион одно из красивейших созвездий с двумя яркими звездами первой звездной величины:  $\alpha$  — красноватый Бетельгейзе,  $\beta$  — голубой Ригель. Три звезды второй величины  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\zeta$  образуют пояс Ориона, звезда  $\delta$  расположена почти на небесном экваторе.

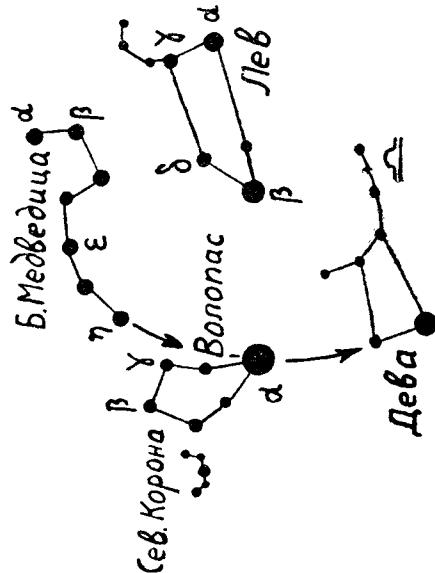


Рис. 7. Положение Волопаса, Девы, Льва относительно Большой Медведицы.

Если продолжить линию пояса Ориона вниз, то недалеко встретим самую яркую звезду неба Сиркус ( $m = -1^{m}4$ ) из созвездия Большого Пса.

Проведя линию через звезду  $\zeta$  и  $\gamma$  Ориона вправо вверх, попадем на яркую красную звезду Альдебаран из созвездия Тельца. В этом созвездии наблюдаются два скопления звезд Гиады (близ Альдебарана) и Плеяды (несколько вправо от Альдебарана). Созвездие Тельца граничит с Возничим.

Слева от Тельца (влево и вверх от Ориона) находится созвездие Близнецов, две цепочки звезд с яркими звездами Кастро ( $\alpha$ ) и Поллукс ( $\beta$ ). Близнецы расположены в Млечном Пути рядом с Возничим.

Под Близнецами расположено небольшое созвездие Малого Пса с яркой звездой Процион ( $m = 0^{m}5$ ), которую можно найти, проведя линию через звезды  $\gamma$  и  $\alpha$  Ориона влево.

Проведя линию через ручку ковша Большой Медведицы от  $\epsilon$  к  $\gamma$  и продолжая ее с той же кривизной, встретим яркую желтую звезду Арктур ( $m = 0^{m}2$ ) из созвездия Волопаса, напоминающего лист каптана (рис. 7), а еще дальше звезду Спика ( $m = 1^{m}2$ ) из созвездия Девы. В Деве находится так называемая точка осеннего равноденствия, в которой бывает Солнце примерно 23 сентября.

Под ковшом Большой Медведицы расположено созвездие Льва. Оно имеет форму трапеции (рис. 7). Звезда  $\alpha$  — Регул первой звездной величины,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  — второй величины.

Левее Волопаса нетрудно найти венчик из звезд — созвездие Северной Короны.

Лев и Дева — наиболее интересные созвездия в вечернее время весной.

Самой заметной звездой летнего неба является Вега (блз зенита), которая образует большой треугольник с

двумя другими звездами первой величины Денебом и Альтаиром (рис. 8). Звезда Денеб входит в созвездие Лебедя, которое в виде яркого креста своркает в Млечном Пути. Звезда Альтаир — самая яркая звезда из созвездия Орла. В светлые летние вечера в наших широтах только и заметен этот треугольник звезд.

Мы познакомились с 19 созвездиями наших широт. Для более подробного знакомства со звездным небом нужно использовать звездные карты и имеющиеся путеводители по небу, например, В. П. Цесевич, Что и как наблюдать в небе, Гос. изд-во техн.-теор. лит., М.—Л., 1950 г.

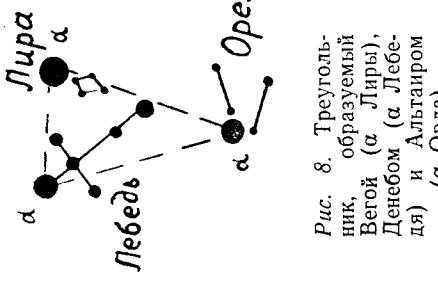


Рис. 8. Треугольник из звезд Денебом и Альтаиром (а Лебедя), Денебом (а Лебедя) и Альтаиром (а Орла).

### § 8. Сезонное изменение вида звездного неба

В результате суточного вращения вид звездного неба меняется. Если в некоторый момент определенное свети-

ло наблюдался в восточной стороне неба, то через шесть часов оно будет располагаться в южной стороне.

Кроме суточного изменения звездного неба ежегодно происходит изменение вида неба по сезонам.

Заметьте в некоторый момент, какие звезды и звезды кульминируют, т. е. находятся в южной стороне неба, и посмотрите, где они будут в это же время суток через месяц или два. Окажется, что они сместятся к западу, а кульминировать будут уже другие звезды и звезды. Например, созвездие Ориона в наших широтах кульминирует в полночь в середине декабря. К середине февраля, т. е. два месяца спустя, в полночь Орион будет близок к западу, а примерно в начале апреля он уже не будет виден вообще. В начале апреля в полночь будет кульминировать Дева, которая в середине декабря к этому часу суток еще оказывается под горизонтом. И так от места к месту все звезды постепенно смещаются к западу, для одних наступает период невидимости (над горизонтом эти звезды в порядке суточного движения проходят днем), для других, напротив, только начинается период видимости. Сказанное относится к звездам, которые являются заходящими. Что касается наших находящихся созвездий, то и в их положении в разное время года можно легко заметить различие: и для них меняются условия видимости. Так, созвездие Большой Медведицы в «нормальном» для ковша положении наблюдается в январе в 4 часа, в апреле в 22 часа, в июле в 16 часов (не доступно наблюдению), в октябре в 10 часов (тоже недоступно наблюдению).

Как объяснить сезонное изменение вида звездного неба?

Так же, как и суточное вращение, годичное движение неба — явление кажущееся. Оно является следствием движения Земли вокруг Солнца.

Земля, как известно, движется вокруг Солнца в некоторой плоскости практически по окружности. Изображение Земли и земную орбиту, отметив на последней положение Земли через месяц, в плоскости чертежа (рис. 9). Изобразим также линию пересечения этой плоскости со звездным небом (с небесной сферой). Так как радиус небесной сферы сколь угодно велик, то радиусом земной орбиты можно пренебречь и считать центр небесной сферы совпадающим с центром Солнца. По-

этому линия пересечения небесной сферы плоскостью земной орбиты представляет собой большой круг небесной сферы. Это линия кажущегося движения Солнца по небу. Солнце, как нам кажется, делает полный оборот по небу на фоне звезд, перемещаясь против суточного движения, т. е. в направлении против часовой стрелки, если смотреть на этот рисунок сверху (с северного полюса мира). Созвездия, которые последовательно проходят Солнце в течение года, называются зодиакальными. Их 12<sup>1</sup>, поэтому в каждом из них Солнце бывает примерно месяц. Названия зодиакальных созвездий:

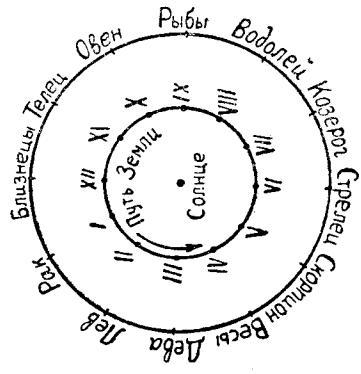


Рис. 9. Видимое движение Солнца по зодиаку.

Следует отметить, что в течение года

Дева,		Стрелец,		Рыбы,		Близнецы,
Весы,		Козерог,		Овен,		Рак,
Скорпион,		Водолей,		Телец,		Лев.

Они указаны на рисунке.  
Теперь мы можем объяснить сезонное изменение звездного неба.

Начнем с месяца марта, так как 21 марта — начало астрономической весны. В марте Солнце находится в той стороне неба, где расположено созвездие Рыб. В это время созвездие Рыб восходит и заходит вместе с Солнцем, т. е. бывает над горизонтом днем, поэтому мы его не видим. Зато в эти дни в полночь, когда Солнце находится глубоко под горизонтом, из зодиакальных созвездий будет кульминировать Дева. Пройдет месяц, Земля пере-

<sup>1</sup> В древности было 12 зодиакальных созвездий по числу месиев. Когда в 1922 г. определили границы созвездий, в число зодиакальных попало созвездие Змееносца. Оно располагается между Скорпионом и Стрельцом.

ствия и точке осеннего равноденствия (обозначения точек даны в приложении).

В точке весеннего равноденствия, которая в настоящее время расположена в созвездии Рыб, Солнце бывает 21 марта, когда оно переходит из южного небесного полушария в северное. Этот день считается началом астрономической весны. В порядке суточного движения Солнце в этот день на небесной сфере движется по небесному экватору, поэтому в любом пункте земного шара Солнце восходит ровно в 6 часов в точке востока Е и заходит в 18 часов в точке запада W. День равен ночи на всем земном шаре. Это день весеннего равноденствия (около 21 марта).

В точке осеннего равноденствия, находящейся сейчас в созвездии Девы, Солнце бывает примерно 23 сентября, т. е. тоже в день равноденствия. Но здесь Солнце передходит из северного небесного полушария в южное. Этот день считается началом астрономической осени. Точки  $e$  и  $e'$ , лежащие на эклиптике посередине между точками равноденствия, называются точками летнего и зимнего солнцестояния. В них Солнце бывает 22 июня и 22 декабря. Эти точки находятся соответственно в созвездиях Близнецов и Стрельца.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра солнечного диска через точку весеннего равноденствия называется *тропическим годом*. Тропический год содержит 365 дней 5 часов 48 минут 46 секунд =  $365^{\circ},2422$ .

Так как положение Солнца среди звезд все время меняется, то в течение года изменяются экваториальные координаты Солнца.

Легко видеть, что после прохождения точки весеннего равноденствия, когда прямое восхождение и склонение Солнца равны нулю, прямое восхождение все время возрастает, а склонение растет, достигая наибольшего значения  $23^{\circ}27'$  в точке  $e$ , затем уменьшается до нуля в точке осеннего равноденствия.

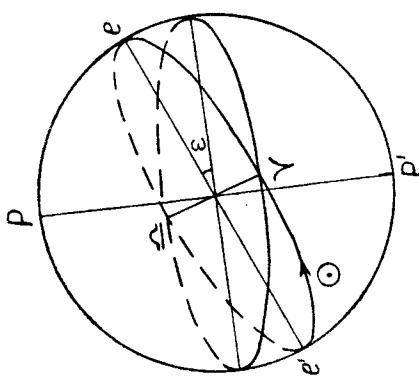
После этого склонение Солнца становится отрицательным. В точке зимнего солнцестояния склонение минимальное,  $-23^{\circ}27'$ , после чего оно начинает увеличиваться, достигая нуля в точке весеннего равноденствия. Координаты Солнца в точках равноденствия и солнцестояния даны в таблице 2.

## § 9. Видимое годичное движение Солнца относительно звезд

Действительное движение Земли вокруг Солнца приводит не только к сезонному изменению вида звездного неба, но, как мы только что видели, и к кажущемуся годичному движению Солнца по звездному небу. Рассмотрим это движение подробнее.

В порядке годичного движения Солнце движется против суточного движения<sup>1</sup>, перемещаясь ежедневно примерно на  $1^{\circ}$  ( $360^{\circ}$  за 365 дней). Линия видимого годичного движения Солнца представляет собой большой круг небесной сферы и называется *эклиптикой*. Эклиптику можно определить и так: это линия пересечения плоскости земной орбиты с небесной сферой. Плоскость эклиптики (рис. 10) наклонена к плоскости небесного экватора под углом  $\epsilon = 23^{\circ}27'$ . Этот угол называется наклонением экватора к эклиптике. Эклиптика пересекается с небесным экватором в двух точках: точке весеннего равноденствия и точке осеннего равноденствия.

Рис. 10. Эклиптика.



<sup>1</sup> Не надо забывать, что ежедневно независимо от годичного перемещения го небу Солнце участвует в суточном движении (Земля вращается!).

Таблица 2

Точка эклиптики	Координаты Солнца	
	Прямое восхождение $\alpha$	Склонение $\delta$
Весеннего равноденствия	0 <sup>ч</sup>	0°
Летнего солнцестояния	6 <sup>ч</sup>	23°27'
Осеннего равноденствия	12 <sup>ч</sup>	0°
Зимнего солнцестояния	18 <sup>ч</sup>	-23°27'

Солнце по эклиптике движется неравномерно: дугу эклиптики в  $180^\circ$  с 21 марта по 23 сентября оно проходит за 186 дней, а такую же дугу с 23 сентября по 21 марта — за 179 дней. Таким образом, зимой Солнце движется быстрее. Неравномерное годичное движение Солнца на фоне звезд является отражением неравномерного движения Земли по своей эллиптической орбите в соответствии со вторым законом Кеплера. В первых числах января Земля бывает в перигелии своей орбиты, т. е. движется с наибольшей скоростью.

## § 10. Видимое движение Луны относительно звезд и смена лунных фаз

Очень давно люди заметили, что Луна так же, как и Солнце, движется относительно звезд в направлении против часовой стрелки, но только быстрее Солнца. Полный оборот по небу Луна совершает приблизительно за 27,3 суток, это так называемый *сидерический*, или звездный, месяц Луны, в среднем он составляет  $27\frac{1}{7}43^m12^s$ . Если Солнце за сутки смещается примерно на  $1^\circ$  ( $360^\circ : 365,25 = 0^\circ,98$ ), то Луна больше, чем на  $13^\circ$  ( $360 : 27\frac{1}{3} = 13^\circ,2$ , в день).

Путь Луны на фоне звезд проходит недалеко от эклиптики, т. е. Луна движется, как и Солнце, по зодиакальным созвездиям. Если нанести положения лунного центра на звездную карту в течение сидерического месяца, то легко убедиться, что видимый лунный путь представляет собой большой круг небесной сферы<sup>1</sup>, плоскость которого составляет с плоскостью эклиптики угол в  $59'$  (рис. 11). Линия видимого движения Луны на небесной сфере (будем называть ее лунный путь)<sup>1</sup> пересекается с эклиптикой в двух диаметрально противоположных точках — лунных узлах. Тот узел, через который Луна движется из южного полушария в северное, называется восходящим лунным узлом<sup>2</sup>, противоположный — нисходящим.

Лунные узлы не сохраняют своего положения относительно звезд: они непрерывно перемещаются по эклиптике в направлении по часовой стрелке, т. е. движутся навстречу месячному движению самой Луны. В результате по истечении сидерического месяца Луна не возвращается в точности к той звезде, от которой начала свое движение в начале месяца, и именно поэтому видимый путь Луны не представляет точно большого круга небесной сферы. Только через 18 лет 7 месяцев, когда лунные узлы сделают полный оборот по небу, Луна вернется к той же звезде, а лунный путь займет свое прежнее положение.

<sup>1</sup> Более точно видимый лунный путь на небе представляет собой незамыкающуюся окружность, которая постоянно меняет свое положение на фоне звезд.

<sup>2</sup> Восходящий узел лунной орбиты.

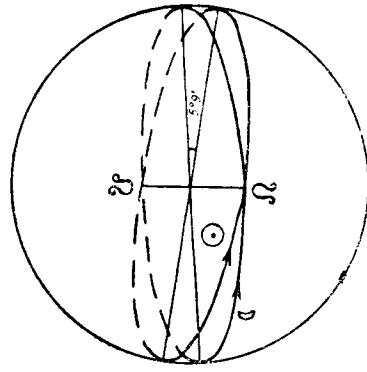


Рис. 11. Лунный путь, и  
эклиптика.

Движение лунных узлов изменяет условия видимости Луны. Так, когда восходящий узел совпадает с точкой весеннего равноденствия (рис. 12), лунный путь по отношению к небесному экватору наклонен на самый большой угол  $23^\circ27' + 5^\circ9' = 28^\circ36'$ . Через 9 лет 3,5 месяца, когда в точке весеннего равноденствия будет находиться нисходящий лунный узел (рис. 13), угловое удаление лунного пути от экватора будет составлять только  $23^\circ27' - 5^\circ9' = 18^\circ18'$ . Видимое движение Луны является следствием ее действительного движения вокруг Земли в направлении с

<sup>1</sup> Очень часто ее называют несколько иначе — лунной орбитой.

запада на восток, т. е. в направлении против часовой стрелки, или в направлении суточного вращения Земли. Полный оборот вокруг Земли Луна совершает за звездный месяц. Орбита невозмущенного движения Луны, при условии, что на нее действует только притяжение сферической Земли, представляет собой эллипс с эксцентриситетом 0,055 и большой полуосью в 384400 км. В действи-

четверти Луна заходит через 6 часов после захода Солнца. Пройдет еще 7 дней, и мы увидим полную Луну, это — **полнолуние**. В это время Луна сияет на небе всю ночь. После полнолуния диск Луны начинает убывать: с правой стороны появляется все больший «ушерб», через 7 дней будет видна снова половина лунного диска, но теперь уже обращенная выпуклостью влево. Это **послед-**

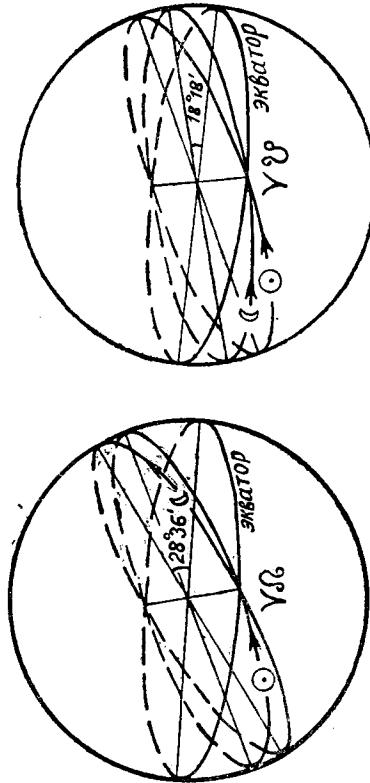


Рис. 12. Наибольшее наклонение лунного пути к небесному экватору)

тельности же движение Луны необычно сложно и составляет одну из最难ных задач небесной механики.

Видимое движение Луны на фоне звезд сопровождается непрерывным изменением ее внешнего вида, называемого **фазой Луны**. Изменение лунных фаз происходит в следующем порядке. После нескольких дней невидимости, это **новолуние**, Луна появляется слева от Солнца в виде узкого серпика, повернутого выпуклостью к Солнцу. В это время ее можно видеть только вечером сразу после захода Солнца очень непродолжительное время, так как Луна быстро заходит. С каждым днем условия видимости Луны улучшаются: утолщается ее серп, она дальше влево отходит от Солнца (на 12° ежедневно), поэтому видна дольше. Примерно через 7 дней после новолуния угловое расстояние Луны от Солнца составит 90°, в этот день она будет видна в виде половинки диска; эта фаза называется **первой четвертью**. Во время первой

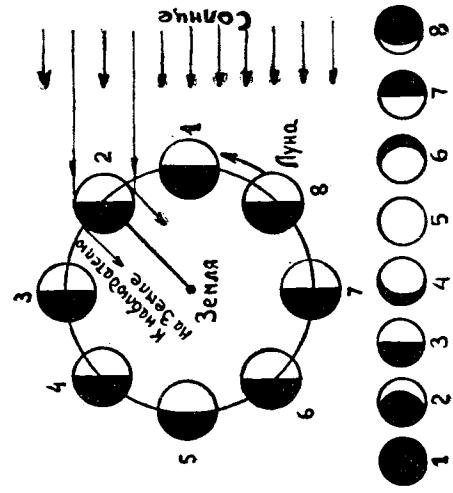


Рис. 14. Фазы Луны

**надежда**. В последней четверти Луна восходит за 6 часов до восхода Солнца, т. е. становится видимой примерно около полуночи. «Старая» Луна в виде узкого серпика, напоминающего букву «С» бывает видна только по утрам.

Смена лунных фаз объясняется следующим образом. Луна своего света не имеет, и видим мы ее только потому, что она освещается Солнцем. Так как расстояние до Солнца очень велико (в 400 раз больше расстояния от Земли до Луны), то солнечные лучи можно считать параллельными, и поэтому они освещают ровно половину лунного шара, другая половина остается темной. Вследствие движения Луны вокруг Земли в разное время к Земле обращены и часть освещенного Солнцем

полушария Луны и часть неосвещенного. На рис. 14 показана смена лунных фаз. В положении 1, когда Луна проходит между Солнцем и Землей, к Земле обращено неосвещенное полушарие Луны, Луна на небе не видна. Это новолуние. В положении 2 мы уже видим небольшой участок освещенной лунной поверхности. На небе в это

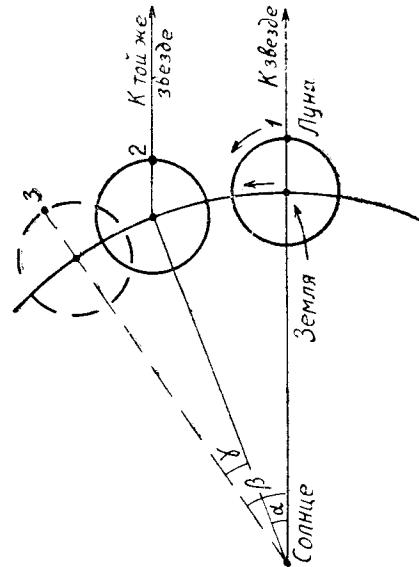


Рис. 14. К объяснению разницы между синодическим и сидерическим месяцами.

время сияет узкий серпик Луны. Положение 3 — первая четверть, 5 — полнолуние, 7 — последняя четверть.

Промежуток времени, в течение которого происходит смена лунных фаз, т. е. промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами, называется **синодическим** месяцем. Синодический месяц содержит в среднем  $29^{\text{d}}\ 5$  или  $29^{\text{d}}\ 12^{\text{ч}}\ 44^{\text{м}}\ 3^{\text{с}} = 29^{\text{d}}\ 53$ .

Синодический месяц длиннее сидерического. Для того, чтобы это понять, обратимся к рис. 15, на котором в положении 1 изображено полнолуние. Через  $27,3$  дня (положение 2) Луна сделает полный оборот по своей орбите и вернется к той же самой звезде. Но так как за это время и Земля переместится по своей орбите, то полнолуние не наступит. Чтобы снова наступило полнолуние необходимо, чтобы Луна и Земля оказались в положении 3, т. е. должно пройти еще около двух дней.

Математическая связь между синодическим месяцем

(S), сидерическим месяцем (T) и звездным годом E<sup>1</sup> может быть получена так. Солнце полный оборот по небу делает за E суток, за сутки оно смещается на  $\frac{1}{E}$  часть полного угла. Луна за сутки смещается на больший угол, составляющий  $\frac{1}{T}$  полного угла, т. е. ежесуточно она опе-

режает Солнце на  $\frac{1}{T} - \frac{1}{E}$ . Так как на полный угол Луна опережает Солнце за синодический месяц, то за сутки это опережение составляет  $\frac{1}{S} - \frac{1}{T}$  полного угла. Отсюда

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E}. \quad (2)$$

### § 11. Видимое движение планет

В глубокой древности среди неподвижных звезд люди заметили пять необычных светил. Эти светила были похожи на звезды, но отличались от них значительно большей яркостью, спокойным померцающим светом и перемещением подобно Солнцу и Луне на фоне звезд. За «блуждание» среди звезд их называли планетами, что значит «блуждающие светила». Со временем за видимыми невооруженным глазом планетами закрепились имена римских богов. Венера, самая яркая, была названа в честь богини любви и красоты; Юпитер получил имя главного бога, Марс носит имя бога войны, Меркурий — бога торговли, Сатурн — бога смерти и загробной жизни. Еще три планеты, не видимые невооруженным глазом и открытые уже в наше время, тоже получили имена богов. Планета Уран, обнаруженная Вильямом Гершелем в 1781 году, получила имя бога астрономии; Нептун, положение которого было заранее вычислено Урбаном Леверье и Джоном К. Адамсом и который по расчетам У. Леверье был обнаружен Иоганном Г. Галле в 1846 году, назван в честь бога морей. Плутон, открытый Кэллом Томбо в 1930 году после многолетних поисков, осно-

<sup>1</sup> Звездным годом называется промежуток времени, в течение которого Солнце возвращается к одной и той же звезде, другими словами, это время полного обращения Земли вокруг Солнца. Звездный год немного длиннее тропического и содержит  $365^{\text{д}}\ 2564^{\text{ч}}\ 9^{\text{с}} = 365^{\text{д}}\ 2564$ .

ванных на теоретических расчетах Персивала Ловелла, носит имя бога подземной жизни.

Каждая планета так же, как Солнце и Луна, имеет свой астрономический знак, которые даны в приложении 1.

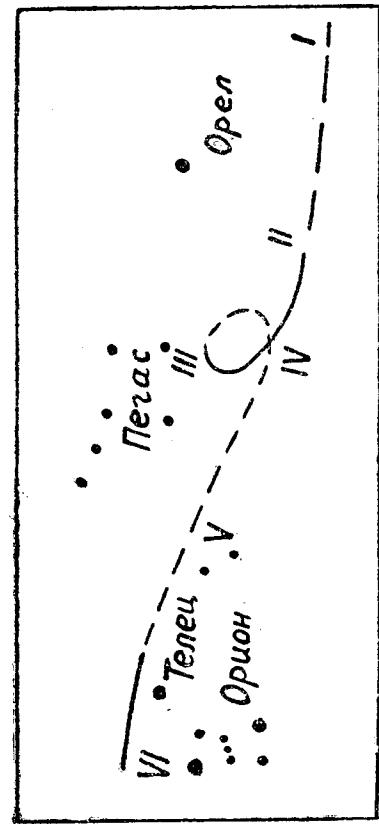


Рис. 16. Видимый путь Меркурия в январе – мае 1967 г.

Видимые движения планет происходят, как и движение Солнца и Луны, в области зодиакальных созвездий.

Но если Солнце и Луна все время перемещаются в одном направлении, с запада на восток, говорят, в *прямом направлении*<sup>1</sup>, то планеты движутся значительно сложнее: иногда они движутся в прямом направлении, иногда в *обратном*, т. е. с востока на запад, время от времени в движении планет происходит остановки, *стоячия*. В результате, если нарастить положения планеты на звездную карту, ее путь может представиться в виде пегасов (рис. 16). Поэтому очень часто говорят о *пегасовом* движении планет.

По характеру видимых движений планеты разделяются на две группы: нижние — Меркурий и Венера и верхние — все остальные<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> При прямом движении прямо восхождение ( $\alpha$ ) и эклиптическая долгота ( $\lambda$ ) увеличиваются. Если движение происходит так, что прямое восхождение и эклиптическая долгота уменьшаются, движение называется обратным.

<sup>2</sup> К верхним планетам следует отнести и так называемые ма-

## Движение нижних планет

Меркурий и Венера при движении по небу никогда не отходят далеко от Солнца. Наибольшее угловое удаление от Солнца (элонгация) составляет для Меркурия  $18^\circ - 28^\circ$ , для Венеры —  $43^\circ - 48^\circ$ . Наибольшее угловое удаление ( $\vartheta$ ) планеты к востоку от Солнца (рис. 17) на-

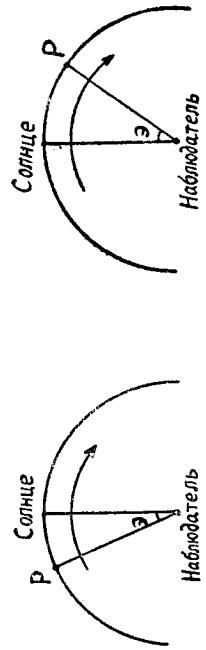


Рис. 17. Восточная элонгация нижней планеты.

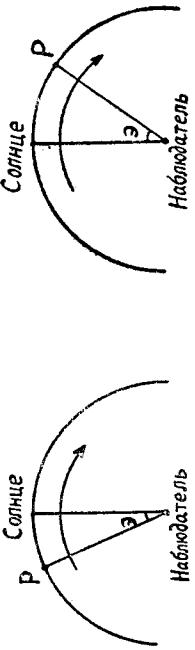


Рис. 18. Западная элонгация нижней планеты.

зывается *восточной элонгацией* планеты, к западу — *западной элонгацией* (рис. 18).

Когда планета находится к востоку от Солнца (рис. 17), в порядке суточного движения она идет позади Солнца, поэтому она может наблюдаваться только после захода Солнца в западной стороне неба. Во время западного удаления (рис. 18) планета доступна наблюдению в утренние часы до восхода Солнца в восточной стороне неба. Чем больше угловое удаление планеты, тем доступнее она для наблюдения, тем больше времени она бывает над горизонтом после захода Солнца или перед его восходом.

Последним движением нижней планеты, начиная с момента восточной элонгации. После наибольшего удаления планеты от Солнца она начинает двигаться навстречу Солнцу, перемещаясь на фоне звезд в обратном направлении, т. е. с востока на запад. С каждым днем период ее видимости уменьшается, и, наконец, она скрывается в лучах Солнца и наступает *нижнее соединение* планеты с Солнцем (эквипартические долготы планеты и Солнца одинаковы).

В момент нижнего соединения иногда наблюдается явление прохождения планеты по диску Солнца, когда

планету можно увидеть на солнечном диске в виде черного кружка.

После некоторого периода невидимости планета появляется справа от Солнца (к западу) и становится видна как утренняя звезда. Перемещаясь на фоне звезд по прежнему попутным движением, она все дальше удаляется от Солнца, пока не достигнет западной элонгации, после этого останавливается, затем начинает приближаться к Солнцу, дугойя его (в это время планета движется с запада на восток), наступает момент *верхнего соединения*. На этом заканчивается период утренней видимости планеты. Через некоторое время снова наступает пора вечерней видимости, когда планета появляется слева, к востоку от Солнца, удаляясь все дальше от него, пока не достигнет восточной элонгации. Далее все повторяется.

### Движение верхних планет

В отличие от нижних верхние планеты относительно Солнца могут находиться на любом угловом расстоянии. После *соединения* с Солнцем, когда планета не видна, она появляется справа от него, к западу, и наблюдается в утренние часы, до восхода Солнца. Движение ее на фоне звезд в это время происходит в прямом направлении, но так как она движется медленнее Солнца, то, постепенно отставая, оказывается все дальше от Солнца и восходит с каждым днем все раньше, задолго до восхода Солнца. Через некоторое время наступает стояние планеты (например, для Марса через год после соединения, на расстоянии примерно в  $130^{\circ}$  к западу от Солнца, для Юпитера и Сатурна через 4—5 месяцев на расстоянии около  $100^{\circ}$  от Солнца), после чего ее движение становится попутным. Западное угловое удаление планет от Солнца увеличивается теперь быстрее, так как они движутся в противоположные стороны, и в определенный момент достигает  $180^{\circ}$ . Это *противостояние* планеты с Солнцем. Во время противостояния планета восходит примерно в момент захода Солнца и видна всю ночь. Вскоре после противостояния планета снова начинает двигаться в прямом направлении, но теперь Солнце догоняет ее и планета кажется приближающейся к нему слева, с востока. В это время планета видна с вечера, так

как к моменту захода Солнца оказывается уже над горизонтом, а заходит она поэтому до восхода Солнца. С каждым днем планета подходит все ближе к Солнцу, поэтому период видимости ее уменьшается, и через определенный срок она скрывается в лучах вечернего Солнца. Наступает новый период невидимости планеты, во время которого снова происходит ее соединение с Солнцем.

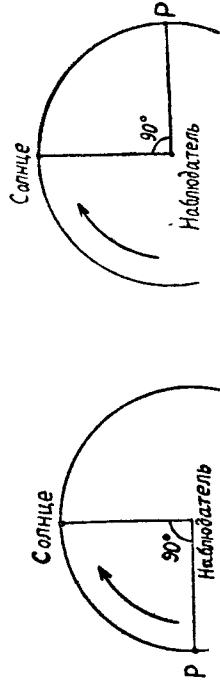


Рис. 19. Восточная квадратура верхней планеты

Рис. 20. Западная квадратура верхней планеты.

Таким образом, у верхних планет бывает одно соединение с Солнцем, а у нижних — два, зато у нижних может быть противостояния. Для верхних планет отмечают еще *восточную* (рис. 19) и *западную* (рис. 20) *квадратуры*, положения, при которых угловое удаление планеты по отношению к Солнцу составляет  $90^{\circ}$ .

Таблица 3

Название планеты	Синодический период обращения (в сутках)	Луга обратного движения (в градусах)	Продолжительность обратного движения (в сутках)
Меркурий	116	12	17
Венера	584	16	41
Марс	780	15	70
Юпитер	399	10	119
Сатурн	378	7	136

Различные положения планет на небе относительно Солнца называются *конфигурациями* планет. Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями планеты называется *синодическим периодом обращения* (S) планеты.

В таблице 3 приведены значения синодических периодов обращения планет, средние значения дуг и продолжительность обратных движений.

При движении планет по небу блеск их все время меняется. Верхние планеты наибольшей яркости достигают в противостоянии. Особенно это изменение блеска замечено у Марса.

## ГЛАВА II.

### РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МИРА

#### § 12. Первые научные взгляды на устройство мира

Мы уже отмечали, что астрономия — древнейшая наука, первые научные сведения по астрономии были получены в третьем — четвертом тысячелетиях до н. э. Одновременно с развитием наблюдений и накоплением фактических сведений по астрономии возникали определенные представления об устройстве окружающего мира. Первоначально это были всевозможные легенды и мифы, причем не только о строении, но одновременно и об образовании мира.

Бессмыслие человека перед природой, неумение объяснить наблюдаемые явления породили веру в сверхъестественные силы. Поэтому в древнейших мифах о мире, как правило, присутствовал творец.

Развитие общества очень рано потребовало систематических наблюдений неба для решения различных практических задач. Именно поэтому в развитых странах древности были получены многие важные сведения по астрономии.

Так, значительное развитие получила астрономия в Древнем Вавилоне и Египте уже к началу 2-го тысячелетия до н. э., но многовековые наблюдения в этих странах не привели к созданию научных представлений о Земле и окружающем мире.

Египетская и Вавилонская культура после того, как эти государства в VI в. до н. э. перестали существовать как самостоятельные, нашла свое дальнейшее развитие в связи с развитием культуры и науки Древней Греции.

Заметный вклад в развитие астрономии внесли многие греческие философы: Фалес Милетский (ок. 625—

550 до н. э.), Анаксимандр (ок. 610—546 до н. э.), Гераклит (ок. 540—480 до н. э.), Пифагор (580—500 до н. э.), которому приписывается идея о шарообразности Земли; Демокрит (ок. 460—370 до н. э.), который высказал ряд гениальных догадок, связанных со строением мира; в частности, он утверждал, что Млечный Путь — это скопление огромного количества звезд; Евдокс Книдский (ок. 410—355 до н. э.), который пытался объяснить видимые движения Солнца, Луны, планет, звезд, как действительные движения вокруг неподвижной Земли; наконец, Аристотель (384—322 до н. э.), «величайший мыслитель древности», по характеристике К. Маркса.

Будучи философами, греческие ученые не столь занимались наблюдениями, сколько исследовали причины различных явлений. Возможно, именно поэтому греческая наука намного опередила науку других стран в попытках объяснить наблюдаемые небесные движения и в создании космологических представлений.

Пифагору приписывается идея о шарообразности Земли, которая с тех пор не покидала греческих философов. К этому времени уже существовало представление о хрустальной сфере с прикрепленными к ней звездами, вращающейся на оси вокруг Земли с периодом в одни сутки. Пифагор и его последователи приписали Солнцу, Луне и пяти видимым невооруженным глазом планетам свои сферы.

Мысль о движении Земли и других небесных тел вокруг «центрального огня» была высказана последователем Пифагора Филолаем (V в. до н. э.), но в настолько туманной форме, что она не получила распространения и не оказала влияния на современников.

Во всяком случае в греческой науке сложилось представление о центральном положении Земли во Вселенной, которое и было закреплено в первых теориях о строении мира. Одну из таких теорий, пытаясь объяснить видимые движения небесных тел, выдвинул Евдокс из Книда. Аналогично сфере неподвижных звезд, вращающейся вокруг Земли, он ввел свои сферы для Солнца, Луны и планет. Но так как он считал, что небесные тела могут совершать только равномерные и круговые движения, то ему пришлось допустить, что движение каждого тела осуществляется вращением нескольких сфер, оси которых наклонены друг к другу под определенными углами. Так,

для Солнца и Луны он ввел по три сферы, для планет по четыре. Таким образом, построение Евдокса, позволившее описать видимые движения светил, состояло из 27 сфер. Видимо нет, оснований считать эти сферы, за исключением сферы звезд, материальными; вероятнее всего, для математика Евдокса эти сферы были удобным математическим аппаратом, приспособленным для расположения сложных движений на более простые.

Огромное влияние на развитие наукиоказал Аристотель. Научный авторитет этого мыслителя был настолько велик, что на его сочинениясылались для подтверждения мнения много веков спустя.

В космологических воззрениях Аристотель признавал систему Евдокса (расширенную в свое время Калиппом), в которой число сфер он довел до 56. Однако в отличие от Евдокса Аристотель считал все сферы существующими реально. В результате он превратил чисто геометрическое построение в громоздкое нагромождение якобы материальных сфер.

Аристотель обосновывал на основе наблюдений шарообразность Земли и распространял этот вывод на другие небесные тела. Это было крупным шагом вперед по сравнению с прежними представлениями. В то же время своим авторитетом Аристотель на многие века закрепил ложное представление о неподвижности Земли и о ее центральном положении во Вселенной. Неподвижность Земли он обосновывал тем же аргументом, который приводился для опровержения этого движения вплоть до XIX в.: если бы существовало движение Земли, то оно вызывало бы соответствующее кажущееся перемещение звезд.

Эти два ошибочных момента в учении Аристотеля — неподвижность Земли и ее центральное положение в мироздании впоследствии явились основным препятствием для развития научной мысли, так как были канонизированы, т. е. возведены в непреложную догму, церковью.

Со второй половины IV в. до н. э. начинается эпоха эллинизма, для которой характерно распространение греческой культуры далеко на Восток. С организацией новых государств появились новые культурные центры. Таким центром стала Александрия. В течение пяти веков все более или менее заметные астрономы, кроме Гиппарха, были александрийцами. Среди александрийских ученых,

### § 13. Геоцентрическая система мира Птолемея

сделавших значительные астрономические исследования, следует назвать Аристарха Самосского (ок. первой половины III в. до н. э.), учившего, что Земля не только вращается вокруг своей оси, но еще и движется вокруг Солнца; Тимохариса и Аристилла (III в. до н. э.), Эратосфена (276—195-96 до н. э.), осуществившего первые измерения размеров Земли, Аполлония Пергского (III—

IV в. до н. э.), Архимеда (287—212 до н. э.), предпринявшего первые попытки представить размеры Вселенной в числах. Огромный вклад в развитие астрономии внес Гиппарх (II в. до н. э.). Его открытия и обобщения сохранили свое значение в течение долгого времени.

Аполлоний из Перги, совершивший систему мира Евдокса — Аристотеля, вместо вращающихся сфер ввел систему окружностей (кругов): *эксцентртриков и эпициклов*. Эксцентртик — это окружность (рис. 21), центр О которой не совпадает с центром Земли Е (с наблюдателем), а эпидикл — представляет собой окружность, центр О которой (рис. 22) движется по другой окружности, центр О *диферента*, центр диферента Е совпадает с центром Земли (с наблюдателем).

До нас не дошли сведения о конкретной разработке системы мира Аполлония, но его идея об эксцентрике была использована Гиппархом для вполне удовлетворительного по тому времени описания движения Солнца. Для движения Луны результаты Гиппарха были менее удовлетворительны.

Работы по построению теории об устройстве мира начали свое завершение в трудах Александрийского астронома Клавдия Птолемея (II в.).

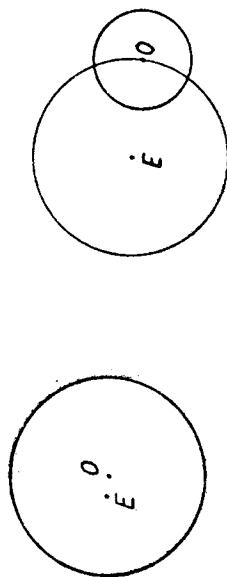


Рис. 21. Эксцентртик.

Рис. 22. Эпидикл и диферент.

II в. до н. э.), Архимеда (287—212 до н. э.), предпринявшего первые попытки представить размеры Вселенной в числах. Огромный вклад в развитие астрономии внес Гиппарх (II в. до н. э.). Его открытия и обобщения сохранили свое значение в течение долгого времени.

Аполлоний из Перги, совершивший систему мира Евдокса — Аристотеля, вместо вращающихся сфер ввел систему окружностей (кругов): *эксцентртриков и эпициклов*. Эксцентртик — это окружность (рис. 21), центр О которой не совпадает с центром Земли Е (с наблюдателем), а эпидикл — представляет собой окружность, центр О которой (рис. 22) движется по другой окружности, центр О *диферента*, центр диферента Е совпадает с центром Земли (с наблюдателем).

До нас не дошли сведения о конкретной разработке системы мира Аполлония, но его идея об эксцентрике была использована Гиппархом для вполне удовлетворительного по тому времени описания движения Солнца. Для движения Луны результаты Гиппарха были менее удовлетворительны.

Работы по построению теории об устройстве мира начали свое завершение в трудах Александрийского астронома Клавдия Птолемея (II в.).

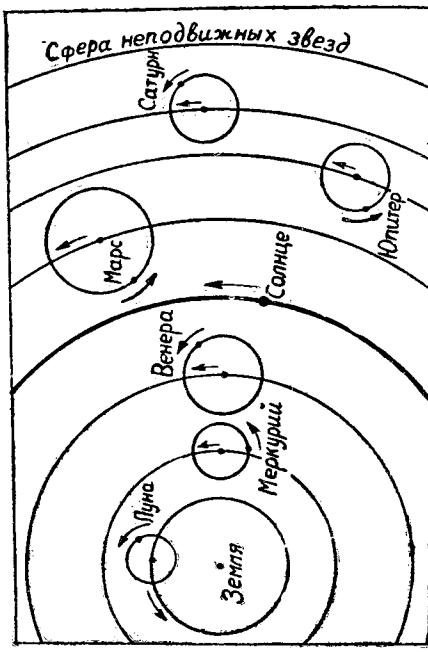


Рис. 23. Геоцентрическая система мира.

стности, Гиппарха. Здесь была изложена и теория Птолемея о строении мира, известная еще под названием *геоцентрической системы мира*.

Основные положения системы мира Птолемея можно сформулировать следующим образом.

1. Земля имеет форму шара и неподвижно покончится в центре мира.

2. Звезды образуют шарообразное небо, которое вращается вокруг Земли. Размеры Земли пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями до сферы звезд.

3. Вокруг Земли движутся в порядке удаления от нее Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн, при этом Солнце движется по эксцентрику, а Луна и планеты — по эпидиклам, центры которых перемещаются

<sup>1</sup> У Птолемея работа озаглавлена «Большое сочинение», что арабы перевели как «Величайшее сочинение».

по деферентам<sup>1</sup> (рис. 23). Уклонения планет от эклипти-  
ки объясняются некоторым наклоном плоскостей дефе-  
рентов и эпициклов.

Легко видеть (рис. 24), что при соответствующем вы-  
боре скоростей движения центра эпицикла О по дефе-  
ренту и планеты Р по эпициклу можно объяснить осо-  
бенности движения планеты. Так, в положении Р<sub>1</sub> пла-  
нета будет казаться движущейся быстро, так как скла-  
дываются скорости двух движений: эпицикла и самой  
планеты. В положении Р<sub>3</sub> движение планеты самое мед-  
ленное либо обратное. Около точек Р<sub>2</sub> и Р<sub>4</sub> могут быть  
остановки в движении планеты (стояния).

Система мира Птолемея, представлявшая математи-  
ческую схему, разработанная им очень тщательно, дава-  
ла возможность с большой точностью по тому времени  
описать видимые движения планет, по она не отражала  
действительной картины устройства материальной Все-  
лесной. Возможно, что и сам Птолемей рассматривал ее  
лишь как математическую схему, а не как реальное уст-  
ройство мира.

Следует подчеркнуть, что Птолемей, как и многие  
астрономы того времени, не мог освободиться от идей  
Аристотеля о разграниченности Вселенной на две части: на  
небесную, совершенную (эфирную) и на земную, несо-

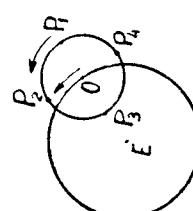


Рис. 24. Объяснение особенностей движения планеты по Пто-  
лемею.

<sup>1</sup> Нас не должна устрашать многослож-  
ность гипотез или же трудность вычислений, а мы долж-  
ны единственно заботиться о том, чтобы по возможности  
удовлетворительнее объяснить явления природы!.

Со временем, когда увеличилась точность астрономи-  
ческих измерений, расхождения в таблицах, вычислен-  
ных на основе теории Птолемея, с результатами наблю-  
дений стали более заметными. Это заставило в системе  
мира Птолемея вводить новые эпициклы. К XIII в. для  
объяснения движений планет Солнца и Луны было вве-  
дено уже 75 кругов. По поводу исключительной сложно-  
сти, громоздкости и запутанности системы Птолемея, ка-  
кой она стала к этому времени, кастильский король Аль-  
фонс X в 1250 г. сказал: «Если бы господь бог при-  
створении мира сделал мне честь спросить моего совета,  
то многое было бы создано лучше, а главное проще».

Однако, несмотря на сложность геоцентрической си-  
стемы мира, сочинение Птолемея, а также работы Арис-  
тотеля приобрели исключительный авторитет в средние  
века, и схему Птолемея рассматривали как действитель-  
ную картину устройства мира. Причиной этого явилось,  
что система Птолемея не противоречила учению церк-  
ви о строении мира и вполне удовлетворяла практические  
запросы того времени (§ 15).

#### § 14. От Птолемея до Коперника

После Птолемея Александрийская школа ученых при-  
шла в упадок, и на протяжении пяти веков здесь не было  
сделано ни одного более или менее значительного откры-  
тия в астрономии.

В VII в. начался научный подъем у арабов, в своих за-  
воеваниях проникнувшихся далеко на запад. С арабами  
было связано распространение новой религии — ислама.  
Ислам, подобно христианству, с самого зарождения враж-  
дебно относился к науке. Поэтому арабские завоевания  
сопровождались уничтожением памятников культуры,

<sup>1</sup> Для более точного описания движения планет в нарисованной  
схеме имеется ряд усложнений. В частности, центры деферентов не  
совпадают с центром Земли, а кроме того, допускается, что центр  
эпицикла перемещается по деференту не равномерно, но так, что ес-  
ли смотреть на него из так называемого эвантса — точки, симметрич-  
ные центру Земли относительно центра деферента, его движение все  
кажется равномерным. Центр эксцентрического деферента Луны  
движется вокруг Земли. Для объяснения особенностей в видимом  
движении Меркурия и Венеры, не отходящих далеко от Солнца, при-  
шлось допустить, что центры эпициклов этих планет всегда располо-  
гаются на линии Земля — Солнце.

<sup>1</sup> Г. А. Гурев, Системы мира от древнейших времен до наших  
дней, Изд-во «Московский рабочий», 1950, стр. 75.

особенно в Египте, Сирии. Однако образование огромной арабской империи, развитие торговли со многими странами очень скоро потребовали изменить отношение к культуре и науке. В результате этого начало развиваться арабская наука, особенно математика и астрономия.

Арабы перевели на свой язык большое число греческих сочинений и тем самым сохранили многие достижения древних ученых. В их числе было и «Великое сочинение» Птолемея. Арабы построили ряд обсерваторий и много внимания уделяли наблюдению. Их щательные наблюдения привели к обнаружению некоторых гравеских астрономических таблиц. Составляя новые таблицы, арабские ученые внесли некоторые усовершенствования и уточнения в систему мира Птолемея. Арабская астрономия перестала существовать в XIII в.

В Европе после завоевания Западной Римской империи варварами (IV в.) образовался ряд новых государств, Европа получила возможность дальнейшего развития. Однако при завоевании варвары многое уничтожили: города, храмы, библиотеки. Это привело к упадку культуры, в частности, астрономии и других естественных наук. Быстрое распространение христианства, объявившее войну всему античному («языческому»), не только не сподобовало дальнейшему развитию науки, но предало забвению все достижения древних и возродило примитивные взгляды на строение Земли и мира<sup>1</sup>.

Однако под влиянием развития общества происходившие изменения и в умах людей. Возникла, *схоластика*, которая занималась разработкой и систематизацией главных пунктов вероучения и которая ставила своей задачей примириять знание с верой, сделать науку «служанкой Богословия». Схоластика, пессомогра на свою основную задачу, высоко подняла авторитет разума, благодаря схоластике, церковь перестала мешать изучению древних авторов. Через арабов<sup>2</sup> в Европе познакомились с

сочинениями Аристотеля и других греческих философов. Схоласти остановились на том уровне науки, который был дан Аристотелем, они изучали написанное этим философом и совсем не считали нужным изучать природу, производить наблюдения, они отрицали всякий опыт.

В результате философские взгляды Аристотеля вместе с астрономическими представлениями о мире Птолемея с XIII в. были признаны неотъемлемым элементом христианского учения. Идея центрального положения Земли во Вселенной ни у кого не вызывала сомнения. Все в мире, согласно учению церкви, бог создал для человека и на пользу ему. Поэтому нет ничего странного и удивительного в том, что все небесные тела движутся вокруг Земли. «Если бог сына своего послал для нашего спасения, можно ли дивиться тому, что он для нас привел не беса во вращение и весь материальный мир создал на пользу и удовольствие человека?» — заявлял астроном Морэн (1583—1656 г.)<sup>1</sup>. Религией укреплялась вера не только в реальность птолемеевских кругов, но и в реальность твердых сфер.

В связи с развитием торговли, ростом городов, расширением ремесла нарождающаяся буржуазия стремилась поднять производительные силы. Это можно было сделать только с помощью науки, поэтому буржуазия соудействовала возрождению античной науки и дальнейшему ее развитию, в особенности естествознания. Вот так охарактеризовал Ф. Энгельс роль буржуазии: «... с ростом среднего класса произошло гигантское развитие науки. Стали вновь изучаться астрономия, механика, физика, анатомия, физиология. Буржуазии для развития ее промышленности нужна была наука, которая исследовала бы свойства физических тел и формы проявления сил природы. До того же времени наука была смиренной служанкой церкви и ей не позволено было выходить за рамки, установленные верой; по этой причине она была чрезмерно угодна, только не наукой. Теперь наука воссталла против церкви; буржуазия нуждалась в науке и приняла участие в этом восстании»<sup>2</sup>.

В конце XV и начале XVI веков был сделан ряд великих географических открытий: открыли Америку и неизвестные в Европе. В XII в. появились переводы на латинский язык арабских и переведенных на арабский языки греческих произведений.

<sup>1</sup> Г. А. Гурев. Системы мира от древнейших времен до наших дней. Изд-во «Московский рабочий», 1950, стр. 109.  
<sup>2</sup> К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч., изд. 2, т. 22, стр. 307.

Вестные раньше земли Африки, Азии и Океании, освоили морской путь в Индию вокруг Африки, было совершено первое кругосветное путешествие. Эти события оказали большое влияние на развитие культуры. Началась эпоха великих открытий и изобретений в науке. Ф. Энгельс писал в «Диалектике природы»: «Современное естествознание, — единственное, о котором может идти речь как о науке, в противоположность гениальным догадкам греков и спорадическим, не имеющим между собою связи исследованиям арабов,— начинается с той грандиозной эпохи, когда бюргерство сломило мощь феодализма, когда на заднем плане борьбы между горожанами и феодальным дворянством показалось мятежное крестьянство, а за ним революционные предшественники современного пролетариата, уже с красным знаменем в руках в Европе крупные монархии, сломила духовную диктатуру папы, воскресила греческую древность и вместе с новое время, которая разбила границы старого мира и впервые, собственно говоря, открыла Землю. Это была величайшая из революций, какие до тех пор пережила Земля. И естествознание, развивающееся в атмосфере этой революции, было насквозь революционным, шло рука об руку с пробуждающейся новой философией великих итальянцев, посыпая своих мучеников на кости и в темницы... Это было время, которое французы привильно называли Ренессансом...» («Возрождением»)!

Снова начали заниматься астрономией. К этому вынуждали практические потребности мореплавания и потребность церкви в проведении реформы календаря. Благодаря возросшему интересу к астрономии уже в конце XV в. стало ясно, что на практике нельзя обходиться чрезвычайно сложной системой эпициклов: новые наблюдения противоречили таблицам, вычисленным на основе этой теории. Появились выступления против геоцентристической системы мира, против догмата о противоположности земного и небесного (например, Николай Кузанский, Леонардо да Винчи), но преодолеть их смог лишь Николай Коперник (1473—1543), один из титанов эпохи

Возрождения, заменивший геоцентрическую систему мира гелиоцентрической и положивший этим начало новому естествознанию.

### § 15. Гелиоцентрическая система мира Коперника

Польский ученый Николай Коперник родился в 1473 году в г. Торне. Он учился в лучших университетах того времени в Кракове, Риме, Падуе и других. Закончив образование, в 1505 году вернулся на родину и в небольшом городе Фрауэнбурге получил должность каноника, т. е. духовного чиновника при епископе по управлению церковными делами. Священником он не был и церковных служб не совершал. Коперник был очень образованным человеком своего времени, был врачом, инженером, но главным своим занятием он считал астрономию и все свободное время посвящал наблюдениям небесных тел и астрономическим вычислениям. Без преувеличения можно сказать, что всю жизнь он посвятил выяснению вопроса, как устроен мир, если система мира Птолемея неверна.

Книга Коперника «Об обращении небесных кругов», в которой изложена его теория о строении мира, была напечатана в Нюрнберге в мае 1543 г., когда Коперник был уже на смертном одре<sup>1</sup>.

Основные положения гелиоцентрической системы мира Коперника можно сформулировать следующим образом.

1. В центре мира находится Солнце.
2. Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн.
3. Вокруг Земли обращается только одна Луна.
4. Кроме годичного обращения вокруг Солнца, Земля вращается вокруг оси, проходящей через полюсы мира.

<sup>1</sup> Коперник не торопился обнародовать свои взгляды, ибо хорошо понимал, что выступает против могущественной церкви, утверждавшей, что Земля движется. Однако свою идею он не скрывал. Его ученик и последователь Иоганн Регикус (1514—1576) написал небольшую книжку о взглядах Коперника, которая вышла в 1539 г. в Данциге. Кроме того, небольшой трактат самого Коперника под названием «Комментарий к Аристотелю» получил некоторое распространение среди специалистов, хотя и не был напечатан.

движений небесных тел. Ниже мы рассмотрим некоторые обьяснения, данные или самим Коперником, или частично исправленные поздними исследователями.

5. Вокруг Солнца расположена сфера неподвижных звезд. Расстояние от Земли до Солнца ничтожно мало по сравнению с расстоянием до звезд.

Гелиоцентрическая система в том виде, в каком она была дана Коперником, еще не свободна от ошибок, она сохранила некоторые особенности прежней астрономии и физики. Так, у Коперника мы по-прежнему находим сферу неподвижных звезд, хотя он и заявил, что расстояние до нее очень велико. Большое расстояние вытекало из отсутствия какущегося смещения звезд при движении Земли. Коперник не смог отказаться от равномерных и круговых движений, поэтому для объяснения всех особенностей в движении планет он сохранил в своей системе 34 эпициклы (вместо того, чтобы ввести эллиптичность орбит). Поэтому при вычислении положений планет для отдельных моментов времени (эфемерид) система Коперника тогда не давала существенных преимуществ перед системой Птолемея.

От всех погрешностей системы Коперника была освобождена трудом следующих исследований, в частности, И. Кеплера. Вследствие этого система мира, которую мы обычно называем системой Коперника, в некоторых пунктах существенно отличается от того, что было дано самим Коперником.

Огромной заслугой Коперника является уничтожение геоцентризма и различия между земным и небесным. Своим ученикам в этих пунктах он сделал большой шаг к созданию новой физики и механики.

«Декларацией независимости» назвал Ф. Энгельс «творение Коперника, в котором он... бросил вызов церковному суеверию. С этого времени исследование природы по существу освободилось от религии, хотя окончательное выяснение всех подробностей затянулось до настоящего времени и далеко еще не завершилось во многих головах. Но с тех пор и развитие науки пошло гигантскими шагами...»<sup>1</sup>.

## § 16. Объяснение ряда явлений на основе системы мира Коперника

На основе созданной теории об устройстве мира Коперник объяснил целый ряд наблюдавших явлений и

### 1. Суточное движение светил

Суточное вращение звездного неба и все связанные с ним явления: восход и заход Солнца, Луны, планет, звезд — просто объяснялись вращением Земли. Все эти движения, считавшиеся до Коперника действительными, превратились в кажущиеся, являющиеся следствием одного действительного движения — вращения Земли с заходом на восток.

### 2. Годичное движение Солнца и смена времен года

Так как Земля в течение года делает оборот вокруг Солнца, то наблюдаемое годичное перемещение Солнца по экваториальной плоскости представляет собой кажущееся движение,

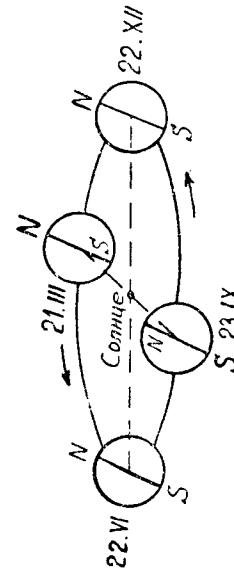


Рис. 25. К объяснению смены времен года.

являющееся следствием действительного движения Земли.

Следствием годичного обращения Земли вокруг Солнца является и смена времен года. Ось вращения Земли при перемещении последней вокруг Солнца все время остается параллельной самой себе<sup>1</sup> и сохраняет с плоскостью эклиптики угол в  $66^{\circ}33'$ . В результате в течение года северное и южное полушария Земли то лучше, то

<sup>1</sup> Для объяснения этой особенности Коперник ввел кроме вращения Земли вокруг оси и обращения вокруг Солнца, еще третье движение Земли, которое было отброшено как ошибочное, когда обнаружили независимость первых двух движений.

уже освещаются Солнцем. На рис. 25 показано расположение земной оси в дни равноденствия и солнцестояния. 22 июня ось Земли наклонена северным концом к Солнцу, поэтому северное полушарие в этот момент оказывается в наибольшем благоприятных условиях в смысле освещения солнечными лучами: в северном полушарии Земли лето, в южном — зима. Через полгода 22 декабря Земля окажется в противоположной точке своей орбиты, к Солнцу теперь будет обращено южнее полушарие Земли, в северном полушарии будет зима.

### 3. Конфигурации и видимые движения планет

Конфигурации планет (их положения на небе относительно Солнца) зависят от взаимного расположения планеты и Земли на своих орbitах. Нижние планеты

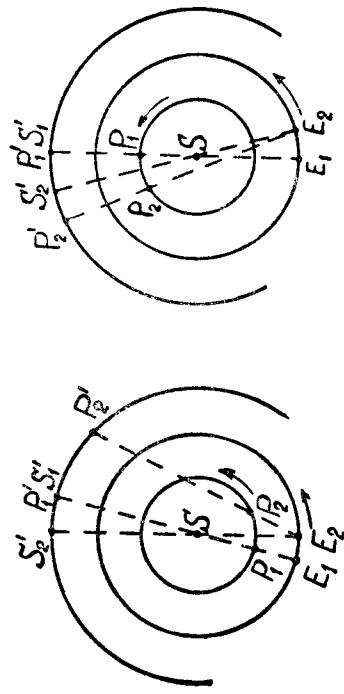


Рис. 25. Верхнее соединение планет. Планеты  $P_1$  и  $P_2$  находятся на орбите Земли  $S$  в точках  $P'_1$  и  $P'_2$ . Ось Земли  $E_1-E_2$  наклонена вправо. Планеты движутся по часовой стрелке.

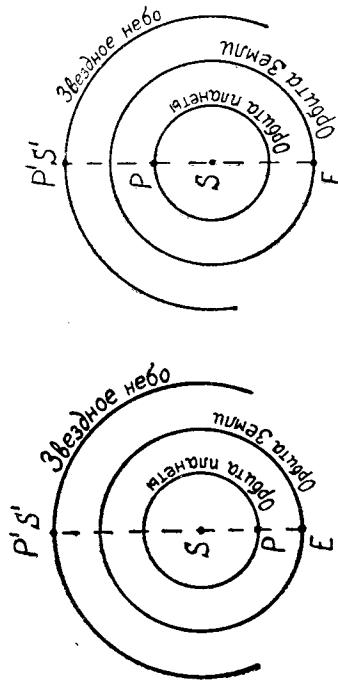


Рис. 26. Нижнее соединение планет. Планеты  $P_1$  и  $P_2$  находятся на орбите Земли  $S$  в точках  $P'_1$  и  $P'_2$ . Ось Земли  $E_1-E_2$  наклонена влево. Планеты движутся по часовой стрелке.

Меркурий и Венера движутся по орбитам, расположенным внутри земной орбиты (поэтому эти планеты называются еще внутренними). Когда внутренняя планета и Земля располагаются по одну сторону от Солнца (рис. 26), планета на небе не видна, она находится в нижнем соединении с Солнцем. Если Земля и планета оказываются в противоположных направлениях от Солнца (рис. 27), наступает верхнее соединение.

Коперник, расположив планеты в порядке их удаления от Солнца, правильно приписал им тем большую угловую

скорость, чем ближе планета к Солнцу. Исходя из этого, легко видеть (рис. 28), что после нижнего соединения планета появляется на небе справа от Солнца (западное удаление), а после верхнего соединения (рис. 29) — слева

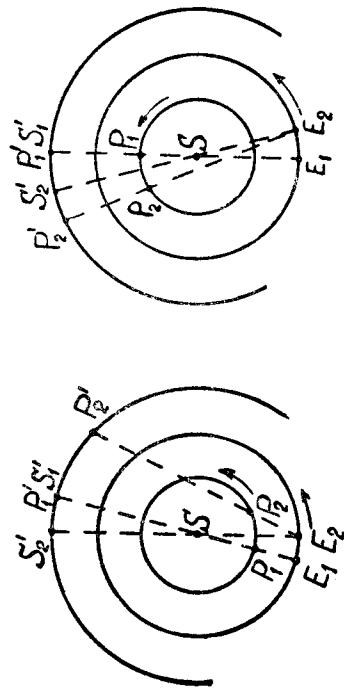


Рис. 27. Верхнее соединение планет. Планеты  $P_1$  и  $P_2$  находятся на орбите Земли  $S$  в точках  $P'_1$  и  $P'_2$ . Ось Земли  $E_1-E_2$  наклонена вправо. Планеты движутся по часовой стрелке.

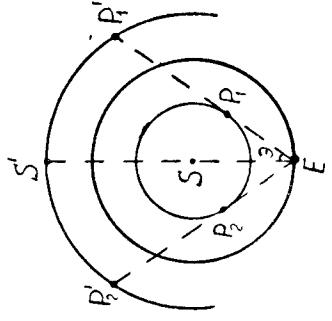


Рис. 28. Условия видимости внутренней планеты после нижнего соединения.

(восточное удаление). Элонгации внутренних планет наблюдаются в положениях, определяемых направлением касательной из центра Земли к орбите планеты. На рис. 30  $P_1$  — западная,  $P_2$  — восточная элонгации.

Орбиты верхних (внешних) планет расположены дальше орбиты Земли. На рис. 31 объясняются конфигурации внешней планеты. Положение планеты относительно Солнца и Земли в  $P_1$  — соединение, в  $P_2$  — противостояние, в  $P_3$  — западная квадратура,  $P_4$  — восточная квадратура.

Помня, что угловая скорость вращения планеты вокруг Солнца меньше соответствующей скорости Земли, можно проследить, как изменяется со временем положение планеты по отношению

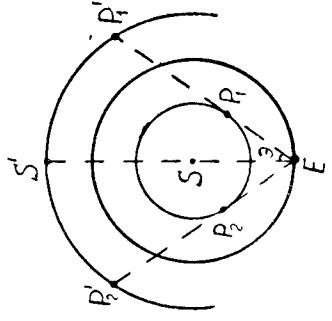


Рис. 29. Условия видимости внутренней планеты после верхнего соединения.

к Солнцу. Например, после момента западной квадратуры (рис. 32) Солнце и планета движутся в прямом направлении (угловое расстояние между ними увеличивается

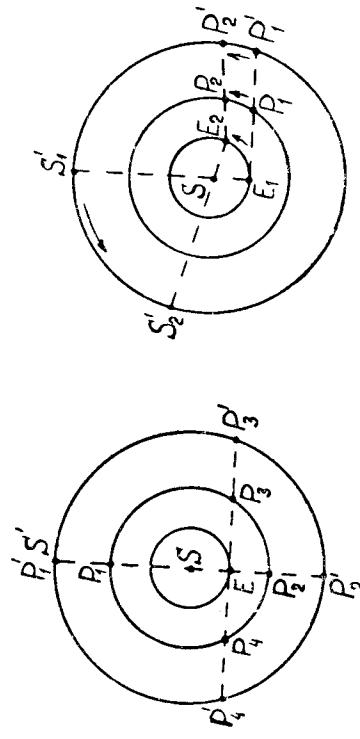


Рис. 31. Конфигурации внешней планеты.

Рис. 32. Движение внешней планеты после западной квадратуры.

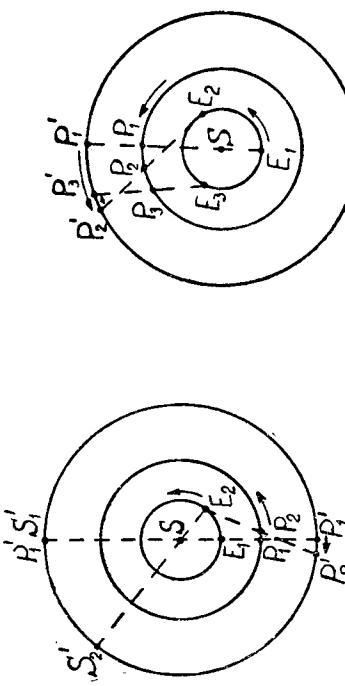


Рис. 32. Движение внешней планеты после западной квадратуры.

съ), а после противостояния (рис. 33) нам будет казаться, что планета движется в обратном направлении. Образование петли планетой можно проследить на рис. 34. Когда Земля на своей орбите занимает положение  $E_1$ , а планета  $P_1$ , мы ее видим на небе в  $P_1'$ . Через некоторое время Земля попадет в положение  $E_2$ , а пла-

нета в положение  $P_2$ , и мы увидим планету в  $P_2'$  (в направлении  $E_2 \rightarrow P_2$ ). В момент  $E_3$  планета  $P_3$  будет наблюдаваться в  $P_3'$ . Что же получается? От  $P_1$  к  $P_2$ , планета побежала перемещалась прямым движением, а от  $P_2$  к  $P_3$  — обратным. Значит, где-то около момента  $P_2'$  в движении планеты наблюдалось стояние, после чего планета начала обратное движение; в результате наблюдателю будет казаться, что планета описала на фоне звезд петлю.

Таким образом, особенности в видимых движениях планет (прямое движение, обратное движение, стояния, петли) объясняются тем, что движущуюся планете земной наблюдатель рассматривает с движущейся, в свою очередь, Земли.

#### 4. Сидерические периоды обращения планет

*Сидерическим*, или звездным, периодом обращения ( $T$ ) планеты называется промежуток времени, в течение которого планета делает полный оборот вокруг Солнца.

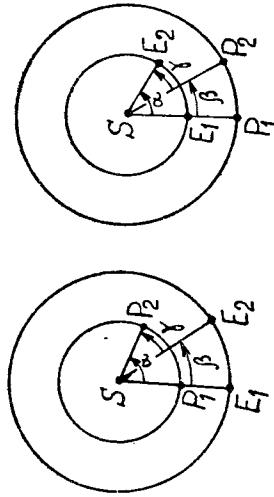


Рис. 35. К получению уравнений синодического движения.

Сидерический период обращения Земли называется звездным годом ( $E$ ), он содержит 365, 2564 средних солнечных суток (§ 10).

Непосредственно из наблюдений можно определить только продолжительность звездного года Земли и продолжительность синодических периодов обращения ( $S$ ) планет (§ 11). Сидерические периоды планет вычисляются по формулам, связывающим звездный год с сидерическим и синодическим периодами планеты.

Суточное угловое перемещение планеты по орбите равно  $\frac{2\pi}{T}$ , у Земли —  $\frac{2\pi}{E}$ , разность суточных угловых перемещений планеты и Земли (для внутренних планет) или Земли и планеты (для внешних планет) составляет суточную часть синодического периода  $\frac{2\pi}{S}$  (рис. 35), от-

куда для нижних планет  $\gamma = \alpha - \beta$  или

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E} \quad (3)$$

и для верхних планет  $\gamma = \alpha - \beta$  или

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{E} - \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) называются *уравнениями синодического движения*.

В таблице 4 приведены сидерические периоды обращения планет.

Таблица 4

Название планеты	Сидерический период обращения	
	в средних сутках	в годах
Меркурий	88	0,24
Венера	225	0,62
Земля	365	1,00
Марс	687	1,88
Юпитер	4 332	11,86
Сатурн	10 759	29,46
Уран	30 686	84,02
Нептун	60 188	164,79
Плутон	90 737	247,70

## 5. Относительные расстояния планет от Солнца

Коперник пришел к выводу, что величина петли, опи- сываемой планетой на небе, зависит от расстояния пла- неты от Солнца и от Земли: чем дальше планета от Зем- ли, тем меньше ее петля. Самой близкой к Земле является Венера, она имеет самую большую петлю (см. таб- лицу 3, § 11). На основании этого Коперник заключил, что по величине петли можно вычислить расстояния пла- нет от Солнца и впервые получили эти расстояния, выра-

зив их в радиусах земной орбиты, т. е. через расстояние Земли от Солнца<sup>1</sup>.

Расстояние внутренней планеты от Солнца  $a_p$  легко вычислить, если измерить значение ее западной или вос- точной элонгации  $\vartheta$  (рис. 36)

$$a_p = a \sin \vartheta. \quad (5)$$

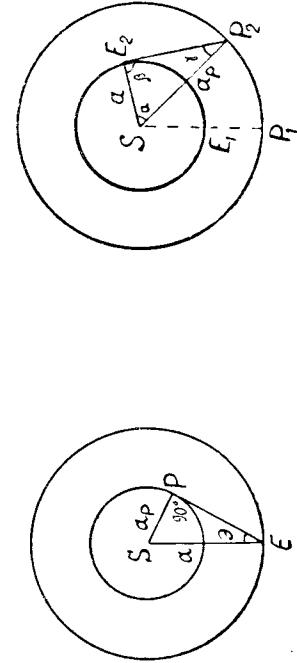


Рис. 36. К получению расстояния до внутренней планеты.

Положив расстояние от Земли до Солнца  $a = 1$ , имеем

$$a_p = \sin \vartheta.$$

Расстояние до внешней планеты (рис. 37), можно, например, вычислить в момент восточной квадратуры ( $E_2, P_2$ ), заметив, сколько времени  $t$  пройдет до этого момента от противостояния планеты ( $E_1, P_1$ ). Из  $\Delta SE_2P_2$  имеем

$$\frac{a_p}{\sin \beta} = \frac{a}{\sin \gamma}, \quad \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{S} \cdot t, \quad \text{где } S =$$

синодический период обращения планеты. Таким образом

$$a_p = \frac{a}{\sin \gamma}. \quad (6)$$

В таблице 5 приведены средние относительные рас-стояния планет.

<sup>1</sup> Среднее расстояние от Земли до Солнца называется астрономической единицей (а.е.). 1 а.е.=149600000 км, приблизительно 150 м.лн. км.

## Таблица 5

Название планеты	Среднее расстояние планеты от Солнца в а. е.
Меркурий	0,4
Венера	0,7
Земля	1,0
Марс	1,5
Юпитер	5,2
Сатурн	9,5
Уран	19,2
Нептун	30,1
Плутон	39,5

### 6. Изменение блеска планет, фазы планет

В изменении видимого блеска планет Коперник видел одно из важнейших подтверждений центрального положения Солнца. Так как планеты, подобно Земле, сами не светят, а лишь отражают солнечные лучи, то чем дальше они от Земли, тем менее ярки, и наоборот. Именно поэтому в противостоянии блеск планет наибольший.

Коперник правильно объяснил смену лунных фаз (§ 10) и предсказал фазы у планет<sup>1</sup>. Например, внутренние планеты в моменты элонгаций должны наблюдатьсь в виде половинок диска, как Луна в первой и последней четвертях, между нижним соединением и элонгацией — в виде узкого серпика. Между элонгациями и верхним соединением видно больше половины диска, а в верхнем соединении — полный диск (подобно полнолунию). Для верхних планет смена фазы выражена не очень заметно: к Земле повернут полный светильный диск планеты, когда она находится в противостоянии или в соединении, в остальное время земной наблюдатель видит всегда большую половины светлого полуширья планеты.

### § 17. Борьба за новое учение о строении мира (Дж. Бруно, И. Кеплер, Г. Галилей, И. Ньютон). Распространение коперниканства в России

Книга Коперника «Об обращении небесных кругов» явилась вызовом религии, однако католическая церковь в течение полу века не проявляла особого беспокойства по

<sup>1</sup> Фазы планет можно видеть лишь с помощью телескопа.

поводу нового учения. Это привело к тому, что книга Коперника свободно распространялась и выдержала не сколько изданий.

Причиной такого отношения церкви к учению о движении Земли явилось следующее. Книга была написана по-латыни и содержала сложные математические расчеты, поэтому была доступна только ученым. Изложение материала носило такой характер, что можно было прочесть значительную часть книги и не заметить в ней нового учения о Земле, Солнце и планетах. Именно поэтому распространение новых взглядов на строение мира даже среди специалистов-астрономов шло очень медленно. Кроме того, в книге совершенно отсутствовали какие бы то ни были отступления в область религиозных и библейских воззрений.

Больше того, учение о движении Земли вокруг Солнца вначале было воспринято как удобная математическая гипотеза. Дело в том, что в предисловии к книге говорилось о том, что новое учение является лишь гипотезой, более удобной для вычислений. Предисловие было написано богословом и математиком А. Осиандером, который таким путем пытался обезвредить учение Коперника, придать ему присланный для церкви характер, но так как предисловие не имело подписи, оно было приписано самому автору. Коперник не знал об этом и исправить ничего уже не мог, хотя для него новое учение было отображением существующей действительности. Это видно, в частности, из его дипломатически написанного послания папе Павлу III.

Все это привело к тому, что церковь отнеслась к книге Коперника вначале терпимо и выступила против нового учения лишь в самом конце XVI в., когда вскрылось его революционное значение в мировоззрении, чemu много способствовал итальянский философ Джордано Бруно (1548—1600), который был одним из замечательных людей эпохи Возрождения. Бруно разоблачил подлог Осиандера, показал, что новая система мира описывает однинную картину действительности, и изложил идеи Коперника общедоступным, без математических формул, языком, сделав их понятными даже для неспециалистов. Полупляризаторская деятельность Бруно (сначала в Италии, затем Швейцарии, Франции, Англии, Германии)

кроме этого, Бруно высказал новые идеи о строении мира. Он учил, что наблюдаемые звезды — такие же огромные солнца, как наше, что вокруг них также кружатся планеты, на которых развивается жизнь. Учение о бесконечности Вселенной и о множественности обитаемых миров в ней нанесло мощный удар по религиозным представлениям.

Благодаря Бруну, церковь ясно увидела, что учение Коперника представляется собой махровую ересь и совершенно несовместимо с религией. Джордано Бруно за 1600 г. в Риме по приговору инквизиции.

Учение Коперника постепенно приобретало последователей. Следующий важный шаг в развитии представлений о мире связан с именем Николауса Кеплера (1571—1630). В теории о строении мира все еще сохранялось понятие об идеальных движениях планет (равномерно и по окружностям), о различии между земным и небесным, о сфере неподвижных звезд. Кеплеру принадлежит заслуга установления действительного характера движения планет.

Получив от Тихо Браге (1546—1601), непревзойденного мастера точных наблюдений, результаты 20-летних наблюдений Марса, Кеплер долго работал над этим материалом, пытаясь определить действительный путь Марса вокруг Солнца. В результате он пришел к выводу, что Марс движется *неравномерно* и не по окружности, а по эллипсу. Были найдены два важных закона движения планет, известные сейчас под именем первого и второго законов Кеплера.

Первый закон определяет форму орбиты планеты: «*Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце*».

Второй закон определяет скорость движения планеты в разных точках ее орбиты: «*Каждая планета движется так, что ее радиус — вектор описывает равные площади в равные промежутки времени*».

Оба эти закона были изложены в книге «Новая астрономия»<sup>1</sup>, изданной в 1609 г.

Благодаря законам Кеплера астрономия навсегда осталась, и небесная физика, сопровождаемая разъяснениями о движении планеты Марс по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге».

вободилась от деферентов и эпициклов, система Коперника получила дальнейшее теоретическое развитие.

В 1618 г. Кеплер опубликовал третий закон, связывающий планеты и их спутников (к этому времени стали известны 4 спутника Юпитера, открытые Галилеем) в единую систему: «*Квадраты сидерических периодов обраращения планет относятся, как кубы больших полуосей их орбит*»

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (7)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — большие полуоси орбит планет.

Законы Кеплера показали, как происходит движение тел в солнечной системе, но они не отвечали на вопрос, почему именно так движутся планеты. Кеплер искал причину движения планет, более того, считал, что такой причиной является Солнце, но он не смог открыть закон, управляемый движением планет. Это сделал в 1687 г. Исаак Ньютона (1642—1727), показав строго математически, что планеты движутся под действием силы притяжения Солнца. И. Ньютон открыл закон всемирного тяготения, который является важнейшим законом природы, на основе которого объясняются почти все движения небесных тел и многие другие явления.

Исключительное значение в утверждении коперниканства имели телескопические открытия Галилео Галилея (1564—1642). Галилей использовал телескоп для наблюдения небесных тел и сделал первые телескопические открытия. Этим он положил начало телескопической астрономии. С помощью изготовленного им самим телескопа, дававшего всего тридцатикратное увеличение, в течение 1610 года Галилей открыл горы на Луне (рис. 38), фазы Венеры (рис. 39), четыре спутника Юпитера (они называются галилеевыми), пятна на Солнце, показал, что Млечный путь представляет громкое скопление звезд. Эти открытия убедительно говорили о том, что нет разницы между земным и небесным. На самом деле, на Луне, подобно Земле, имеются горы и равнины, ошибочно принятые тогда за моря; Венера светит отраженным светом. Обнаружение «Луны» у Юпитера, который оказался подобен солнечной системе, ликвидировало исклюющительное положение Земли как планеты, имеющей спутника. Пяtnа на

<sup>1</sup> Полное название «Новая астрономия, причинно обоснованная, или небесная физика, сопровождаемая разъяснениями о движении планеты Марс по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге».

Солнце, их движение позволили сделать заключение о том, что Солнце медленно вращается, делая один оборот примерно за месяц.

самое главное значение телескопических открытий Галилея заключалось в подтверждении истинности учения Коперника. Именно так были оценены работы Галилея, как и работы Кеплера, их современниками.

Так же поняла и оценила результаты этих исследований и церковь и резко изменила отношение к учению Ко-

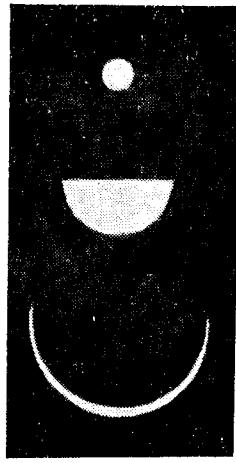


Рис. 39. Фазы Венеры.

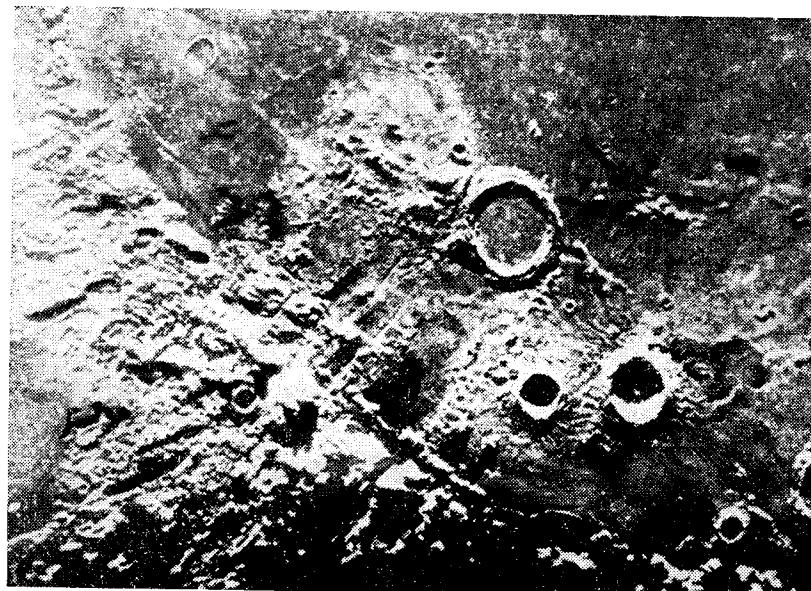


Рис. 38. Современный снимок части лунной поверхности в области Моря Дождей. В верхней части расположены Апеннины, самый большой цирк — Архимед.

Открытия Галилея, опубликованные на итальянском языке в труде «Звездный вестник», произвели на совремников спешомлющее действие и стимулировали телескопические наблюдения неба в ряде стран Европы. Но

перника. Была признана его полная несовместимость с религиозным учением. В 1616 г. руководители католической церкви приняли решение о запрещении книги Коперника. Она была включена в «Индекс» («Список запрещенных книг»)<sup>1</sup>. Это решение было основано на том, что учение о движении Земли и неподвижности Солнца должно и противно священному писанию и что это учение многими принимается за истинное. Были запрещены также все сочинения с высказываниями в пользу коперниканства. Галилею под угрозой ареста предложили отказаться от коперниковских взглядов.

Несмотря на это Галилей написал большое сочинение под названием «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», в котором в виде диалога трех лиц: Сальвиати — сторонника Коперника, Симпличио — поклонника Птолемея и Сагредо — центрального ученого — отстаивал и утверждал новое учение. Книга вышла в свет в 1632 г., пройдя церковную цензуру, но Галилей был привлечен к суду инквизиций.

<sup>1</sup> Это запрещение было снято только в 1835 г. В 1822 г. коллегия кардиналов постановила признать учение Коперника допустимым к распространению в католических странах.

Измученный болезнью, тюрьмой, угрозами пыток, смигдиятил Галилей подписал текст «отречения» от учения Коперника и от своих взглядов. Однако он остался верен им в последние годы жизни и не только продолжал заниматься наукой, но и сделал ряд важных открытий.

Работы Кеплера и Галилея привели к укреплению нового учения о мире. Хотя по условиям своего времени Кеплер и Галилей не смогли полностью порвать со старыми воззрениями, они по существу завершили создание стройной теории Коперника. А с помощью закона всемирного тяготения Ньютона было окончательно обосновано это учение, и гелиоцентрическая система мира в конце концов получила признание как учение о действительном устройстве солнечной системы.

Следует сказать несколько слов о распространении коперниканства в России. Первые сведения о новой системе мира появились в России еще до 1543 г., т. е. до выхода в свет книги Коперника, но они не получили нужного распространения и остались в немногих рукописях, ибо на Руси тогда господствовали представления о мире в духе Аристотеля—Птолемея. Письменные сообщения о новой теории были сделаны лишь в середине XVII в.

Православная церковь, подобно католической и лютеранской, также рьяно запрещала всякие выводы об устройстве мира, противоречащие представлениям «священного писания».

Гелиоцентрические взгляды на мир начали распространяться в России лишь с XVII века. В 1717 г. по распоряжению Петра I была напечатана «Книга мироздания» Х. Гюгенса, которая сыграла важную роль в распространении и популяризации гелиоцентрического мировоззрения и вообще астрономических знаний в России, хотя и встретила многочисленные выступления сторонников религиозных представлений о мире. Так И. Т. Поншков (1653—1726), мастер монетного двора, вследствие стоял на точке зрения церковной идеологии. Он говорил о новом учении как об умственном разврате, а об авторе гелиоцентрической системы писал: «А проклятый Коперник, багуту соперник.. Мойсеево писание, иже от откровения божия написанная, ничтожит. И тому своему лжесоставному вымыслу никакова от божественного писания

свидетельства не является, но токмо своим богоопротивным умыслом утверждает»<sup>1</sup>.

После смерти Петра I некоторое время церковники молчали, учение о движении Земли особенно не преследовалось, хотя широкое поощрение его также не наблюдалось. Так, после долгих проволочек в 1740 г. в Петербурге был напечатан перевод книги Б. Фонтенеля «Разговоры о множестве миров». Но уже в 50-е годы Синод провел ряд дел о научных ересях, не совместимых с учением православной церкви, в первую очередь об антирелигиозном учении Коперника, в какой бы форме литературного произведения оно ни выступало: в научных сочинениях, стихах, рассказах и т. д. В докладе Синода о запрещении по всей империи книг, противных вере и нравственности, было сказано: «дабы никто отпойль ничего писать и печатать как о множестве миров, так и о всем другом, вере святой противном и с честными правами несогласном, не отваживался»...

В это время для распространения коперниканства в России, несмотря на запрет Синода<sup>2</sup>, много сделал М. В. Ломоносов (1711—1765), он не только защищал и пропагандировал ненавистное церковникам новое учение о Земле, планетах и Солнце, но получил еще одно веское доказательство справедливости системы Коперника: в 1761 г. М. В. Ломоносов наблюдал прохождение Венеры по диску Солнца (§ 11) и открыл у нее плотную атмосферу. Это открытие сильно взволновало церковников, так как подтверждало вывод о возможности жизни на других планетах.

Во время царствования Екатерины II резко изменилось положение духовенства: оно было подчинено светской власти. Начали широко проводиться просветительские мероприятия. Проповедование сделалось всесословной нуждой. Началось усиленное печатание книг. Произошли изменения и в отношении к новому учению: гелиоцентрическая система перестала быть запретным плодом: начали печататься книги, излагавшие ее для широкого круга читателей, ее стали преподавать в школах.

<sup>1</sup> Б. Е. Райков, Очерки по истории гелиоцентрического мировоззрения в России, АН СССР, изд. 2, М.—Л., 1947, стр. 182.  
<sup>2</sup> Против М. В. Ломоносова Синод возбудил в 1757 г. целое дело и подал жалобу империатрице Елизавете. К счастью, для Ломоносова все это кончилось ничем.

А в 1798 г. Синод дал указание обучать «copeрниковской ереси» учеников духовных академий. Теперь церковники занялись задачей согласовать учение о движении Земли с религиозной догмой, надо было показать, что гелиоцентрическая система не только не противоречит «откровенному учению», но утверждает его, «прославляя творца вселенной».

Новые выступления православной церкви против теории Коперника имели место после войны 1812 г., когда правящие сферы России охватил религиозный мистицизм, но это было уже запоздалым отголоском многовековой борьбы, которая велась вокруг гелиоцентрического учения.

### § 18. Дальнейшее изучение солнечной системы

Благодаря применению телескопа в XVII в. были сделаны важные открытия, относящиеся к телам солнечной системы.

Кроме уже описанных открытий и исследований Галилея, Кеплера, Ньютона, отметим следующие. Ян Гевелий (1611—1687), польский астроном, много лет посвятил изучению лунной поверхности. Итоги этой работы составили капитальный труд «Селенография» (1647), который содержал подробное описание лунных поверхностных форм и был снабжен атласом гравюр. Кстати, названия многих горных хребтов и «морей» на Луне, данные Гевелием, сохраняются и в наше время.

Гевелий, а также другой польский ученый Станислав Роль-Любенецкий (1623—1675) дали обзор всех комет, наблюдавшихся с 2312 г. до н. э. вплоть до 1665 г., всего 415 появлений. Вопрос о роли комет в устройстве мира привлекал внимание многих ученых. В конце XVII века изучением комет занялся Эдмунд Галлей (1656—1742).

Изучив прежние материалы, характеризовавшие движение комет, он пришел к выводу, что в 1456, 1531, 1607 и 1682 г. г. наблюдалась одна и та же комета. Галлей заключил, что эта комета, названная впоследствии кометой Галлея, подобно планетам, обращается вокруг Солнца, делая один оборот за 75-76 лет. Проверить правильность вывода Галлея можно было лишь при следующем появлении кометы, которое Галлей предсказал на 1758 г. Подтверждение вывода Галлея явилось одновременно

блестящим подтверждением и закона всемирного тяготения Ньютона, и поэтому о нем стоит здесь рассказать подробнее.

Появление кометы Галлея ожидалось в начале 1758 г. Незадолго до этого Алексис Клеро (1713—1765) взялся вычислить те возмущения, которые комета могла претерпеть со дня своего последнего появления с северной стороны Юпитера и Сатурна. Вычисления показали, что комета опоздает и появится лишь в начале 1759 г. Так оно и произошло. Ненавистники науки, которые видели в запоздании кометы подтверждение неверности теории, были посрамлены. С другой стороны, предсказание появления кометы во многом способствовало ослаблению предрасудков, обычно связывавшихся с внезапно появлявшимися кометами.

Таким образом, было установлено, что кометы являются членами солнечной системы<sup>1</sup>.

Христиан Гюйгенс (1629—1695) в 1655 г. открыл спутник У Сатурна (Титан) и показал, что загадочные придатки у этой планеты, обнаруженные еще Галилеем, представляют собой точное кольцо около Сатурна. Гюйгенс правильно объяснил, почему кольцо наблюдается не всегда. Благодаря своей исключительно малой толщине кольцо

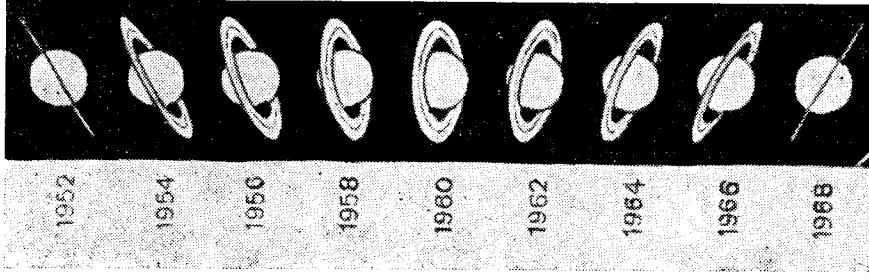


Рис. 40. Изменение видимости Сатурна.

<sup>1</sup> Вместе с Клеро огромную вычислительную работу проделали Жозеф Жером Лаланд и одна из первых французских женщин-ученых Николь Гортензия Лелот, имя которой увековечено в названии цветка гортензии, привезенного Лежантрилем из Индии.

не видно, когда оно повернуто к наблюдателю или к Солнцу ребром; в последнем случае мы его тоже не видим, так как оно не освещено солнечными лучами (рис. 40).

В 1675 г. Джованни Доминик Кассини (1625—1712) обнаружил, что колцо Сатурна состоит из внутреннего и наружного<sup>1</sup>, а также открыл еще четыре новых спутника у этой планеты: Япета (1671), Рети (1672), Диону и Тифию (1684).

В XVII в. были сделаны первые измерения расстояний в солнечной системе. В 1672 г.<sup>2</sup> Д. Кассини и Ш. Риш привели наблюдение Марса из Парижа и Кайены (Южная Америка), который в это время был в противостоянии, и определили расстояние до него. Это позволило вычислить расстояние от Земли до Солнца (§ 19), оно оказалось равным 140 млн. км. Хотя астрономическая единица содержит 149,6 млн. км (§ 16), результат Кассини был большим достижением астрономии того времени, так как впервые были получены правильные представления о размерах солнечной системы.

### § 19. Определение расстояний до тел солнечной системы

Определение расстояний до небесных тел производится тем же способом, что и определение расстояний на Земле до недоступных предметов. При определении

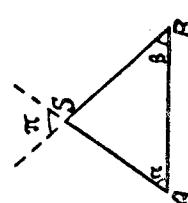


Рис. 41. К определению параллакса.

расстояния от А до недоступного тела S (рис. 41) изменяют некоторый отрезок АВ (базис) и углы  $\alpha$  и  $\beta$ , образуемые направлениями на тело S с базисом.

Перемещение наблюдателя из А в В сопровождается

<sup>1</sup> В настоящее время щель между внешним и средним кольцами Сатурна (есть еще третье внутреннее кольцо, самое слабое) называется щелью или делением Кассини.

<sup>2</sup> В 1659 г. Хойенс получил довольно близкое к действительному значение расстояния от Земли до Солнца.

кажущимся, *параллактическим*, смещением предмета S на фоне далеких тел (или на фоне звезд). Это смещение равно углу  $\Delta$ , под которым с данного предмета виден базис. Угол  $\Delta$  называется *параллаксом* тела S для данного базиса АВ. Если известен базис и параллакс, расстояние до тела S может быть вычислено с помощью тригонометрических формул.

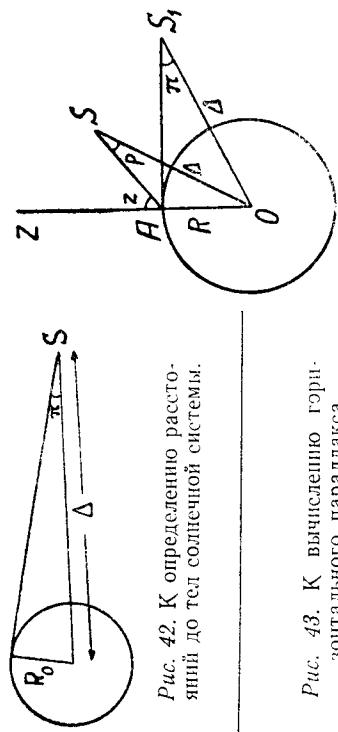


Рис. 42. К определению расстояния до тел солнечной системы.

Легко понять, что при одном и том же базисе параллакс тела тем меньше, чем дальше от базиса находится это тело.

Для определения расстояния в солнечной системе в качестве базиса берется экваториальный радиус Земли ( $R_0 = 6378 \text{ км}$ ). Угол, под которым с данного тела виден экваториальный радиус Земли, называется *горизонтальным экваториальным параллаксом*  $\pi$  этого тела<sup>1</sup> (рис.

<sup>1</sup> Для наблюдателя А параллакс светила S равен  $\rho$  (рис. 43). В момент, когда светило наблюдалось на горизонте в положении S ( $\angle OAS_1 = 90^\circ$ ), его параллакс наибольший и равен  $\pi$ . Поэтому он называется горизонтальным.

Горизонтальный параллакс светила легко можно вычислить по параллаксу  $\rho$ , если известно значение зенитного расстояния светила в положении S ( $\angle ZAS$ ). Из треугольников OAS и OAS<sub>1</sub> имеем

$$\frac{\sin \rho}{\sin (180^\circ - z)} := \frac{R}{\Delta} \quad \text{и} \quad \frac{\sin \pi}{\sin 90^\circ} = \frac{R}{\Delta},$$

$$\frac{\sin \pi}{\sin 90^\circ} = \frac{\sin \rho}{\sin z} \quad \text{и} \quad \sin \pi = \frac{\sin \rho}{\sin z}.$$

42). Зная радиус Земли  $R_0$  и параллакс  $\pi$  тела  $S$ , расстояние до него  $\Delta$  можно вычислить по формуле

$$\Delta = \frac{R_0}{\sin \pi}. \quad (8)$$

Таким образом, определить расстояние до небесного тела — значит определить его параллакс.

Параллакс тел солнечной системы, кроме Луны, малы и измеряются секундами дуги, поэтому в формуле (8)  $\sin \pi$  можно заменить значением  $\pi$  в радианах

$$\Delta = \frac{R_0}{\pi} = \frac{206265'' R_0}{\pi''}. \quad (8')$$

Параллакс Луны составляет в среднем  $57'2'',70$ , что соответствует расстоянию в  $384\,400$  км или в  $60$  земных радиусов.

Впервые расстояние Луны от Земли оценил Гиппарх, используя метод Аристарха, основанный на затмениях, и получил, что оно равно почти  $59$  радиусам Земли. Расстояние от Земли до Солнца по существу впервые было вычислено только в XVII в. Кассини (§ 18) по параллаксу Марса, определенному во времени его противостояния. Оценки расстояния до Солнца, сделанные Аристархом и позднее Гиппархом, были примерно в  $20$  раз меньше действительного значения.

## § 20. Определение параллакса Солнца

Определение параллакса Солнца очень важно, так как он дает значение астрономической единицы. Как правило, параллакс Солнца вычисляется через параллакс близкой планеты, определенной в момент противостояния. В качестве такой планеты сначала использовали Марс, а позднее астероид Эрос, размеры которого очень незначительны (около  $20$  км) и который может под雄厚ть к Земле на расстояние до  $23$  млн. км.

Так как значения параллаксов малы, то можно записать

$$\pi = \frac{p}{\sin z}. \quad (9)$$

Значение параллакса определяется при наблюдении тела из двух точек земного шара (так определяли параллакс Марса Кассини и Ришё) или из одной точки, но в разное время суток.  
 $\frac{1}{1} \frac{par\partial=206265''}{}$

Дело в том, что при непосредственном определении параллакса Солнца получаются очень неточные результаты и из-за большой удаленности Солнца (параллакс мал), и из-за ошибок в наблюдениях, возникающих от сильного нагревания инструментов солнечными лучами. На рис. 44 изображены Солнце, Земля и планета, отмечены параллаксы Солнца  $\pi_S$  и планеты  $\pi_P$  и рас-

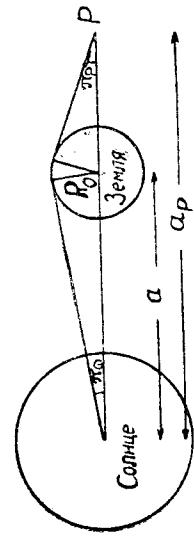


Рис. 44. К определению параллакса Солнца.

стояния от Солнца Земли  $a$  и планеты  $a_p$ . Так как на основании формулы (8')  $a = \frac{R_0}{\pi_C}$  и  $a_p - a = \frac{R_0}{\pi_P}$ , то  $\pi_C =$

$$= \pi_P \frac{a_p - a}{a} = \pi_P \left( \frac{a_p}{a} - 1 \right).$$

Отношение  $\frac{a_p}{a}$  с большой точностью вычисляется по третьему закону Кеплера (формула, 7 § 17).

$$\frac{T_p^2}{T^2} = \frac{a_p^3}{a^3}, \text{ откуда } \frac{a_p}{a} = \left( \frac{T_p}{T} \right)^{2/3}.$$

Окончательно

$$\pi_C = \pi_P \left[ \left( \frac{T_p}{T} \right)^{2/3} - 1 \right]. \quad (10)$$

Малая планета Эрос, открытая в 1898 г., в противостояние 1930—1931 гг. подошла к Земле на минимальное расстояние около  $0,17$  а. е. В это время его параллакс достиг  $50''$ . В результате тщательных наблюдений Эроса на ряде обсерваторий мира параллакс Солнца получился равным

$$\pi_C = 8'',790 \pm 0'',001.$$

До этого времени было общепринято значение параллакса Солнца  $\pi_C = 8'',80$  и  $1 \text{ a.e.} = (149450000 \pm 17000) \text{ км}$ .

Наиболее точное значение астрономической единицы получено в 1961—1963 гг. в СССР и США по радиолокации Меркурия, Венеры, Марса. На основе этих измерений найдено значение астрономической единицы  $1 \text{ a.e.} = (149597500 \pm 500) \text{ км}$ .

В связи с этим XII съезд Международного астрономического союза (МАС), проходивший в Гамбурге в 1964 г., принял такие значения  $\pi_C = 8'',794$  и  $1 \text{ a.e.} = 149\,600\,000 \text{ км}$ , эти значения будут использоваться в астрономических ежегодниках с 1970 г.

### § 21. Определение линейных размеров планет, Солнца, Луны

Поперечник планеты, Солнца, Луны, может быть вычислен, если известно расстояние  $\Delta$  до рассматриваемого

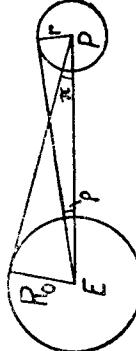


Рис. 45. К определению радиуса пебесного тела.

го тела и его угловый радиус  $\rho$  или диаметр  $2\rho$ . Угол, под которым с Земли наблюдается диск светила, называется его угловым диаметром. Угловые диаметры Солнца, планет и Луны определяются непосредственно из наблюдений (таблица 6). На рис. 45 изображены Земля Е и светило Р,  $\alpha$  — параллакс светила,  $r$  — его линейный, а  $\rho$  — угловой радиусы. Так как  $R_0 = \Delta \sin \alpha$ ,  $r = \Delta \sin \rho$ , то  $r = R_0 \frac{\sin \rho}{\sin \alpha}$  или

$$r = R_0 \frac{\rho}{\alpha}. \quad (11)$$

В таблице 6 приведены экваториальные радиусы Солнца и планет.

Как правило, планеты несколько скаты в направлении оси вращения. Скатие планеты тем сильнее, чем быстрее вращается планета, и определяется отношением разности значений экваториального  $a$  и полярного  $b$  радиусов планеты к экваториальному, т. е.

$$\epsilon = \frac{a - b}{a}.$$

### Сжатия планет даны в таблице 6.

Таблица 6

Название тела	Угловой радиус в среднем соединении или противоположном	Линейный радиус		Сжатие
		в км	в радиусах Земли	
Солнце	16' (на 1 а.е.)	696 000	109	0,0
Меркурий	5''	2 420	0,38	0,0
Венера	30,7	6 200	0,97	0,0
Земля	—	6 378	1,00	1:298,3
Марс	8,9	3 400	0,53	1:192
Юпитер	23,4	71 400	11,20	1:15,4
Сатурн	9,8	60 400	9,45	1:9,74
Уран	1,8	23 800	3,75	1:14
Нептун	1,1	22 300	3,50	1:45

### § 22. Измерения Земли. Размеры и форма Земли

Практически любое измерение расстояния в солнечной системе так или иначе связано со значением радиуса Земли. Отсюда становится ясно, насколько важно знать точные размеры Земли, не говоря о многих других задачах.

Первое дошедшее до нас научное измерение величины земного шара принадлежит Эратосфену. Он заметил, что в дни летнего солнцестояния в Сиене Солнце кульминирует в зените, а в Александрии, которая находится к северу от Сиены (ныне Асуан), оно отстоит на  $7^{\circ},2$  от зенита (рис. 46). На основании этого он заключил, что дуга земного шара от Александрии до Сиены составляет тоже  $7^{\circ},2$ , или  $\frac{1}{50}$  часть полной окружности.

Расстояние от Александрии до Сиены считалось равным 5000 египетских стадий, поэтому длину дуги земного шара Эратосфен оценил в 250 000 египетских стадий. Значение египетской стадии не дошло до наших дней, поэтому трудно судить о точности результата, полученного Эратосфеном, но зато, несмотря на грубые оценки исходных количественных данных, измерение Эратосфена основано на прочном научном принципе.

Неоднократные измерения, связанные с определением длины одного градуса земной окружности, были прове-

дены в XVII в. Виллеборд Снеллиус (1591—1626) привел в Голландии в 1617 г. ряд измерений и нашел, что длина градуса равна 67 милям (примерно 108 км), один из его учеников дал значение в 69 миль, результат, Ричард Норвуд (1590?—1675) в 1636 г. измерял расстояние между Лондоном и Иорком, получил значение

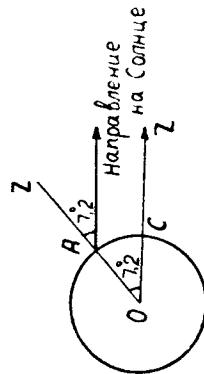


Рис. 46. К оценке размеров Земли Эратосфеном.

длины одного градуса с погрешностью всего в полкилометра. В 1671 Жан Пикар (1620—1682) произвел измерения близ Парижа и нашел, что длина одного градуса широты составляет примерно 111 200 м.

Зная длину окружности и подаяя Землю идеальным шаром, нетрудно определить радиус Земли. Однако вскоре пришлося отказаться от представления, что Земля — идеальный шар. Опыты с маятником, качания которого в экваториальных широтах происходят медленнее, чем в Европе, заставили предположить, что Земля несколько ската в направлении оси вращения. Ньютона объяснил, что скатие обусловлено действием тяготения и вращения Земли, и получил для сжатия Земли ( $\S$  21) значение  $\varepsilon = 1 : 230$ . В настоящее время скатие Земли принято равным  $\varepsilon = 1 : 298,3$ .

В измерениях, связанных с определением размеров Земли, называемых *градусными измерениями*, важно как можно точнее измерить линейное расстояние между выбранными двумя пунктами А и В на земной поверхности, т. е. измерить часть длины полной окружности Земли, проходящей через эти пункты. Угловое выражение дуги АВ находится астрономическими методами.

Снеллиус предложил метод *триангуляции*, при котором непосредственно измеряется не дуга АВ (рис. 47), а небольшое расстояние — базис  $(AC)$  и углы.

Смысл

метода триангуляции заключается в следующем. Вдоль линии АВ, длину которой надо измерить, выбирается некоторое количество точек С, D, E ... на расстояниях в 30—40 км одна от другой, причем так, чтобы из каждой точки, где обычно устанавливают специальные вышки, были видны, по крайней мере, две другие точки. Измерения сводятся к определению углов в треугольниках и очень tatsächlich определению базиса АС. Зная базис АС и все углы в треугольнике АСД, можно вычислить стороны АД и DC и перейти к расчету сторон треугольника DCE и т. д. Получив значения сторон АД, DF, FB и зная все углы, можно спроектировать эти стороны на АВ и вычислить длину АВ.

Многочисленные измерения дуг в разных странах и на разных широтах, выполненные к настоящему времени, показали, что длина дуги  $1^\circ$  меридiana близ экватора составляет 110,6 км, а около полюсов 111,7 км. Это означает, что Земля по форме близка к сфере-роиду (эллипсоиду вращения), радиусы которого: экваториальный  $a = R_0 = 6378,24$  км, полярный  $b = 6356,86$  км (данные Ф. Н. Красовского и А. А. Изотова, полученные в 1940 г.).

В последние годы форма Земли исследуется с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Истинная фигура Земли не является в точности эллипсоидом вращения и отличается от трехсекционного эллипсоида.

Поверхность Земли вообще не может быть представлена ни одной из известных математических поверхностей. Поэтому Земле приписывают только ей присущую фигуру и называют ее *геоидом*. Поверхность геоида представляет собой такую поверхность, нормальями к которой в любой точке являются отвесные линии и которая совпадает в открытом океане с поверхностью покоящейся свободной воды.

Поверхность геоида очень незначительно отличается от поверхности эллипсоида вращения.

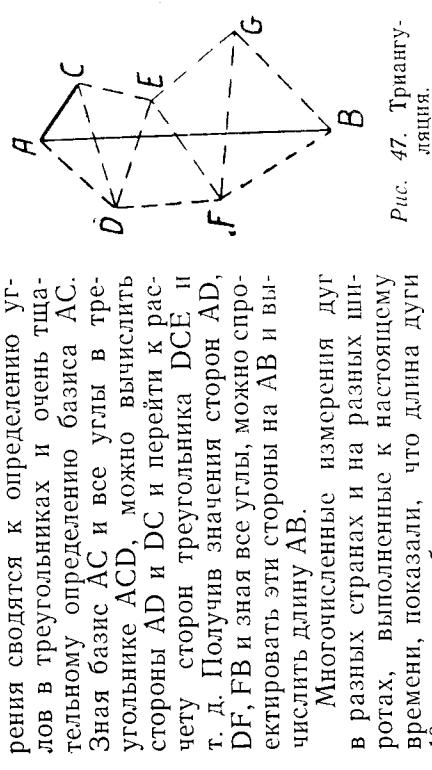


Рис. 47. Триангуляция.

## § 23. Строение солнечной системы

Все сказанное о телах солнечной системы с учетом последующих открытий позволяет перейти к описанию современных представлений о строении нашей планетной системы.

По имени центрального тела системы — Солнца наша планетная система называется солнечной системой. Солнце — звезда, т. е. горячее самосветящееся тело. Его перечник в 109 раз превосходит диаметр Земли и составляет 1 390 000 км.

В состав солнечной системы входят девять больших планет, больше 1600 малых планет, или астероидов; около 1000 комет, метеорные тела и спутники планет. Все эти тела, кроме спутников, движутся вокруг Солнца под действием его притяжения; спутники обращаются вокруг планет.

Большие планеты являются основными членами солнечной системы и представляют собой, подобно Земле, холодные шарообразные тела. В порядке удаления от Солнца они называются Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон. Поперечник Земли составляет примерно 13 тыс. км. Самой маленькой планетой в солнечной системе является Меркурий (4800 км), самой большой Юпитер, диаметр которого достигает 143 000 км, что в 11 раз больше диаметра Земли. Размеры планет даны в таблице 6 (§ 21).

Малые планеты, астероиды, — тоже холодные тела, но они не имеют определенной формы.

Кометы, «хвостатые звезды», представляют собой одну или несколько глыб вещества, образующих практически невидимое ядро кометы, размерами не больше нескольких десятков километров, окруженных разреженной газовой оболочкой.

Метеорные тела — незначительные по размерам кусочки твердого вещества. Спутники, подобно планетам, являются хладными шарообразными телами. Вокруг шести планет под действием их притяжения обращается 32 спутника. Земля имеет одного спутника Луны, Марс — двух, вокруг Юпитера обращается 12, вокруг Сатурна — 10, у Урана имеется 5, у Нептуна — 2. Меркурий, Венера, Плутон спутников не имеют.

Несмотря на большое разнообразие тел, входящих в солнечную систему, основными членами ее являются большие планеты, которые обладают рядом закономерностей, характеризующих солнечную систему как гармоническое образование. По классификации Д. Тер-Хаара, широко использованной О. Ю. Шмидтом, *основные закономерности* солнечной системы могут быть сведены в следующие четыре группы: 1 — закономерности движения планет; 2 — закономерности планетных расстояний; 3 — разделение планет на две группы, 4 — распределение момента количества движения. Подходя к характеристике солнечной системы с точки зрения основных закономерностей, такие особенности ее, как: наличие астероидов, комет, спутников, метеорных тел, особенностей в их движении — следует считать частными особенностями солнечной системы.

В этом параграфе мы рассмотрим только первые две группы закономерностей солнечной системы.

### 1. Закономерности движения планет

Планеты солнечной системы движутся по эллипсам с очень малыми эксцентриситетами (таблица 7), в одном общем фокусе которых находится Солнце. Эксцентриситеты планетных орбит настолько малы (наибольшие у орбит Меркурия — 0,20 и Плутона — 0,25), что эти эллипсы практически не отличаются от окружностей.

Глоскости планетных орбит наклонены к плоскости земной орбиты (к плоскости эклиптики) под малыми углами (табл. 7).

Планеты	Эксцентриситет орбиты	Наклонение плоскости орбиты к плоскости эклиптики	Наклонение планеты к плоскости орбиты	Период вращения
Меркурий	0,206	7°00'	около 90°	59 д
Венера	0,007	3°24'	84°	247 д
Земля	0,017	0°00'	63°33'	23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> 4 <sup>s</sup>
Марс	0,093	1°51'	65°12'	24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup>
Юпитер	0,048	1°19'	87°	9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 1 <sup>s</sup>
Сатурн	0,056	2°30'	63°	10 <sup>h</sup> 4 <sup>m</sup> 1 <sup>s</sup>
Уран	0,047	0°46'	2°	10 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>
Нептун	0,009	1°47'	61°	15 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup>
Плутон	0,247	17°09'	—	—

<sup>1</sup> Для экваториальной зоны.

## 2. Закономерность планетных расстояний

Одна из особенностей солнечной системы — наличие определенной закономерности в расстояниях планет от Солнца. Так как планеты движутся по эллипсам, то обычно под расстоянием планеты от Солнца понимают ее среднее расстояние или, точнее, большую полуось ее эллипса  $a$ . Расстояние до планеты в астрономических единицах можно вычислить по формуле:

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n,$$

где  $n$  нужно последовательно давать значения —  $\infty, 0, 1, 2, 3, 4 \dots$  Эта формула выражает эмпирический закон Боде — Тицуса, полученный в XVIII в. В таблице 8 приведены значения расстояний до планет, вычисленные по этой формуле и действительные

Таблица 8

Планета	$n$	Вычисленное расстояние (в а. е.)	Действительное расстояние (в а. е.)
Меркурий	$-\infty$	0,4	0,39
Венера	0	0,7	0,72
Земля	1	1,0	1,00
Марс	2	1,6	1,52
—	3	2,8	—
Юпитер	4	5,2	5,20
Сатурн	5	10,0	9,55
Уран	6	19,6	19,20
Нептун	$-\frac{1}{7}$	38,8	30,09
Ультон	7	39,5	—

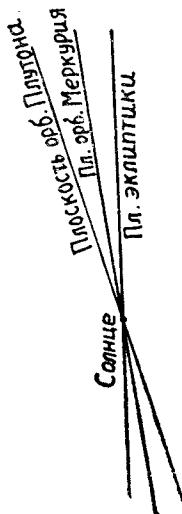


Рис. 48. Наклон плоскостей орбит Плутона и Меркурия к плоскости земной орбиты.

Почти все планеты врачаются в прямом направлении, т. е. в том же, в каком движутся вокруг Солнца, за исключением Венеры и Урана. Для Меркурия долгое время считали, что его период вращения равен периоду обращения. Приведенное в таблице 7 значение периода вращения получено радиолокационным методом. Период вращения Венеры тоже стал известен недавно благодаря радиолокационным измерениям в СССР и США (1961—1962). Венера вращается в обратном направлении, поэтому ее «сутки», т. е. промежуток времени от восхода Солнца до его следующего восхода, содержит 118 земных суток. Сутки на Меркурии еще длиннее: около 200 наших суток. Следует заметить, что в периодах вращения планет наблюдается большое разнообразие. Особенно быстро вращаются Юпитер и Сатурн.

Оси планет под разными углами (таблица 7). У Марса наклон оси почти такой же, как у Земли, значит, на Марсе происходит смена времен года, хотя «год» там, а стало быть, и каждое время года почти в два раза длиннее, чем у нас. На Юпитере, так как его ось перпендикулярна к плоскости орбиты, смены времени года не бывает.

## 3. Астероиды и meteorные тела

Отсутствие планеты, соответствующей  $n=3$  в законе Боде — Тицуса, определило усиленные поиски таковой в конце XVIII в. И вот 1 января 1801 г. Джузеппе Гассани (1746—1826) открыл Цереру. Ее орбита, вычисленная Карлом Фридрихом Гаус-

сом (1777—1855), действительно оказалась заключенной между орбитами Марса и Юпитера. Открытие Цереры не явилось большой неожиданностью, но открытие Генрихом Ольберсом (1758—1840) в 1802 г. еще одногранеты (Паллады), обращающейся вокруг Солнца примерно на том же расстоянии, что и Церера, было совсем неожиданно. Вскоре были открыты еще две планеты: Юнона в 1804 г. и Веста в 1807 г. Новые планеты оказались гораздо меньше обычных планет, у них совсем не наблюдалась диски и их трудно было отличить от звезд. Их стали называть астероидами (звездоподобными), или малыми планетами. Пятый астероид был открыт в 1845 г., в 1847 г., — еще два, в 1848 еще один. С тех пор число их непрерывно увеличивалось, особенно после применения фотографического метода поисков в 1891 г. В настящее время известно больше 1600 астероидов.

Орбиты малых планет в основном располагаются в пространстве между орбитами Марса и Юпитера, хотя некоторые из них выходят за пределы этой области. Большие полуоси орбит астероидов колеблются в значительных пределах: от  $a = 1$  а.е. (Икар) до  $a = 5,8$  а.е. (Гидальго). Кроме того, характерной особенностью орбит астероидов являются значительные эксцентриситеты их (от  $e = 0$  до  $e = 0,8$ ) и большие наклоения к плоскости эклиптики (от  $i = 0^\circ$  до  $i = 43^\circ$ ). Так, Гидальго движется по очень вытянутой орбите ( $e = 0,65$ ) и почти достигает орбиты Сатурна, наклонение его орбиты  $i = 42^\circ 5$ . Эрос заходит внутрь орбиты Марса, благодаря чему может приближаться к Земле на небольшое расстояние. Однако несмотря на исключительные случаи, огромное большинство астероидов (97%) имеет орбиты с большими полуосами, заключенными в пределах от  $a = 2,2$  а.е. до 3,6 а.е. Они образуют в солнечной системе пояс астероидов. Таким образом, большинство орбит астероидов не представляет никаких интересных особенностей, отличаясь от орбит больших планет лишь несколько большими эксцентриситетами и наклонениями. Однако среди астероидов имеются и интересные астероиды и даже группы их. Укажем на некоторые из них.

**Эрот** (Эрос). Эта планета открыта в 1898 г. Эрос имеет необычную для астероидов орбиту с большой полуостью  $a = 1,46$  а.е., эксцентриситетом  $e = 0,22$ , наклонением  $i = 10^\circ 51'$ . Благодаря этому во время некоторых противостояний Эрос уменьшается в размерах, астероиды переходят

стоянний Эрос может подходить к Земле (рис. 49) на расстояние до 23 000 000 км. Используется для определения параллакса Солнца.

**Астероид Икар** (открыт в 1949 г.) интересен тем, что среднее расстояние его от Солнца почти равно земному ( $a = 1,08$  а.е.), а время обращения близко к году ( $T = 409$  д.). Эксцентриситет очень велик ( $e = 0,83$ ). Икар может значительно сближаться с Землей — до 0,05 а.е. (окколо 7 млн. км).

**Группа троянцев.** 15 астероидов, получивших имена героев Троянской войны (Ахиллес, Гектор, Нестор, Агамемнон и др.), движутся вокруг Солнца по орбитам, близким к орбите Юпитера, оставаясь все время впереди Юпитера на  $60^\circ$  (10 астероидов) или позади него на  $60^\circ$  (5 астероидов), так что Солнце, Юпитер и астероиды образуют равносторонний треугольник. Открытие троянцев подтвердило возможность такого частного случая движения в задаче трех тел, найденного теоретически Жозефом Луи Лагранжем (1736—1813) в 1772 г.

Все астероиды очень малы. Непосредственно определены размеры только у четырех из них, у которых наблюдаются маленькие диски. Самая крупная из этих малых планет Церера (780 км), наименьшая — Юнона (200 км). Кроме этих планеток (Церера, Паллада, Юнона, Веста) непосредственно определялись еще размеры Эроса (при мерно 20 км). Размеры других астероидов были оцененыкосвенными методами. Оказалось, что поперечники большинства малых планет меньше 80 км. Некоторые астероиды из открываемых в последние годы совсем маленькие. Так, Гермес не больше 400 м. По существу это уже не малая планета, а что-то промежуточное между астероидом и метеорным телом. Надо полагать, что в солнечной системе очень много мелких астероидов, а также метеорных тел, количество которых непрестанно пополняется в результате дробления астероидов. Таким образом, постепенно уменьшается в размерах, астероиды переходят

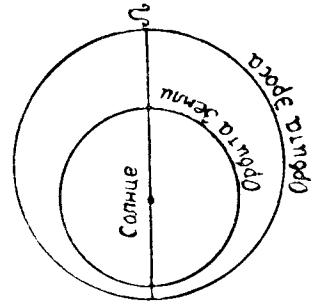


Рис. 49. Орбита Эроса.

в метеорные тела, которые не могут быть видимы на своих орбитах и обнаруживаются только тогда, когда попадают в земную атмосферу. Если в атмосфера влетает довольно крупное тело, оно может даже выпасть на поверхность Земли в виде метеорита. Самые мелкие частицы, заполняющие межпланетное пространство (размеры их порядка долей микрома) образуют космическую пыль.

#### 4. Кометы

По внешнему виду кометы очень изменчивы и похожи на туманные пятна. Более яркая центральная часть кометы, называемая *ядром*, окружена туманной оболочкой — *комой*, яркость которой постепенно ослабевает к краям. Ядро и кома — образуют *голову* кометы. У многих комет имеется еще *хвост*. Голова и хвост кометы развиваются по мере приближения к Солнцу, на достаточно больших расстояниях комета практически не имеет комы и поэтому не наблюдается. В связи с этим ранее не наблюдавшиеся кометы появляются неожиданно. Внезапное появление комет, их необычный вид (яркие головы, длинные яркие хвосты) на протяжении многих веков вызывали чувство ужаса у людей, считалось, что кометы являются перед самыми нежелательными событиями:

Кометы — самые большие тела в солнечной системе. Угловые размеры большинства комет составляют несколько минут, что значительно превосходит угловые размеры планет (таблица 6, § 21). Головы и особенно хвосты комет, доступных наблюдению невооруженным глазом, простираются даже на десятки градусов на небе. Действительная протяженность голов комет достигает подчас нескольких сотен тысяч и даже доходит до миллиона километров. Хвосты больших комет вытягиваются на сотни миллионов километров. Вместе с тем следует отметить исключительную прозрачность комет: через хвосты и даже головы их бывают видны слабые звезды.

Сейчас ежегодно открывают и наблюдают по несколько комет. В порядке их открытия комета получает предварительное обозначение в виде 1967 *a*, 1967 *b* и т. д. с добавлением фамилии наблюдателя, впервые заметившего эту комету. Позднее кометы данного года нумеруются в порядке прохождения через перигелий и называются

именем ее открывателя. Например, комета Неуймина 2 (1916 II) — значит, что это вторая комета, открытая Г. Н. Неуймином<sup>1</sup>, в 1916 г. второй прошла свой перигелий.

К настоящему времени зарегистрировано примерно 800 комет, которые по характеру движения делятся на две группы: *короткопериодические* (период обращения вокруг Солнца меньше 100 лет) и *долгопериодические* (с периодами в несколько десятков и сотен тысяч и даже миллионов лет).

Долгопериодические кометы движутся по очень вытянутым эллипсам, которые при приближенном определении орбиты представляются в виде параболы (отсюда другое название этих комет — параболические). Плоскости параболических орбит наклонены к эклиптике под всевозможными углами, поэтому среди этих комет как прямое, так и обратное движение встречается одинаково часто. К этой группе принадлежит большинство известных комет.

Короткопериодические кометы (рис. 50) составляют меньшую часть всех комет, это кометы, которых уже не раз возвращались к Солнцу. Каждое новое появление этих комет заранее вычисляется. Самый короткий период обращения из комет этой группы имеет комета Энке-Баклунда (всего 3,3 года), самый длинный — комета Галлея — 76,0 лет (см. § 18). В списке короткопериодических комет только одна комета Галлея имеет обратное движение, наклонение ее орбиты к плоскости эклиптики составляет примерно 162°. Все остальные кометы этой группы движутся в прямом направлении; наклонения орбит большинства из них много меньше 90°. Эксцентриситеты кометных эллипсов, как правило, больше 0,5, поэтому орбиты достаточно вытянуты, то есть орбиты, близкие к окружностям. Например, комета Швасмана-Вахмана (1925 II) движется между орбитами Юпитера и Сатурна.

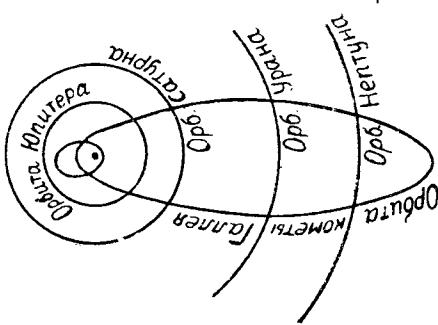
Короткопериодические кометы можно разбить на четыре группы, различие между которыми состоит в том, что афелии комет расположаются близ орбит Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Это так называемые «кометные семейства» планет. Наиболее многочисленной и, может,

<sup>1</sup> Советский астроном Г. Н. Неуймин (1885—1946) открыл 7 ко-

Таблица 9

Спутник	Планета	Относительное расстояние	Наклонение орбиты к экватору планеты	Диаметр		
				в км	в метрах планеты	
V	Юпитер	2,53	0° 0'	160	0,001	
	Сатурн	2,65	0° 0'	300	0,002	
	Марс	2,77	0° 0'	15	0,002	
	Сатурн	3,08	0° 1'	650	0,005	
	"	3,95	0° 0'	800	0,007	
	Уран	5,11	—	—	—	
	Сатурн	4,89	0° 0'	1300	0,011	
	Юпитер	5,88	0° 0'	3330	0,024	
	Сатурн	6,26	0° 0'	1200	0,010	
	Марс	6,85	0° 56'	8	0,001	
V	Уран	7,18	0° 1'	900	0,018	
	Сатурн	8,75	0° 3'	1750	0,014	
	Юпитер	9,35	0° 1'	2880	0,020	
	Уран	10,01	0° 1'	700	0,014	
	Нептун	12,92	120° 14'	4000	0,091	
	Юпитер	14,92	0° 5'	5150	0,036	
	Уран	16,43	0° 1'	1700	0,034	
	Сатурн	20,28	0° 38'	5000	0,042	
	Уран	21,94	0° 1'	1500	0,030	
	Сатурн	24,61	0° 45'	500	0,004	
V	Юпитер	26,24	0° 24'	4680	0,033	
	III — Ганимед					
	Титания					
	Умбриэль					
	Гриотон <sup>1</sup>					
	IV — Каллисто					
	Япет	Сатурн	59,09	10° 27'	1800	0,015
	Луна	Земля	60,27	28° 35' — 18° 18'	3476	0,273
	VI	Юпитер	160,2	25° 38'	160	0,001
	VII	"	163,5	24° 51'	65	—
X		"	163,6	24° 53'	25	—
	Феба <sup>1</sup>	Сатурн	214,8	147° 57'	320	0,003
	XII	Юпитер	292,5	144°	—	—
	XI	"	313	160°	25	—
	VIII	"	327	145°	65	—
	IX <sup>1</sup>	"	330	154°	30	—
	Нептун					
	Нептун					

Рис. 50. Орбиты короткопериодических комет Галлея и Энке-Баклунида.



## 5. Спутники планет

Все спутники планет солнечной системы можно разделить на две группы: прямые и обратные.

Спутник является *прямым*, если направлениe его движения совпадает с направлением вращения планеты, и обратным, если он движется навстречу вращению планеты. При таком делении к группе прямых спутников относится 26 спутников, а к группе обратных — только шесть (четыре внешних спутника Юпитера, последний спутник Сатурна, ближний спутник Нептуна).

Орбиты прямых спутников имеют самые различные наклонения к орбитам своих планет и их экваторам (таблица 9). Как правило, спутники, относительные расстояния которых (т. е. расстояния, выраженные в радиусах планеты) не превышают 30 единиц, движутся почти в точности в экваториальных плоскостях планет. К таким относятся спутники Марса, первые пять спутников Юпитера, восемь спутников Сатурна, спутники Урана (всего 20). Увеличение относительных расстояний спутников

<sup>1</sup> Обратный спутник.

сопровождается отходом их от экваториальных плоскостей планет. При этом приблизительно выполняется следующая зависимость: чем дальше отстоит спутник от планеты, тем больше наклонение его орбиты к экватору планеты.

К спутникам, для которых это имеет место, относятся Луна, восьмой спутник Сатурна (Япет), три спутника Юпитера (всего пять).

Экваториальные спутники, т. е. движущиеся почти в плоскостях экваторов планет, как правило, характеризуются малыми эксцентриситетами. Эксцентриситеты спутников, орбиты которых наклонены к экватору на  $10^{\circ}$ — $30^{\circ}$ , уже больше. Но самыми большими эксцентриситетами обладают обратные спутники. Исключением среди них является Тритон, движущийся в плоскости экватора Нептуна по круговой орбите.

Относительное вращение спутников надо сказать следующее. Для ряда спутников (Луна, галилеевы спутники Юпитера, некоторые спутники Сатурна) было обнаружено совпадение периодов вращения и обращения<sup>1</sup>. Видимо, это является общим правилом для всех спутников солнечной системы.

По абсолютным размерам спутники стоят в одном ряду с большими планетами, а некоторые даже превосходят Меркурий (Титан, Ганимед). Луна является пятым по величине в системе спутников, ее полуперечник составляет 3476 км. Наименьшими являются оба спутника

Марса и последние шесть спутников Юпитера (8—20 км). Интересно сравнить относительные размеры спутников, т. е. выраженные через размеры своих планет (таблица 9). Оказывается, полуперечники наиболее крупных спутников составляют только несколько сотых долей половины диаметра планет, и лишь у Тритона диаметр равен 0,1, а у Луны достигает 0,273 диаметра своей планеты. В ряде исследований большие относительные размеры Луны (и большая относительная масса ее — 0,012,

<sup>1</sup> Для Луны этот закон был открыт Дж. Кассини в 1693 г., он может быть сформулирован так: «Луна вращается с постоянной угловой скоростью в прямом направлении вокруг оси, сохраняющей свое положение в теле Луны неизменным, причем период ее осевого вращения в точности совпадает с периодом ее обращения вокруг Земли».

Для остальных спутников вращение было обнаружено по периодическому изменению интегрального блеска.

## § 24. Первые крупные открытия звездной астрономии

XVII в. был веком изучения солнечной системы, и в этой области были достигнуты значительные успехи. Однако многие представления, связанные со звездами, продолжали оставаться в зачаточном состоянии. В конце XVII в. еще считалось, что звезды неподвижны, хотя и сложилось мнение, что они подобны Солнцу. Первые ценные открытия, касающиеся мира звезд, были сделаны в XVIII в.

### 1. Собственные движения звезд

В 1718 г. Э. Галлей обнаружил собственные движения у трех звезд. Он сравнил положения звезд в каталогах Гиппарха, Тихо Браге и Дж. Флемстида (1646—1720) и пришел к выводу, что звезды Сириус, Арктур и Процион действительно изменили свое положение относительно остальных звезд, т. е. имеют собственное движение. К концу XVIII в. собственные движения были обнаружены уже у многих звезд.

Все звезды, как теперь известно, движутся по различным направлениям. Но видимые движения звезд настолько малы, что невооруженным глазом их можно заметить лишь по истечении нескольких тысяч лет. Вот почему фигуры созвездий, скажем, со временем Гиппарха заметно не изменились. Собственное движение звезд и принято характеризовать величиной дуги в секундах, которую звезда описывает на небе за год. У больших звезд, видимых невооруженным глазом, собственные движения меньше  $0''$ , 1. Но есть среди них звезды и со значительно большим собственным движением. Так, звезда  $\alpha$  Центавра имеет собственное движение в  $3'',7$ , а у звезды Арктур  $\mu = 2'',3$ . Самое большое собственное движение у однородной звездочки ( $n = 10^n$ ) из созвездия Змееносца (звезды Барнarda) —  $\mu = 10'',27$ .

Большое численное значение собственного движения звезды, как правило, указывает на близость ее к нам.

## 2. Годичная аберрация и годичный параллакс звезд

Английский астроном Джеймс Брадлей (1693—1762) предпринял попытки обнаружить параллактическое смещение звезд, вызываемое движением наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца. Так как Земля через полгода перемещается на расстояние в 300 млн. км., то это должно вызывать кажущееся смещение звезд, т. е. должен су-

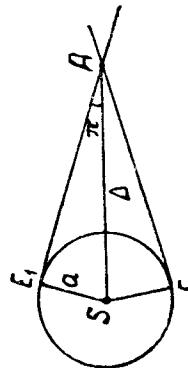


Рис. 51. Годичный параллакс звезд.

ществовать годичный параллакс звезд (рис. 51). *Годичным параллаксом* звезды называется угол, под которым с данной звездой видна большая полуось  $a$  земной орбиты при условии, что плоскость, проходящая через звезду (A) и Землю, перпендикулярна этой полуоси.

Если бы был определен параллакс звезды  $\Delta$ , то расстояние до нее  $\Delta$  можно было бы вычислить по формуле 8' (см. § 19)

$$\Delta = \frac{a}{\pi} = \frac{206265''a}{\pi''}. \quad (13)$$

Предположим для простоты, что мы наблюдаем звезду M, расположенную близ полюса эллиптики (рис. 52). Находясь в положении A, мы увидим звезду на небе в точке a, из положения B — в точке b и т. д. Каждый раз мы будем отмечать смещение звезды от полюса эллиптики в сторону, в которой находится Солнце. В результате в течение года звезда описывает на небе окружность (эллиптическую земной орбиты можно пренебречь) с радиусом, равным годичному параллаксу звезды. Направление движения звезды в любой момент противоположно направлению действительного движения Земли. Вследствие годичного параллакса нам должно казаться, что любая звезда описывает на небе эллипс: чем

ближе расположена звезда к эллиптике, тем более скажет эллипс. Для звезды, находящейся в полюсе эллиптики, параллактический эллипс обращается практически в окружность, для звезды на эллиптике — в линию. Большие полуоси параллактических эллипсов различны, они зависят от действительного расстояния до звезды: чем ближе к нам звезда, тем больше описываемый ею в течение года эллипс.

Теперь мы знаем, что даже у самой близкой к нам звезды размер эллипса меньше  $1''$ . Вот почему очень долгое время не могли обнаружить годичные параллаксы звезд. Не обнаружил параллактического смещения у звезд и Дж. Брадлей, но вместо этого он открыл другое смещение, тоже имеющее годичный период, названное впоследствии *абберрацией звезд*. Суть этого явления заключается в следующем. Все звезды описывают в течение года на небе эллипсы, большая полуось которых параллельная эллиптике и для всех звезд равна  $20'',5$ . Для звезд в полюсе эллиптики превращается в окружность, для звезд на эллиптике — в линию. Направление смещения звезды по аберрационному эллипсу составляет угл  $\pi$  с направлением движения Земли в любой момент угл  $90^\circ$  (рис. 53). В сравнении с параллактическим смещением звезды как бы отстает на четверть оборота.

Дж. Брадлей дал правильное объяснение открытому им явлению. Аберрация звезд вызывается сочетанием двух движений: света, идущего от звезды со скоростью  $c = 300000 \text{ км/сек}$ , и Земли, движущейся вокруг Солнца со скоростью  $v = 30 \text{ км/сек}$ .

Возьмем опять в качестве примера звезду M, расположенную в полюсе эллиптики (рис. 54 а). Пусть после зрения телескопа настолько мало, что в нем помещается изображение только одной звезды. Пусть телескоп установлен строго перпендикулярно к плоскости эллиптики, к вектору скорости земли v. В этом случае наблюдатель не увидит звезды. Дело вот в чем. Пока луч света, попав в объектив телескопа O, пройдет расстояние, равное OA, за промежуток времени  $\Delta t$ , нижний конец телескопа (окуляр) вместе с Землей переместится в точку B на расстояние  $AB = v \cdot \Delta t$ . Луч света придет в точку A, а окуляр в это время будет уже в точке B (рис. 54б). Чтобы наблюдатель увидел звезду, надо, чтобы к моменту, когда луч света достигает точки A, в точку A вследствие дви-

жения Земли подошел и окуляр телескопа. Другими словами, наблюдатель увидит звезду, если окулярный конец телескопа будет оттянут назад в точку С (рис. 54в) на расстояние  $AC = v\Delta t$ . Но в результате изменится направление на звезду: мы ее видим на продолжении линии CO

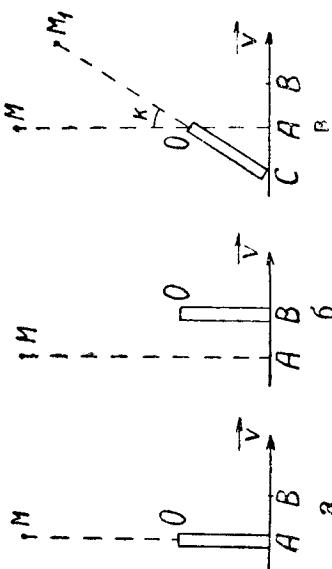


Рис. 54. К объяснению aberrации.

в точке  $M_1$ . Звезда будет казаться смещенной в ту сторону, куда в данный момент движется Земля (эта точка называется *апексом*). По отношению к Солнцу апекс  $\Lambda$  находится на эклиптике на  $90^\circ$  к западу от него (рис. 55). В следующий момент положение апекса изменяется, изменяется и кажущееся положение звезды, описывающей на небе aberrационную окружность (для звезды в полюсе эклиптики). Угол  $k$ , на который смещается вследствие aberrации звезда, расположенная в полюсе эклиптики, называется *постоянной aberrации*. Постоянную aberrации можно найти, используя рис. 54 в.

$\operatorname{tg} k = \frac{v}{c}$ . Так как  $CA = v\Delta t$ ,  $OA = c\Delta t$ ,

$\operatorname{tg} k = \frac{v}{c} = 0,0001$ , откуда  $k = 20'',47'$ . Если звезда нахо-

Рис. 55. Положение апекса Земли на эклиптике.

Рис. 53. Аппаратура для измерения aberrации

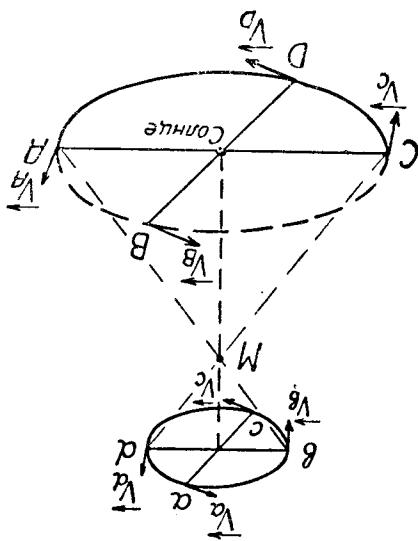
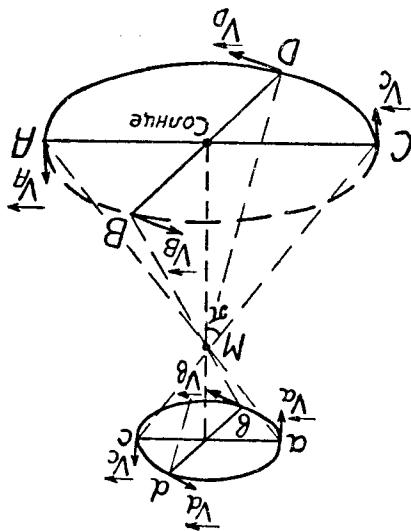


Рис. 52. Изображение звезды в полюсе эклиптики



<sup>1</sup> Положив  $\operatorname{tg} k = k$  и взяв более точные значения  $c = 299700 \text{ км/сек}$ ,  $v = 29,76 \text{ км/сек}$ , получим

$$k = \frac{v}{c} = \frac{206265''v}{c} = \frac{206265'' \cdot 29,76}{299700} = 20'',47.$$

дится в произвольной точке неба, то ее оберрационное смещение в этот момент времени, определяемое углом  $\alpha$  (рис. 56), найдется из соотношения  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{CA}{OA}$ , где  $\gamma = u - a$ ,  $CA = v\Delta t$ ,  $OA = c \cdot \Delta t$ ,  $u$  — угол между направлением на звезду и направлением вектора скорости Земли в данный момент, откуда

$$\sin \alpha = \sin(u - a) \frac{v}{c} = k \sin(u - \alpha).$$

Так как  $\alpha$  мало, можно записать  $\alpha = k \sin u$ . На такой угол смешена звезда в сторону апекса Земли в данный момент. В результате, если звезда находится не в полусфере эклиптики, она описывает вследствие aberrации эллипс, большая полуось которого равна  $k$ , а малая зависит от эклиптической широты звезды  $\beta$

$$b = k \sin \beta.$$

Открытие годичной aberrации в 1727 г. явилось первым доказательством движения Земли.

Брадлей, не обнаружив параллаксов звезд, заключил, что они малы и даже для ближайших звезд не превышают  $0''5 - 0''4$ .

Другими словами, Брадлей оценил расстояния до звезд в  $400000 - 500000$  а.е.<sup>1</sup>

Впервые годичный параллакс был измерен Василем Яковлевичем Струве (1793—1864) в 1837 г. Для этой цели он избрал самую яркую звезду северного полушария Вегу, которая обладает и заметным собственным движением ( $\mu = 0''4$ ). Кроме того, вблизи Веги на расстоянии в  $43''$  имеется слабая звездочка, по отношению к которой можно было отмечать положения Веги. После обработки многомесячных наблюдений в Дерпте (1835—1836 гг.) Струве получил для параллакса Веги значение  $0''125$ ,

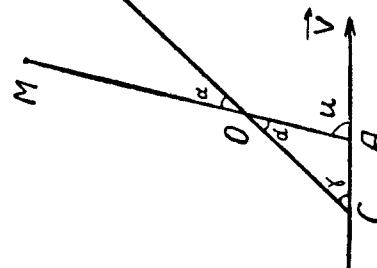


Рис. 56. Аберрационное смещение звезды.

(рис. 56), найдется из соотношения  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{CA}{OA}$ , где  $\gamma = u - a$ ,  $CA = v\Delta t$ ,  $OA = c \cdot \Delta t$ ,  $u$  — угол между направлением на звезду и направлением вектора скорости Земли в данный момент, откуда

$\sin \alpha = \sin(u - a) \frac{v}{c} = k \sin(u - \alpha)$ .

Так как  $\alpha$  мало, можно записать  $\alpha = k \sin u$ . На такой угол смешена звезда в сторону апекса Земли в данный момент. В результате, если звезда находится не в полусфере эклиптики, она описывает вследствие aberrации эллипс, большая полуось которого равна  $k$ , а малая зависит от эклиптической широты звезды  $\beta$ .

Открытие годичной aberrации в 1727 г. явилось первым доказательством движения Земли.

Брадлей, не обнаружив параллаксов звезд, заключил, что они малы и даже для ближайших звезд не превышают  $0''5 - 0''4$ .

Другими словами, Брадлей оценил расстояния до звезд в  $400000 - 500000$  а.е.<sup>1</sup>

Впервые годичный параллакс был измерен Василем Яковлевичем Струве (1793—1864) в 1837 г. Для этой цели он избрал самую яркую звезду северного полушария Вегу, которая обладает и заметным собственным движением ( $\mu = 0''4$ ). Кроме того, вблизи Веги на расстоянии в  $43''$  имеется слабая звездочка, по отношению к которой можно было отмечать положения Веги. После обработки многомесячных наблюдений в Дерпте (1835—1836 гг.) Струве получил для параллакса Веги значение  $0''125$ ,

что соответствует расстоянию в 8 парсеков или 26 световых лет (1600000 а.е.).<sup>1</sup>

Значение параллакса Веги, полученное В. Я. Струве, практически не отличается от принятого в настоящее время ( $0''123$ ).

В 1838 г. Фридрих Вильгельм Бессель (1784—1846) в Кенигсберге определил параллакс звезды 61 Лебедя, имеющей большое собственное движение  $\mu = 5'',2$  ( $m = 5^m,5$ ), а в начале 1839 г. на мысе Доброй Надежды Томас Гендерсон (1798—1844) — яркой звезды а Центавра ( $\mu = 3'',7$ ,  $m = 0^m,3$ ). Современные значения параллаксов и расстояний этих звезд:

61 Лебедя  $\pi = 0'',292$ ,  $\Delta = 3,4$  nc =  $11,1$  св. года,  
а Центавра  $\pi = 0'',751$ ,  $\Delta = 1,3$  nc =  $4,3$  св. года.

Звезда а Центавра — ближайшая к нам звезда. Более близкой, чем она, является слабая звездочка, находящаяся рядом с а Центавра ( $m = 10^m,5$ ), носящая имя Проксима (или Близнейшая). Ее параллакс  $\pi = 0'',762$ .

Определение параллаксов звезд убедительно доказывало, что Земля движется. Этим окончательно утверждалась справедливость системы мира Коперника.

Параллаксы звезд, определяемые непосредственно из наблюдений, называются *тригонометрическими*.

Для определения тригонометрического параллакса производят измерения на фотопластинах, снятых в различные моменты года, в результате чего звезда на фотопластиниках оказывается смещенной на фоне более слабых звезд. Современные методы и инструменты позволяют

<sup>1</sup> Астрономическая единица ( $a = 1$  а.е.) оказывается недостаточно большой для измерения расстояний до звезд. Для этой цели используются световой год и парsec ( $pc$  или  $ps$ ).

<sup>2</sup> Световой год — это расстояние, которое свет проходит за год.

<sup>3</sup> Парsec — расстояние, с которого большая полусфера земной орбиты видна под углом в  $1''$ . Значение парсека легко получить, используя формулу (13). Подставляя в

$$\Delta = \frac{\pi''}{206265} \cdot a \cdot \pi = 1'',$$

получаем значение  $1 pc$  в тех единицах, в каких выражаем большую полуось земной орбиты.

<sup>4</sup>  $1 pc = 206265$  а.е. =  $206265 \cdot 149,5 \cdot 10^6$  км.

Так как  $1 pc = 206265$  а.е., то формула (13) в виде

$$\Delta = \frac{1}{\pi''},$$

<sup>1</sup> В формуле (13) надо подставить  $a = 1$  а.е.

сразу дает расстояние до звезды в парсеках.

определять параллаксы до  $0''$ , т. е. до расстояний в 100 pc. К настоящему времени тригонометрические параллаксы измерены у 7000 звезд.

## § 25. Зарождение внегалактической астрономии

На протяжении XVIII в. и первой половины XIX в. складывались вполне определенные представления о на- шей Галактике как динамической системе звезд, образу- ющих на небе Млечный Путь, высказывались мысли о других звездных системах, и все определенное начала звучать идея о бесконечности мира. (Эммануил Сведен- борг (1688—1772), Томас Райт (1711—1786), Иммануил Кант (1724—1804), Иоганн Генрих Ламберт (1728—1777), В. Я. Струве). Правда, многие высказывания того времени о распределении звезд в пространстве были чисто умозрительными, они не опирались на факты, на результаты наблюдений, хотя и намного опередили раз- витие науки своего времени.

Первые попытки выяснить на основе наблюдений, как устроен мир, предпринял выдающийся английский аст- роном Вильям Гершель (1738—1822)<sup>1</sup>. Позднее эти ра- боты продолжил на более крупном телескопе Бильям Парсонс (lord Ross, 1800—1867).

С вопросом о строении звездной системы был тесно связан вопрос о распределении и природе туманностей, первый каталог которых составил Шарль Мессье (1730—1817) в 1781 г.<sup>2</sup>. С открытием туманностей было установ- лено, что в космическом пространстве паряду со звездами существует еще материя в диффузной (рассыпной) форме.

В. Парсонс, наблюдая туманности, обнаружил, что пе- рвые из них не разлагаются на звезды даже в его те- лескоп и имеют характерную спиральную форму (1861 г.). Возникло представление, что именно эти спи- ральные туманности являются самостоятельными звезд- формами.

<sup>1</sup> Большой вклад в дело исследования строения Галактики внесли В. Я. Струве и Мариян Альбертович Ковалевский (1821—1884), но, к сожалению, их работы не получили в свое время широкого рас- пространения и стали известны уже в наше время.

<sup>2</sup> Большое число небесных объектов, наблюдавшихся в виде туманностей пятын, открыл В. Герцель и показал, что многие из них со- стоят из звезд. Но были и такие туманности, которые Герцель не удалось разложить на звезды.

ними системами, находящимися далеко за пределами на- шей Галактики.

Открытие спиральных туманностей сыграло важную роль в укреплении идеи о множественности звездных си- stem, но окончательные доказательства того, что во Все- звездные системы, были получены лишь в XX в.

Для решения этого вопроса необходимо было опреде- лить размеры нашей Галактики и расстояния до спираль- ных туманностей и доказать звездную природу этих ту- манностей.

В 1912 году Генрикетта Левитт (1868—1921) для одно- го из типов переменных звезд-цефеид обнаружила зависи- мость между периодом изменения блеска и абсолютной звездной величиной (§ 62), что позволило использовать цефеиды для определения расстояний до них, а стало быть, и до тех объектов, в которых они находятся. С по- мощью цефеид уже в следующем году Эйнар Герцели- рунг определил расстояние до Малого Магелланова Об- лака, а в 1916—18 гг. были оценены размеры нашей Га- лактики. По современным данным ее диаметр около 100000 световых лет. К 1920 г. рядом исследователей раз- ными методами было определено расстояние до спираль- ной туманности в созвездии Андромеды. Оно оказалось равным около 650000 световых лет<sup>1</sup>, что явно свидетель- ствовало в пользу того, что эта спиральная туманность находится вне пределов Галактики. Однако окончатель- ные доказательства, что спиральные туманности являются звездными системами получил Эдвин Хаббл (1889—1953) в 1924 г. Он сфотографировал на самом крупном в то время рефлекторе (диаметр зеркала 250 см) туман- ности в созвездиях Андромеды, Треугольника и Стрельца. Во видах этих туманностей на фотографиях от- четливо были видны отдельные звезды. Это величайшее открытие в астрономии нашего времени положило нача- ло развитию внегалактической астрономии.

Уже первые исследования нескольких тысяч внегалак- тических туманностей показали, что среди них далеко не все являются спиральными, многие туманности имеют эллиптическую или неправильную форму. Внегалакти- 720000 pc.

<sup>1</sup> По современным данным расстояние до этой галактики

гематомы стали называться галактиками. Знание расстояний до галактик позволило по угловым размерам вычислить их линейные диаметры. Оказалось, что они сравнимы с размерами нашей Галактики.

Э. Хаббл применил принцип Допплера — Белодольского к спектрам далеких галактик и открыл у них «красное смещение» (§ 29): оказалось, что почти все галактики удаляются от нашей Галактики, при этом скорость удаления тем больше, чем дальше находится галактика. Эти скорости измеряются десятками тысяч километров в секунду. Постепенно сложилось и укрепилось представление о расширяющейся Вселенной.

Уже в наше время (1963 г.) были обнаружены квазары — таинственные «квазизвездные радиоисточники», находящиеся на расстояниях порядка нескольких миллиардов световых лет. Сейчас это самые далекие объекты, обнаруженные человеком во Вселенной.

## ГЛАВА III.

### ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

#### § 26. Основные методы астрофизики

В этой главе мы рассмотрим основные методы, с помощью которых в астрофизике исследуются физические свойства и состояния различных небесных объектов и среды.

Современная астрофизика использует все средства и методы, которыми располагает физика, а также теории, на основе которых можно сделать те или иные заключения о физическом состоянии небесных тел.

Большинство сведений о физических условиях и состоянии небесных объектов получено на основе анализа их излучения. В этой связи нужно подчеркнуть особенности, с которыми сталкивается в практической работе астрофизик. Прежде всего, астрофизик не может изменить условия, в которых находится исследуемое тело, а во-вторых, как правило, астрофизику приходится иметь дело с очень слабыми источниками излучения. Благодаря последнему обстоятельству многие приборы, применяемые в астрофизике, доведены до очень высокой степени чувствительности. Кроме того, во всех астрофизических наблюдениях должно быть учтено то обстоятельство, что излучение небесных тел попадает в глаз наблюдателя или прибор после прохождения через толщу земной атмосферы, что вызывает изменения в приходящем на Землю излучении. Стارаясь уменьшить влияние атмосферы, астрономические обсерватории стремятся строить в горах, подальше от городов. В последние годы широко используют для астрофизических исследований искусственные спутники Земли, геофизические и космиче-

ские ракеты, выносящие приборы за пределы атмосферы или в верхние ее слои.

Во всех астрофизических исследованиях обязательно применяется телескоп, который собирает излучение небесных тел и дает их изображения. Эти изображения или изучаются *визуально*, или *фотографируются*, или направляются в более сложные вспомогательные приборы, после чего исследуются также либо визуально, либо фотографируются. Фотографический метод в астрофизике занимает существенное место (*астрофотография*).

В 1856 г. французский философ О. Конт (1798—1857) утверждал: «Никогда и ни в коем случае нам не удастся изучить химический состав небесных тел», — однако прошло всего три года, как учёные получили могучий метод изучения не только химического состава, но и многих других свойств тел — *спектральный анализ (астроспектроскопия и астрорентгенография)*.

Очень важным методом исследования физической природы небесных тел является *фотометрический метод (астрофотометрия)*.

В обоих этих методах при наблюдении с поверхности Земли используется оптический участок электромагнитного спектра с длиной волн в пределах от  $2900\text{ \AA}$  до  $1,5\text{ \mu m}$ , т. е. от ультрафиолетовых до инфракрасных лучей.

Радиоизлучение небесных тел ( $\lambda > 3\text{ mm}$ ) принимается с помощью радиотелескопов и исследуется радиофизическими методами (*радиоастрономия*). В последние годы созданы специальные приемники коротковолнового излучения небесных объектов — рентгеновского ( $\lambda_0,1\text{ \AA} - 100\text{ \AA}$ ) и гамма-излучения ( $\lambda < 0,1\text{ \AA}$ ) — рентгеновские и гамма-телескопы (*рентгеновская и гамма-астрономия*).

Исследование коротких ультрафиолетовых ( $\lambda$  от  $0,29\text{ \mu m}$  до  $100\text{ \AA}$ ), рентгеновских и гамма-лучей, а также инфракрасного излучения (с  $\lambda > 15\text{ \mu m}$ ) осуществляется исключительно внеатмосферными методами (вынос аппаратуры в верхние слои или за пределы земной атмосферы).

## § 27. Спектральный анализ

Спектральный анализ был открыт в 1859 г. немецкими учеными Густавом Робертом Кирхгофом (1824—

1887) и Робертом Вильгельмом Бунзеном (1811—1899). Этим было положено начало астрофизике. Вместе с тем открытие этого метода исследования нанесло серьезный удар по идеализму, ставившему границы человеческому познанию.

Спектральный анализ заключается в анализе, в изучении спектров различных тел.

Как известно, всяко нагретое тело излучает электромагнитные волны от коротких гамма-лучей до длинных радиоволн. Это *тепловое излучение*. Совокупность всех видов излучения образует спектр электромагнитного излучения. В земных условиях легко обнаруживается излучение лишь в оптическом диапазоне длин волн: ультрафиолетовое, световое и инфракрасное излучение. От разлитых небесных тел в настоящее время принимается тепловое излучение и в других диапазонах, в частности, радио и рентгеновское излучение.

Если оптическое излучение тела (свет), пропустить через какое-либо преломляющее приспособление, например, через стеклянную призму, и направить на экран, то на экране получится *спектр* этого излучения (спектр данного тела).

*Сплошной спектр* излучения тела в видимой области представляет собой светлую полоску, в которой спектральные цвета непрерывно, плавно переходят один в другой. Такие спектры дают раскаленные твердые и жидкые тела, а также газы, находящиеся под большим давлением или образующие толстый слой. В сплошном (непрерывном) спектре представлены все длины волн.

Атомы нагретых разреженных газов или паров дают *линейчатый спектр излучения* (или *эмиссионный*). Такой спектр состоит из определенной совокупности длии волн (или частот). На экране этот спектр представляется в виде отдельных цветных линий на темном фоне. Каждый химический элемент имеет характерный для него линейчатый спектр (рис. 57). Спектральные линии в спектре группируются в серии, в каждой из которых линии сближаются по мере перехода к более коротким длинам волн и сливаются около некоторой границы серии.

Если излучение, имеющее сплошной спектр, проходит через более холодные пары исследуемого вещества и затем разлагается в спектр, то получается *линейчатый*

**спектр поглощения** (абсорбционный), в котором на фоне непрерывного спектра наблюдаются темные линии поглощения в тех местах, где находились бы линии излучения данного парка. Другими словами, атомы поглощают те же длины волн, которые сами испускают.

Молекулы дают так называемые *полосатые* спектры излучения (или поглощения), в которых энергия сосредоточена не в тонких линиях, а в полосах.

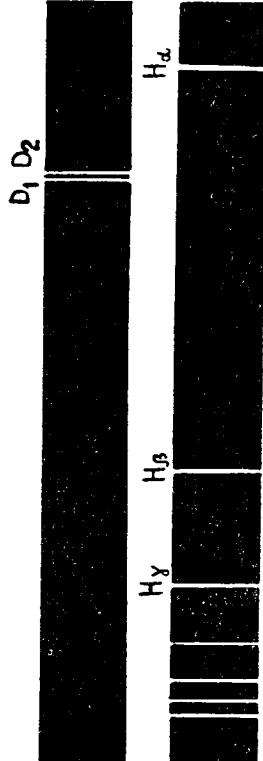


Рис. 57. Спектры излучения натрия (линии  $D_1$  и  $D_2$ ) и водорода (линии серии Бальмера).

Спектр данного вещества является его важнейшей характеристикой и содержит вполне определенные линии. Так, атомарный водород имеет наиболее простой спектр. В видимой и близкой ультрафиолетовой области его спектра содержится несколько интенсивных линий, входящих в серию Бальмера<sup>1</sup>. Они получили специальные обозначения:  $H_\alpha$  (красная),  $H_\beta$  (зеленая),  $H_\gamma$  (голубая),  $H_\delta$  (фиолетовая),  $H_\epsilon$ ,  $H_\zeta$  (ультрафиолетовые).

В этой серии обнаружено 29 линий. Линии в далекой ультрафиолетовой области спектра водорода составляют серию Даймана<sup>2</sup> (таблица 10).

<sup>1</sup> Швейцарский физик Иоганн Яков Бальмер (1825—1898) подобрал эмпирическую формулу, по которой можно вычислить длины волн  $\lambda$  линий этой серии

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{где}$$

$R = 109676.576 \text{ см}^{-1}$  — постоянная Ридберга,  $n=3, 4, 5, \dots$

<sup>2</sup> Серия Лаймана является главной серией водорода, так как линии этой серии получаются в результате перехода возбужденного атома водорода на первый энергетический уровень со всех высших. Серия Бальмера связана с переходами на второй уровень.

В спектре нейтрального гелия в видимой части выделяется желтая линия  $D_3$  ( $\lambda 5875 \text{ \AA}$ ). (Линии  $D_1$  ( $\lambda 5896 \text{ \AA}$ ) и  $D_2$  ( $\lambda 5890 \text{ \AA}$ ) принадлежат натрию). В спектре ионизированного кальция очень интенсивными являются линии  $H$  ( $\lambda 3964 \text{ \AA}$ ) и  $K$  ( $\lambda 3934 \text{ \AA}$ ), лежащие у фиолетовой границы видимого спектра.

Таблица 10

Сообщение линии	Длина волны (в $\text{\AA}$ )
$H_\alpha$	6563
$H_\beta$	4861
$H_\gamma$	4340
$H_\delta$	4102
$H_\epsilon$	3970
$H_\zeta$	3889
$L_\alpha$	1216
$L_\beta$	1026
$L_\gamma$	972

Задача спектрального анализа состоит в отождествлении спектральных линий в спектре исследуемого тела, т. е. в определении длии волн и в выяснении, атомами каких химических элементов излучена или поглощена та или иная линия.

Обычно, если пользуются призменным спектрографом, спектр исследуемого небесного тела, получаемый в спектрографе, фотографируется при условии, что края щели закрыты диафрагмой. После этого, закрыв середину щели и открыв ее край, на ту же пластику впечатывают спектр сравнения от лабораторного источника излучения. В качестве спектра сравнения используется спектр электрической дуги между железными электродами, который богат линиями в оптической области и который хорошо исследован. Пользуясь спектром сравнения, определяют длины волн на полученной спектрограмме небесного тела и по ним устанавливают, атомам каких элементов они принадлежат. Некоторые характерные спект-

лярные линии, например, водородные линии серии Бальмера, линии  $H$  и  $K$  ионизированного кальция обычно легко распознаются без всяких измерений.

Отождествление спектральных линий в спектре исследуемого тела позволяет установить, какие химические элементы присутствуют на этом теле, а детальное изучение отдельных линий дает сведения о количественном химическом составе, о температуре, давлении, величине магнитного поля и других свойствах этого тела.

## § 28. Спектры некоторых небесных тел и их химический состав

### 1. Спектр Солнца

Впервые разложение солнечного света наблюдал И. Ньютон в виде непрерывного спектра. В действительности в видимой области Солнца имеет сплошной спектр, на фоне которого наблюдается несколько десятков тысяч темных линий поглощения, называемых *фраунгоферовыми*. Некоторые из этих линий были обнаружены в 1802 г. Вильямом Гайдом Волластоном (1766—1828). В 1814—15 гг. Иосиф Фраунгофер (1787—1826),ательно исследовав солнечный спектр, описал уже около 600 линий. В 1891 г. Генри Роуланд (1848—1901) издал большой спектральный атлас солнечного спектра и каталог, содержащий свыше 20000 линий поглощения. В XX в. были заново определены длины волн линий солнечного спектра. Сейчас имеются подробные описания для длин волн от 0,3  $\mu\text{к}$  до 25  $\mu\text{к}$ . Количество зарегистрированных линий достигает 30 тысяч.

Максимум интенсивности солнечного излучения приходится на сине-зеленую часть спектра, на участке с длинами волн 4300—5000 $\text{\AA}$ .

Внештатмосферные исследования солнечного излучения показали, что спектр Солнца продолжается в обе стороны от оптической области. В коротковолновой части на некотором диапазоне волн, примерно до  $\lambda = 2000\text{\AA}$ , спектр по-прежнему непрерывный с линиями поглощения, но дальше происходит изменение в характере спектра: начиная с  $\lambda = 1680\text{\AA}$ , непрерывный спектр становится совсем слабым, а вместо темных фраунгоферовых линий появляются яркие линии излучения, определяющие всю энергию излучения, начиная примерно с  $1500\text{\AA}$ . В настоящее время исследовано солнечное излучение в короткой УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ и рентгеновской частях спектра до длины волн в 1 $\text{\AA}$ .

В инфракрасной области от  $\lambda = 1 \mu\text{к}$  до  $\lambda = 15 \mu\text{к}$  солнечное излучение испытывает заметное поглощение при прохождении через земную атмосферу: в спектре появляются широкие полосы поглощения, принадлежащие в основном молекулам водяного пара и углекислого газа, поэтому с Земли видно очень мало линий в этом участке спектра. Участок спектра от  $\lambda = 15 \mu\text{к}$  до радиоволн с длиной волны в несколько миллиметров полностью поглощается в атмосфере Земли. В радиодиапазоне (для радиоволн с длиной от нескольких миллиметров до 20 метров земная атмосфера прозрачна) интенсивность солнечного спектра достаточно большая, значительно больше, чем у тела с температурой  $6000^\circ$ . Радиоизлучение Солнца в диапазоне метровых волн соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела с температурой в миллион градусов. Кроме этого, особенностю радиоизлучения является его переменность.

В видимой области солнечного спектра наиболее интенсивными являются линии поглощения  $H$  и  $K$  ионизированного кальция, линии  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  водорода бальмеровской серии. Самая интенсивная линия принадлежит основной серии водорода  $L_\alpha \lambda 1216\text{\AA}$ . Следующими по интенсивности являются линии  $D_1$  и  $D_2$  натрия и других элементов.

Первые отождествления ряда спектральных линий Солнца были произведены Кирхгофом (1861). Он же ввел обозначение наибольее интенсивных линий  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$ . Большое число линий отождествил Роуланд. Он обнаружил на Солнце присутствие таких элементов, как водород, кальций, железо и др. К настоящему времени на Солнце уверенно установлено присутствие 69 элементов таблицы Менделеева. Это водород, гелий, азот, углерод, кислород, магний, натрий, кальций, железо и другие химические элементы. Это не значит, что остальных элементов на Солнце нет. Дело в том, что спектры некоторых элементов еще недостаточно изучены, а многие линии в спектре Солнца очень слабы или находятся в та-

$D_3 \lambda 5876\text{\AA}$ ) в верхней атмосфере Солнца, где количество возбужденных атомов значительно больше.

Теоретическая астрофизика установливает методы, которые позволяют оценить количественное содержание различных элементов в солнечной атмосфере (или в атмосферах звезд). Согласно современным данным, наиболее распространенным элементом солнечной атмосферы является водород, на втором месте находится гелий. Число атомов водорода в 5 раз больше, чем гелия, и в 10000 раз больше, чем атомов всех металлов. Водород составляет примерно 63% всей массы солнечной атмосферы, гелий — 36%, на долю остальных элементов приходится немногого больше 1%.

Есть основания полагать, что химический состав Солнца не отличается значительно от состава его атмосферы.

## 2. Спектры звезд

Вопрос о спектрах звезд будет подробно рассмотрен в § 55.

Спектр звезды, как правило, представляет собой непрерывный спектр с линиями поглощения, хотя в спектрах некоторых звезд имеются яркие линии излучения. Спектры отдельных звезд, вернее групп звезд, отличаются расположением и характером линий поглощения. Существование в спектрах звезд фраунгоферовых линий указывает на то, что поверхностные слои звезд (атмосферы) состоят из разреженных газов, в которых происходит поглощение света, идущего из более плотных и горячих внутренних слоев звезды. Отождествление линий в звездных спектрах позволило сделать заключение о химическом составе атмосфер. Оказалось, что звезды состоят из тех же химических элементов, которые известны на Земле. Наиболее распространенным элементом является водород, далее идет гелий. Отсутствие на звездах каких-либо новых, неизвестных на Земле элементов доказывает единство материи во Вселенной<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В истории астрономии имелись интересные случаи, когда некоторые спектральные линии были приписаны не встречавшимся на Земле элементам. В спектре солнечной короны долгое время не отождествлялись линии «корона» (из них выделялась зеленая линия  $\lambda 5303\text{\AA}$ ), позднее установлено, что эти линии принадлежат многократ-

ких частях электромагнитного диапазона, которые сильно поглощаются земной атмосферой и не всегда доступны для наблюдений. Поясним последнее следующим образом.

Линии поглощения атома, возникающие при переходах с основного уровня на ближайший возможный верхний уровень называются *резонансными*. Они наиболее яркие и при уменьшении количества исследуемого вещества обычно исчезают последними. Резонансные переходы являются наиболее вероятными, так как большее количество атомов из наличного числа их находится именно в основном состоянии. У гелия резонансная линия имеет длину волны  $584\text{\AA}$ , т. е. лежит в далекой ультрафиолетовой области. У водорода резонансной является линия лайман-альфа  $L_\alpha$  с длиной волны  $\lambda 1216\text{\AA}$ . В спектрах гелия и водорода эти линии самые интенсивные, но до недавнего времени даже водородные линии серии Лаймана в солнечном спектре были недоступны для наблюдений. О присутствии водорода на Солнце судили по линиям серии Бальмера. То обстоятельство, что линии повторного, т. е. возбужденного, энергетического уровня, достаточно сильны в спектре Солнца, указывает на большое количество атомов водорода и в возбужденном состоянии (а не только в основном, невозбужденном)<sup>1</sup>. Что касается линий поглощения гелия в видимой области солнечного спектра, то они там отсутствуют (или очень слабы), так как для осуществления переходов, дающих линию  $D_3 \lambda 5876\text{\AA}$ , атомов гелия в нужных состояниях очень немного. И хотя гелий был открыт впервые именно на Солнце (1868 г.)<sup>2</sup>, это было сделано не по линиям поглощения его, а по линиям излучения (в частности, по

<sup>1</sup> Теория приводит к выводу, что при температурах порядка  $5000-8000^\circ\text{K}$  число атомов водорода в возбужденных состояниях ( $2, 3, 4, \dots$ ) по сравнению с основным очень мало. (Так, при  $T = 8000^\circ\text{K}$  на 100000 невозбужденных атомов водорода приходится следующее число атомов в состояниях  $2, 3, 4 \dots n_2=16, n_3=2, 3, n_4=1, 5$  и т. д.).

<sup>2</sup> Это сделали французский ученик Ж. Жансен и английский астроном Н. Локкер. В 1895 году англичанин У. Рамзай выделил гелий из минерала клевента.

## Справочник химического состава планетных атмосфер

Если планета окружена атмосферой, то некоторые заключения о ее химическом составе можно сделать на основе анализа солнечного спектра.

Солнечный свет попадает на планету, пройдя через ее атмосферу, затем, отражаясь от поверхности, снова проходит атмосферу. Если какое-либо вещество присутствует в атмосфере в достаточном количестве, в спектре Солнца возникают дополнительные линии поглощения, по которым можно судить о составе планетной атмосферы. Как правило, линии поглощения, вызванные веществом определения химического состава планетных атмосфер исключительно сложная и не всегда получается однозначные ответы на вопрос о наличии в атмосфере того или иного вещества. Сложность выделения планетных линий поглощения увеличивается за счет возникновения в солнечном спектре линий поглощения, вызванных веществом земной атмосферы, теллурических линий. Теллурические линии для многих газов (водяной пар, кислород, азот) значительно сильнее, чем линии этих же веществ атмосферы исследуемой планеты. Чтобы освободиться от теллурических линий или ослабить их, спектральные аппараты поднимают, в частности, на аэростатах на значительную высоту (порядка 26 км).

Наибольший интерес в атмосферах планет представляет те газы, которые есть в земной воздушной оболочке: углекислый газ, кислород, азот, водяной пар. На основе многочисленных определений можно заключить, что в атмосферах Венеры и Марса основным веществом является углекислый газ, азота там нет, кислорода очень мало (на Венере около 1% всего состава атмосферы, на Земле — примерно 20%), водяной пар присутствует на Венере и Марсе в очень небольших количествах.

Есть основания предполагать наличие очень незначительной атмосферы у Меркурия (О. Дольфюс, В. И. Морено ионизированным (от 10 до 14 раз) атомам железа, кальция, никеля, аргона.

В спектрах планетных туманностей линии  $\lambda = 4959^{\circ}$  Å и  $\lambda = 5007^{\circ}$  Å, принадлежащие двукратно ионизованному кислороду, приписывались неизвестному элементу «небулю».

## § 29. Смещение спектральных линий в спектрах

Если в спектре исследуемого объекта отождествленные линии оказываются смещенными от значения соответствующей длины волн  $\lambda$  на некоторую величину  $\Delta\lambda$ , то к ним можно применить формулу эффекта Доплера<sup>1</sup> Белопольского<sup>1</sup>

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{v_r}{c}, \quad (15)$$

где  $v_r$  — относительная лучевая скорость объекта,  $c$  — скорость света.

В формулу (15) входит лучевая скорость светила (рис. 58), т. е. скорость, направленная по радиусу-вектору относительно наблюдателя (по лучу зрения на све-

<sup>1</sup> Если источник электромагнитных волн имеет относительно наблюдателя некоторую лучевую скорость  $v_r$  (направленную по линии источника — наблюдателю), то наблюдаемая длина волны  $\lambda$  изменяется на величину  $\Delta\lambda$  и наблюдатель измеряет вместо  $\lambda$  значение  $\lambda'$ . При этом  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{v_r}{c} \lambda$  или  $\Delta\lambda = \frac{v_r}{c} \lambda$ . Если имеет место относительное удаление источника волны и наблюдателя, то длина волны  $\lambda'$  оказывается больше  $\lambda$ ,  $\Delta\lambda > 0$ ; если источник волны и наблюдатель сближаются,  $\lambda' < \lambda$ ,  $\Delta\lambda < 0$ .

Этот эффект был открыт Христианом Допплером (1803—1853) в применении к акустическим волнам. В 1900 г. Аристарх Аполлонович Белопольский (1870—1934) подтвердил проявление эффекта Доплера в оптике и первым применил его в астрономии.

Сближение источника света и наблюдателя приводит к смещению спектральных линий в спектре источника к фиолетовому концу спектра («фиолетовое» смещение линий), а удаление — к красному концу спектра («красное» смещение линий).

В общем случае, когда направление на источник волны составляет с направлением вектора скорости некоторый угол, эффект Доплера — Белопольского выражается более сложной формулой.

иную). Это скорость, с которой светило приближается к наблюдателю или удаляется от него. Зная длину волны  $\lambda$  рассматриваемой линии в спектре небесного тела и измерив ее смещение  $\Delta\lambda$ , по формуле (15) можно

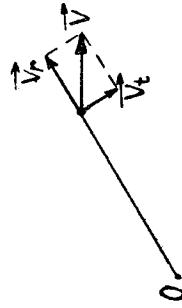


Рис. 58. Разложение вектора скорости звезды.

определить лучевую скорость  $v_r$ . Для вычисления полной скорости  $v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}$  (рис. 58) нужно знать еще значение касательной скорости  $v_t$  (§ 65).

Рассмотрим некоторые примеры, где используется смещение спектральных линий.

### 1. Вращение протяженных тел

В случае протяженного небесного тела смещение вращения этого тела вокруг некоторой оси (рис. 59). В результате вращения левые точки тела удаляются от наблюдателя, излучение от этих точек дает в спектре линии, смещенные к красному концу спектра; излучение от



Рис. 59. К определению скорости вращения небесного тела по смещению спектральных линий.

приближающихся правых точек тела будет иметь смещение линий к фиолетовому концу спектра.

Этот способ эффективно используется для выяснения характера вращения Солнца, особенно для точек, значительно удаленных от солнечного экватора. На спектрограммах получают линии от точек западного и восточного краев солнечного диска, расположенных на одной гелиографической широте. Величина относительного смещения линий с применением формулы (15) дает удвоенную скорость вращения Солнца на данной широте.

Если щель спектрографа расположена под некоторым углом к оси вращения исследуемого объекта, то на спектрограмме спектральные линии окажутся наклоненными.

По положению спектральных линий определяют периоды вращения планет, а для некоторых планет это единственный способ (например, для Нептуна).

А. А. Белопольский впервые получил спектрограммы для разных частей Сатурна и измерил скорости движения на внутреннем крае (21,0 км/сек) и внешнем крае (15,5 км/сек). Этим, кстати, доказывается, что колыца Сатурна — не твердые тела.

### 2. Двойственность звезд

По характеру расположения линий в спектре звезды можно судить о двойственности ее, когда наличие двух компонентов не обнаруживается визуально. В спектре двойной звезды, кажущейся наблюдателю одиночной, либо имеет место периодическое раздвоение спектральных линий (если компоненты мало отличаются по спектру и блеску), либо колебание их, в последнем случае один компонент темный (рис. 60).

На рис. 60а показано движение двух компонентов А и В спектрально-двойной звезды. В положении А<sub>1</sub> и В<sub>1</sub> на спектрограмме смещений линий нет, а в положении А<sub>2</sub> и В<sub>2</sub> линии, даваемые звездой В, оказываются смещеными влево (к фиолетовому концу спектра), а линии от А — вправо. Получается раздвоение линий. Через промежуток времени, равный полуperiоду обращения компонентов, линии от А и В поменяются местами. На рис. 60 б компонент В темный (имеет очень слабый спектр). В этом случае будет наблюдатьться периода-

ваемых звездой  $A$ , расположенных по положению спектральных линий, да-

ния  $H$  связано с трудностями спектрофотографирования для далеких и слабых галактик, а близкие галактики, имеющие большие дисперсии в лучевых скоростях, не дают уверенных определений постоянной Хаббла.

Закон Хаббла констатирует очень интересное положение: чем дальше от нас галактика, тем с большей скоростью она удаляется. К настоящему времени непосредственными измерениями определено красное смещение галактик от 1200 км/сек до 61000 км/сек и даже до 92000 км/сек. Наибольшие красные смещения имеют квазары (открыты в 1963 г.). Так, квазар 3C 147<sup>1</sup> имеет  $v_r = 121000$  км/сек и соответствующее расстояние в несколько миллиардов световых лет; у квазара 3C 9  $v_r = 240000$  км/сек и  $\Delta \approx 8$  млрд. с. лет. Большие красные смещения и у квазизвездных галактик (эти объекты открыты в 1965 г.). У одной из них  $v_r = 200000$  км/сек.

При правильном значении постоянной Хаббла формула (16) может служить средством для определения расстояния до галактики или ее лучевой скорости по измеренному смещению спектральных линий.

### 3. Красное смещение галактик

В спектрах почти всех галактик спектральные линии смещены к красному концу. Это значит, что лучевые скорости галактик положительны и галактики удаляются от системы Млечного Пути (от нас). Это интересное явление *разбегания галактик* называется еще *красным смещением*. Так как наша Галактика не имеет никакого премущественного положения во Вселенной, наблюдаемое разбегание галактик является выражением взаимного удаления галактик друг от друга. Интересной особенностью красного смещения галактик является прямая зависимость его от расстояния  $\Delta$  до галактик от нас (закон Хаббла)

$$v_r = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = H \Delta, \quad (16)$$

где  $H$  — постоянная Хаббла. Точное значение  $H$  пока не установлено. Примерно можно считать<sup>1</sup>, что  $H = 100$  км/(сек · Мпс)<sup>2</sup>. Незнание правильного значения

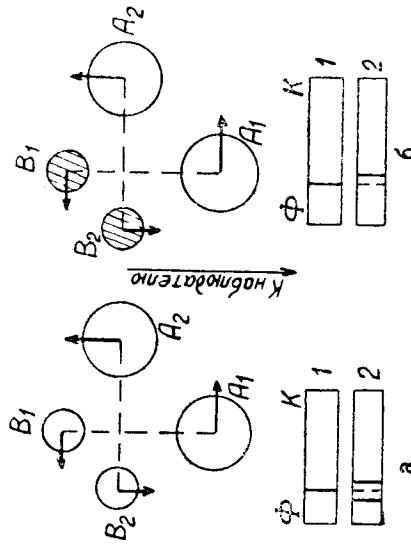


Рис. 60. К обнаружению двойственности звезды.

### 4. Замечания

1. При измерении допплеровского смещения спектральных линий надо учитывать смещение, вызываемое движением Земли вокруг Солнца со скоростью около 30 км/сек. Линии в спектрах звезд, к которым в данный момент приближается Земля, имеют смещение к фиолетовому концу спектра порядка  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = 10^{-4}$ , что легко может быть измерено (если  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ , то  $\Delta \lambda = 0.5 \text{ \AA}$ ). Это наибольшее смещение спектральных линий, вызванное движением Земли, оно бывает у звезд, находящихся около земного апекса (у звезд близ антапекса такое же смещение, но к красному концу спектра).

2. От допплеровского смещения спектральных линий надо отличать смещение вследствие эффекта Зеемана, т. е. под действием внешнего магнитного поля, в котором находится источник света. Рассмотрим простейшие случаи этого эффекта.

<sup>1</sup> Вероятно, значение  $H$  заключено между 75 и 180 км/(сек · Мпс).

<sup>2</sup> 1 Мпс =  $10^6$  с.

1 ЗС — обозначение Третьего Кэмбриджского каталога радиоисточников (1959 г.).

лучение направлено вдоль магнитного поля) каждая спектральная линия расщепляется на две компоненты (дублет) с длинами волн  $\lambda \pm \Delta\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны линии при отсутствии магнитного поля. При нормальном (триплет) с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda \pm \Delta\lambda$ . При этом свет линий оказывается поляризованным: в продольном эффекте по кругу в противоположных направлениях, в поперечном — в центральной линии плоско: для боковых линий поперек поля, для нормального эффе́кта плоско: для боковых линий вдоль направления поля.

Нормальный эффе́кт Зеемана наблюдается в сильных магнитных полях. Величина расщепления  $\Delta\lambda$  пропорциональна напряженности  $H$  магнитного поля  $\Delta\lambda \sim H^2$ . По зеемановскому смещению линий в спектре можно судить о наличии и величине магнитного поля. Так, магнитные поля на Солнце, в области пятен, были обнаружены этим способом в 1908 г. Джорджем Эллери Хэйлом (1868—1938).

Расщепления линий в спектре Солнца не превышают  $0,1\text{\AA}$ , поэтому для их измерения и поляризационного исследования требуются спектральные приборы большой точности. Современные методы позволяют измерять на Солнце магнитные поля в  $1-2$  эрстеда, которые имеют в любой точке солнечного диска.

### 3. Эффект Эйнштейна.

Свойства света, излучаемого источником, зависят от силы тяжести. Покидая массивное тело, фотон часть своей энергии  $\epsilon = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота, расходует на совершение работы по преодолению поля тяжести. В результате его частота  $\nu$  уменьшается ( $\lambda$  увеличивается). Свет «краснеет». В спектрах это должно выразиться в смещении линий к красному концу. Для Солнца это смещение ничтожно (порядка  $0,01\text{\AA}$ ), а для некоторых звезд должно учитываться. Так, в спектре Сириуса  $B$  и в спектре  $40\text{~S}\alpha$  Солнца. В оно в  $30-35$  раз превосходит смещение для

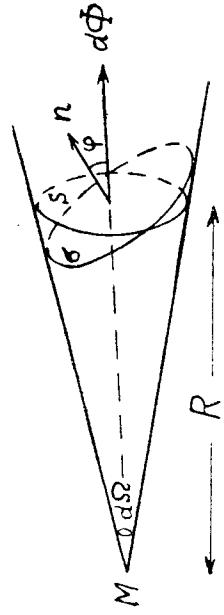


Рис. 61. К определению понятий фотометрии.

Напомним содержание основных фотометрических величин, которыми характеризуют излучение различных тел.

Количество энергии  $d\Phi$ , проходящей через данную площадку  $\sigma$  в единицу времени, называется потоком энергии через данную площадку (рис. 61). Если принимается энергия во всех длинах волн, то поток называется интегральным; если энергия принимается в отдельной узкой области спектра, получается монохроматический поток. Интегральный поток энергии измеряется единицами мощности ( $\text{er}/\text{сек}$ ,  $\text{эр}/\text{сек}$ ), а монохроматический — единицами мощности, отнесенной к единичному интервалу длии волн ( $\text{эр}/\text{сек} \cdot \text{см}$ ) или частот ( $\text{эр}/\text{сек} \cdot \text{гц}$ ).

Полный поток энергии, идущий от источника  $M^1$  по всем направлениям, равен

$$\Phi = \int d\Phi.$$

Величина потока энергии от точечного источника, приходящегося на единицу телесного угла, называется силой света  $I$  (рис. 61)

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$

<sup>1</sup> Имеется в виду точечный источник энергии.

## § 30. Понятие об астрофотометрии

Астрофотометрия занимается измерением общего излучения небесных тел. Естественным и первым приемником излучения был

Если поток света равномерен во всех направлениях, то сила света источника постоянна и равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}.$$

Световой поток, подающий на единицу площади освещаемой поверхности, создает освещенность этой поверхности  $E$  (рис. 61)

$$E = \frac{d\Phi}{\sigma} = \frac{Id\Omega}{\sigma} = \frac{I \cos \varphi}{R^2}. \quad (17)$$

В астронометрии понятие освещенности очень важно, так как все фотометрические измерения связаны именно с освещенностью.

В астрономии освещенность, созданную светом данной звезды в глазу наблюдателя, принято называть видимым блеском этой звезды. Блеск звезды  $E$  обычно выражается в видимых звездных величинах  $m$ .

Блеск каких-либо двух звезд  $E_0$  и  $E_1$  связан с их звездными величинами  $m_0$  и  $m_1$  формулой (1) § 5

$$\frac{E_0}{E_1} = 2,512^{m_1 - m_0}. \quad (18)$$

Логарифмируя это выражение, получаем формулу Погсона

$$\lg \frac{E_0}{E_1} = 0,4(m_1 - m_0). \quad (19)$$

Эта формула, вообще говоря, справедлива для любых двух источников, создающих освещенности  $E_1$  и  $E_0$ . Для того, чтобы формула (19) годилась для вычислений, необходимо выбрать «нуль-пункт», т. е. некоторому источнику света, например, какой-нибудь конкретной звезде, присвоить вполне определенные значения видимой звездной величины ( $m_0$ ) и блеска ( $E_0$ ). Можно было бы, например, принять освещенность, созданную светом, приписанную к плоскости  $\sigma$ , элементарная площадка сферической поверхности  $S = d\Omega R^2$ , с другой стороны,

<sup>1</sup> Из рис. 61, где  $n$  — нормаль к плоскости  $\sigma$ , элементарная площадка поверхности  $S = d\Omega R^2$ , с другой стороны,  $S = \sigma \cos \varphi$ , откуда  $d\Omega = \frac{\sigma \cos \varphi}{R^2}$ .

<sup>2</sup>  $\lg 2,512 = 0,4$ .

том такого источника, за единицу ( $E_0 = 1$ ), положив его звездную величину  $m_0 = 0$ . Наиболее удобным было бы за единицу освещенности принять какую-либо физическую единицу (скажем, люкс), но астрономическая единица блеска (звездная величина) возникла раньше, чем физические единицы освещенности, поэтому при установлении соотношения между звездной величиной и люксом пришлось исходить из тех нуль-пунктов, которые были установлены разными фотометристами с некоторой произвольностью.<sup>1</sup> Измерения, произведенные в XIX и XX вв., привели к следующему соотношению: звездная величина  $m_0$  одного блеска равна  $m_0 = -14^m 18 \pm 0^m 05$ . Это значит, что звезда, звездная величина которой  $-14^m 18$ , находится в зените, давала бы на поверхности Земли освещенность в  $1 \text{ лк}$ . При прохождении через земную атмосферу часть светового потока звезды теряется (около 23%), поэтому за пределами земной атмосферы освещенность в  $1 \text{ лк}$  давала бы звезда со звездной величиной  $m^0 = -13^m 89 \pm 0^m 05$ .

Освещенность от Солнца в ясный летний день на поверхности Земли составляет  $100\,000 \text{ лк}$ , от полной Луны  $0,25 \text{ лк}$ , для всего ночного неба в беззумную ночь только  $0,0003 \text{ лк}$ .<sup>2</sup> Источник света сплошь в одну свечу с расстояния в  $1 \text{ км}$  казался бы звездой в  $0^m 8$ , а с расстояния в  $10 \text{ км}$  — звездой в  $5^m 8$ .

Таким образом, в формуле (19) величины для звезды-эталона  $m_0$  и  $E_0$  вполне определенные, и по измеренной освещенности (блеску) наблюдавшей звезды  $E_1$  можно вычислить ее звездную величину  $m_1$ . В таблице 1 (§ 5) приведены видимые звездные величины некоторых небесных тел.

Излучение светила может быть принято и оценено непосредственно глазом наблюдателя (визуальные наблюдения), фотографической (фотографические наблюдения) или каким-либо иным приемником радиации (фотоэлемент).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Например, в одном случае считают, что звезда  $\alpha$  Лиры имеет блеск  $\text{p} = 0^m 14$ , и, исходя из этого, оценивают блеск других звезд. В другом случае признают, что у звезды  $\alpha$  Тельца  $m = 1,00$ , и измеряют сравнивают с характеристиками этой звезды.

<sup>2</sup> В настоящее время нуль-пункт шкалы звездных величин определен по группе хорошо изученных звезд (так называемый Северный Полярный Ряд, сокращенное обозначение СПР или NPS).

Но для работы за столом (ченне, письмо) достаточно освещенность в  $20 \text{ лк}$ .

мені, термоэлемент, радиометр, болометр). Глаз, фотографическая пластиинка и фотоэлемент по-разному воспринимают различные длины волн, их чувствительность к лучам различных длин различна; эти приемники излучения являются *селективными*. Термоэлемент, радиометр, болометр одинаково чувствительны к лучам любого участка спектра, они *неселективные*. Поэтому суммарный блеск небесного светила будет оценен по-разному в зависимости от того приемника, которым пользовались при измерении излучения. Так, глаз, воспринимая свет в пределах от красных ( $\lambda = 0,68 \text{ мк}$ ) до фиолетовых ( $\lambda = 0,43 \text{ мк}$ ) лучей, наиболее чувствителен к желтым лучам ( $\lambda = 0,55 \text{ мк}$ ), а обычная фотопластиинка, реагируя на ультрафиолетовые, фиолетовые и сине-зеленые лучи, имеет наибольшую чувствительность в фиолетовых лучах ( $\lambda = 0,44 \text{ мк}$ )<sup>1</sup>. Предположим, что некоторая звезда излучает только красный и фиолетовый свет, причем энергия красных лучей в два раза превосходит энергию фиолетовых лучей, тогда фотографический блеск этой звезды окажется в 2 раза меньше, чем визуальный, а неселективный приемник оценит блеск в 1,5 раза больше, чем глаз.

В зависимости от используемого приемника излучения различают *визуальную, фотографическую и болометрическую* звездные величины. При визуальных фотометрических наблюдениях блеск  $E_1$  звезды звездной величины  $m_1$  обычно сравнивают с помощью фотометра с блеском искусственного источника света. Наблюдатель изменяет блеск искусственной «звездочки» до тех пор, пока не уравняет его с блеском исследуемой звезды. Затем такие же действия повторяют, наведя телескоп на звезду с известной звездной величиной ( $m_0$ ). Зная, в каком отношении был изменен блеск исследуемой звезды ( $E_1$ ) к звезде сравнения ( $E_0$ ), а также  $m_0$ , по формуле Погсона определяют  $m_1$ . Измерения с помощью визуальных фотометров дают значения звездных величин с точностью до сотых долей звездной величины.

Для определения звездных величин на фотографических пластиинках используется то обстоятельство, что, чем ярче звезда, тем больше диаметр ее изображения. Поэтому

<sup>1</sup> Специальные сорта пластинок воспринимают желтоокрасные и даже инфракрасные участки спектра.

### § 31. Абсолютная звездная величина и светимость

Видимая звездная величина  $m$  не дает никаких сведений ни об общей энергии звезды, ни об ее поверхности яркости, так как различные звезды находятся на разных расстояниях от наблюдателя. В зависимости от расстояния более слабая звезда может иметь меньшую звездную величину (больший блеск), чем звезда, излучающая сильнее, но находящаяся дальше.

Чтобы можно было сравнивать звезды по излучаемой ими энергии, условились звездную величину светила, отнесенного на расстояние в  $10 \text{ pc}$ , называть *абсолютной звездной величиной*  $M$ , а блеск, который звезда имела бы, находясь на расстоянии в  $10 \text{ pc}$  от наблюдателя, — *абсолютным блеском*  $E_0$ .

Пусть некоторая звезда, находящаяся на расстоянии  $\Delta$ , имеет видимую звездную величину  $m$  и видимый блеск  $E$ . Для расстояния в  $10 \text{ pc}$  звездная величина и блеск этой звезды будут соответственно  $M$  и  $E_0$ . Можно применить формулу (19)  $m_1 - m_0 = -2,5 \frac{E_1}{E_0}$ , заменив  $m_1$  и  $E_1$  на  $m$  и  $E$ , а  $m_0$  и  $E_0$  на  $M$  и  $E_0$ . Будем иметь

$$M - m = 2,5 \lg \frac{E}{E_0}. \quad (20)$$

Так как освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния (формула 17), а мы имеем дело с одной и той же звездой, то  $\frac{E}{E_0} = \frac{10^2}{\Delta^2}$  и  $\lg \frac{E}{E_0} = 2(1 - \lg \Delta)$ , после чего формула (20) принимает вид  $M - m = 5 - 5 \lg \Delta$  или

$$M = m + 5 - 5 \lg \Delta. \quad (21)$$

Следовательно, формула связывает абсолютную звездную величину с расстоянием до звезды.

Визуальная абсолютная звездная величина нашего Солнца равна  $4^m.84$ , болометрическая —  $4^m.7$ .

Поток энергии, излучаемый звездой по всем направлениям, называется ее *светимостью*  $L$ . В астрономии светимость обычно выражается в светимостях Солнца ( $\Phi_C = L_C = 3,86 \cdot 10^{33}$  эрг/сек),

$$L = \frac{\Phi}{\Phi_C} = \frac{I}{I_C} . \quad (22)$$

Светимость звезды  $L$  можно связать с абсолютными звездными величинами этой звезды  $M$  и Солнца  $M_C$ . Заменив в формуле Погсона (19)  $m_1$  на  $M_C$ ,  $m_0$  на  $M$ ,  $E_1$  на  $E_C$ ,  $E_0$  на  $E$ , получим

$$M_C - M = 2,5 \frac{E}{E_C}$$

или с учетом формулы (22)  $\frac{E}{E_C} = \frac{\Phi}{\Phi_C} = L$ , так как

$$E = \frac{I}{10^2}, \quad E_C = \frac{I_C}{10^2},$$

$$M = M_C - 2,5 \lg L, \quad (23)$$

Таблица 11

Звезда	Абсолютная величина $M$	Светимость $L$ ( $L_C = 1$ )	
		М	$M_C - M$
Канопус	—	—	24 000
Ригель	— 6 <sup>m</sup> .1	— 6 <sup>m</sup> .1	16 000
Денеб	— 5,8	— 5,8	10 000
Бетельгейзе	— 5,2	— 5,2	2 800
Арктуру	— 3,9	— 3,9	80
Вега	0,0	0,0	50
Сириус	+ 0,6	+ 0,6	23
Альтаир	+ 1,3	+ 1,3	8
Солнце	+ 2,5	+ 2,5	1
е Индийца	+ 4,7	+ 4,7	0,13
Сириус В	+ 7,0	+ 7,0	0,009
Звезда Барнarda	+ 10,0	+ 10,0	0,0003
Звезда ван-Маана	+ 13,4	+ 13,4	0,0002
Вольф 359	+ 14,3	+ 14,3	0,0002
	+ 16,5	+ 16,5	0,0002

откуда

$$\lg L = 0,4(M_C - M). \quad (23')$$

Вычисленные по формулам (21) и (23') абсолютные величины и светимости звезд оказались очень различными (таблица 11).

### § 32. Спектральные параллаксы звезд

Если известно расстояние до звезды, т. е. известен ее тригонометрический параллакс,  $\Delta = \frac{1}{\pi''}$  (§ 24), то по формуле (21) можно вычислить абсолютную звездную величину  $M = m + 5 - 5 \lg \Delta$  или  $M = m + 5 + 5 \lg \pi''$ . Если известно значение абсолютной звездной величины звезды, то с помощью формулы (21) можно получить расстояние до звезды  $\lg \Delta = 1 + 0,2(m - M)$  или ее параллакс

$$\lg \pi'' = 0,2(M - M) - 1. \quad (24)$$

Абсолютная величина звезды  $M$  может быть определена по отношению интенсивностей некоторых линий в ее спектре. Поэтому параллаксы звезд, вычисленные по формуле (24), называются *спектральными* (§ 57).

Спектроскопическое определение параллаксов звезд может быть использовано и для близких, и для далеких звезд. Оно значительно проще, чем определение тригонометрических параллаксов, так как для него требуется лишь хорошая спектрограмма звезды. Совпадение результатов обоих методов достаточно высокое. Совпадение спектральных параллаксов.

### § 33. Понятие о применении фотографии в астрономии

В настоящее время визуальные наблюдения с самыми различными инструментами часто заменяются фотографированием. Фотография обладает рядом достоинств, к числу которых относятся:

1. Моментальность — свойство фиксировать даже очень кратковременные явления.

2. Документальность — возможность сохранять фотографическую пластиинку как документ и изучать изображение на ней в любое время. Архивы фотографистикон («стеклянные библиотеки») имеются в каждой обсерватории и представляют большую ценность.

3. Объективность — свойство фиксировать наблюдаемые явления, объект такими, какими они есть в действительности. При фотографировании совершил устраиняется индивидуальные особенности наблюдателя.

4. Панорамность — возможность одновременно снять целый ряд небесных тел.

5. Интегральность — способность накапливать световое воздействие. Увеличение выдержки (экспозиции) позволяет получать изображения слабых объектов, недоступных визуальным наблюдениям с тем же телескопом.

К преимуществам фотографии следует также отнести возможность получать изображения тел, вообще недоступных пока визуальным наблюдениям с Земли (например, фотографирование обратной стороны Луны).

В настоящее время специальные сорта фотопластинок воспринимают самые различные участки оптического спектра, поэтому фотография вполне может заменить человеческий глаз. Больше того, фотографическим методом можно исследовать тела в лучах, не воспринимаемых глазом (У-лучи, рентгеновские, ультрафиолетовые, инфракрасные). Однако применение фотографии ограничивается чувствительностью фотографических эмульсий и зернистостью получаемого изображения.

Вот некоторые примеры применения фотографии в современной астрономии:

1. Фотографирование участков звездного неба с астрометрическими целями.
2. Фотографирование протижных небесных тел.
3. Фотографирование солнечной короны.
4. Фотографирование поверхности Луны и планет.
5. Фотографирование звезд с фотометрическими целями.

6. Фотографирование участков неба с целью открытия малых планет, комет, переменных звезд.

## § 34. Определение температуры небесных тел

### 1. Понятие температуры. Тепловое излучение тел.

#### Яркостная, эффективная, цветовая температуры

Температура — очень важная характеристика тела, от которой зависят его основные физические свойства.

Определение температуры небесных объектов является

сложной задачей астрофизики. Пока что астрономы лишиены возможности измерять температуры небесных тел непосредственно. Первый опыт такого определения температуры был осуществлен советской автоматической станцией «Венера-4» на планете Венера 18 октября 1967 года.

Кроме того, привычные для нас методы определения температуры с помощью термометра, основанные на использовании теплового равновесия термометра и тела, температура которого измеряется, принципиально не годятся для тел, не находящихся в термодинамическом равновесии.

Напомним, что такое температура. Как известно, частицы тела находятся в беспорядочном тепловом движении. Отдельная молекула с массой  $m$ , движущаяся со скоростью  $v$ , обладает кинетической энергией  $\epsilon = \frac{mv^2}{2}$ . Из-за постоянных столкновений скорости и кинетическая энергии частиц все время меняются, но можно говорить о среднем для всех частиц в данный момент значении энергии  $\epsilon_0$ , которое равно  $\epsilon_0 = \frac{3}{2}kT$ , где  $T$  — абсолютная температура тела,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ дж/град}$  — постоянная Больцмана.

Из этой формулы имеем  $T = \frac{2}{3k}\epsilon_0$ , что позволяет дать следующее определение понятия температуры. Абсолютная температура тела — это величина, которая характеризует тепловое состояние тела и определяется значением средней кинетической энергии, приходящейся на одну частицу.

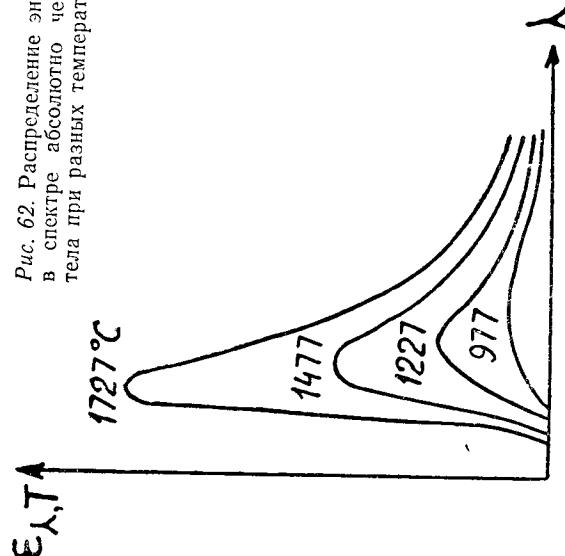
Очень часто, желая подчеркнуть содержание, которое вкладывается в понятие температуры, пользуются термином *кинетическая температура*.

О температуре небесных объектов можно судить по их излучению. Здесь нам придется напомнить некоторые сведения, касающиеся теплового излучения тел. Всякое нагретое тело излучает электромагнитные волны, но при низких температурах излучаются в основном радиоволны и инфракрасные лучи, которые от земных источников, как правило, не улавливаются. С ростом температуры спектр излучения тела меняется: постепенно начинают появляться все более короткие волны: видимые, ультрафиолетовые, рентгеновские. При конкретном

значении температуры тело сильнее всего излучает во вполне определенной области спектра. Так, при температуре около  $2000^{\circ}$  больше всего излучается инфракрасных лучей, при  $6000^{\circ}$  — желто-зеленых и т. д.

Для теплового излучения тела с абсолютной температурой  $T$  отношение излучательной способности  $e_{\lambda,T}$  в данной длине волн (в интервале от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ) к поглоща-

Рис. 62. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела при разных температурах.



тельной способности  $a_{\lambda,T}$ <sup>1</sup> в той же длине волны<sup>1</sup> зависит только от длины волны и температуры тела (закон Кирхгофа)

$$\frac{e_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = \varepsilon_{\lambda,T}. \quad (25)$$

<sup>1</sup> Излучательной (испускающей) способностью тела  $\varepsilon_{\lambda,T}$  называется величина энергии, излучаемой единицей поверхности тела в одну секунду в единичном интервале длин волн. Поглощательная способность  $a_{\lambda,T}$  тела определяется отношением величины поглощенной телом энергии к величине падающей энергии. Излучательная и поглощательная способности тела зависят от длины волны и температуры тела.

Поток энергии, излучаемый единицей поверхности тела во всех направлениях в данном интервале длин волн  $d\lambda$  при температуре  $T$  равен  $d\Phi_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} d\lambda$ .

Универсальная функция  $\varepsilon_{\lambda,T}$ , справедливая для всех тел, представляет собою излучательную способность абсолютно черного тела<sup>1</sup>. На рис. 62 приведены найденные экспериментально кривые распределения энергии в спектре абсолютно черного тела при нескольких температурах. По оси ординат отложено значение  $\varepsilon_{\lambda,T}$  при разных температурах, по оси абсцисс — длина волны  $\lambda$ .

Излучательная способность абсолютно черного тела теоретически была получена Максом Планком (1858—1947).

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT}} - 1}, \quad (26)$$

где  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ эВ} \cdot \text{сек}$  — постоянная Планка. Формула Планка превосходно описывает кривые, представленные на рис. 62.

До определения Планком излучательной способности абсолютно черного тела  $\varepsilon_{\lambda,T}$  были получены закон Стефана — Больцмана, закон Вина и закон Рэлея — Джинса<sup>3</sup>.

Закон Стефана — Больцмана дает зависимость суммарного излучения с единицы поверхности абсолютно черного тела  $\varepsilon_T$  от его температуры

$$\varepsilon_T = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda,T} d\lambda = \sigma T^4, \quad (27)$$

где  $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}^4$  — постоянная Стефана — Больцмана.

Вильгельм Вин (1864—1928) пришел к выводу, что излучательная способность абсолютно черного тела име-

<sup>1</sup> Абсолютно черным телом называется тело, которое поглощает все падающие на него лучи. Другими словами, для абсолютно черного тела поглощательная способность  $a_{\lambda,T} = 1$ .

<sup>2</sup> Другой вид формулы Планка

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

где  $\nu$  — частота.  
<sup>3</sup> Джозеф Стефан (1835—1893); Людвиг Эдуард Больцман (1845—1906); лорд Рэлей (Джон Стротт, 1842—1919); Джеймс Хоппуд Джинс (1877—1946).

ет вид  $\varepsilon_{\lambda,T} = \frac{c^5}{\lambda^5} f \left( \frac{c}{\lambda T} \right)$ , где  $f$  — некоторая функция, не определенная Вином. Из этой формулы Вин получил закон смещения

$$T \cdot \lambda_{\max} = b, \quad (28)$$

показывающий, что с ростом температуры положение максимума  $\varepsilon_{\lambda,T}$  смещается в область коротких волн и определяется значением длины волн  $\lambda_{\max}$ ,  $b = 0,2897 \text{ см} \cdot \text{град} = 2,897 \cdot 10^7 \text{ \AA} \cdot \text{град}$ .

Рэлей и Джинс получили формулу  $\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\nu v^2}{c^2} k T$ ,

которая совпадала с опытными данными только в области больших длин волн.

Формула Планка является полным решением задачи об излучении абсолютно черного тела. Из формулы Планка получаются и все упомянутые законы.

Тепловое излучение реальных тел отличается от излучения абсолютно черного тела. Согласно закону Кирхгофа  $e_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} \cdot a_{\lambda,T}$ , откуда следует, что  $e_{\lambda,T} < \varepsilon_{\lambda,T}$ , так как  $a_{\lambda,T} < 1$ . Это значит, что для любой длины волны излучательная способность реального тела не может быть больше излучательной способности черного тела при одной и той же температуре. Другими словами, законы излучения абсолютно черного тела не применимы к реальным телам. Однако на практике все же приходится пользоваться этими законами и для реальных тел с некоторыми допущениями. Это позволяет характеризовать излучение реальных тел одной величиной — температурой, но при разных допущениях получаются разные температуры. Определим некоторые из них.

Если бы всегда была известна поглощающая способность  $a_{\lambda,T}$  реального тела, то из закона Кирхгофа с учетом формулы Планка

$$e_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{h c}{k T} - 1} \cdot a_{\lambda,T} \quad (29)$$

можно было бы определить истинную температуру этого тела  $T$ . Так как  $a_{\lambda,T}$  неизвестно, то полагают  $a_{\lambda,T} = 1$  и

при этом условии определяют температуру излучающего тела, она называется *яркостной* или *черной*, температурой  $T_{\text{ярк}}$ . Ее можно определить так. Яркостной температурой излучающего тела  $T_{\text{ярк}}$  называется такая температура, которую имело бы абсолютно черное тело, излучающее в данной линии волны такая же, как у рассматриваемого излучателя в той же линии волны. Из определения яркой температуры вытекает, что в зависимости от выбранного участка спектра  $(d\lambda)$  для тела могут быть получены разные значения яркостной температуры, так как кривая распределения энергии тела отличается от планковской кривой.

Если допустить, что для излучения тела имеет место закон Стефана — Больцмана (27), то определенная при этом допущении температура называется *эффективной*  $T_{\text{эфф}}$ . Эффективной температурой излучающего тела  $T_{\text{эфф}}$  называется такая температура, которую имело бы абсолютно черное тело, излучающее с каждого квадратного сантиметра поверхности в 1 сек столько энергии, сколько излучает данное тело

$$e_T = \sigma T_{\text{эфф}}^4. \quad (30)$$

Так как эффективная температура входит в формулу в четвертой степени, то хотя  $T_{\text{эфф}} < T$ , это отличие незначительно. Расхождение между значениями эффективной и истинной температур в большей степени объясняется невозможностью измерить  $e$  на всем диапазоне длин волн. Если при определении температуры тела получаются близкие друг к другу значения  $T_{\text{эфф}}$  и  $T_{\text{ярк}}$  при разных  $\lambda$ , то это является веским доводом в пользу того, что данное тело по характеру излучения близко к абсолютно черному телу.

Определение эффективной и яркостной температуры тела требует абсолютных спектрофотометрических измерений. Это значит, что прибор (например, болометр) должен давать показания, характеризующие распределение энергии в спектре, в абсолютных единицах (в эрг), так как для вычисления  $T_{\text{ярк}}$  (формула 29) или  $T_{\text{эфф}}$  (формула 30) необходимо знать излучательную способность тела  $e_{\lambda,T}$  (или поток  $d\Phi_{\lambda,T} = e_{\lambda,T} \cdot d\lambda$ ) или суммар-

У астрономических объектов, как правило, практически нельзя подобрать одну и ту же цветовую температуру на всем наблюдаемом участке спектра. Это говорит о том, что рассматриваемое тело не является близким к абсолютно черному.

Спектрофотометрические измерения, как абсолютные, так и относительные, — очень сложные и тонкие измерения, они требуют учета целого ряда поправок. Помимо использования закона излучения для определения температуры небесных объектов в астрофизике применяют и другие методы, например, используются выводы теории ионизации звездных атмосфер или исследуются распределение энергии в спектральной линии (профиль линии).

Рассмотрим результаты определения температур для некоторых небесных тел.

## 2. Температура Солнца

При измерении температуры Солнца могут быть использованы все названные методы, хотя каждый из них дает температуру слоя, расположенного на определенной высоте.

Таблица 12

Способ измерения температуры	Название температуры	Значение температуры, $^{\circ}\text{К}$
По максимуму излучения (закон Вина)	—	6 750
По полному излучению (закон Стефана—Больцмана)	Эффективная температура	5 800
По интенсивности монокроматического излучения (по формуле Планка)	Яростная температура	
$\lambda = 1000 \text{ \AA}$		4 500
$\lambda = 2500 \text{ \AA}$		5 000
$\lambda = 5500 \text{ \AA}$		6 400
$\lambda = 1 \text{ м}$		1 000 000
По относительному распределению энергии в интервале длин волн	Цветовая температура	
4700 — 5400 $\text{\AA}$		6 500
4300 — 4700 $\text{\AA}$		8 000

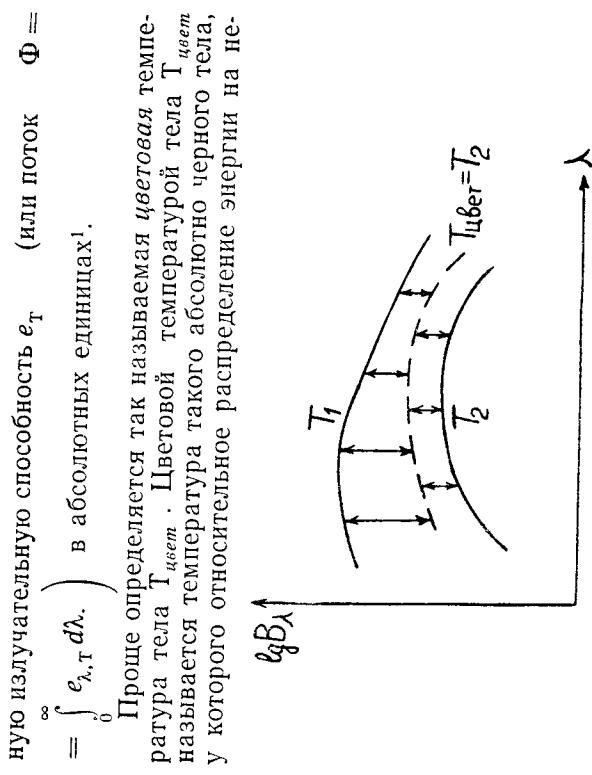


Рис. 63. К определению цветовой температуры.

котором участке спектра такое же, как и у данного тела.

Ее определение основано на относительных измерениях. Предположим, что по показаниям некалиброванного брометра получено распределение энергии в спектре некоторого тела и построена кривая этого распределения энергии по формуле Планка для некоторых температур, для которых ход кривых напоминает ход исследуемой кривой. Та кривая, которая равноточит от наблюдаемой кривой, наблюдаемая кривая повторяет кривизну теоретической кривой на достаточно широком участке спектра, можно считать, что тело как излучатель близко к абсолютно черному телу, а его цветовая температура близка к истинной температуре.

<sup>1</sup> Для определения  $T_{\text{эфф}}$ , надо знать еще действительные размеры точечного источника и расстояние до него, чтобы от измеренного потока перейти к  $e_T$ .

глубине в солнечной атмосфере. Результаты определения солнечной температуры приведены в таблице 12. Расхождение в значениях температур Солнца, полученных для разных слоев, свидетельствует о том, что излучение Солнца существенно отличается от излучения абсолютно черного тела.

### 3. Температура звезд

Определение температур звезд тоже основывается на допущении, что излучение звезды подобно излучению абсолютно черного тела. Как и в случае Солнца, это допущение неверно, но для большинства звезд оно незначительно искажает результаты, если производить измерение излучения на всем оптическом диапазоне длии волн. Наиболее широко используется для звезд определение цветовой и эффективной температуры. Измеренные температуры звезд показали, что индивидуальные определения их очень источны, особенно у горячих звезд, поэтому выводят средние значения температуры для групп звезд с одинаковыми спектрами. Оказалось, что основная масса звезд имеет поверхностные температуры, заключенные в пределах примерно от  $2000^{\circ}$  до  $20\,000^{\circ}$ — $30\,000^{\circ}$ . Для отдельных звезд, имеющих спектр с линиями излучения или являющихся ядрами так называемых планетарных туманностей, получены еще более высокие значения температуры.

### 4. Температура тел солнечной системы

Один из способов определения температуры планет основан на измерении потока их теплового излучения с помощью тепловых приемников радиации (болометр, радиометр, термоэлемент), чувствительных к инфракрасным лучам. Этот способ имеет свои трудности, так как надо исключить отраженное планетой солнечное излучение, учесть поглощение в земной атмосфере и др.

### 5. Температура радиоисточников

Земная атмосфера пропускает без существенного поглощения космическое радиоизлучение с длинами волн от нескольких миллиметров до  $20\text{--}25\text{ м}$ . В настоящее время принимается радиоизлучение от многих небесных тел: от

Солнца, планет, Луны, галактики, межзвездного и межгалактического газа. От звезд радиоволны пока не принимаются. Прием космического радиоизлучения связан с исключительными трудностями, так как, во-первых, потоки его от небесных тел, как правило, очень малы, а во-вторых, их нужно выделить на общем фоне приходящего со всех сторон как космического, так и земного радиоизлучения с самыми различными длинами волн (радиопомехи). Факт, что радиоизлучение принято от многих небесных объектов, свидетельствует об исключительно высокой чувствительности приемников космического радиоизлучения.

Количественные измерения радиоизлучения проводятся путем сравнения с источником радиоизлучения известной мощности (источник радиошумов). Мощность генерируемых радиошумов определяется температурой Т генератора. Поэтому мощность, принятого космического радиоизлучения выражают также с помощью температуры — температуры антенны  $T_a$ . Температуру антенны  $T_a$  называют температурой шумового генератора, дающего ту же мощность, что и исследуемый радиосигнал. Исследования показывают, что температура антенны  $T_a$  представляет собой температуру абсолютно черного тела, внутри которого надо было бы поместить антенну приемника радиации, чтобы она получала столько же энергии, сколько дает источник шумов. Эта температура может быть связана с температурой тела, излучающего радиоволны, подобной яркостной температуре. Однако для радиоволн можно пользоваться не формулой Планка, а формулой Рэля — Джинса  $B_{\lambda,T} = \frac{2kT}{\lambda^3}$ <sup>1</sup>. Таким образом, по принятому радиоизлучению может быть оценена яркостная температура тела.

В таблице 12 значение температуры  $1\,000\,000^{\circ}$  на радиоволне  $\lambda = 1\text{ м}$  получено по радиоизлучению Солнца. Результаты измерения температур планет по их радиоизлучению мы рассмотрим в следующей главе.

<sup>1</sup> Излучательная способность  $\varepsilon_{\lambda,T}$  тела тождественна его энтропийской светимости  $S_{\lambda,T}$ , которая связана с яркостью тела  $B_{\lambda,T}$  формулой  $S_{\lambda,T} = \pi B_{\lambda,T}$ . См. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, изд. 3, М., 1954.

## § 35. Определение масс небесных тел

Применяется несколько способов определения масс небесных тел.

1. Масса небесного тела может быть определена из измерений силы тяжести на его поверхности (гравиметрический метод). Этот метод пока применим лишь для определения массы Земли  $m_3$ . Ускорение свободного падения  $g$  на поверхности Земли на основании закона всемирного тяготения может быть представлено в виде

$$g = f \frac{m_3}{R^2}. \quad (31)$$

Постоянная тяготения  $f = 6,668 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{сек}^{-2}$  была измерена Генри Кэвендишем (1731—1810) еще в 1798 г., радиус  $R$  и ускорение  $g$  определяются из непосредственных измерений на поверхности Земли, поэтому формула (31) позволяет определить массу Земли

$$m_3 = \frac{gR^2}{f}. \quad (31')$$

Масса Земли составляет

$$m_3 = 5,975 \cdot 10^{27} \text{ г.}$$

2. Массы небесных тел могут быть оценены на основе уточненного Ньютона 3-го закона Кеплера

$$\frac{T_1^2(M+m_1)}{T_2^2(M+m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (32)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы тел, которые движутся вокруг тела  $M$ ;  $T_1$  и  $T_2$ ,  $a_1$  и  $a_2$  — соответственно период обращения и большая полуось орбиты первого и второго тел. Эта формула может быть еще записана в виде

$$\frac{T_1^2(M+m_1)}{a_1^3} = \frac{T_2^2(M+m_2)}{a_2^3}. \quad (32')$$

или

$$\frac{T^2(M+m)}{a^3} = \text{const} = \frac{4\pi^2}{f}$$

Формула (32') позволяет найти соотношение между массами Солнца и планеты, у которой имеется спутник.

Если обозначим массу Солнца  $M$ , массу планеты  $m$ , период ее обращения вокруг Солнца  $T$ , большую полуось орбиты  $a$ , массу спутника  $m_c$ , период его обращения вокруг планеты  $t_c$ , большую полуось орбиты  $a_c$ , то на основании 32<sup>1</sup> имеем

$$\frac{T^2(M+m)}{a^3} = \frac{t_c^2(m+m_c)}{a_c^3},$$

откуда

$$\frac{M+m}{m+m_c} = \frac{t_c^2 a^3}{T^2 a_c^3}$$

или после деления на  $m$

$$\frac{M/m+1}{1+m_c/m} = \frac{t_c^2 a^3}{T^2 a_c^3}. \quad (33)$$

Отношение  $m_c/m$  для всех спутников планет, кроме Луны, мало, им можно пренебречь. После этого определяется отношение  $M/m$ .

При получении соотношения между массами Солнца и Земли предварительно нужно определить массу Луны. Задача определения массы Луны, хотя и является очень сложной задачей, решена давно. Масса Луны составляет  $\frac{1}{81,30}$  массы Земли. После этого по формуле (33) можно вычислить отношение массы Солнца и Земли. Масса Солнца составляет

$$M_C = 333434 m_3 = 1,983 \cdot 10^{33} \text{ г.}$$

По массе Солнца с помощью формулы (33) вычисляется масса любой планеты, имеющей спутника.

3. Массы планет, не имеющих спутников, определяются на основе сравнения теоретических возмущений, которые они должны вызывать в орбите другой планеты, с наблюдаемыми эффектами.

Массы планет приведены в таблице 13.

Массы некоторых спутников определены по возмущениям, которые они вызывают в движении других спутников (таблица 14).

Таблица 13

Планета	$M_C : m$	Масса $m$		$10^{24} \text{ г}$
		$m_3 = 1$	Масса $m$	
Меркурий	6 120 000	0,054	0,32	
Венера	408 645	0,814	4,86	
Земля	333 434	1,000	5,975	
Марс	3 088 000	0,107	0,639	
Юпитер	1 047	318,37	1900	
Сатурн	3 497	95,08	570	
Уран	23 000	14,3	85,3	
Нептун	19 300	17,23	103	

Таблица 14

Планета	Спутник	Масса		$10^{24} \text{ г}$
		в массах планеты	Масса	
Земля	Луна	0,12	73,4	
Юпитер	Ио	0,000041	79	
	Европа	0,000025	47,8	
	Ганимед	0,000081	153	
	Каллисто	0,000048	90	
Сатурн	Титан	0,00025	137	
Нептун	Тритон	0,0014	150	

Об определении масс звезд будет сказано в § 59.

### § 36. О неоптических направлениях в астрономии

Мы уже отмечали (§ 27), что в астрономии в настояще время улавливается и исследуется излучение небесных объектов по всему спектру электромагнитных волн. Астрономия из науки «чисто оптической» (изучающей небесные тела путем приема их излучения в оптическом участке спектра) превращается в науку «многодиапазонную».

Первой неоптической ветвью в астрономии явилась *радиоастрономия*, рождение которой относится к 1929 г., когда Карл Янски впервые принял радиосигналы из космоса. Несмотря на сравнительно молодость, радиоастрономия сделала большое число самых различных и очень интересных открытий (радиогалактики, квазары, радиолокационные методы и др.). В радиоастрономии

кроме изучения собственного радиоизлучения небесных объектов, успешно развиваются *радиолокационные* методы исследования тел солнечной системы. К настоящему времени осуществлена радиолокация Луны, Венеры, Меркурия, Марса, Юпитера, Солнца; радиолокационные методы успешно применяются при исследовании метеоров.

В связи с успехами в ракетостроении начали развиваться внеатмосферные направления в астрономии, сделавшие уже первые открытия: *ультрафиолетовая* и *инфракрасная* астрономия (исследуется излучение в дальних областях ультрафиолетового и инфракрасного участков спектра, которое поглощается земной атмосферой и совершенно недоступно для изучения с поверхности Земли); получены значительные результаты относительно спектра Солнца, некоторые данные о планетах и ходовых звездах;

*гамма- и рентгеновская* астрономия (открыты рентгеновское излучение всего неба — диффузный космический рентгеновский фон — и мощные локальные источники рентгеновских лучей). Так, в 1966 г. обнаружено рентгеновское излучение радиогалактик Лебедь-А и Дева-А (NGC 4486). Галактика, расположенная в созвездии Лебедя и являющаяся мощным источником радиоизлучения, т. е. радиогалактикой, излучает в рентгеновском диапазоне почти в 100 раз сильнее, чем в радио и оптическом диапазонах вместе).

Обнаружено также несколько источников гамма-лучей. Развитие гамма- и рентгеновской астрономии только что началось.

К новым направлениям в исследовании Вселенной следует отнести не получившую пока результата *нейтринную астрономию*, целью которой является прием космических нейтрино, и *астрономию космических лучей* (первичные космические лучи регистрируются со спутников и ракет).

### § 37. Астрономические обсерватории

Специальные учреждения, которые занимаются астрономическими наблюдениями и теоретическими исследованиями, называются астрономическими *обсерваториями*. Отдельные проблемы астрономии изучаются в

научно-исследовательских институтах и специальных лабораториях и станциях. Обсерватории начали создаваться задолго до изобретения телескопа и были тогда оснащены различными угломерными инструментами. Обсерватория нашего времени не мыслима без телескопа.

Современные обсерватории могут быть смешанными, решающими различные задачи, или специализированными, ведущими, например, астрофизические исследования. В зависимости от задач, решаемых обсерваторией, она оснащается специальными инструментами и аппаратурой. Для выполнения главных астрономических исследований служит обычно самый большой рефрактор или рефлектор, имеющийся на данной обсерватории. Каждый астрономический инструмент устанавливается в отдельной башне с вращающимся куполом. Для изучения полученных путем наблюдений материалов (фотографий, спектрограмм) при обсерваториях имеются специальные лаборатории.

Работа обсерватории проводится по заранее составленному плану, в осуществлении которого участвует определенный коллектив наблюдателей, теоретиков и других работников. Многие астрономические работы могут успешно выполняться лишь при условии, что в них участвуют различные обсерватории («служба времени», «служба Солнца», создание фотографического атласа неба и др.).

За 50 лет советской власти астрономия в СССР достигла больших успехов. К настоящему времени создано прочная материальная база, действует большое количество обсерваторий, оснащенных крупными телескопами. Мировую славу завоевала Главная астрономическая обсерватория Академии Наук СССР в Пулкове. Пулковская обсерватория, основанная в 1839 г., во время Отечественной войны была полностью разрушена; она восстановлена и значительно расширена к 1954 г. Главным инструментом является рефрактор с диаметром объектива 66 см<sup>1</sup>.

Крымская астрофизическая обсерватория, включающая в себя обсерваторию в Симензе и вновь построен-

ную после войны обсерваторию недалеко от Симферополя, стоит в ряду лучших обсерваторий мира. Здесь находятся 260-сантиметровый рефлектор им. Г. А. Шайна (третий по величине в мире и первый в Европе), 122-сантиметровый рефлектор Цейса.

В Абастуманской обсерватории, открытой в 1932 г., был установлен первый большой светосильный менинковский телескоп системы Максутова<sup>1</sup> (диаметр  $D = 70$  см). Одной из лучших астрофизических обсерваторий является открытая в 1946 г. Бюраканская обсерватория Академии Наук Армянской ССР. Здесь установлен в 1955—56 гг. 70-сантиметровый менинковский телескоп системы Максутова. В настоящее время в Советском Союзе готовится к вводу в строй самый крупный в мире 6-метровый рефлектор.

Развитие радиоастрономии потребовало создания мощных радиотелескопов. За последнее десятилетие крупные радиотелескопы установлены под Серпуховым, Горьким, в Крыму, в Пулкове. Ведется конструирование более мощных радиотелескопов.

Среди крупнейших обсерваторий мира назовем обсерватории США: Маунт Паломар, где установлен самый большой в мире рефрактор с диаметром зеркала 5 м, и Иеркскую обсерваторию, которая имеет самый большой рефрактор ( $D = 102$  см). Самый большой в мире ( $D = 305$  м) радиотелескоп находится в обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико. Он представляет собой кратер потухшего вулкана, которому придали форму параболоида, после чего забетонировали и нанесли на бетон металлическую сетку. Антенна неподвижна.

Крупнейший наводимый радиотелескоп находится в Англии (обсерватория Джодрелл Бэнк,  $D = 76$  м).

<sup>1</sup> Дмитрий Дмитриевич Максутов (1896—1964).