

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ЦЕНТР СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО,
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

М. Мамадазимов

АСТРОНОМИЯ

*Учебник для академических лицеев
и профессиональных колледжей*

Издание второе



ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ
ТВОРЧЕСКИЙ ДОМ «O'QITUVCHi»
ТАШКЕНТ - 2008

Рецензенты: **Р. Г. Исянов** – кандидат педагогических наук, доцент;
И. Болтаев – руководитель отдела содержания и методики образования в академических лицеях, кандидат педагогических наук;
М. Курбанов – доцент физического факультета УзНУ.

ОТ АВТОРА

Дорогие учащиеся, наука астрономия, которая перед вами раскрывает сотни тайн Вселенной, возникла несколько тысяч лет назад до нашей эры. Люди поняли, что наблюдения за звездами могут быть полезны в повседневной практической деятельности: по ним можно ориентироваться на местности, предсказывать сезонные явления, определять суточное время и т. п. Когда путешественники и купцы Древнего Востока, защищаясь от дневного зноя, выезжали прохладной ночью в путь, звезды показывали им дорогу, помогали отсчитывать время суток, очаровывая красотой и таинственностью. Небесные явления казались им удивительной загадкой, их охватывало чувство страха и вместе с тем оно заставляло людей думать о причинах происходящих в небе явлений. Но небо не хотело так легко раскрывать свои секреты, иногда вынуждало людей искать объяснений в течение тысячелетий.

Непрерывное вращение звездного неба вокруг Земли, систематическое сезонное изменение его вида, изменение фаз Луны, солнечные и лунные затмения, «хвостатые кометы» — все это уже многие тысячи лет были тайной Вселенной. Замечая периодичность большинства явлений (суточность, месячность и годичность), люди стали пользоваться ими при определении времени в течение суток, в повседневной практической деятельности во время сельскохозяйственных и животноводческих работ, при выборе правильного пути в открытом море. В результате астрономия как наука стала развиваться в центрах древней цивилизации Востока — в Древнем Египте и Вавилоне, Индии, Китае и Центральной Азии и др.

В Центральной Азии уже в конце первого тысячелетия астрономия была одной из самых развитых наук. Можно гордиться десятками ученых-астрономов, наших предков, внесших большой вклад в изучение астрономии. Имена таких ученых IX века, как Мухаммад аль-Хорезми, Ахмад аль-Фергани, трудившихся в «Доме ученых» (Академия Маъмуна) в Багдаде, Абу Махмуд аль-Ходжанди в X веке, Абу Райхан Беруни, Абу Наср Мансур ибн Ирак и чуть позже Омар Хайям в XI веке и Насриддин ат-Туси в XIII в. известны всему миру. Научные наследия последних — бесценные жемчужины науки астрономии. Построе-

ние одной из наиболее значительных обсерваторий средневековья, создание астрономической школы в середине XV века в Самарканде Улугбеком, его знаменитый каталог о положении звезд на небе явились значительным вкладом в изучение Вселенной. Творческое наследие ученых Востока заложило основу важной в будущем науки астрономии.

Эти достижения ученых Востока позволили ученым мира и в первую очередь стран Европы построить новые обсерватории, сделать важные открытия в астрономии. Создание в Польше гелиоцентрической системы мира (Н. Коперник), в Милане (Италия) идей о бесконечности Вселенной и о том, что Солнечная система в ней — всего лишь небольшая система одной из звезд со своими спутниками (Дж. Бруно), открытие основных законов небесной механики в Германии (И. Кеплер) и всемирного тяготения и на его основе вычисление масс небесных тел в Англии (И. Ньютон) являются такого рода открытиями, которые стали важными факторами в формировании астрономии как одной из значительных наук в естествознании. Немаловажную роль в формировании теоретической астрономии сыграли результаты изучения движений Солнца, Луны и планет учеными астрономической школы Улугбека.

Астрономия, рассматривая Землю в качестве обыкновенного небесного тела Солнечной системы, знакомит вас с возникновением жизни на Земле. В результате эволюции, продолжавшейся в течение миллионов лет, в биосфере Земли появилось мыслящее существо — человек, явление, не имеющее себе подобных на других планетах. При этом вы осознаете, что существование жизни на Земле, животный и растительный мир и вообще природа в целом — уникальное космическое явление.

Земля в космосе — крохотный шарик, каждая ее пядь, леса, горы, прозрачная вода и даже воздух имеются в весьма ограниченных объемах и поэтому необходимо рассматривать их как бесценные богатства и пользоваться ими очень бережно и экономно.

В прошлом веке сбылась многовековая мечта — нога человека ступила на Луну. Совсем немного времени отделяет нас от сооружения на околоземной орбите международной космической станции, строительство которой началось всего семь

лет назад. В ближайшие годы планируется высадка космонавтов на Марс.

Новый XXI век, озаглавленный такими уверенными шагами в освоении космоса, требует: современный молодой человек должен быть осведомленным в астрономических представлениях о мире, не должен доверять нелепым выдумкам и суевериям (вроде астрологических предсказаний, космических пришельцев, летающих тарелок, хвостатых звезд как предвестников несчастий).

Человек — ничтожно малая частичка безграничного космоса, человеческая жизнь продолжается по сравнению с продолжительностью жизни Вселенной лишь одно мгновение. Но его появление на свет — это чудо, и прожить эту коротенькую жизнь надо так, чтобы не запятнать это гордое звание — Человек.

Будем надеяться, что в ближайшем будущем в нашей республике за счет талантливой молодежи в вашем лице наука пополнит число ученых-астрономов и займет достойное место в мировой истории развития этой науки.

При создании настоящего учебника автор использовал советы своих коллег — ученых-астрономов. Многие учебные и фотографические материалы были любезно предоставлены директором Астрономического института АН РУз, д.ф.м.н., профессором Ш.А. Эгамбердиевым. Автор выражает всем глубокую благодарность.

А вам, дорогие учащиеся, желаю всяческих успехов в овладении тайнами Вселенной.

Автор



I ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Астрономия и ее происхождение

В средней школе вы уже освоили понятия о Солнце, Луне, о планетах и звездах из курсов «Окружающий нас мир», «Природоведение», «Физика» и др., приобрели также элементарные знания относительно их движения, излучения и физической природе этих явлений. Учебный предмет, который вы будете изучать, обобщает, углубляет и расширяет ваши понятия и знания, и этот предмет называется астрономией. Астрономия — это наука о движении и происхождении космических тел, об их физической природе, о строении Вселенной в целом, местоположении нашей родной планеты — Земли в ней. Само слово «астрономия» происходит от двух греческих слов: «астро» означает звезда и «номос» — закон, т. е. наука, изучающая закономерности строения и развития звезд, других космических тел и их систем.

Нет, наверное, человека, который не любовался бы звездным небом, не пытался бы проникнуть в тайны безграничного космоса.



Рис. 1. Построенная в XX в. до н. э. обсерватория Стоунхендж (Великобритания) для изучения движения Луны и Солнца.

Тысячи сверкающих неподвижных звезд, движущиеся на их фоне «блуждающие звезды», «хвостатые» и «падающие» звезды, смены фаз Луны, затмения Солнца и Луны — все это на протяжении тысячелетий поражало воображение людей.

Как и многие другие науки, астрономия также возникла из практических нужд человека. С древнейших времен люди, наблю-



Рис. 2. Обсерватория, построенная в Центральной Америке в X в. племенем майя.



Рис. 3. Строение мироздания по Аристотелю (IV в. до н. э.).

дая ежегодные периодические изменения вида звездного неба, заметили их связь с сезонными изменениями и на основе этого они стали определять начало земледельческих и животноводческих работ, время наступления народных праздников. В дальних путешествиях они ориентировались на месте по звездам, определяли время и др. Истоки астрономии берут свое начало несколько тысяч лет назад в таких цивилизованных странах, как Древний Вавилон, Древний Египет, Китай, Индия, Великобритания и другие европейские страны (рис. 1 и 2). В частности, более трех тысяч лет до нашей эры египетские жрецы на основе наблюдений звездного неба могли предсказать разлив Нила, который имел огромное значение в экономической жизни страны. Они считали, что если на востоке с появлением утренней зари будет видна самая яркая звезда северного полушария — Сотис (т. е. Сириус), то вслед за этим начинается разлив реки Нил. Это позволило определить длину тропического года с большой точностью.



1. Что изучает астрономия?
2. Как сформировалась наука астрономия?

§ 2. Краткий исторический очерк

2.1. Представления о мироздании в Древней Греции.

Астрономы Древней Греции, наряду с наблюдениями, пытались объяснить причины астрономических явлений. В частнос-

ти, Пифагор (VI в. до н. э.) предположил, что Земля имеет форму шара, а Аристотель (IV в. до н. э.) явился создателем учения геоцентрической системы, исходящей из предположения, что в центре мира расположена неподвижная Земля (рис. 3).

Эратосфен, живший в Александрии в III в. до н. э., первым вычислил длину дуги меридиана, а позже, основываясь на этом, радиус нашей планеты. Знаменитый греческий ученый и философ Гиппарх составил первый каталог (таблицу) звезд, в котором приведены координаты сотен звезд.

Великий древнегреческий астроном Клавдий Птолемей, живший во II в. до н. э., в своем сочинении «Мегале синтаксис» («Великое построение»), обобщив результаты греческой астрономии, создал учение, основанное на геоцентрической теории Аристотеля — Гиппарха, объясняющей видимые движения планет.

Согласно этой теории, известные к тому времени пять планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн) движутся по окружностям, называемым эпициклами, центры которых, в свою очередь, движутся вокруг Земли по большим окружностям, называемым *деферентами*. Несмотря на то, что эта геоцентрическая теория не отражала действительное строение мира, она просуществовала в течение 15 столетий.

2.2. Астрономическое наследие восточных ученых.

В IX–XV вв. в странах Ближнего и Среднего Востока, Центральной Азии функционировали астрономические обсерватории. В них работали такие известные ученые, как аль-Баттани, аль-Фергани, аль-Хорезми, Абу-л-Вафа Бузджани, Абу Махмуд Худжанди, Абдурахман ас-Суфи, Ибн Юсуф и др. (рис. 4).

В частности, аль-Баттани, обобщив результаты, полученные греческими астрономами, определил некоторые данные, относящиеся к движениям Луны. Сочинение аль-Фергани «Основы астрономии» выполняло роль астрономической энциклопедии того периода. Абу-л-Вафа известен своими открытиями в теории движения Луны и работами по вычислению длины меридиана Земли.



Рис. 4. «Дом мудрости» астрономов Востока (IX–X вв.).

До нас дошло более 40 сочинений по астрономии известного узбекского ученого Абу Райхана Беруни, жившего в X–XI вв. В своем сочинении «Хронология» ученый, подробно изложив историю составления календарей многих народов Европы и Азии, дал их обоснования и правила перехода от одного летосчисления к другому.

В трактатах «Геодезия», «Канон Маъсуда об астрономии и звездах» и «Наука о звездах» Беруни приводит много сведений о Солнце, Луне, планетах и их движениях и излагает несколько способов определения радиуса Земли, известных в то время. Последователь Беруни Омар Хайям, также изложив несколько философских мыслей о Вселенной, разработал очень точный солнечный календарь.

В XV в. в Самарканде под руководством ученого-астронома Улутбека была построена самая крупная астрономическая обсерватория того периода. В течение нескольких десятилетий при обсерватории функционировала астрономическая школа, в которую входили известные ученые Кази-заде Руми, Гияс ад-Дин Джамшид-аль-Каши, Муйин ад-Дин аль-Каши, Али Кушчи и др.

2.3. Развитие астрономии в Европе.

Дальнейшее развитие астрономии связано с фундаментальными открытиями в области астрономии ряда ученых Европы. Особенно плодотворными в этой области были исследования польского астронома Н. Коперника (1473–1543), итальянцев Дж. Бруно (1548–1600) и Г. Галилея (1564–1642), немца И. Кеплера (1572–1630) и англичанина И. Ньютона (1643–1727). Основные открытия и большинство законов, открытых с XVI в. до начала XX в., были связаны с именами этих и других ученых Европы. Для развития астрономии большое значение имели исследования известных ученых того периода О. К. Ремера, Э. Галлея, Дж. Брадлея, И. Г. Галле, В. И. Струве, Ф. В. Бесселя и других. В середине XX в., в результате изобретения спектрального анализа и использования в астрономии фотографии, открылись новые горизонты астрономии. Это дало большие возможности для изучения физической природы небесных тел. В конечном итоге появилась новая наука — астрофизика, занимающаяся изучением физической природы небесных тел и их систем.

В настоящее время активно работают в исследовании тайн Вселенной узбекские ученые в Астрономическом институте АН РУз, в его филиале в обсерватории Камашинского района в Майданакском высокогорье (рис. 5), а также на Междуна-



Рис. 5. Высокогорная обсерватория Майданак Института астрономии АН РУз (Кашкадарьинская область).

2.4. Современная астрономия и значение освоения космоса.

Деятельность человека, связанная с освоением космоса, создает большие возможности в изучении геологических богатств, природы и климата нашей планеты. Человек, взглянув на Землю из космоса, понял, какая она крохотная, редкостная и прекрасная. Кроме того, эти представления способствовали осознанию во всей полноте экологических, энергетических и демографических проблем, представляющих угрозу жизни планеты. В течение последних десятилетий прогресс космонавтики не только указал человечеству пути решения этих проблем, но и предоставил самой космонавтике возможность принять активное участие в их решении. В частности, ученые всего мира сделали полные экспертизы проектов создания крупных космических станций, предоставляющих возможность предотвратить энергетический кризис и использовать энергию Солнца, а для предотвращения демографического кризиса создали планы освоения околоземного пространства и создания космических «колоний». Ощущается настоятельная необходимость безотлагательного решения проблем экологии, угрожающих жизни на Земле.

В содружестве десятков развитых стран создается международная космическая станция (МКС), которую можно считать первым образцом «космических городов» (рис. 6).

С космическими исследованиями связано развитие исследований в области радиоэлектроники и компьютерных технологий, без которых немислима социальная жизнь нашей цивилизации. Нет сомнений в том, что освоение космоса может сослужить большую службу в решении сегодняшних проблем. По выражению известного путешественника и ученого Т. Хейер-

родной станции им. Улугбека в Китабском тумане. В этих научных учреждениях работает целая группа талантливых людей, они ведут научно-исследовательские работы по проблемам современной астрономии и астрофизики, в частности работы по уточнению вращения Земли, изучению физической природы Галактики и внегалактических источников.

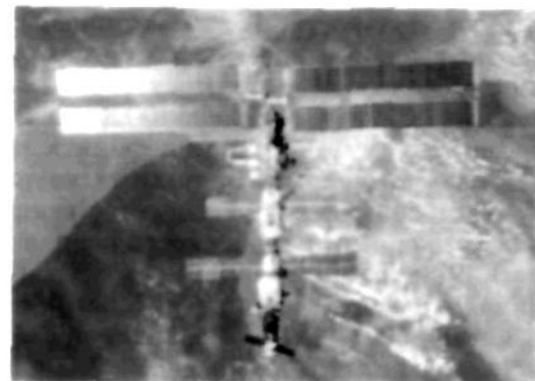


Рис. 6. Международная космическая станция (МКС) — первая космическая колония.

дала, только космическая техника позволяет человеку взглянуть со стороны на Землю, которая представляется домом без дымохода. И чтобы содержать свой дом в чистоте, человечеству необходимо найти способы избавления от загрязнения.

К числу важнейших задач космонавтики относится изучение состояния биосферы Земли, ее природных ресурсов, лесов и полей. Работы в указанных направлениях имеют большое значение для решения экологических проблем нашей планеты, разрабатываются проекты удаления с помощью космической техники все увеличивающихся на поверхности Земли ядовитых радиоактивных отходов.

В ближайшие десятилетия намечается осуществить работы по сооружению в космосе больших энергетических установок, размещению комплексов по разработке сырьевых ресурсов. Эти работы свидетельствуют о том, что космическое и, в первую очередь, околоземное пространство должно быть превращено в среду обитания человека и активной его деятельности. Превращение ближнего космоса в среду жизнедеятельности человека, иначе говоря, экологизация космоса и в то же время избавление от губительных результатов истощения экологических ресурсов, грозящих нашей планете, — это одна из важнейших задач, стоящих перед человечеством.

В частности, стало известно об очень многих экспериментах, проводимых на орбитальных станциях по получению сверхчистых металлических сплавов, выращиванию редких кристаллов и приготовлению чистых лекарственных препаратов.

В будущем планируется использовать для нужд человечества ресурсы Луны и некоторых астероидов. Имея в виду эту перспективу, в научных кругах всего мира рассматриваются проекты сооружения на Луне станции для проживания людей

и их деятельности. В гуманитарных целях рассматриваются также реальные проекты по организации работ по сооружению в околоземном пространстве больших энергетических установок («Солнечных фабрик») для избавления человечества от грозящего ему в будущем дефицита энергии (рис. 7).

Связь астрономии с другими науками. Астрономия органически связана с другими естественными науками. В развитии астрономии в особенности велика роль физико-математических наук. В свою очередь и астрономия внесла ощутимый вклад в развитие этих наук. Многие теории и законы физики и методы их решения проходят проверку в астрономических исследованиях. В их числе законы механики, основные идеи теории относительности, квантовая физика, строение атома, ядерные реакции, взаимодействие вещества и поля и связанные с этим теории. Велика роль математики в обработке результатов астрономических наблюдений. Современная физика использует астрономические объекты (Солнце, звезды, туманности, галактики и т. д.) в роли гигантских лабораторий. Существуют небесные тела, состоящие из разреженных газов, находящихся при температуре около нуля абсолютной шкалы температур, и чрезвычайно плотные нейтронные звезды, масса 1 см^3 вещества которых составляет сотни миллионов тонн. Физические показатели, полученные в результате исследования подобного рода небесных тел с помощью астрофизических методов, дают возможность проверки физических

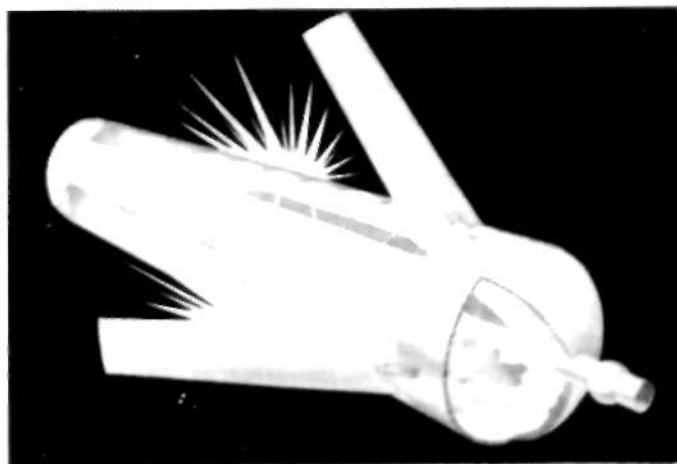


Рис. 7. Проект первой космической колонии на орбите Земли, так называемая Солнечная фабрика (длина 1 км, диаметр 500 м).

законов и теорий и способствуют пониманию сущности важнейших свойств материи.

Кроме того, химический состав небесных тел и молекулярных соединений, образующих их атмосферы, проблемы возникновения жизни на Земле относятся к числу задач, вскрывающих связи между астрономией, химией и биологией. Многие задачи, в которых рассматриваются методологические, мировоззренческие и экономические аспекты науки астрономии, относятся к числу проблем, отражающих связь этой науки с социальными и гуманитарными науками. В истории можно найти много свидетельств тому, что точную датировку исторических событий удастся установить, основываясь на датировках астрономических явлений, зафиксированных в древних рукописях.

1. Кто первым обнаружил шарообразность Земли?
2. Кто в древности первым измерил радиус Земли?
3. Назовите имена ученых Центральной Азии, способствовавших прогрессу средневековой астрономии.
4. Как назывался известный астрономический труд аль-Фергани?
5. Назовите главные сочинения Беруни в области астрономии.
6. В чем заключается вклад Омара Хайяма в область астрономии?
7. Когда и где на территории нашей республики была сооружена обсерватория Улугбека?
8. Назовите имена ученых астрономической школы Улугбека.
9. Назовите имена европейских ученых, внесших большой вклад в развитие средневековой астрономии.
10. Где на территории Узбекистана находился в средние века астрономический центр?
11. В чем важность освоения космоса?
12. Что вы знаете о планах освоения космоса в ближайшем будущем?
13. Как вы думаете, от каких экологических проблем избавит человечество освоение космоса?
14. Что вы знаете о связях астрономии с другими науками?

§ 3. Видимые положения звезд. Созвездия

Человека, который в безоблачную ночь смотрит на усыпанный звездами небосклон и остается равнодушным к этой красоте, найти, наверное, очень трудно. Хотя на первый взгляд звезд на небе сосчитать нельзя, на деле невооружен-

ным глазом можно увидеть на небесной полусфере не более 3000 звезд. Звезды находятся от нас на различных расстояниях, но нам они кажутся находящимися на одном и том же расстоянии на внутренней поверхности небесной сферы.

Взаимные положения звезд меняются слишком медленно, чтобы можно было заметить эти движения за несколько месяцев и даже лет. Это позволяет ориентироваться по звездам, находясь на поверхности Земли, в частности, находить стороны горизонта. Поэтому с древнейших времен путешественники ориентировались по звездам, которые заменяли им отсутствующий в то время компас.

На Древнем Востоке для того чтобы ориентироваться на звездном небе, люди объединили яркие звезды в определенных частях небосвода в отдельные группы, которые называли *созвездиями*. Созвездиям давались имена животных или мифических существ (Большая и Малая Медведица, Лебедь, Лев, Кит, Дракон), героев греческой мифологии (Кассиопея, Андромеда, Пегас и т. д.), а если созвездие было похоже на геометрическую фигуру или вещь, то их так и называли (Треугольник, Весы и т. д.) (рис. 8).

В XVII в. звезды, входящие в каждое созвездие, стали обозначать буквами греческого алфавита (α , β , γ , δ , ...), но около 130 наиболее ярких звезд получили собственные имена, в частности, α Большого Пса называется Сириусом, α Возничего — Капеллой, α Лирь — Вегой, α Ориона — Бетельгейзе, α Персея — Алголой.



Рис. 8. Звездное небо с изображением созвездий Большой и Малой Медведицы.

В 1922 г., заменив условные криволинейные границы созвездий на прямолинейные, астрономы разбили созвездия, занимающие большую площадь на небесной сфере, на несколько маленьких созвездий. Сегодня небесная сфера разбита на 88 частей.

По определенным ярким звездам созвездия легко находить положение слабых звезд, входящих в это или в соседнее созвездие, что позволяет ориентироваться на небесной сфере.

Для того чтобы легко находить на небесной сфере определенные созвездия или звезды, нужно вначале хорошо изучить звездные карты и атласы и попрактиковаться в работе с ними.

1. Сколько звезд можно увидеть невооруженным глазом на небе в одно и то же время?
2. Что называется созвездием? Сколько всего созвездий можно наблюдать на небе?
3. Какими именами называют созвездия?
4. Каким звездам даются имена? Какие из них вы знаете?

§ 4. Видимые движения Солнца, Луны, планет и звезд

Если ночью наблюдать за звездами в определенном месте на Земле в течение нескольких часов, то все звезды небесной сферы покажутся совершающими вращение вокруг воображаемой оси, проходящей через глаз наблюдателя, — *оси мира*. Во время этого вращения каждое светило меняет свое положение относительно сторон горизонта. Период такого видимого обращения звезд на небе составляет одни сутки. Для наблюдателя, смотрящего в сторону юга, звезды движутся слева направо, т. е. в направлении часовой стрелки. При этом определенное светило, восходя в одной и той же точке на востоке, будет заходить в одной и той же точке на западе. Его максимальная высота над горизонтом в направлении на юг будет оставаться одной и той же для данного наблюдателя. Если же наблюдатель будет смотреть на север, то часть звезд, восходя на востоке, будет заходить на западе, а незаходящие звезды будут описывать концентрические окружности вокруг некоторой невидимой точки (рис. 9). Эта невидимая точка называется *Северным полюсом мира*. Северный полюс мира очень близок к самой яркой звезде α Малой Медведицы, угловое расстояние между ними примерно 1°.

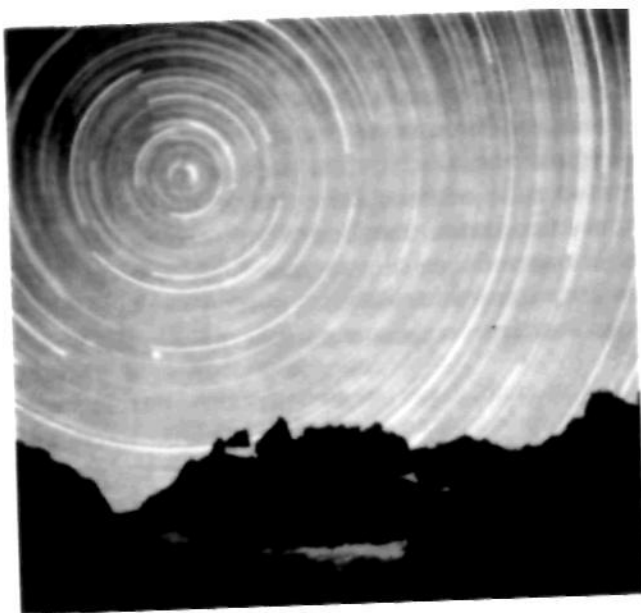


Рис. 9. Видимое суточное вращение звезд вокруг Полярной звезды (по снимкам, сделанным в течение нескольких часов фотокамерой, направленной на Полюс мира).

Поэтому α Малой Медведицы называется *Полярной звездой*.

Наблюдаемое суточное движение звезд вокруг оси мира происходит вследствие вращения Земли вокруг своей оси.

Суточное движение Солнца и Луны также происходит в направлении с востока на запад, но, в отличие от звезд, их точки восхода и захода меняют свое положение день ото дня. В частности, в Навруз (21 марта) Солнце восходит в точности в точке востока и заходит в точке запада. Но затем его точки восхода и захода сдвигаются к северу. Это положение сохраняется до 22 июня, затем точки восхода и захода начинают сдвигаться к югу. В этот период высота Солнца в полдень понижается, продолжительность дня уменьшается, а продолжительность ночи увеличивается.

Спутник нашей планеты Луна также участвует в *видимом суточном движении*, двигаясь с востока на запад вместе со звездами. Но если понаблюдать за движением Луны в течение нескольких дней, то можно обнаружить, что Луна на

фоне звезд сдвигается с запада на восток за каждые сутки на 13', совершая полный оборот вокруг Земли за 27,32 суток. Это и есть ее *истинное движение*.

В результате систематического наблюдения за Солнцем в течение нескольких месяцев можно обнаружить, что Солнце также, подобно Луне, движется с запада на восток. Такое видимое годовичное движение Солнца обусловлено истинным движением Земли вокруг Солнца. Видимое годовичное перемещение Солнца на фоне звезд составляет примерно 1° дуги в сутки. Полный оборот в кажущемся движении вокруг Земли Солнце совершит за один год. Плоскости годовичного видимого движения Солнца и истинного движения Луны близки друг к другу. Созвездия, через которые они проходят, называются зодиакальными (от греческого *зоон* — животное). Пояс этих созвездий также называется зодиакальным.

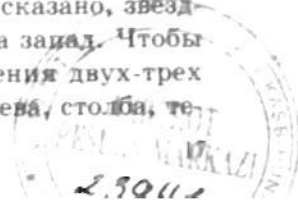
С древнейших времен люди заметили, что среди звезд зодиакальных созвездий перемещаются похожие на звезды светила. Из-за этих особенностей их движения им было дано название «блуждающие» звезды — планеты (от греческого *planetes* — блуждающая). В Древнем Риме пяти известным в то время планетам были даны имена богов: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн.

После изобретения телескопа в 1781 г. был открыт Уран, в 1846 г. — Нептун, в 1930 г. — Плутон.

1. В чем причина кажущегося движения звездного неба с востока на запад?
2. Действительно ли все звезды располагаются на поверхности одной и той же сферы?
3. Являются ли движения Солнца и Луны с востока на запад истинными движениями?
4. Какие точки на небе называют полюсами мира?

§ 5. Доказательство вращения Земли вокруг своей оси

Человек, внимательно наблюдающий за небом в течение нескольких минут, заметит, что, как уже было сказано, звездное небо вращается в направлении с востока на запад. Чтобы убедиться в этом, достаточно заметить положения двух-трех ярких звезд относительно, например, ветки дерева, столба, те-



левизионной антенны и т. п. ориентиров, и засечь время наблюдения. Если вернуться к наблюдениям через 15–20 минут, встав на прежнее место, то можно увидеть, что все звезды сдвинутся по дугам небесной сферы на одну и ту же величину в направлении с востока на запад. С помощью несложных вычислений можно обнаружить, что звезды перемещаются с востока на запад с угловой скоростью $15^\circ/\text{ч}$. Если теперь разделить 360° на 15 , получим 24 (ч). Таким образом, видимое движение звезд вокруг Земли происходит с периодом 24 ч, что соответствует периоду вращения Земли вокруг своей оси в направлении с запада на восток. Вращение Земли вокруг оси доказывается здесь двумя способами.

1. Движение Земли вокруг своей оси можно обнаружить с помощью опыта с маятником, тяжелый груз которого подвешен на длинной нити. В этом случае маятник может колебаться в любом направлении (Ж. Фуко, 1851 г.).

Из курса физики известно, что плоскость колебаний маятника сохраняет неизменным свое направление если даже вращается точка его подвеса. Подвесим над одним из полюсов Земли маятник Фуко, заменив груз сосудом с песком, в дне которого проделано маленькое отверстие. Придав ему колебательное движение, заметим, что плоскость колебаний маятника, сохраняя неподвижность относительно звезд, будет вращаться относительно поверхности Земли с угловой скоростью $15^\circ/\text{ч}$ по направлению часовой стрелки, и песок, высыпавшийся из сосуда, покроет равномерным слоем внутренность двух круговых секторов с вертикальными углами при вершинах. Это доказывает вращение Земли вокруг своей оси. Маятник Фуко, с длиной нити подвеса 98 м, установлен в Исаакиевском соборе Санкт-Петербурга. Вращение плоскости его колебаний наглядно демонстрирует вращение Земли вокруг своей оси. На рисунке 10 показан маятник Фуко, установленный в одном из соборов Парижа.

2. Другой способ доказательства вращения Земли связан с законом вращательного движения. Это объясняется тем, что, если на определенной широте (φ), с известной высоты h от поверхности Земли (рис. 11) тело опускается, то оно при падении в зависимости от линейной скорости этой широты (v_0) смещается на некую длину в сторону вращения, т. е. с запада на восток. Дело в том, что тела, находящиеся в точке A над точкой O (на уровне



Рис. 10.
Демонстрация вращения Земли вокруг своей оси с помощью маятника Фуко.

Земли), благодаря вращению Земли имеют линейную скорость v_A , равную

$$v_A = \omega_A (R_\oplus + h),$$

а линейная скорость точки O выражается:

$$v_O = \omega_O R_\oplus.$$

где R_\oplus — радиус Земли, а угловые скорости ω_A и ω_O , соответствующие точкам A и O , равны между собой, т. е. $\omega_A = \omega_O$, отсюда $v_A > v_O$.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна вертикальной линии, называется *математическим горизонтом*. Большие круги небесной сферы, проходящие через зенит и надир, называются *вертикальными кругами*. Если наблюдатель, находящийся на поверхности Земли, изменит свое положение, то положение изменят и все рассмотренные выше точки и линии.

На поверхности Земли есть точки и линии, которые не меняют своего положения в зависимости от изменения положения наблюдателя. Для наблюдателя, смотрящего на юг, небесная сфера равномерно вращается с востока на запад, как это делает и Солнце при суточном движении. При этом вращении две точки небесной сферы остаются неподвижными: *Северный полюс мира P и Южный полюс мира P'* . Диаметр PP' , вокруг которого происходит вращение небесной сферы, называется *осью мира*. Она параллельна земной оси. Большой круг небесной сферы, перпендикулярный оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор лежит в одной плоскости с земным экватором. Два полушария, на которые небесный экватор делит поверхность небесной сферы, называются *северным полушарием* с Северным полюсом мира P , и *южным полушарием* с Южным полюсом мира P' . Малые круги небесной сферы, плоскости которых параллельны плоскости небесного экватора, называются *суточными параллелями*.

Большие круги небесной сферы, проходящие через полюсы мира, называются *кругами склонения*.

Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в двух точках: в точке востока (E) и в точке запада (W).

Небесный меридиан пересекается с математическим горизонтом в двух точках: в точке севера (N), которая ближе к полюсу P , и в точке юга (S), которая ближе к полюсу P' .

Большой круг $PZQSP'Z'Q'N$ небесной сферы, плоскость которого проходит через вертикальную линию и ось мира, называется *небесным меридианом*. Плоскость небесного меридиана и плоскость математического горизонта пересекаются по прямой линии NOS , которая называется *полуденной линией*.

1. Какую линию называют осью мира?
2. Какие точки небесной сферы называют полюсами мира?
3. Опишите взаимное расположение небесного и земного экваторов.
4. Какие круги называются кругами склонения, суточными параллелями?

5. Что называется математическим горизонтом?
6. Где на небесной сфере расположены зенит и надир?
7. Что называется небесным меридианом?
8. Какие точки называются точками севера и юга, точками востока и запада?

§ 2. Видимое годовое движение Солнца. Эклиптика

Солнце в своем кажущемся годовом движении на фоне неподвижных звезд проходит среди созвездий, образующих *пояс зодиака*, который включает 12 *зодиакальных созвездий*. Приведем их в порядке, соответствующем движению Солнца: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы.

Кажущийся путь Солнца — это большой круг небесной сферы, который называется *эклиптикой*. Эклиптика пересекает небесный экватор в двух диаметрально противоположных точках. Солнце пересекает небесный экватор, переходя из южного полушария небесной сферы в северное, в *точке весеннего равноденствия* (Υ) в день 21 марта. Диаметрально противоположная точка на эклиптике называется *точкой осеннего равноденствия* (Ω). Солнце проходит через эту точку 23 сентября. Двугранный угол, образуемый этими плоскостями, называется *наклоном эклиптики к небесному экватору* и равен $\epsilon = 23^\circ 26'$ (рис. 13). 22 июня в полдень склонение Солнца составляет $+23^\circ 26'$ и находится в точке эклиптики (ϵ), называемой *точкой летнего солнцестояния*. А 22 декабря его склонение $-23^\circ 26'$ и находится в точке эклиптики (ϵ'), называемой *точкой зимнего солнцестояния*.

Поскольку видимое годовое движение Солнца (эклиптика) есть отражение истинного движения Земли вокруг Солнца, то плоскость орбиты Земли совпадает с плоскостью эклиптики. От-

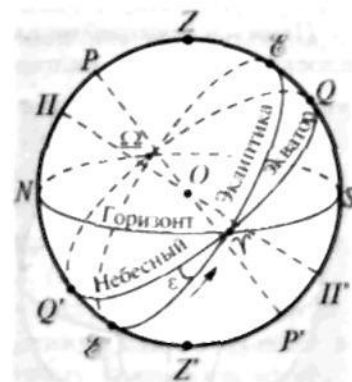


Рис. 13. Видимое годовое движение Солнца. Эклиптика (ϵ — угол между плоскостями эклиптики и небесного экватора).

сюда следует, что плоскость земной орбиты наклонена также к плоскости небесного экватора под углом $23^{\circ} 26'$.

1. В чем причина кажущегося движения Солнца среди звезд?
2. Как называется путь кажущегося годовичного движения Солнца по небесной сфере?
3. Под каким углом наклонена плоскость эклиптики к плоскости небесного экватора?
4. Что называется зодиаком? Перечислите названия зодиакальных созвездий.
5. Определите основные точки эклиптики (точки весеннего и осеннего равноденствия и точки зимнего и летнего солнцестояния).

§ 3. Небесные координаты

Подобно географическим координатам, которые точно определяют положение данной точки на земной поверхности по долготе λ и широте φ (рис. 14), положение небесных светил на небесной сфере определяется введением небесных координат.

Положение небесных тел в так называемой экваториальной системе координат определяют с помощью двух координат: прямого восхождения α и склонения δ .

По определению, началом координат условно принято считать одну из точек пересечения эклиптики с небесным экватором — точку весеннего равноденствия Υ (рис. 15 а, б).

Прямым восхождением α светила M называется угол между плоскостью круга склонения светила и плоскостью большого

круга, проходящего через полюсы мира и точку весеннего равноденствия Υ . Этот угол отсчитывается от точки весеннего равноденствия Υ до точки пересечения круга склонения, проходящего через светило M , с небесным экватором K в направлении против часовой стрелки (если смотреть со стороны Северного полюса мира).

Эта дуга измеряется центральным углом $\angle \Upsilon OK$, проведенным из центра сферы O .

Второй координатой светила M является склонение δ — дуга

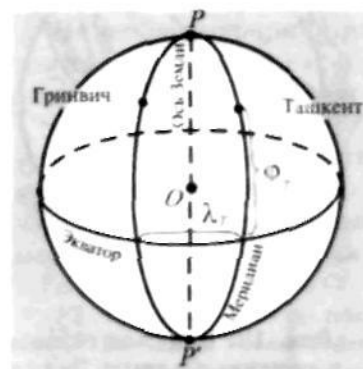


Рис. 14. Географическая система координат.

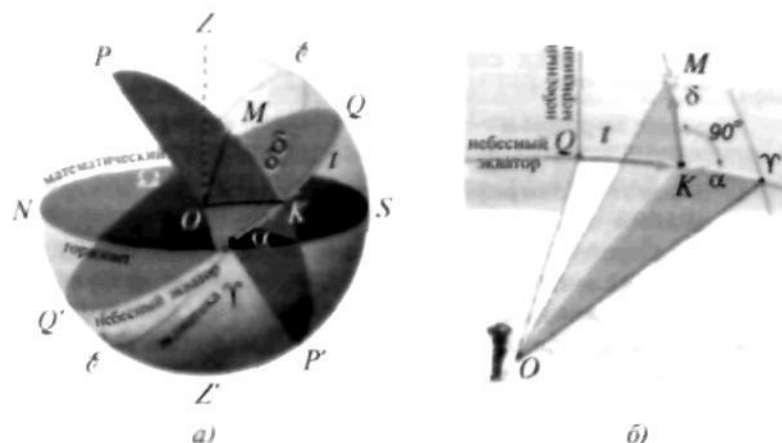


Рис. 15. Экваториальные системы координат.

KM , соединяющая точку K на круге склонения со светилом M (см. рис. 15 а, б). Она измеряется центральным углом, опирающимся на нее, т. е. $\delta = \angle KOM$.

Прямые восхождения отсчитываются в сторону, противоположную суточному вращению небесной сферы в часах, минутах и секундах от 0 часов до 24 часов (поскольку видимое вращение небесной сферы составляет за 1 час $15''$). Склонение светил отсчитывается в пределах от 0 до ± 90 (минус для светила, находящегося в южном полушарии) в градусах, минутах и секундах дуги. При составлении звездных карт используют именно эти координаты.

Еще одной координатой светила в экваториальной системе координат является часовая угол (t), дуга небесного экватора (QK) от точки пересечения небесного экватора с южной частью небесного меридиана (Q) до точки пересечения (K) круга склонения, проходящего через это светило, с экватором. Он измеряется центральным углом $\angle QOK$ (см. рис. 15 а, б).

Часовой угол также измеряется в часах, минутах и секундах в пределах от 0^h до $\pm 12^h$ часов (минус для измерения в направлении, противоположном суточному вращению сферы, т. е. к востоку) или иногда в пределах от 0^h часов до 24^h часов.

Для перехода от часового измерения в часах, минутах и секундах к градусному измерению в градусах, минутах и секундах пользуются следующей таблицей:

Таблица 1

Градусная мера дуги	360°	15°	1°	15'	1"	15'''
Часовая мера дуги	24 ^ч	1 ^ч	4 ^м	1 ^м	4 ^с	1 ^с

1. Вспомните географические координаты. Как измеряются долгота и широта?
2. Объясните на чертеже, как измеряются прямое восхождение (α) и склонение (δ) небесного светила в экваториальной системе координат.
3. Что общего между географическими координатами и экваториальными координатами?
4. Какая координата называется часовым углом (t) и как она измеряется?

§ 4. Звездные карты

Звездные карты, подобно географическим, строятся посредством проектирования соответствующей части небесной сферы на плоскость. Подобная карта приведена на рисунке 16. На ней прямое восхождение α и склонение δ светила откладываются на двух взаимно перпендикулярных осях.

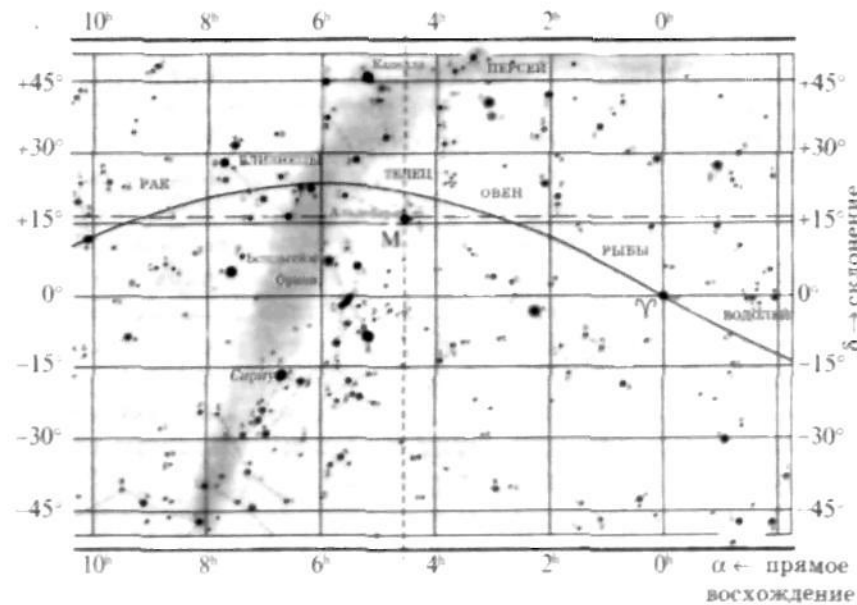


Рис. 16. Звездная карта.

Ось абсцисс в рассматриваемой системе координат соответствует небесному экватору и служит для определения прямого восхождения α светила. Ось ординат служит для определения другой координаты светила – склонения δ .

Для того чтобы определить координаты приведенной на карте звезды, из точки M , соответствующей этой звезде, опускают перпендикуляр на ось абсцисс. Координата точки пересечения этого перпендикуляра с осью абсцисс определит прямое восхождение звезды, а именно, длину дуги небесного экватора от точки весеннего равноденствия до круга склонения, проходящего через звезду M . Склонение звезды определяется по точке пересечения прямой, соответствующей суточной параллели звезды (на карте горизонтальная прямая) с осью δ . Тогда координаты изображенной на карте звезды M будут следующими: $\alpha = 4^{\text{h}}35^{\text{m}}$, $\delta = +16^{\circ}$.

1. Каким линиям небесной сферы соответствуют вертикальные прямые на карте, изображенной на рис. 16?
2. Каким линиям соответствуют горизонтальные прямые звездной карты?
3. Объясните, в каком порядке необходимо выполнять действия по определению экваториальных координат звезды на карте.

§ 5. Связь между высотой Полюса мира и географической широтой места наблюдения

Высота h_p Полюса мира над математическим горизонтом всегда равна географической широте места наблюдения. Это утверждение доказывается следующим образом: как видно из рисунка 17, расстояние, измеренное по небесному меридиану, от зенита до небесного экватора равно ZQ . Если наблюдатель находится в точке O , то географическая широта места его наблюдения равна длине дуги $qO = \varphi$, то, как видно из чертежа, она равна центральному углу QOZ .



Рис. 17. Связь между высотой Полюса мира и широтой места наблюдения.

Центральный угол NOP , который опирается на дугу NP , соответствующую высоте Полюса мира (h_p), и угол $\angle QOZ$ — углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Из геометрии известно, что одноименные углы со взаимно перпендикулярными сторонами равны. Следовательно, $\angle NOP = \angle QOZ$, откуда и следует, что $h_p = \varphi$.

1. Объясните, какая существует связь между высотой Полюса мира и географической широтой места наблюдения.
2. Объясните, где находится на небе Северный полюс мира, если наблюдатель находится на Северном полюсе Земли? А если он находится на экваторе Земли?

§ 6. Видимое суточное вращение небесной сферы на различных географических широтах

Вращение небесной сферы — кажущееся явление, которое представляет собой следствие суточного вращения Земли, поэтому нетрудно понять, что в местах с различными географическими широтами кажущееся движение небесных светил по небесной сфере будет выглядеть по-разному. Общую картину этих явлений можно понять, выяснив, каким будет представляться суточное вращение небесной сферы в трех точках земной поверхности с различными географическими широтами.

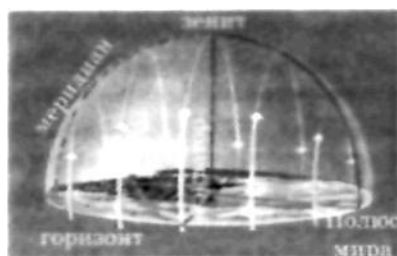
Первый случай. Пусть наблюдатель находится на земном экваторе ($\varphi = 0$). Тогда, согласно формуле $h_p = \varphi$, высота Полюса мира равна 0, т. е. полюса мира P, P' лежат на математическом горизонте, а ось мира совпадает с полуденной линией (рис. 18 а). В этом случае небесный экватор перпендикулярен математическому горизонту и проходит через зенит и надир. Суточные движения светил происходят в плоскостях, параллельных плоскости небесного экватора, и, следовательно, также перпендикулярны плоскости математического горизонта. Таким образом, все светила северного и южного полушарий небесной сферы видны над горизонтом в течение 12-ти часов и столько же времени не видны. Их высота на небесном меридиане $h = 90^\circ - |\delta|$. Значит, все светила для наблюдателя на экваторе восходят и заходят. Если суточная параллель светила совпадает с небесным экватором ($\delta = 0$), то светило проходит через зенит.

Для того чтобы определить суточное движение Солнца в определенный день года, находят положение Солнца на эк-

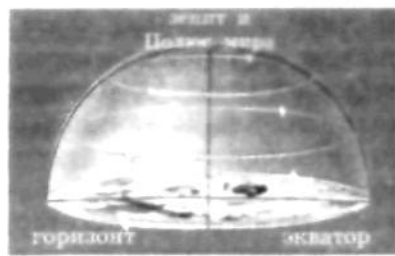
липтике и проводят через найденную точку суточную параллель Солнца, плоскость которой параллельна плоскости небесного экватора. Движение Солнца в данный день происходит именно по этой параллели. Когда Солнце находится в точке весеннего равноденствия, то его прямое восхождение и склонение равны 0 ($\alpha_\odot = \delta_\odot = 0$). Следовательно, Солнце движется по небесному экватору. То же самое происходит, когда Солнце находится в точке осеннего равноденствия, т. е. когда $\alpha_\odot = 12^h$, а $\delta_\odot = 0$. В обоих этих случаях Солнце проходит в полдень через зенит. Когда Солнце придет в точку летнего солнцестояния, его прямое восхождение $\alpha_\odot = 6^h$, а склонение $\delta_\odot = 23^\circ 26'$, т. е. достигает своего максимального значения в северном полушарии, поэтому в этот день полуденная высота Солнца на меридиане, т. е. в полдень, $h = 90^\circ - 23^\circ 26' = 66^\circ 34'$. А в день зимнего солнцестояния склонение Солнца $\delta_\odot = -23^\circ 26'$, т. е. достигает своего максимального значения в южном полушарии. Тогда высота Солнца в полдень $h = 90^\circ - |-23^\circ 26'| = 66^\circ 34'$. Следовательно, вместо четырех времен года на экваторе только два. Самое жаркое время года соответствует нашим весне и осени, более прохладное — нашим лету и зиме. На экваторе в течение всего года продолжительность дня равна продолжительности ночи.

Второй случай — наблюдатель находится на полюсах Земли ($\varphi = \pm 90^\circ$). Если наблюдатель находится на Северном полюсе Земли, то $h_p = \varphi = 90^\circ$. Значит, Северный полюс мира совпадает с зенитом (рис. 18 б). В этом случае все звезды северного полушария имеют суточные параллели, плоскости которых параллельны плоскостям математического горизонта и, следовательно, не восходят и не заходят и всегда видны над горизонтом. Светила южного полушария небесной сферы, напротив, в северном полушарии не видны.

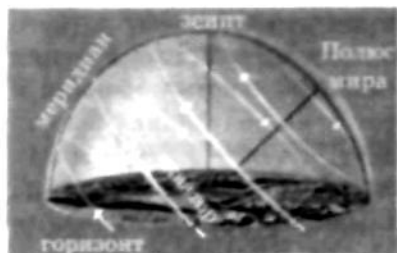
Солнце будет незаходящим светилом с 21 марта по 23 сентября, когда склонение Солнца $\delta_\odot \geq 0$, и будет невосходящим с 23 сентября по 21 марта, когда его склонение $\delta_\odot < 0$. Около 21 марта Солнце восходит над горизонтом и затем, описывая ежедневно спиралевидные кривые, близкие к окружности, поднимается с каждым днем все выше и выше. В день летнего солнцестояния — 22 июня — высота Солнца максимальна: $h_\odot = \delta_\odot = 23^\circ 26'$. После этого Солнце начинает приближаться к горизонту, опускаясь все ниже и ниже. 23 сентября Солнце заходит, заканчивается полярный день, и появляется после окон-



а)



б)



в)

Рис. 18. Суточное вращение звездного неба на различных широтах:

- а) на земном экваторе;
- б) на полюсе Земли;
- в) на некоторой промежуточной широте.

чания полярной ночи 21 марта следующего года. На Южном полюсе Земли ($\varphi = -90$) суточное движение Солнца происходит подобным же образом, но там Солнце восходит 23 сентября и заходит 21 марта. Шесть месяцев — с 21 марта по 23 сентября — на Южном полюсе длится полярная ночь.

Третий случай. Пусть $0 < \varphi < 90$, т. е. наблюдатель находится не на экваторе и не на полюсах (рис. 18 в). В этом случае суточные параллели либо не пересекаются с математическим горизонтом, либо, пересекаясь, делятся на неравные части: большая часть суточной параллели (для звезд с $\delta=0$) проходит над горизонтом. Эта разница связана со склонением δ светила, и чем оно больше, тем большей будет эта разница. Для звезд южного полушария ($\delta < 0$) часть суточной параллели, проходящая над горизонтом, меньше той, которая проходит под горизонтом. Таким образом, в этих местах можно наблюдать звезды, которые являются незаходящими, и звезды, которые являются невосходящими. Это их свойство определяется широтой места наблюдения. Светило восходит и заходит на данной широте φ , если $|\delta| < (90 - |\varphi|)$.

Небесный экватор делится математическим горизонтом на две равные части. Если светило находится на небесном экваторе, т. е. его склонение $\delta = 0$, то оно восходит в точке востока E и заходит в точке запада W .

Если склонение светила $\delta > 0$, то оно восходит на северо-востоке и заходит на северо-западе. Если склонение светила $\delta < 0$, то оно восходит на юго-востоке и заходит на юго-западе.

Если $|\delta| \geq (90 - |\varphi|)$, то суточная параллель светила не пересекает математического горизонта, и оно будет либо незаходящим, либо невосходящим.

В северных широтах, когда Солнце находится в северном полушарии, т. е. с 21 марта по 23 сентября, день длиннее ночи, а когда оно находится в южном полушарии, т. е. с 23 сентября по 21 марта, ночь длиннее дня (рис. 19). Однако за Северным и Южным полярными кругами (от $\varphi = \pm 66^{\circ}34'$ до $\varphi = \pm 90$) Солнце может быть незаходящим и невосходящим светилом. Полярный день и полярная ночь на Земле в зависимости от широты местности продолжаются от 24 часов до полугода.

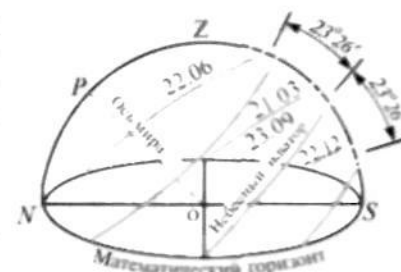


Рис. 19. Изменение полуденной высоты Солнца в течение года.

1. Объясните, как происходят кажущиеся движения звезд на полюсах Земли ($\varphi = \pm 90$).
2. Объясните, как происходят кажущиеся движения звезд на земном экваторе ($\varphi = 0$).
3. Объясните, как происходят кажущиеся движения звезд, если широта места наблюдения $0 < \varphi < 90$.
4. Каким будет кажущееся движение Солнца на различных широтах?

§ 7. Приближенное определение широты места наблюдения с помощью астрономических наблюдений

Полярная звезда (α Малой Медведицы) расположена на расстоянии, меньшем 1 от Северного полюса мира. Мы уже говорили, что широта места наблюдения φ равна высоте Полюса мира над горизонтом. Если высота Северного полюса мира над горизонтом в Ташкенте приблизительно равна 41, то значит, такой же будет и географическая широта Ташкента.

Иными словами, если наблюдателю, находящемуся в некотором пункте земной поверхности, требуется определить географическую широту места наблюдения, то ему достаточно определить высоту Северного полюса мира над горизонтом.

1. Каким будет простейший способ определения широты места наблюдения?
2. Какой будет высота Полюса мира над горизонтом в Самарканде ($\varphi = 39^\circ 30'$)?

§ 8. Кульминации звезд и высоты кульминаций

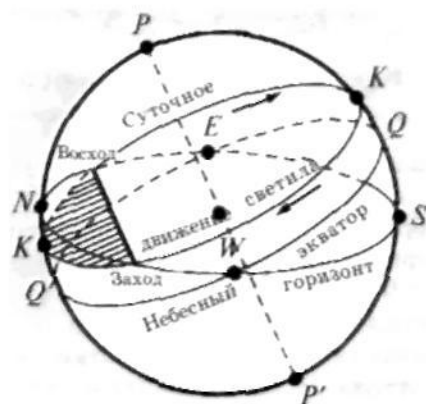


Рис. 20. Кульминации светил.

Суточная параллель каждого светила пересекает небесный меридиан в двух точках, которые называются кульминациями светила. Точка, ближайшая к зениту, называется *верхней кульминацией* (K) светила, вторая — *нижней кульминацией* (K') (рис. 20). Высота светила во время кульминации связана с географической широтой φ места наблюдения и склонением δ светила. В момент *верхней кульминации* K светила измеряется

высота \overline{SK} светила: $h_s = \overline{SK} = \overline{SQ} + \overline{QK}$, где \overline{SQ} равна углу наклона плоскости небесного экватора к горизонту, т. е. $\overline{SQ} = 90^\circ - \varphi$, \overline{QK} равна склонению δ светила, поэтому

$$h_s = 90^\circ - \varphi + \delta.$$

Аналогично определяется высота светила в нижней кульминации:

$$h_n = \varphi + \delta - 90^\circ.$$

Верхняя кульминация Солнца называется *солнечным полднем*, в то время как нижняя кульминация приходится на полночь.

Например, определим в Ташкенте 22 июня в полдень высоту центра Солнца. Географическая широта Ташкента $\varphi_T = 41^\circ 20'$; склонение Солнца 22 июня, в день летнего солнцестояния $\delta = 23^\circ 26'$, следовательно, высота центра Солнца

$$h_{\odot} = 90^\circ - \varphi + \delta = 90^\circ - 41^\circ 20' + 23^\circ 26' = 72^\circ 06'.$$

Таким образом, в полдень 22 июня в Ташкенте высота центра Солнца над горизонтом равна $72^\circ 06'$, зенитное расстояние — $17^\circ 54'$.

1. Что называется кульминацией светила, верхней и нижней кульминацией?
2. Как используется для определения кульминаций светила географическая широта места наблюдения и склонение светила?

§ 9. Основы измерения времени

Потребность в измерении времени возникла уже в глубокой древности. Изменение объема воды, количества песка в водяных и песочных часах позволяло фиксировать малые промежутки времени, изменение длины тени предметов в солнечный день позволяло, например, определить время отправления религиозных обрядов. На рисунке 21 изображены солнечные часы, сооруженные в Древней Индии. Главной частью их был гномон, состоявший из вертикально поставленного столбика. С помощью изменения направления его тени днем можно было надежно определить наступление полудня и находить направление полуденной линии. С течением времени человечество находило все более и более точные способы измерения времени.

На наблюдениях суточного вращения Земли вокруг оси основана система исчисления времени, применяемая в повседневной жизни. Время между двумя последовательными верхними кульминациями центра видимого диска Солнца — единица времени, называемая *истинными солнечными сутками*. Вся трудовая жизнь определяется временем восхода и заката Солнца, поэтому солнечные сутки и их доли (в частности, единица измерения времени — 1 секунда солнечного времени — определяется как $1/86400$ средних солнечных суток) являются основой для измерения времени.

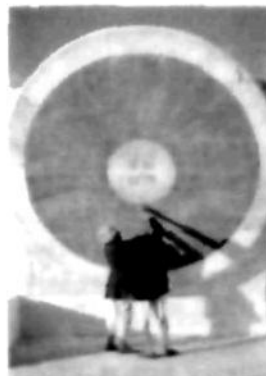


Рис. 21. Солнечные часы, которыми пользовались в Древней Индии.

Сутки и их доли (часы, минуты и секунды) применяются при измерении коротких промежутков времени. Для из-

мерения больших промежутков времени используется единица времени, называемая *тропическим годом*. Это промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра видимого диска Солнца через точку весеннего равноденствия.

Длительность солнечных суток меняется в течение года из-за неравномерности движения Солнца по эклиптике, т. е. неравномерности обращения Земли вокруг Солнца, а также из-за наклона эклиптики к плоскости небесного экватора. Поэтому вместо истинных солнечных суток используются так называемые *средние солнечные сутки*. Один тропический год содержит 365,2422 средних солнечных суток.

Тем не менее, по причине значительных видимых размеров Солнца (его угловой диаметр около 30') и большого потока света и тепла, излучаемого им, измерение времени по Солнцу неудобно и неточно. Поэтому вместе с солнечными сутками в астрономии широко используются *звездные сутки*. Звездные сутки — это промежуток времени между двумя верхними кульминациями точки весеннего равноденствия или какой-либо определенной звезды, так как точку весеннего равноденствия наблюдать на небе нельзя. Если известно прямое восхождение α звезды и ее часовой угол t , то звездное время s , равное часовому углу точки весеннего равноденствия, определяется по формуле: $s = t_{\text{вр}} - \alpha + t$.

На практике при определении среднего солнечного времени используются точные соотношения между солнечными и звездными сутками, которые для любого момента времени уже определены и предлагаются в виде таблиц.

В современном мире «сохранение» времени обеспечивается кварцевыми и атомными часами. Ход кварцевых часов определяется колебаниями пластин из высококачественного кристаллического кварца (ошибка, накапливающаяся в течение года, не превышает 10^{-9} с). Ход атомных часов определяется практически постоянной частотой колебаний, соответствующих определенному квантовому переходу атома цезия-137 (^{137}Cs). За *атомную секунду* принимается 9192637170,0 периодов этого колебания. Ноль после запятой означает, что эта величина максимально близка к *эфемеридной секунде* — 1 31556925,9747 части тропического года и не подлежит дальнейшему уточнению.

Определением точного времени, «хранением» его и уточнением занимаются «Службы времени» астрономических институтов. В частности, Институт астрономии АН Республики Узбекистан имеет такую службу времени и с ее помощью успешно участвует в международном сотрудничестве по опре-

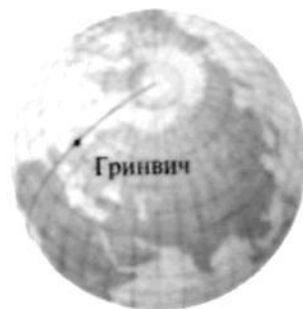


Рис. 22. Исчисление времени начинается с времени гринвичского меридиана.

делению точного времени для нужд науки и техники.

Время, измеренное на данном меридиане, называется *местным временем*.

Всемирное время — это местное среднее солнечное время меридиана, проходящего через Гринвичскую обсерваторию в Лондоне (рис. 22).

Знание местного времени важно для точного определения географической долготы места наблюдения, так как между долготами λ_1 и λ_2 и местным временем T_1 и T_2 существует следующая связь:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = T_1 - T_2.$$

Тогда связь между долготой λ места наблюдения и местным T_λ и всемирным T_0 временем определяется формулой:

$$T_\lambda = T_0 + \lambda.$$

Только пользоваться в жизни местным временем неудобно, поскольку имеется столько систем местного времени, сколько географических меридианов. Поэтому с 1884 г. применяется система *поясного времени*. Для этой цели вся поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса (рис. 23). Во всех пунктах в пределах одного и того же меридиана местное время одинаково. В системе поясного времени выделены 24 *основных меридиана*, которые расположены друг от друга по долготе через 15 (или через 1^h). Счет поясного времени в пределах определенного часового пояса ведется только по местному среднему солнечному времени основного меридиана, лежащего в пределах данного часового пояса. Долготы основных меридианов приняты за 0^h, 1^h, 2^h, ..., 23^h, и основные меридианы проходят приблизительно по середине часового пояса. Часовые пояса занумерованы в направлении на восток от Гринвича от 0 до 23.

Связь между местным временем (T_μ) какого-либо пункта (λ_μ) и поясным временем (T_π) его часового пояса дается следующей формулой:

$$\lambda_\mu - \lambda_{\text{осн}} = T_\mu - T_\pi,$$

где $\lambda_{\text{осн}}$ — долгота основного меридиана на этом поясе.

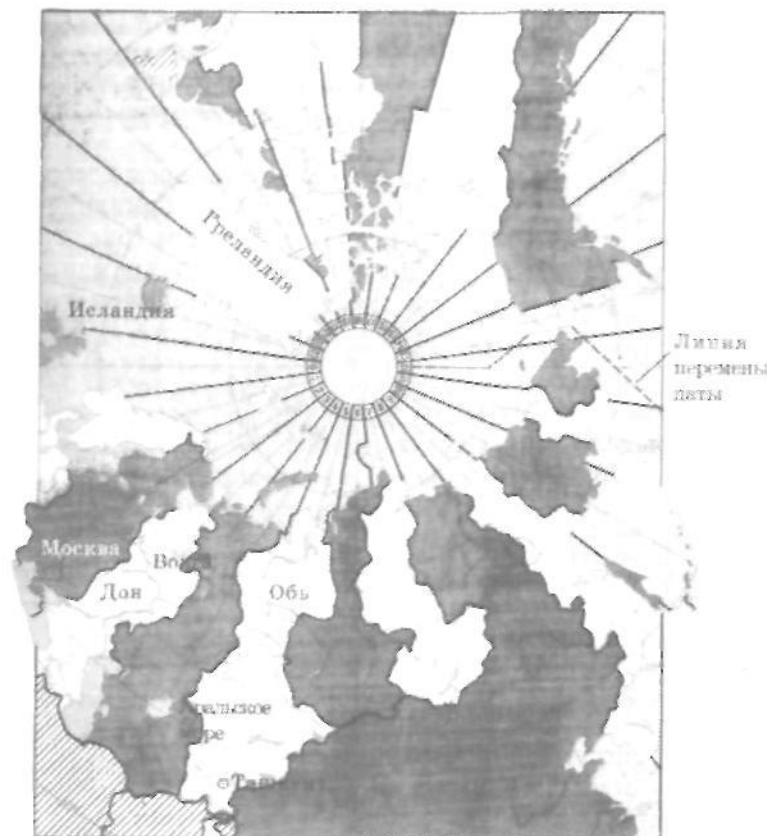


Рис. 23. Часовые пояса Земли (Ташкент находится в 5-м поясе).

Так как $\lambda_{\text{осн}}$ равно N^h — поясному времени данного часового пояса, где N — номер часового пояса, то эту формулу можно переписать в виде $\lambda_{\text{м}} - N^h = T_{\text{м}} - T_{\text{осн}}$. Из этой формулы можно при необходимости определить местное $T_{\text{м}}$ или поясное $T_{\text{осн}}$ время:

$$T_{\text{осн}} = T_{\text{м}} - \lambda_{\text{м}} + N^h \text{ или } T_{\text{м}} = T_{\text{осн}} - N^h + \lambda_{\text{м}}$$



1. Какие периоды времени, связанные с небесными телами, используются при измерении времени?
2. Как определяются солнечные и звездные сутки?
3. Расскажите, что нужно сделать для определения солнечного времени.
4. Что называют местным и всемирным временем?
5. Как находят поясное время? Какая связь существует между поясным и местным временем?

§ 10. Календарь

Система счисления длительных промежутков времени называется календарем. Он основан на периодичности таких явлений природы, как смена фаз луны, смена времен года. Первое из них определяет *синодический месяц*, продолжительность которого 29,53 средних солнечных суток, или $29^{\circ}12'44''3^{\circ}$, второе — *тропический год*, который состоит из 365,2422 средних солнечных суток, или $365^{\circ}5^{\circ}48''46^{\circ}$.

Если в основе календаря лежит продолжительность синодического месяца, такой календарь называется лунным, если тропический год — солнечным. Несовместимость числа суток в синодическом месяце и тропическом году создает много трудностей при попытке согласовать между собой различные календари, поскольку календарный месяц и календарный год должны содержать целое число суток.

Лунный календарь. Родина лунного календаря — Древний Вавилон (2500 лет до н. э.). Год вавилонского календаря содержал 12 месяцев по 29 или 30 дней. Тогда же появилась и семидневная неделя, по числу «блуждающих» звезд — 5 планет, Солнца и Луны. Эти небесные тела обожествлялись во всех древних религиях и их имена присваивались дням недели (примером могут служить названия дней недели в немецком или английском языках). В некоторых мусульманских странах и в настоящее время используется лунный календарь. Количество дней в месяцах этого календаря меняется с таким расчетом, чтобы первое число месяца приходилось на новолуние. Лунный год мусульманского календаря содержит 354 или 355 дней, таким образом, он короче тропического года примерно на 11 суток. По этой причине начало лунного нового года сдвигается в нашем календаре на 11 дней вперед, так что за 33 года накапливается разница в целый год. 20 января 2007 г. наступил новый 1428 г. по мусульманскому календарю. Возникновению эры мусульманского летосчисления послужило переселение пророка Мухаммада из Мекки в Медину. Начало этого календаря совпадает с началом года лунно-солнечного календаря, действующего в то время в Мекке, и соответствует 16 июля 622 г. по григорианскому календарю. В отличие от нашего летосчисления, мусульманское летосчисление называется *хиджрой* (от арабского «хиджра» — переселение).

Солнечный календарь. Один из первых солнечных календарей зародился в Древнем Египте (3500 лет до н. э.). Египтяне заметили, что день летнего солнцестояния и нача-

ло разлива Нила приходится на первый восход Сириуса (α Большого Пса) — самой яркой звезды северного полушария. Так как от разливов Нила зависела судьба урожая сельскохозяйственных культур, то на основе наблюдений за восходом Сириуса был разработан календарь, год которого делился на 12 месяцев по 30 дней и 5 дополнительных дней.

Солнечный календарь, который используется сейчас почти во всех странах мира, происходит от календаря древних римлян. Первоначально календарь состоял из 10 месяцев и содержал 304 дня и начинался с марта. Отголоски этого календаря мы видим сейчас в названиях месяцев, начиная с сентября (7-й месяц) по декабрь (10-й месяц).

В VII в. до н. э. римский календарь был реформирован: к календарному году было добавлено 2 месяца, а число дней в году увеличено до 355. Так как календарный год был короче тропического более чем на 10 суток, то соответствие между датами и сезонными явлениями природы нарушалось с каждым годом.

Новая реформа календаря была произведена в 46 г. до н. э. Юлием Цезарем (ум. в 44 г. до н. э.), римским полководцем и государственным деятелем. В честь Цезаря новый календарь получил название *юлианского календаря*. Счет по новому календарю начинался 1 января 45 г. до н. э. Три года подряд имели продолжительность 365^d и назывались *простыми*, а четвертый год — 366^d и назывался *високосным*. Високосными считаются годы, номера которых делятся на 4. Февраль високосного года состоит из 29^d , простого — из 28^d . Средняя продолжительность года юлианского календаря составляет $365^d,25$. Таким образом, юлианский год длиннее истинного тропического на $0^d,0078$.

За 400 лет юлианское летосчисление отставало от истинного на трое суток, так что в XVI в. (т. е. больше 12 столетий назад (в 325 г.) Никейским Собором были установлены дни церковных праздников, в частности Пасхи, исчисление которой связано с днем весеннего равноденствия — 21 марта) день весеннего равноденствия пришелся на 11 марта. Это осложняло расчеты церковных праздников, поэтому папа Григорий XIII создал специальную комиссию, которой было поручено исправить календарь так, чтобы весеннее равноденствие приходилось на 21 марта.

В результате в 1582 году, для того чтобы исправить накопившиеся за столетия ошибки, было решено после четверга 4 октября пропустить в счете 10 суток и следующий

день считать пятницей 15 октября. Кроме того, было принято правило високосов (помимо високосных годов, принятых в юлианском календаре) — конечные годы веков являются високосными только в том случае, если их номера делятся на 400 без остатка. Следовательно, 1600-й и 2000-й годы — високосные, 1700, 1800, 1900-й — простые. Новый календарь стал называться *григорианским*. Он ведет свое начало от Рождества Христова и большинство европейских стран перешло на него в течение XVI — XVII вв.

Пять из двенадцати месяцев этого календаря названы в честь римских богов (Янус, Фебруус, Марс, Майя, Юнона), июль и август — в честь императоров Юлия Цезаря и Августа, названия оставшихся месяцев соответствуют названиям старого римского календаря, апрель получил свое название от слова «алерире» — прорасти, распускаться. По указу царя Петра I от 19 декабря 1708 г. «от сотворения мира» Российская империя перешла на юлианский календарь с 1 января следующего года (т. е. в 1700 г.), а с 1918 г. григорианский календарь был введен на всей территории страны. Григорианская система счета лет называется *новым стилем*.

Средняя длительность года в григорианском календаре — $365^d5^h49^m12^s$, т. е. отличается от длительности тропического (истинного) года на $0^d,003 = 26^s$. Разница в 1 день появится только через 3300 лет.



1. Какие периоды, связанные с движениями небесных тел, положены в основу календарей?
2. Как называется календарь, в основу которого положен синодический месяц?
3. Как называется календарь, в основу которого положен тропический год?
4. Расскажите, что вы знаете о мусульманском летосчислении (хиджре).
5. Что вы знаете о юлианском и григорианском календарях?

§ 11. Календарь Омара Хайяма

Известный поэт и философ Омар Хайям (1048–1123) жил в Нишапуре во времена правления сельджукского султана Джалал ад-Дина Малик-шаха и его визиря Низам аль-Мулька. В зрелые годы Омар Хайям занимался математикой и астрономией. В 1076 г. по велению Малик-шаха Омар Хайям руководил сооружением астрономической обсерватории в Исфагане.

В этой обсерватории, вплоть до смерти Малик-шаха в 1092 г., производились первоклассные астрономические наблюдения, были определены и уточнены координаты более 100 ярких звезд и составлены таблицы движения Солнца, Луны и планет. Собранные воедино, они известны в истории астрономии как «Астрономические таблицы Малик-шаха» («Зидж Малик-шахи»).

Беруни в своем сочинении «Памятники ушедших поколений» приводит древний персидский солнечный календарь. Год этого календаря продолжительностью 365 дней состоял из 12 месяцев по 30 (11 месяцев) и 35 дней (последний, 12-й, месяц). Так как продолжительность тропического года превосходит год этого календаря более чем на 5 часов, то с каждым годом календарные даты все меньше соответствовали сезонным явлениям природы.

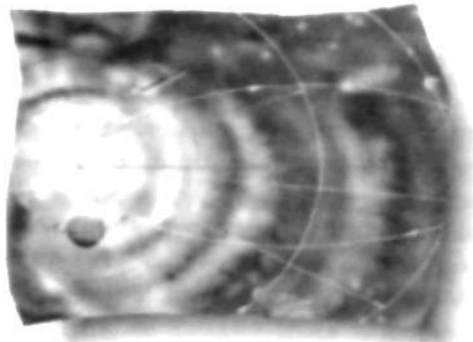
Чтобы устранить этот недостаток, Малик-шах в 1074 г. создал комиссию под руководством Омара Хайяма, которой было поручено произвести реформу календаря. Комиссии предстояло решить следующие задачи: 1) определить момент наступления астрономического равноденствия и 2) найти такую систему чередования високосных лет, при которой персидский Новый год — Навруз — приходился бы на день весеннего равноденствия. Оба вопроса были успешно решены комиссией после проведения ряда специальных наблюдений. Комиссия установила, что весеннее равноденствие в то время наступало по юлианскому календарю 15 марта. К этому дню Хайям и предложил приурочить начало каждого года — Навруз. Високосные годы в календаре Хайяма распределялись в каждом периоде из 33 лет следующим образом: 4-й, 8-й, 12-й, 16-й, 20-й, 24-й, 28-й и 33-й имели продолжительность 366 дней, остальные 25 лет — по 365 дней. Средняя длина года в нем составляла $365 \frac{8}{33} = 365,24242$. Сравнивая ее с точным значением тропического года, находим разницу в $0,00022 = 19''$. Таким образом, в этой системе весеннее равноденствие отстает от своей календарной даты на один день примерно через 4500 лет. В этом календаре названия месяцев совпадают с названиями зодиакальных созвездий.

Данный календарь Хайяма лежит в основе календаря солнечной хиджры, эра которого совпадает с эрой календаря лунной хиджры, и назван в честь Малик-шаха календарем Джалали (псевдоним Малик-шаха).

На 21 марта 2007 г. приходится начало Нового 1386 года солнечной хиджры.



1. Каким был календарь Омара Хайяма?
2. Как назывались астрономические таблицы Омара Хайяма?
3. С какой даты начинается эра Джалал ад-Дина?
4. Когда наступает Новый год по календарю Омара Хайяма?
5. Какова разница календарного года Омара Хайяма с тропическим?
6. Сравните точность календаря Омара Хайяма и григорианского календаря.
7. По какой причине в календаре Омара Хайяма Новый год приходится на 21 марта?
8. Какой год наступит по календарю Омара Хайяма 21 марта 2008 года?



III

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ МИРА

§ 1. Строение Солнечной системы

Развитие представлений о строении Солнечной системы. История развития представлений о строении мира уходит в глубокую древность.

Не обладая серьезными знаниями о явлениях природы, люди в древности приписывали создание мира сверхъестественной силе, которая являлась причиной движения небесных тел, восходов и заходов светил, солнечных и лунных затмений и т. д.

В древности на протяжении многих веков люди обожествляли Солнце и Луну и поклонялись им. В частности, в Египте Солнце называли богом Ра, а греки — богом Гелиосом.

Первые представления о строении мира были очень примитивны, считалось, что Земля и Небо находятся друг против друга. Люди представляли Землю в виде плоскости, а Небо в виде купола, на котором расположены звезды.

До IV в. до н. э., когда известный греческий философ Аристотель доказал, что Земля, которая имеет форму шара, находится в центре Вселенной, в сознании людей сложилось представление, что в центре Вселенной расположен жестко закрепленный земной шар, вокруг которого движется небо вместе с прикрепленными к нему звездами.

Во II в. н. э. известный александрийский астроном *Клавдий Птолемей* создал более обоснованную теорию о строении мироздания, т. е. о *геоцентрическом строении* мира. Согласно этой теории, в центре Вселенной находится Земля, а другие планеты и Солнце вращаются вокруг нее, как показано на рисунке 24. На самой внешней сфере на одинаковом расстоянии от Земли расположены звезды, которые также вращаются вокруг Земли.

С течением времени изучение планетных движений на небесной сфере натолкнулось на серьезные трудности, которые нельзя было объяснить в рамках теории Птолемея.

Гелиоцентрическая теория строения Солнечной системы. В XVI в. известный польский астроном *Николай Коперник* (1473–1543) после многолетних астрономических наблюдений создал *гелиоцентрическое учение* о строении Солнечной системы.

Согласно этой теории, в центре Солнечной системы расположено Солнце, а все планеты, в том числе и Земля, вращаются вокруг него (рис. 25). Звезды, как и в теории Птолемея, находятся на поверхности самой внешней сферы и неподвижны относительно друг друга.

Коперник был первым, кто объяснил причины попятного движения планет на фоне звезд и вращение Земли в ряду других планет вокруг Солнца (рис. 26).

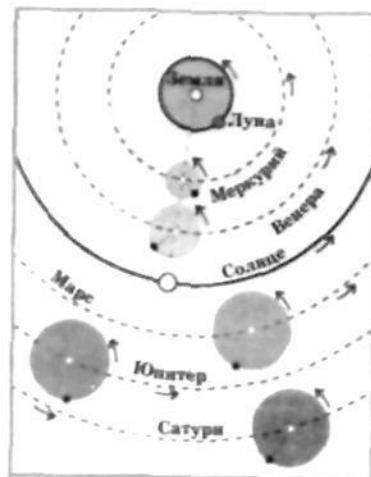


Рис. 24. Геоцентрическая система Птолемея.



Рис. 25. Гелиоцентрическая система строения мира. (В центре — Солнце.)

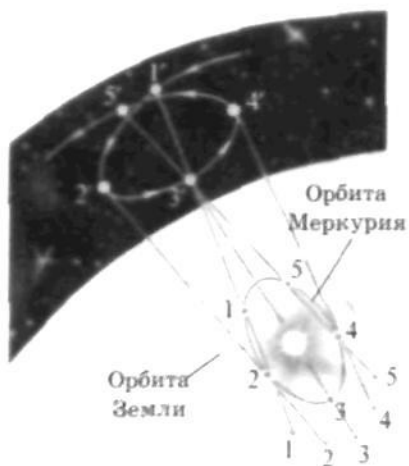


Рис. 26. Объяснение видимого попятного движения планет.

Известный итальянский астроном *Галилео Галилей* (1564–1642) сконструировал первый телескоп для изучения небесных тел и, наблюдая за их движениями, получил подтверждение гелиоцентрической теории Коперника. В частности, он обнаружил фазы Венеры, определил, что на Луне, как и на Земле, есть горы, что Юпитер имеет четыре спутника и показал, что Млечный Путь состоит из неисчислимого множества звезд. В результате своих наблюдений он установил, что Земля есть одна из планет, обращающихся вокруг Солнца, и опроверг неверное мнение, что «Земля есть центр Вселенной», существовавшее до тех пор.

В формировании представлений о строении Вселенной есть большая заслуга и нашего соотечественника — великого



Рис. 27. Представления Беруни о строении мира. Согласно им, Солнце вместе со своими спутниками — Меркурием и Венерой — обращается вокруг Земли.

Позже вклад в развитие гелиоцентрической теории внес известный итальянский ученый и философ *Джордано Бруно* (1548–1600). Он доказал, что звезды находятся на различном расстоянии от Солнца, что Солнце не является центром Вселенной, а всего лишь одна из ее звезд и вокруг звезд также могут обращаться планеты. Дальнейшие астрономические наблюдения, проводившиеся в течение многих столетий после сожжения Дж. Бруно на костре по приговору святой инквизиции, подтвердили его правоту.

го ученого *Абу Райхана Беруни* (973–1048). Беруни доказал, что планеты Меркурий и Венера не могут удаляться от Солнца на большие расстояния и, основываясь на этом, пришел к правильному выводу о том, что они вращаются вокруг Солнца (рис. 27). Несмотря на то, что Беруни был сторонником геоцентрической теории, его вывод о внутренних планетах (Меркурий и Венера) в IX в. был первым шагом в понимании гелиоцентрической теории.



1. Какими были представления о строении мира до нашей эры?
2. Как объясняет геоцентрическая теория строение Солнечной системы?
3. Как устроена Вселенная в соответствии с гелиоцентрической теорией?
4. Как объясняются на основании гелиоцентрической теории движения планет на фоне неподвижных звезд?
5. Какие новые идеи внес в строение Вселенной Дж. Бруно?
6. Начертите модель Вселенной по Беруни.

§ 2. Планеты Солнечной системы и их размеры

Вы познакомились с планетами Солнечной системы на уроках «Природоведения». Известно, что Солнце — самое большое светило этой системы. Его диаметр в 109 раз больше диаметра Земли, масса Солнца в 330000 раз больше массы Земли (рис. 28). Вокруг Солнца обращается 9 больших планет, орбиты которых лежат в близких друг к другу плоскостях и которые имеют различные периоды обращения вокруг Солнца. В соответствии с расстояниями от Солнца планеты расположены в следующей последовательности: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон.

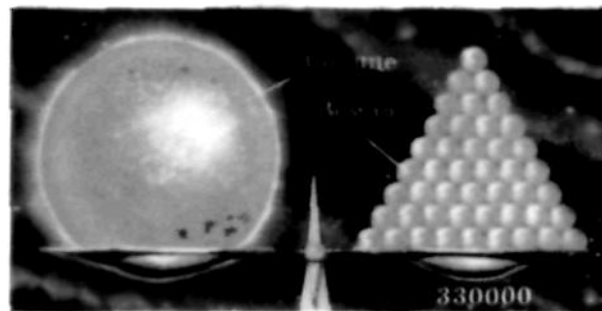


Рис. 28. Сопоставление масс Солнца и Земли.

Самая далекая от Солнца планета Солнечной системы — Плутон. Она расположена от Солнца на расстоянии, почти в 40 раз превосходящем расстояние от Земли до Солнца. Если расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 150 млн км, то Плутон удален от Солнца на расстояние 6 млрд км. Для того чтобы достигнуть Земли, солнечному свету требуется 8 минут, тогда как до Плутона солнечный свет приходит за 5,5 часов.

Кроме этих больших планет, в области между орбитами Марса и Юпитера вокруг Солнца обращаются тысячи малых планет с размерами от нескольких сотен метров до нескольких сотен километров.

По очень вытянутым эллиптическим орбитам вокруг Солнца обращаются «хвостатые звезды» — кометы, которые состоят из «головы» и «хвоста». Хвосты комет образуются при их приближении к Солнцу и, в основном, направлены в противоположную сторону от Солнца.

В пределах Солнечной системы вокруг Солнца также обращаются многочисленные малые космические тела.

Хотя планеты Солнечной системы являются весьма крупными космическими телами, их размеры по сравнению с размерами Солнца очень малы. Планеты и другие космические тела имеют совокупную массу, составляющую около 0,1% от массы Солнечной системы, на массу Солнца приходится ~99,9% (рис. 29). Поэтому Солнце является причиной движения всех тел Солнечной системы.

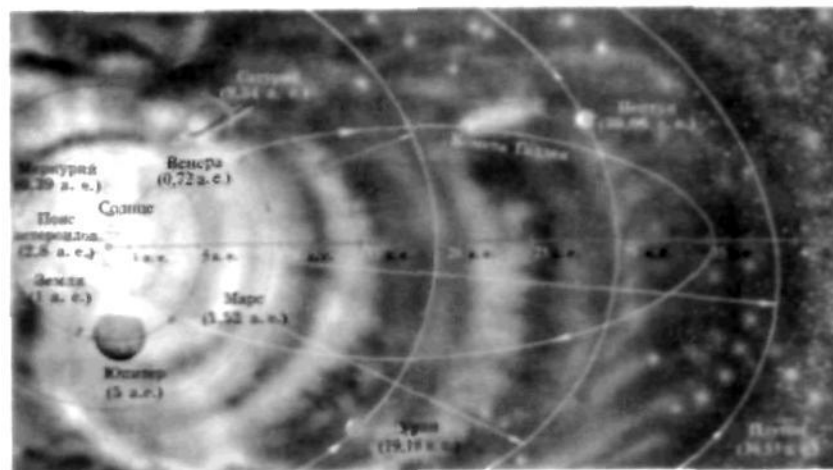


Рис. 29. Масштабы Солнечной системы.

По сравнению с небесными телами Солнечной системы звезды находятся от Солнца и Земли на расстояниях, во много сотни тысяч раз больших. Поэтому даже в самые крупные телескопы их можно наблюдать только в виде светящихся точек. Но в действительности многие звезды имеют по сравнению с Солнцем во много раз большие размеры, большинство из них ярче и горячее Солнца.



1. Перечислите планеты Солнечной системы в соответствии с их расстояниями от Солнца.
2. Какие еще небесные тела обращаются вокруг Солнца?
3. Во сколько раз диаметр и масса Солнца превосходят земные?
4. Во сколько раз дальше, по сравнению с Землей, расположена от Солнца самая далекая планета Солнечной системы — Плутон?
5. Примерно во сколько раз дальше находятся звезды от Солнца по сравнению с окружающими его планетами?

§ 3. Планетные конфигурации и условия их видимости

Положения планет, движущихся вокруг Солнца, при наблюдении их с Земли, совершающей свое собственное движение по орбите, выглядят достаточно сложно. Наблюдаемые с Земли положения планет относительно Солнца называются их конфигурациями.

Рассмотрим конфигурации двух планет. На рисунке 30 схематически изображены орбиты двух планет Солнечной системы. Орбита одной из них — орбита внутренней планеты (так называются планеты, орбиты которых лежат внутри земной орбиты, например, Меркурий и Венера), орбита другой — орбита внешней планеты (так называются планеты, орбиты которых лежат вне земной орбиты, например, Марс).

Если внутренняя планета находится в одной из четырех указанных на рисунке точек, то говорят, что она видна с Земли в нижнем (1) или верхнем (2) соединении с Солнцем, в наибольшей восточной (3) и наибольшей западной (4) элонгации. Вблизи нижнего и верхнего соединения внутренние планеты не видны — они теряются в лучах Солнца. В восточной элонгации эти планеты наблюдаются вечером после захода Солнца, а в западной элонгации они видны под утро. Если внешняя планета находится в точках (5), (6), (7), (8) своей орбиты, то она видна с Земли в соединении (5), в противостоянии (6), в соединении (7), в противостоянии (8).

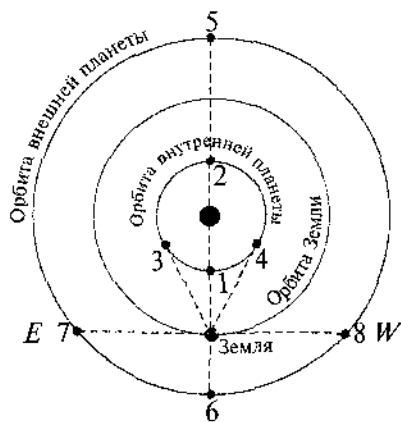


Рис. 30. Конфигурации планет и условия видимости.

нии (6), в восточной (7) и в западной (8) квадратурах соответственно. В противостоянии планета видна на противоположной от Солнца стороне неба на наименьшем от Земли расстоянии. Этот период наиболее благоприятен для астрономических наблюдений, так как планета будет видна всю ночь. В квадратурах угол между направлениями на планету и на Солнце равен 90° . Если планета находится в восточной квадратуре, то ее можно наблюдать с вечера до полуночи, а если в западной квадратуре, то с полуночи до утра.

В соединении внешняя планета теряется в лучах Солнца, находясь от Земли на наибольшем расстоянии.



1. В каких конфигурациях могут быть верхние и нижние планеты, двигаясь вокруг Солнца?
2. В каком взаимном расположении по отношению к Солнцу и Земле находятся планеты в своих конфигурациях и каковы условия их видимости?

§ 4. Движение планет вокруг Солнца. Их периоды

Все планеты движутся вокруг Солнца в направлении с запада на восток. Так как они находятся на различных расстояниях от Солнца, то и время их обращения вокруг Солнца является различным. Ближайшие к Солнцу внутренние планеты движутся вокруг Солнца быстрее, более удаленные внешние планеты имеют большее время обращения. Например, ближайшая к Солнцу планета Меркурий совершает один оборот вокруг Солнца за 88 дней. Самая удаленная от Солнца планета Плутон — за 240 лет. Скорости их движения также различны. В приложении приведена таблица, в которой собраны сведения, относящиеся к их движению вокруг Солнца, и приведены величины углов, образуемые плоскостями их орбит с эклиптической. Как видно из таблицы, все планеты движутся по орбитам, близким к эклиптике.

Сидерическим периодом обращения планеты ($T_{пл}$) называют промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите.

Синодическим периодом обращения планеты ($S_{пл}$) называют промежуток времени между ее двумя последовательными одноименными конфигурациями, т. е. между двумя последовательными соединениями, элонгациями или противостояниями планет.

Синодический период планеты, связанный с движением Земли, находится в простой математической зависимости с сидерическим периодом Земли (T_{\oplus}) и сидерическим периодом планеты за сутки ($T_{пл}$). Так как суточное угловое перемещение

планеты по орбите равно $\frac{360^\circ}{T_{пл}}$, Земли $\frac{360^\circ}{T_{\oplus}}$, то

$$\frac{360^\circ}{T_{пл}} - \frac{360^\circ}{T_{\oplus}} = \frac{360^\circ}{S_{пл}},$$

т.е. разность между перемещениями Земли и планеты за сутки будет равна суточной доле синодического периода планеты. Отсюда находим сидерический период обращения планеты. Исходя из вышеприведенного уравнения можно

найти сидерический период планеты: $\frac{1}{S_{пл}} = \frac{1}{T_{пл}} - \frac{1}{T_{\oplus}}$ (для

внутренних планет) и $\frac{1}{S_{пл}} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_{пл}}$ (для внешних планет),

так как из наблюдений могут быть определены только $S_{пл}$ — синодический период обращения планеты и T_{\oplus} — звездный год, т. е. сидерический период Земли.

1. Что называется сидерическим периодом обращения планеты?
2. Что называется синодическим периодом обращения планеты?
3. Как можно найти сидерический период планеты, зная ее синодический период и сидерический период Земли?

§ 5. Законы Кеплера

В XVI в. в результате многолетних астрономических наблюдений датский астроном *Тихо Браге* (1546–1601) добился превосходных результатов в определении расположения планет, определяя их с точностью до $2'$. Под таким углом на расстоянии 17 м видно тело длиной 1 см. В течение не-

скольких лет в наблюдениях, которые проводились в Праге, вместе с Тихо Браге принимал участие приглашенный им талантливый немецкий астроном *Иоганн Кеплер* (1572–1630). После смерти Браге все результаты его многолетних исследований оказались доступны Кеплеру.

Кеплер остался верен своему учителю и проделал большую вычислительную работу по определению расстояний между Землей и Солнцем, Марсом и Солнцем. Первоначально он предполагал, что планеты обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам, но затем, в результате изучения данных наблюдений Тихо Браге и своих собственных, он установил, что Марс движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Эллипс — это замкнутая кривая, представляющая собой сумму расстояний от какой-либо ее точки (B, C, D) до двух данных точек, называемых фокусами эллипса F_1 и F_2 (рис. 31). Эта сумма постоянна и равна величине *большой оси* AP , где A называется *афелием*, а P — *перигелием*:

$$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = a_3 + b_3 = 2a = \text{const.}$$

Отрезок, соединяющий точку эллипса с одним из его фокусов, называется *радиусом вектором* точки. Обобщив результаты своих почти 24-летних исследований, Кеплер открыл три закона планетных движений, которые формулируются следующим образом:

1. Планеты движутся вокруг Солнца по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади (рис. 32).
3. Квадраты сидерических периодов обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их орбит.

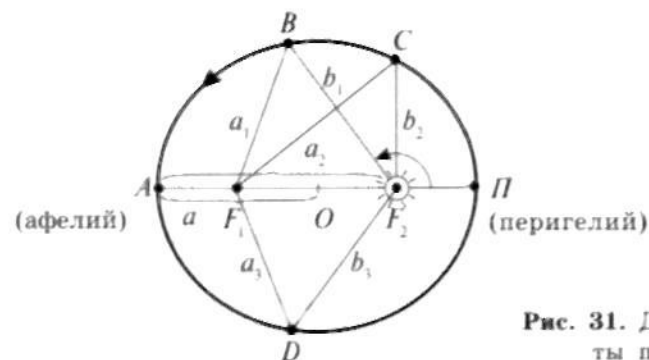


Рис. 31. Движение планеты по эллипсу.

Третий закон Кеплера записывается так:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Если за единицу времени принять один звездный год, а за единицу расстояния — среднее расстояние от Земли до Солнца (1 астрономическая единица), то период обращения вокруг Солнца какой-либо планеты можно вычислить по формуле $T_{пл}^2 = a_{пл}^3$.

Например, период обращения Марса по орбите вокруг Солнца равен 1,88 года, тогда по этой формуле можно вычислить большую полуось орбиты Марса: $a = 1,52$ а. е.

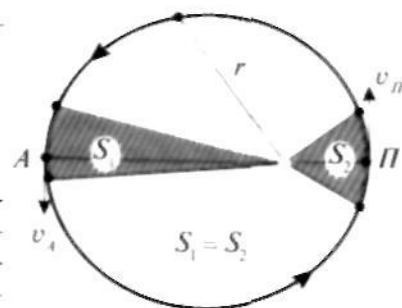


Рис. 32. За равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади.

1. Какая кривая называется эллипсом?
2. Сформулируйте первый закон Кеплера.
3. Сформулируйте второй закон Кеплера.
4. Как связаны период обращения планеты с большой полуосью ее орбиты?

§ 6. Определение расстояний до небесных тел Солнечной системы

1. Расстояния до тел Солнечной системы, в частности до планет, можно определить с помощью так называемого *суточного параллакса*. Предположим для простоты, что Земля имеет форму шара, O — центр Земли, K — место наблюдения на поверхности Земли и M — наблюдаемое светило (рис. 33). Наблюдатель в точке K видит светило по направлению KM , а воображаемый наблюдатель из центра Земли видит светило по направлению OM . Тогда $\angle KMO$ называется *суточным параллаксом* p светила M . Прямая KO имеет направление отвесной линии и направлена к зениту Z . Тогда, если $\angle ZKM = z$ и $\angle ZOM = z'$ — зенитные расстояния светила M в точках K и O , то $\angle KMO = z - z'$.

Если L — расстояние от центра Земли до светила, R_{\oplus} — радиус Земли, то из $\triangle KMO$ (по теореме синусов) имеем:

$$\frac{R_{\oplus}}{L} = \frac{\sin \angle KMO}{\sin \angle MKO} = \frac{\sin (z - z')}{\sin (180 - z)} = \frac{\sin (z - z')}{\sin z}.$$

откуда $\sin(z - z') = \frac{R_{\oplus}}{L} \sin z$. Если светило находится в зените, то $z = z' = 0$ и $z - z' = 0$ — параллактическое смещение по зенитному расстоянию обращается в 0. Если же $z = 90^\circ$, т. е. светило находится на горизонте, то $z - z'$ достигает наибольшего значения p_0 , которое называется *суточным горизонтальным параллаксом* светила.

Итак, *суточный горизонтальный параллакс* светила есть угол с вершиной в центре светила и со сторонами, направленными к центру Земли и в точку наблюдения.

Из треугольника OKM_0 имеем $L = \frac{R_{\oplus}}{\sin p_0}$. Таким образом, для того чтобы измерить расстояние L , нужно знать горизонтальный параллакс. Применим найденную формулу для нахождения расстояния от Земли до центра некоторой планеты. Так как параллаксы планет Солнечной системы меньше $1''$ (кроме параллакса Луны), то $\sin p_0'' : \sin 1'' = p_0'' : 1'' = p_0$, откуда $\sin p_0'' = p_0 \sin 1''$, $\sin 1'' = \frac{1}{206265}$, тогда $L = \frac{R_{\oplus} \cdot 206265}{p_0}$.

Для определения расстояния до звезды приходится использовать *годовой параллакс звезды*, т. е. угол, под которым видна со звезды полусось земной орбиты (об этом более подробно см. в § 7 разд. VIII).

Для справки: годичный параллакс ближайшей к Солнцу звезды Проксима Центавра равен $0'',762$, что соответствует расстоянию $4,04 \cdot 10^{13}$ км, т. е. приблизительно 4 световым годам.

2. С развитием техники появилась возможность определять расстояния до планет с помощью радиолокационного метода.

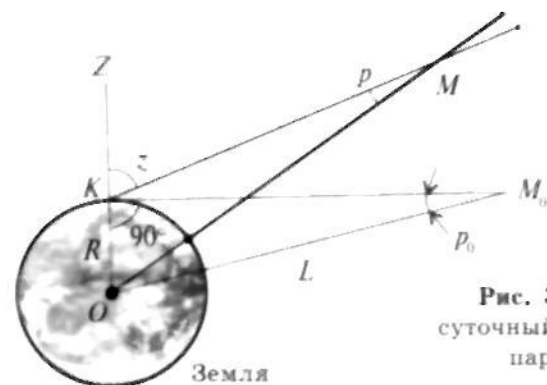


Рис. 33. Суточный (p) и суточный горизонтальный (p_0) параллакс светила.

Измеряется время t , за которое радиолокационный сигнал после достижения поверхности планеты, отражаясь возвращается к наблюдателю, тогда скорость света $c = \frac{2L}{t}$ и $L = \frac{ct}{2}$.

С помощью этого метода была уточнена величина среднего расстояния от Земли до Солнца: время, за которое свет преодолевает это расстояние — 499,004782 с, расстояние от Земли до Солнца — $1,49597870 \cdot 10^{11}$ м.

1. Что называется суточным параллаксом, суточным горизонтальным параллаксом светила?
2. Как определять расстояния до небесных тел солнечной системы?
3. Как определять расстояния с помощью радиолокационного метода?

§ 7. Единицы расстояния в астрономии

В астрономии выражать расстояния до небесных тел в СИ неудобно, поэтому в астрономии приняты специальные единицы расстояний:

1. Астрономическая единица (а. е.) — среднее расстояние от Земли до Солнца $\approx 149,6$ млн км;

2. Световой год — расстояние, которое свет проходит за 1 год. Для того чтобы найти это расстояние, следует найти число секунд тропического года: $365,2422 \cdot 24 \cdot 3600$ с, где 365,2422 — продолжительность тропического года, 24 — число часов в сутках, 3600 — число секунд в часе, и умножить на скорость света $c = 299792,458$ км/с. Таким образом, световой год $= 9,46 \cdot 10^{12}$ км.

3. Парсек (от «параллакс» + «секунда») — расстояние до звезды, годичный параллакс которой равен $1''$. $1 \text{ пс} = 30,86 \cdot 10^{12}$ км $= 206,265$ а. е. $= 3,26$ св. года.

Расстояния в астрономии измеряют и в более крупных единицах: килопарсек $= 1000$ пс, мегапарсек $= 10^6$ пс.

1. Какие единицы расстояний используются в астрономии, кроме единиц СИ?
2. Чему равна 1 астрономическая единица (а. е.)?
3. Что понимается под расстоянием в 1 световой год?
4. Что понимается под расстоянием в 1 парсек?
5. Сколько в 1 пс световых лет, а. е.?

§ 8. Определение размеров небесных тел Солнечной системы

Для того чтобы определить истинный радиус r наблюдаемой с Земли планеты, нужно определить ее суточный горизонтальный параллакс p_0 . Тогда из прямоугольного треугольника OEP (рис. 34) имеем:

$$\sin p_0 = \frac{OE}{OP} = \frac{R_{\oplus}}{L} \quad \text{или} \quad L = \frac{R_{\oplus}}{\sin p_0}.$$

Из прямоугольного треугольника OPO' для углового (видимого) радиуса ρ планеты находим: $\sin \rho = \frac{O'P}{OP} = \frac{r}{L}$, откуда

$$r = L \sin \rho. \quad \text{Подставляя значение } L, \text{ находим: } r = \frac{R_{\oplus}}{\sin p_0} \sin \rho.$$

Выражая p_0 и ρ в секундах дуги, получаем искомую формулу: $r = \frac{\rho}{p_0} R_{\oplus}$ (см. § 6 этого раздела), так как $\sin \rho \approx \rho$, а $\sin p_0 \approx p_0$.

1. Как найти размеры (радиусы) небесных тел Солнечной системы?
2. Какие параметры следует предварительно определить для того, чтобы решить эту задачу?
3. Запишите формулы для вычислений истинного радиуса r планеты, если известны ее суточный горизонтальный параллакс p_0 и угловой радиус ρ .

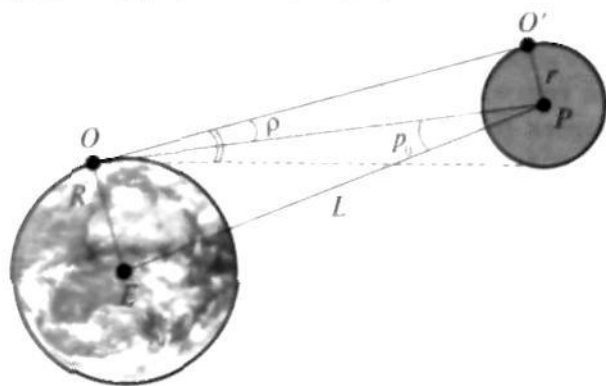


Рис. 34. Метод вычисления радиусов небесных тел Солнечной системы.

§ 9. Закон всемирного тяготения

Законы Кеплера носят универсальный характер, т. е. справедливы не только для планет, обращающихся вокруг Солнца, но и для естественных и искусственных спутников планет.

Установленные Кеплером законы движения планет подготовили почву для открытия силы, управляющей движением всех небесных тел. Великий английский физик Исаак Ньютон доказал, что сила, удерживающая планеты на орбитах, имеет ту же природу, что и сила тяжести на поверхности Земли, и сформулировал в 1687 г. закон всемирного тяготения: любые два тела притягивают друг друга с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Математически этот закон записывается так:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1, m_2 — массы взаимодействующих тел, r — расстояние между ними и $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2 \text{ кг}^{-2}$ — так называемая *гравитационная постоянная*, которая по величине равна силе, с которой притягиваются друг к другу два тела с единичными массами, находящиеся на единичном расстоянии друг от друга. Известно, что в пределах Солнечной системы расстояния измеряются в а. е., массы небесных тел — в массах Солнца, а время — в средних солнечных сутках. В этой системе единиц постоянная гравитации, называемая *гауссовой гравитационной постоянной*, равна $k = 0,0172021$. Ниже будет показано, что законы Кеплера следуют из закона всемирного тяготения.

1. Запишите математическое выражение закона всемирного тяготения.
2. Объясните физический смысл постоянной гравитации.

§ 10. Определение масс небесных тел

Ньютон следующим образом уточнил третий закон Кеплера: если предположить, что m_1, m_2 — массы планет, обращающихся вокруг Солнца, M_{\odot} — масса Солнца, a_1, a_2 — большие полуоси планетных орбит и T_1, T_2 — периоды их обращений вокруг Солнца, то

$$\frac{T_1^2 (M_{\odot} + m_1)}{T_2^2 (M_{\odot} + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (1)$$

Массу Земли можно вычислить исходя из формулы для ускорения силы тяжести — $m_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} = 5,9742 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Согласно (уточненному) третьему закону Кеплера (1), движение планеты, имеющей хотя бы один спутник, вокруг Солнца и движение спутника вокруг этой планеты связаны следующей зависимостью:

$$\frac{T_0^2(M_{\odot} + m_0)}{T_{\text{сп}}^2(m_0 + m_{\text{сп}})} = \frac{a_0^3}{a_{\text{сп}}^3}, \quad (2)$$

где m_0 и $m_{\text{сп}}$ — массы планеты и ее спутника, T_0 и $T_{\text{сп}}$ — периоды обращения планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты, a_0 и $a_{\text{сп}}$ — большие полуоси орбит планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты соответственно. Тогда, разделив числитель и знаменатель левой части формулы (2) на m_0 , получим:

$$\left(\frac{M_{\odot}}{m_0} + 1\right) : \left(1 + \frac{m_{\text{сп}}}{m_0}\right) = \frac{T_{\text{сп}}^2 a_0^3}{T_0^2 a_{\text{сп}}^3}. \quad (3)$$

Для всех планет Солнечной системы, кроме Земли и Луны, $m_0 \gg m_{\text{сп}}$, следовательно, отношением $\frac{m_{\text{сп}}}{m_0}$ можно пренебречь, тогда в уравнении (3) остается только одно неизвестное, которое легко можно вычислить. Например, для Юпитера отношение

$$\frac{m_0}{M_{\odot}} = \frac{1}{1050}. \quad (4)$$

Так как массой Луны по сравнению с массой Земли пренебречь нельзя, то для сравнения массы Солнца с массой Земли в уравнении (2) требуется предварительно определить массу Луны. При помощи специальных трудоемких вычислений удается определить отношение μ массы Луны к массе Земли: $\mu = \frac{1}{81,30}$. Тогда из уравнения (3) удастся найти, что

$$\frac{M_{\odot}}{m_{\oplus}} = 332946,0. \quad (5)$$

Массу Солнца можно независимо от этих вычислений определить также следующим образом: если известны масса искусственного спутника Земли, период его обращения вокруг Земли и большая полуось его орбиты, то, рассуждая аналогичным образом, можно найти массу Солнца по формуле

$$M_{\odot} = \left(\frac{a_{\oplus}}{a_{\text{сп}}}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_{\text{сп}}}{T_{\oplus}}\right)^2 \cdot m_{\oplus}. \quad (6)$$

С помощью формул (5) или (6) можно найти значение массы Солнца:

$$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}.$$

Подводя итоги, можно сказать, что в результате подобных вычислений удастся определить массы планет, у которых есть хотя бы один спутник. Массы планет, не имеющих спутников (Меркурий, Венера), определяют исходя из более сложных методов вычислений, выходящих за рамки школьного курса астрономии.

1. Приведите уточненную формулировку третьего закона Кеплера.
2. Как вычисляются массы планет Солнечной системы?
3. Как найти отношение массы Солнца к массе Земли?

§ 11. Видимое движение и фазы Луны

Луна — единственный естественный спутник Земли и совершает один оборот вокруг Земли за 27,32 суток. Этот период времени называется *сидерическим*, или *звездным*, месяцем. Направление вращения Луны вокруг Земли противоположно направлению кажущегося вращения небесной сферы, и происходит, таким образом, с запада на восток (т. е. в том же направлении, в котором Земля вращается вокруг своей оси). Скорость движения Луны по своей орбите составляет 1 км/с, это значит, что относительно звезд Луна за сутки перемещается примерно на 13° . Лунная орбита лежит в плоскости, которая наклонена к эклиптике под углом $5^{\circ}9'$.

Примечательно, что период обращения Луны вокруг Земли равен периоду вращения Луны вокруг собственной оси. Поэтому Луна всегда обращена к Земле *одной и той же стороной*.

Луна видна с Земли благодаря тому, что она отражает падающий на нее солнечный свет. Однако, если наблюдать в течение сидерического месяца за Луной, то она будет менять свою форму, начиная с узкого серпа, который обращен выпуклостью к Солнцу и бывает виден на западной стороне неба, до полного круга (т. е. до полнолуния), а затем вновь до узкого серпа, обращенного выпуклостью в противоположную сторону. Наконец, в течение 2–3 дней Луна совершенно не видна

на небе. В этот период она проходит возле Солнца и поэтому не будет видна. Формы лунного диска называются *фазами Луны*. Изменение фаз Луны происходит из-за периодического изменения условий освещения ее Солнцем по отношению к наблюдателю (рис. 35). Солнечные лучи падают на Луну почти параллельным пучком. На рисунке различные положения Луны относительно Земли указаны цифрами.

Лунный диск не виден с Земли в *новолунии* (первое положение) или виден полностью в *полнолунии* (пятое положение), или виден только частично (остальные положения).

Появление узкого серпа Луны в лучах вечерней зари вскоре после захода Солнца происходит примерно через два дня после новолуния и называется *неоменией*. В этой фазе темная часть диска все-таки слегка виднеется на фоне вечернего неба. Это так называемый *пепельный свет Луны* — результат падения на Луну солнечного света, отраженного Землей, которая в это время обращена к Луне большей частью своего полушария, освещенного Солнцем.

Промежуток времени между одноименными фазами Луны называется *синодическим* месяцем и равен 29,53 средних солнечных суток. Разница в продолжительности синодического и сидерического месяцев объясняется движением Земли вокруг Солнца.

1. Расскажите о характерных особенностях видимого движения Луны.
2. С каким периодом вращается Луна вокруг своей оси? Вокруг Земли?

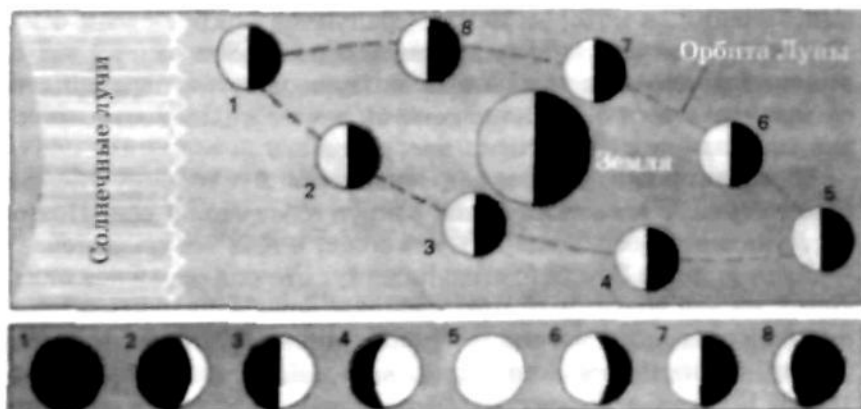


Рис. 35. Изменение фаз Луны
(1. Новолуние. 3. Первая четверть. 5. Полнолуние.
7. Последняя четверть).

3. В чем причина того, что Луна всегда обращена к Земле одной стороной?
4. Как называются основные фазы Луны?
5. Расскажите, как движется и как меняются фазы Луны.
6. Что называется синодическим месяцем?

§ 12. Солнечные и лунные затмения

Солнечные затмения. Луна при своем движении вокруг Земли иногда заслоняет Солнце своим диском, в таком случае говорят о солнечном затмении (рис. 36). Луна, освещаемая Солнцем, отбрасывает в сторону, противоположную Солнцу, тень, имеющую форму постепенно сужающегося конуса.

Наблюдатель, находящийся внутри конуса лунной тени, видит *полное солнечное затмение* (случай *O*). На темном небе появляются звезды, вокруг темного солнечного диска наблюдатель видит красивое лучистое сияние серебристого цвета — солнечную корону. Если наблюдатель окажется в полутени от Луны (случай *A* или *B*), то диск Луны закрывает только часть солнечного диска, и наступает *частное солнечное затмение*. Наконец, если вершина конуса тени Луны не доходит до поверхности Земли, то вблизи оси конуса тени, вместо полного солнечного затмения, наблюдатель

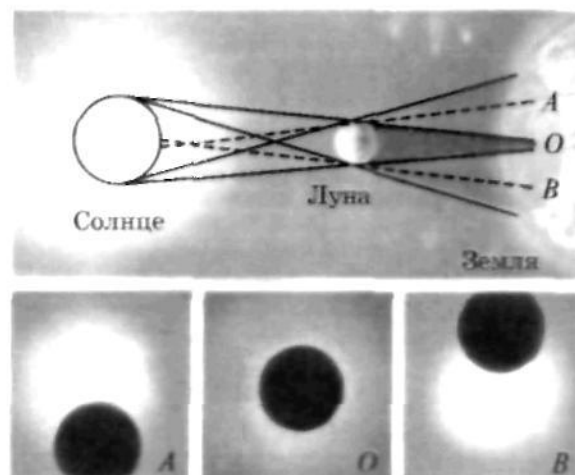


Рис. 36. Солнечное затмение
(на рисунках снизу виды солнечных затмений в соответствующих точках Земли).

будет видеть *кольцеобразное солнечное затмение*, при котором вокруг темного, образуемого Луной, диска на поверхности Солнца будет видно узкое яркое кольцо от Солнца.

Так как плоскость орбиты Луны наклонена к эклиптике, то солнечные затмения происходят только вблизи точек, где эти две плоскости пересекаются (узлы лунной орбиты). Солнце может оказаться вблизи другого лунного узла только через полгода (рис. 37, 1 и 2 — узлы лунной орбиты), так что ежегодно обязательно бывает два солнечных затмения, но в данной местности его может и не быть из-за небольшого размера лунной тени. Например, 8.04.2005 полное солнечное затмение наблюдалось в западном полушарии.

Лунные затмения. Конус земной тени длиннее конуса лунной, и если Луна попадет в него, то произойдет *лунное затмение*. Луна во время лунного затмения полностью лишается солнечного света, и поэтому лунное затмение видно на всем ночном полушарии Земли (рис. 38). Лунное затмение может произойти только во время полнолуния. Лунное затмение в противоположной от Солнца полушарии Земли

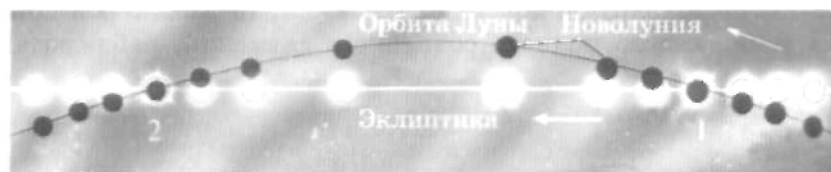


Рис. 37. Изображение движений Луны и Солнца, солнечные затмения с периодом полгода.

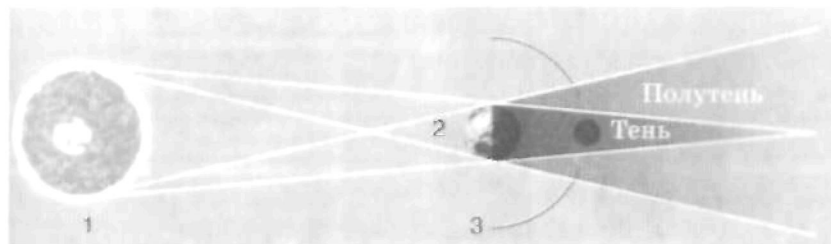


Рис. 38. Лунное затмение
(1 — Солнце; 2 — Земля; 3 — орбита Луны;
Луна в конусе тени Земли).

начинается и заканчивается в одно и то же время и может продолжаться до двух часов.

Так как Луна движется в направлении с запада на восток, то первым в земную тень входит левый край Луны, видимый диск Луны принимает форму серпа. При полном затмении Луна приобретает бурый или темно-красный цвет, так как солнечный свет, преломляясь в атмосфере Земли, все же освещает Луну преимущественно красными лучами. Каждый год происходит от одного до трех лунных затмений, но иногда их может и не быть.

В древности солнечные и лунные затмения наводили ужас на людей. В настоящее время наступление солнечных и лунных затмений предвычисляется на много времени вперед, поэтому затмения никого не пугают. В приложении приведена таблица солнечных затмений начала XXI в. Астрономы во время солнечных и лунных затмений получают исключительную возможность для изучения физики верхних слоев атмосферы Солнца, строения земной атмосферы и движения Луны.

Внимание! Наблюдать солнечные затмения можно только с помощью специальных приспособлений, защищающих зрение.

1. Расскажите, что такое лунное затмение.
2. Что такое солнечное затмение?
3. Почему солнечные затмения не происходят в каждое новолуние?
4. Почему лунные затмения не происходят в каждое полнолуние?
5. В какой фазе должна находиться Луна в момент ее затмения?



IV ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОНАВТИКИ

§ 1. Космонавтика и ее связь с другими науками

Космонавтика состоит из двух греческих слов — «космос» (порядок, мир, строй) и «наутике» (мореплаватель, искусство мореплавания).

С помощью ракет и космических аппаратов (КА) она направлена на изучение космического пространства и объектов вне Земли. В основе космонавтики лежит наука, объединяющая научно-технические исследования и использование космического пространства с помощью космических полетов и ракетной техники. Она, помимо теории и практики космических полетов (расчеты траекторий, орбитальных маневров и др.), включает в себя такие организованные системы, как строение ракетносителей, разных двигателей, бортовых систем управления, наземных установок полетов, научные аппараты, Центр управления полетом на Земле, приборы телеметрии, оборудования орбитальных станций и многое другое. Изучение космоса в последние годы занимает особое место в сфере деятельности человека, является определенным этапом в истории развития науки и техники общества.

Космонавтика основывается на целом ряде научных и технических дисциплин и тесно связана с естественными науками: астрономией, физикой, химией, биологией и математикой. При создании космической ракеты ученые опирались на достижения технических наук. Математические расчеты по достижению космических аппаратов определенного небесного объекта или их движению по определенной траектории осуществляются учеными на основе знаний физики, астрономии и математики. Знания астрономов относительно таких параметров орбит небесных тел, как расстояние, размеры, масса и др. (особенно в пределах Солнечной системы) очень пригодятся в осуществлении полетов косми-

ческих аппаратов в околоземном и межпланетном пространстве.

Не узнав предварительно плотность околоземной атмосферы, структуры ее магнитосферы и радиационных поясов, ни один спутник не выводят в околоземное пространство. Не имея представления о физической природе Луны, нельзя было отправить на нее космическую станцию. Знание законов механики позволило ученым и инженерам успешно запустить искусственные спутники, КА и орбитальные станции в околоземное пространство, на Луну и планеты. Запущенные в последние годы КА и орбитальные станции на Луну, планеты и их спутники не только подтвердили в основном правильность полученных ранее известных величин физических параметров (их расстояние, размеры, массу и др.), но и доказали точность открытых законов небесной механики и знаний природы этих объектов. Они подтвердили также правильность применяемых методов. Таким образом, уже много лет космонавтика оказывает большую помощь в развитии наук физики и астрономии. Методы космонавтики, позволив исследовать небесные тела и их системы в невидимых лучах (ультрафиолете, радиолучах, рентгене, гамма-лучах и др.), значительно обогатили наши знания относительно их природы, открыли новое направление в науке — внеатмосферную астрономию.

При разработке конструкций и двигателей летательных аппаратов, теории управления их движением в космосе, в получении ценной информации, особенно при создании мощных ракетных двигателей с большой силой тяги, ученые и инженерно-технические кадры используют законы физики.

Космонавтика тесно связана с наукой химией. Космонавтика предъявляет большие требования к химическим свойствам материалов, применяемых при создании ракетных двигателей и внешних структур самой ракеты. В частности, для внешней обшивки ракеты необходимы неподдающиеся высокой температуре материалы, а для самой установки — высокостойкие по многим параметрам сплавы. В технологии получения топлива для ракет (жидкого, твердого, газового и др.) огромную роль играют результаты химических исследований.

Исследования в космонавтике нельзя проводить без знания математики. При создании конструкций КА, осуществлении и управлении их движением в космическом пространстве ученым и конструкторам приходят на помощь сложные математические вычисления. Ни одной операции в космонавтике невозможно осуществить без тех или иных математических операций.

В последние годы ученые для долгосрочных полетов на орбитальных станциях запланировали и осуществили несколько биологических в экстремальных условиях экспериментов. В частности, они проводили различные эксперименты, используя космические условия (невесомость, вакуум, повышенная радиация и др.), и определяли их влияние на человеческий организм. На основе полученных результатов они предупредили об их отрицательном влиянии на организм человека.

Многие технические эксперименты (техника горения, проверка сверхстойких материалов и др.) широко применяются в космонавтике. Большую роль в развитии космонавтики сыграли и достижения авиационной техники. В осуществлении задач современной космическо-ракетной техники огромную роль сыграло сотрудничество сотни ученых и инженерно-технических специалистов по интеграции исследований в теоретическом и экспериментальном направлениях.

К.Э. Циолковский является одним из первых ученых в разработке теории движения тела с определенной массой и вычислений, что у небесного тела с определенной массой и радиусом существуют первая и вторая космические скорости, позволяющие выпускать искусственных спутников на околоземную орбиту, круговую и эллиптическую, заставляющие их двигаться также по параболе в поле тяготения Земли. Вычислил необходимые начальные скорости для достижения Луны и планет по эллиптической и параболической траекториям.

К. Циолковский высказывал интересные мысли о создании поселений в космосе, где будут жить и работать десятки тысяч землян, использовать станции в качестве перевалочной базы при полетах на дальние небесные объекты. Теоретические основы космонавтики даны в его книге «Исследования мировых пространств реактивными приборами», изданной в 1903 году. Через несколько лет после него группа ученых, таких как Р. Эно Пельтри (Франция), Р. Годдард (США), Г. Оберт (Германия) предложили множество реальных проектов по исследованию космического пространства. В 20–30-е годы XX века отдельная группа и общество ученых начали эксперименты по конструированию ракетных двигателей. По инициативе ученого Н.И. Тихомирова в 1921 году была открыта первая экспериментально-конструкторская лаборатория по разработке ракет на бездымном порохе. Затем в 1928 году расширенная лаборатория стала называться Газодинамической (ГДЛ). Здесь трудились такие



Рис. 39. Первый искусственный спутник (ИС) Земли.



Рис. 40. Космический аппарат «Вояджер-2», запущенный в 1977 г. для исследования планет.

видные конструкторы, как Б.С. Петропавловский, Г.Э. Лангемак, В.Г. Глушко и др.

Огромную роль в развитии ракетостроения сыграла группа по изучению реактивного двигателя (ГИРД). Руководителем московского ГИРДа, созданного в 1932 году, был назначен С.П. Королев. В ГИРДе работали такие видные ученые и инженеры, как В.П. Ведчинкин, Ф.А. Цандер, М.К. Тихонравов, Ю.А. Победоносцев, Н.А. Рынин, Я.И. Перельман и др.


В конце 50-х годов завершились сложные работы по созданию пилотируемых ракет. Возглавили эти работы основатель прикладной космонавтики С.П. Королев и М.В. Келдыш — основатель современной теории космонавтики. В результате этих работ 4 октября 1957 года с космодрома Байконур был запущен первый искусственный спутник Земли (рис. 39). Это всемирно-историческое событие стало началом новой эры в истории человечества — эры изучения и освоения космического пространства.

После этого для получения новой научной информации о земной атмосфере, ее ионосфере, магнитосфере, а также о других ресурсах околоземного пространства были запущены в космос оборудованные разнообразными научными аппаратами сотни искусственных спутников Земли.

В 1959 году для исследования космическими аппаратами естественного спутника Земли — Луны были запущены автоматические станции. В 1969 году впервые американские космонавты высадились на Луну на КА «Аполлон-11». Так сбылась давняя мечта человека.

В начале 1960-х годов межпланетные автоматические станции (МАС) бывшего Союза стали активно изучать планеты земного типа (сначала Венеру, Марс, а затем и Меркурий).

В 1972—1973 годы по программе «Большой тур» в США началось изучение с помощью МАС планет-гигантов. Запущенные по этой программе в 1977 году МАС «Вояджер-1» и «Вояджер-2» дали очень много интересной информации по физике гигантов (рис. 40). В 1989 году «Вояджер-2», преодолев огромное расстояние, достиг Нептуна. А в настоящее время с помощью КА, МАС и космических обсерваторий широко изучаются небесные тела и их системы, которые находятся далеко за пределами нашей Галактики, вплоть до 10^{10} световых лет. Много интересной информации обнаружено относительно экстремальности условий: температуры, плотности и других параметров, которые заставляют человека серьезно задуматься о нашей жизни на Земле, оценить ее природные богатства, животный и растительный мир, защитить от необдуманных действий, которые могут поставить нашу планету через несколько столетий на грань гибели.

- 
1. Что изучает наука космонавтика?
 2. Какова связь космонавтики с другими науками?
 3. Кто является основателем космонавтики?
 4. Когда был запущен первый искусственный спутник Земли?
 5. Экипаж какого космического корабля впервые ступил на поверхность Луны?

§ 2. Силы, действующие на космический аппарат во время полета

Одна из самых главных сил, действующих на КА во время его полета, — это *сила всемирного тяготения*. Сила тяготения между материальными телами подчиняется всемирному закону, открытому еще Ньютоном. Как уже было отмечено (раздел III, § 9), математическое его выражение


$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Здесь F — сила тяготения между материальными телами, $m_1 m_2$ — их масса, r — расстояние между телами, пропорциональ-

ный коэффициент G — гравитационное постоянное, равное $6,672 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{Hm^2}{kg^2}$.

Другая сила, которая действует на КА, — это сопротивление атмосферы. Если полет совершается близко к поверхности Земли, т. е. на не очень большой высоте, то сила сопротивления атмосферы будет достаточно большой. Такая сила называется аэродинамической. В верхнем слое атмосферы из-за незначительной плотности частиц (в 1 см^3 всего несколько сотен атомов) КА почти не испытывает сопротивления и поэтому в таких случаях им можно пренебречь.

На движущиеся в межпланетном пространстве КА действует еще *сила давления солнечных лучей*. Если при этом масса космического аппарата незначительна, то сила давления солнечных лучей небольшая. Чем больше поверхность КА, тем больше на него сила давления солнечных лучей, которая заметно изменяет траекторию КА. В таких случаях обязательно следует учитывать силу давления излучения Солнца. Другие силы, действующие на КА в космическом пространстве, называются *электрическими и магнитными*, они главным образом образуются при вращательном движении КА вокруг его центра тяжести, в других случаях можно ими пренебречь.

- 
1. Какие силы действуют на КА при его полете?
 2. Как влияет атмосферное сопротивление на эволюцию траектории КА?
 3. Влияет ли сила давления излучения Солнца на орбиту КА?

§ 3. Невесомость

Представим себе космический корабль, свободно движущийся в мировом пространстве после завершения разгона и приданного ему поступательного (т. е. невращательного) движения. При таком движении все точки тела имеют одинаковые скорости. Поскольку КА состоит из различных составных деталей, можно утверждать, что если на корабль действуют одни лишь силы притяжения небесных тел, то скорости этих деталей и в дальнейшем будут одинаковыми. Даже если эти силы изменяются, то изменяются они для всех деталей в одинаковой степени, потому что приобретенное гравитационное ускорение не зависит от массы самих

тел. Это происходит от того, что размеры корабля ничтожно малы по сравнению с расстояниями действующих на него тел:

$$a_{\text{пр}} = \frac{GM}{r^2},$$

где M — масса центрального тела (а не отдельных деталей корабля),

r — расстояние от действующего на КА центрального небесного тела.

В таком случае между деталями КА не возникает никакой силы давления и поэтому они со временем не расходятся, т. е. исчезает их вес относительно друг друга. Космонавт не давит на кресло, на котором он «сидит», не возникает сила натяжения на шнур, на котором подвешена лампа, опущенный в пространство карандаш, не падая на стол, висит в пространстве свободно, так как скорость и ускорение этих деталей остаются одинаковыми. В кабине корабля слова «пол» и «потолок» употребляются не в своем обычном значении. Там возникает невесомость, т. е. отсутствует столь привычная в нашей жизни сила притяжения к полу или стене корабля.

Наличие внешних поверхностных сил (сопротивление на корабль внешней среды, силы реакции опоры или подвеса) приводит к появлению весомости внутри корабля.

1. При каких условиях внутри КА возникает невесомость?
2. При подъеме КА (т. е. при его активном движении) возникнет ли внутри него невесомость?
3. При каких условиях на Земле можно создать невесомость?

§ 4. Центральное поле тяготения

При определении орбиты космического аппарата (КА) нет нужды учитывать действующие на космический аппарат силы притяжения большинства небесных тел Солнечной системы.

Действительно, если КА находится в космосе достаточно далеко от больших планет, необходимо учитывать притяжение одного лишь Солнца, потому что гравитационное ускорение, сообщаемое Солнцем, значительно превосходит ускорения, сообщаемые планетами (по причине больших расстояний до планет и относительной малости их масс по сравнению с массой Солнца).

Допустим теперь, что анализируется движение КА вблизи Земли. Так как сила притяжения, действующая на притягиваемое тело, определяется только массой и расстоянием притягиваемого тела, то ускорение, сообщаемое КА Солнцем, примерно равно ускорению, сообщаемому Солнцем Земле (около $0,6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$).

Если нас интересует движение КА относительно Солнца, то естественно было бы учитывать ускорение, сообщаемое Землей КА, так как относительное ускорение КА определяется разностью между ускорением, которое объект получает от Земли, и ускорением, обусловленным притяжением Солнца.

Но если нас интересует движение КА относительно Земли, то притяжением Солнца без потери точности можно пренебречь. На самом деле, даже на борту КА, совершающего полет вблизи Земли, движение предметов происходит независимо от притяжения Земли. То же самое можно сказать о гравитационном влиянии Луны и других планет.

Вот почему в космонавтике расчет траектории КА почти всегда производится в предположении, что аппарат находится под действием только одного притягивающего небесного тела (т. н. *задача двух тел*, которую удается решить с соблюдением высокой точности расчетов). При этом удается выделить те важные закономерности движения КА, которые остаются незамеченными, если движение КА изучается с учетом влияния всех действующих на него сил.

Будем считать небесное тело (Солнце, Землю или другую планету Солнечной системы) однородным материальным шаром или по крайней мере шаром, состоящим из вложенных друг в друга однородных сферических слоев. В таком случае можно доказать, что подобное небесное тело притягивает так, будто бы вся его масса сосредоточена в его центре. В этом случае поле тяготения называется *центральной*, или *сферическим*, полем.

Рассмотрим движение КА в центральном поле тяготения, если в начальный момент, находясь на расстоянии r_0 от небесного тела, он приобретает скорость v_0 (r_0 и v_0 называются начальными условиями). Так как поле тяготения, как известно из курса физики, является потенциальным, в центральном поле справедлив закон сохранения механической энергии (воздействием негравитационных сил можно пренебречь). В начальный момент времени кинетическая энергия аппарата равна

$$W_k = \frac{mv_0^2}{2},$$

где m — масса аппарата и v_0 — его скорость, потенциальная энергия в центральном поле выражается формулой:

$$W_p = -\frac{GMm}{r_0},$$

где M — масса притягивающего тела, а r_0 — расстояние от него до КА. Потенциальная энергия, будучи отрицательной, увеличивается с удалением от Земли, превращаясь в 0 бесконечности. Тогда закон сохранения полной механической энергии запишется в следующем виде:

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{GMm}{r_0} = \frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r},$$

где в правой части равенства рассматривается кинетическая и потенциальная энергия аппарата на расстоянии r от притягивающего тела.

Разделив обе части уравнения на m , приходим к формуле

$$v^2 = v_0^2 - \frac{2GM}{r_0} \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \text{ или } v_r^2 = v_0^2 - \frac{2K}{r_0} \left(1 - \frac{r_0}{r}\right).$$

Данное выражение называется *интегралом энергии*, где $K = GM$ — *гравитационный параметр* (г. п.), характеризующий центральное поле.

Гравитационный параметр для Земли $K_{\oplus} = 3,9860 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$, для Солнца — $K_{\odot} = 1,32712 \cdot 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$, а для Луны — $K_{\text{л}} = 4,9 \cdot 10^3 \text{ км}^3/\text{с}^2$.

1. Гравитационное поле какого небесного тела называется центральным полем тяготения?
2. Напишите формулу для интеграла энергии.

§ 5. Траектории тела в центральном поле тяготения

Траекторией, или орбитой, космического корабля называется путь, описываемый КА в пространстве. Все возможные типы траекторий можно разделить на четыре группы.

1. *Прямолинейные траектории*. Если начальная скорость КА, находящегося в центральном поле тяготения некоторого тела, равна нулю, то под действием притяжения небесного

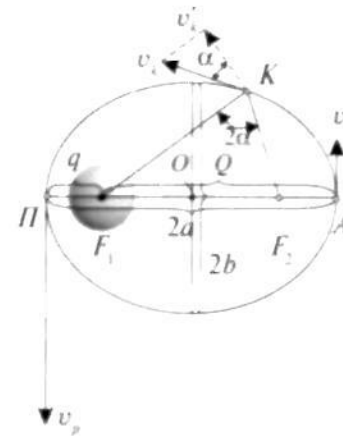


Рис. 41. Движение тела по эллиптической траектории в центральном поле тяготения.

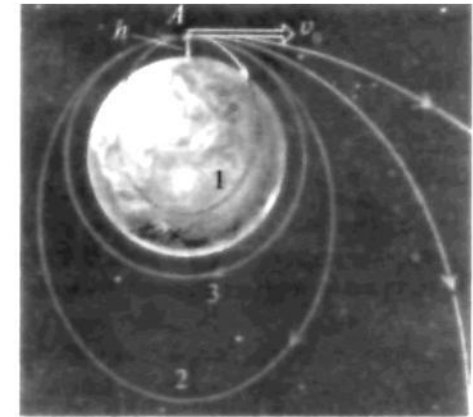


Рис. 42. Траектория тела в центральном поле тяготения (в качестве примера приведены траектории КА в поле тяготения Земли).

тела, создающего центральное поле, КА начинает прямолинейное движение по направлению к его центру. Если начальная скорость КА направлена точно к центру или в прямо противоположном направлении (радиальная скорость), то движение КА также будет прямолинейным. Во всех остальных случаях прямолинейное движение невозможно.

2. *Эллиптические траектории*. Если начальная скорость КА не является радиальной, то траектория не будет прямолинейной, так как она будет искривляться под действием притяжения Земли. Плоскость траектории проходит через начальное направление скорости и центр Земли.

Если модуль начальной скорости не превышает некоторой величины, обусловленной массой и радиусом Земли, то траектория КА, как следует из первого закона Кеплера, представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится центр Земли (рис. 41). Если при этом эллиптическая орбита не пересекает поверхности притягивающего небесного тела (в нашем случае Земли), КА в этом случае превращается в его искусственный спутник.

Можно показать, что скорость v и расстояние r от центра притяжения в любой момент времени связаны с большой полуосью a орбиты следующим соотношением:

$$v^2 = K \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right). \quad (1)$$

Из третьего закона Кеплера период обращения T тела по эллипсу в центральном поле тяготения связан с большой полуосью эллипса a :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \frac{4\pi^2}{K}.$$

Отсюда

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K}} a^{3/2}. \quad (2)$$

Отношение расстояний между фокусами эллипса F_1, F_2 к длине большой оси называется *эксцентриситетом эллипса*, из рисунка 41:

$$e = \frac{FF_1}{2a} = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a},$$

его можно также найти из выражения:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}. \quad (3)$$

Из формулы (1) следует, что чем больше начальная скорость, тем больше большая полуось орбиты, а значит и период обращения T космического аппарата.

Ближайшие и наиболее удаленные от фокуса (F_1) точки эллипса (П и А см. на рис. 41) называются соответственно *перигелием* и *апогелием*.

Если в фокусе эллипса находится Земля, то эти точки называются *перигеем* и *апогеем*, если Солнце — *перигелием* и *афелием* соответственно.

Как известно из курса физики, справедлив *закон сохранения момента импульса* M . В случае центрального поля невозмущенное движение КА является плоским, поэтому, если m — масса КА, v_0 и v — начальная скорость и скорость в момент времени t и r — радиус-вектор, то момент импульса M равен произведению импульса на длину перпендикуляра, опущенного из центра КА на направление скорости. В случае, когда КА находится в перигее и апогее орбиты, моменты импульсов аппарата из-за перпендикулярности скоростей к радиусам-векторам:

$$M = mv_0 r_0 = mv r, \quad \text{и} \quad M = mvr \cos \alpha \quad (4)$$

в текущей точке орбиты. Отсюда по закону сохранения момента импульса

$$v_0 r_0 = v r \cos \alpha. \quad (5)$$

Таким образом, скорость в перигее (v_0) максимальна, в апогее — минимальна, так как r_0 является наименьшим, а r_a — наибольшим радиусом-вектором эллиптической орбиты.

Если КА берет старт с точки А на высоте h с поверхности Земли горизонтально, то в зависимости от величины начальной скорости точка старта А может превратиться в перигей (орбита 2) или апогей (орбита 1) (рис. 42).

В первом случае начальная скорость достаточно велика (больше некоторой величины), чтобы спутник мог начать удаляться от Земли на пути к апогею (см. орбиту 2 на рис. 42). Во втором случае скорость меньше той же величины, поэтому КА описывает воображаемую траекторию внутри Земли (орбита 1). Наконец, когда $a = r$, скорость

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{K_{\oplus}}{r}} \quad (6)$$

и орбита КА будет круговой (см. орбиту 3 на рис. 42).

Из последней формулы легко найти круговую скорость для любого расстояния $r \geq R_{\oplus} + 200$ км от ее центра, в частности, при $r = R_{\oplus} + 200$ км, $v_1 = 7,789$ км/с. А если $r = R_{\oplus}$, то скорость, обеспечивающую круговую орбиту по формуле

$$v_1 = \sqrt{\frac{K_{\oplus}}{R_{\oplus}}}, \quad (7)$$

называют *первой космической скоростью*.

3. *Параболические траектории*. Если начальная скорость достаточно велика, то «апогей уходит в бесконечность», т. е. $a \rightarrow \infty$. В этом случае, исходя из формулы (1), траектория КА будет параболой (см. орбиту 4 на рис. 42).

Тогда на расстоянии r_0 , обеспечивающим параболическую траекторию, начальная скорость v_0 будет равна

$$v_0^2 = \frac{2K}{r_0}, \quad \text{или} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2K}{r_0}}. \quad (8)$$

Скорость, найденная из формулы (8), называется *освобождаемой скоростью* ($v_{\text{осв}}$).

Для Земли найденная скорость при $r_0 = R_{\oplus}$ будет

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2K_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \quad (9)$$

Скорость, найденная из формулы (9), называется *второй космической скоростью*, или скоростью освобождения от Земли.

Скорости v_I и v_{II} связаны соотношением: $v_{II} = v_{осв} = v_I \sqrt{2}$.

Воспользовавшись формулой (8), можно записать выражение для интеграла энергии (IV, § 5) в виде

$$v^2 = v_0^2 - v_{осв}^2 \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \quad (10)$$

4. *Гиперболические траектории.* Если КА получит скорость $v_0 > v_{II}$, то он будет двигаться по гиперболической траектории. При этом скорость аппарата в бесконечности в отличие от параболической траектории уже не будет равна нулю (см. орбиту 5 на рис. 42). Физически это означает, что по мере удаления аппарата его скорость будет непрерывно падать, но не сможет стать меньше величины v_{∞} , которую можно найти, приняв в формуле (10) $r = \infty$. Получим

$$v_{\infty}^2 = v_0^2 - v_{осв}^2 \quad (11)$$

Скоростью v_{∞} называют *остаточной скоростью* (гиперболическим избытком скорости).

В этом случае вдали от центра притяжения КА будет двигаться сколь угодно близко к асимптотам гиперболической траектории, т. е. его траекторию приближенно можно считать прямолинейной.

Ясно, что и в этом случае закон сохранения импульса (4) будет справедлив так же, как и для эллиптических орбит.

Все рассматриваемые траектории называют *кеплеровыми орбитами* в честь И. Кеплера.



1. Связана ли траектория КА в центральном поле с величиной его начальной скорости?
2. Как найти скорость КА в любой точке его эллиптической орбиты?
3. Как найти период T обращения КА?
4. Чему равны первая и вторая космические скорости?
5. Чем отличаются значения скорости КА на бесконечности в случае параболической и гиперболической траекторий?

§ 6. Сфера действия и приближенный расчет траекторий КА

Для реальных космических тел кеплерово движение космического аппарата в точности никогда не может осуществляться. Дело в том, что притягивающее небесное тело не может обладать точной сферической симметрией и, следовательно, его поле тяготения не является, строго говоря, центральным. Кроме того, при изучении траектории КА надо учитывать влияние на него и других тел, прежде всего Луны и Солнца. Но кеплерово движение настолько просто и так хорошо изучено, что будет удобно даже при нахождении точных траекторий не отказываться полностью от рассмотрения кеплеровой орбиты, а по возможности уточнить ее. Кеплерова орбита рассматривается как опорная орбита при расчетах траектории КА, но для ее уточнения в дальнейшем учитываются возмущения, которые траектория претерпевает под влиянием притяжения того или иного тела, сил инерции Земли у полюсов, ее неоднородности, светового давления Солнца и др. В итоге производят истинный расчет движения КА на основе кеплеровой орбиты (т. е. траектории, найденной сначала из задачи двух тел).

1. Рассмотрим для примера возмущающее ускорение КА, движущегося вокруг Земли (т. е. его геоцентрическое движение) за счет гравитационного притяжения Солнца, и его изменение с удалением от Земли. Допустим, что КА обращается вокруг Земли на расстоянии $r_0 = 500000$ км, а его расстояние при этом от Солнца будет 149100000 км (рис. 43). Тогда ускорение, получаемое КА от Земли и вычисляемое выраже-

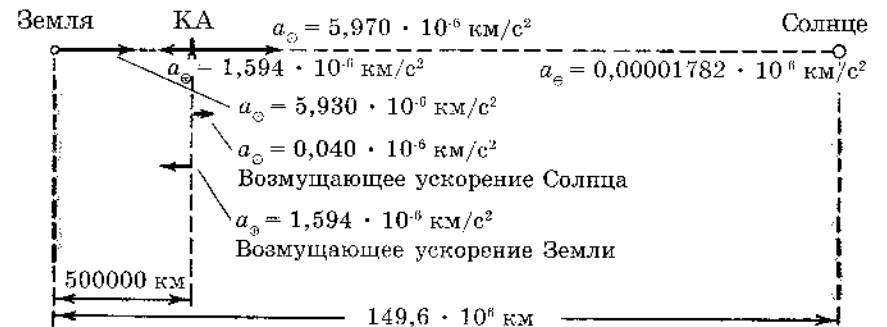


Рис. 43. Оценка сферы действия Земли относительно Солнца.

нием $a_p = GM_\odot / r_p^2$, составит $1,594 \cdot 10^6$ км/с², а от Солнца — $5,970 \cdot 10^6$ км/с², т. е. ускорение, сообщаемое КА Солнцем, оказывается в несколько раз больше. Это, однако, не значит, что КА уйдет от Земли и будет захвачен Солнцем. Дело в том, что при изучении геоцентрического движения КА возмущающим ускорением является разность ускорений, придаваемых Солнцем КА ($5,970 \cdot 10^6$ км/с²) и Земле ($5,930 \cdot 10^6$ км/с²), т. е. $(5,970 - 5,930) \cdot 10^6$ км/с² = $0,040 \cdot 10^6$ км/с². На самом деле полученное ускорение сравнивается с ускорением, сообщаемым Землей КА, т. е. с $1,540 \cdot 10^6$ км/с². Тогда становится ясно, что возмущающее ускорение со стороны Солнца на КА, удаленного от Земли на расстояние 500000 км ($0,040 \cdot 10^6$ км/с²), по сравнению с ускорением, сообщаемым ему Землей ($1,540 \cdot 10^6$ км/с²), незначительно и составляет всего лишь 2,5% ускорения Земли.

2. Допустим, теперь нас интересует движение КА относительно Солнца, т. е. его гелиоцентрическая траектория. При этом ускорения, сообщаемые КА Землей ($1,540 \cdot 10^6$ км/с²) и Солнцем ($0,00001781 \cdot 10^6$ км/с²), сильно отличаются друг от друга, а их разность, которая называется возмущающим ускорением Земли, составляет почти $\approx 1,540 \cdot 10^6$ км/с², так как ускорение, сообщаемое Землей Солнцу, является незначительным. Такое возмущающее ускорение Земли при гелиоцентрическом движении составляет 26,7% ускорения, сообщаемого КА Солнцем ($5,970 \cdot 10^6$ км/с²), и поэтому на таком расстоянии движение КА лучше считать гелиоцентрическим.

Таким образом, можно сделать вывод, что когда КА обращается на расстоянии 500000 км от Земли при расчете его геоцентрической траектории расчет следует сводить к последовательным решениям задач двух тел: сначала вычислить кеплеровую орбиту КА вокруг Земли, а затем возмущающие ускорения со стороны Солнца для каждой точки орбиты. При таком приближенном подходе к решению пространство, через которое проходит траектория полета, разбивают на зоны. Внутри каждой отдельной зоны во внимание принимают гравитационное действие только одного небесного тела.

Если применим такой расчет для всего окружающего пространства Земли, то выясним, что внутри сферы с определенным радиусом можно определить траекторию КА, исходя из задач двух тел, а затем уточнить ее для отдельных точек орбиты, учитывая возмущающее ускорение Солнца. Найденная таким способом сфера вокруг Земли относительно

притяжения Солнца называется *сферой действия Земли*, и ее радиус составляет 925000 км. Найденный таким образом радиус сферы действия Луны относительно Земли — 66000 км, а радиус сферы действия Солнца относительно центра нашей Галактики — $9 \cdot 10^{12}$ км \approx 1 с.г. Радиус сферы действия любого небесного тела с массой m относительно другого с массой M ($m \ll M$) при расстоянии между ними a вычисляется по формуле:

$$\rho = a \left(\frac{m}{M} \right)^{1/3}$$

При пересечении КА границы сферы действия для удобства расчета орбиты допускают, что тело переходит из одного центрального гравитационного поля в другое. Движения космического аппарата в отдельно взятом центральном поле составляют разные кеплеровые орбиты. Траектории движения космического аппарата на границе сферы действия сопрягаются («склеиваются») по определенным правилам. В этом заключается приближенный метод расчета космических траекторий, который иногда называют методом сопряженных конических сечений, т. е. кеплеровых орбит.

1. Что надо понимать под сферой действия определенного небесного тела (например Земли) относительно другого тела (т.е. Солнца)?
2. Как вычисляют сферу действия определенного тела с массой m относительно другого с массой M , где $m \ll M$?

§ 7. Орбитальные элементы искусственного спутника (ИС) Земли

Состояние вращающегося вокруг Земли ИС относительно земного экватора и другие его параметры (положения основных точек пересечения, параметры орбиты, время обращения и т. д.) называются *орбитальными элементами спутника*. Обычно выделяют следующие орбитальные параметры (рис. 44):



Рис. 44. Элементы орбит искусственного спутника Земли (ИС).

i — угол наклона плоскости орбиты ИС к плоскости экватора Земли (при $i=90$ его называют полярным спутником, а в случае $i=0$ — экваториальным). Если направление движения ИС совпадает с направлением вращения Земли, то спутник называется прямым, а если движение обратное (т.е. $i>90^\circ$), то обратным спутником;

h_a — высота апогея;

h_p — высота перигея;

T — период обращения ИС вокруг Земли;

a — большая полуось орбиты;

e — эксцентриситет орбиты ($e=0$ — круговая орбита);

Ω — угловое расстояние восходящего узла (по экваториальной плоскости) от точки весеннего равноденствия (Υ).

Эти элементы вычисляются на основе долгих наблюдений ИС, затем когда они будут известны, то на их основе для любого момента легко можно будет находить местоположение (координаты) спутника на небе.



1. Перечислите орбитальные элементы искусственных спутников.
2. Для чего на основе долгих наблюдений вычисляют орбитальные элементы отдельных искусственных спутников Земли?

§ 8. Орбитальная эволюция ИС в атмосфере Земли

При движении ИС в атмосфере Земли на него действует множество сил. Среди них одной из важных считается сила сопротивления земной атмосферы. Сила сопротивления земной атмосферы, действующая на ИС, вычисляется по формуле:

$$F_{\text{сопр.}} = cS \frac{\rho v_{\text{отн.}}^2}{2}.$$

Здесь коэффициент c — безразмерная величина и для верхних слоев Земли его значение колеблется от 2,0 до 2,5, S — поперечная площадь ИС Земли относительно направления его движения, $v_{\text{отн.}}$ — скорость спутника относительно внешней среды — атмосферы.

Возмущающее ускорение силы сопротивления на высоте 200 км от поверхности Земли составляет $2,2 \cdot 10^{-4}$ м/с², на высоте 400 км — $3,1 \cdot 10^{-6}$ м/с². При движении ИС на высоте 100 км возмущающее ускорение силы сопротивления резко возрастает и составляет уже 0,3 м/с².

Из-за быстрого роста давления атмосферы с понижением высоты ИС на высоте менее чем 100 км не сможет завершить очередной виток и упадет на Землю. Поэтому такая орбита, период обращения которой составляет 86,5—86,7 минут, является *катастрофической*.

Искусственный спутник, движущийся по эллиптической орбите с довольно низким перигеем, при прохождении перигея (Π) из-за заметной плотности атмосферы значительно теряет скорость, что каждый раз заставляет его понижать высоту апогея (A) орбиты (рис. 45). В результате спутник, обращающийся на относительно низкой орбите, в течение нескольких суток завершает свое существование и падает на Землю.

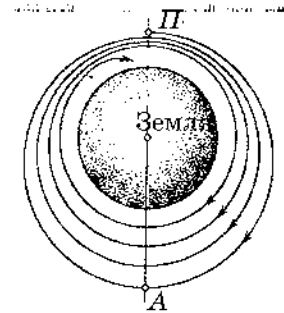


Рис. 45. Эволюция орбиты ИС в атмосфере Земли.



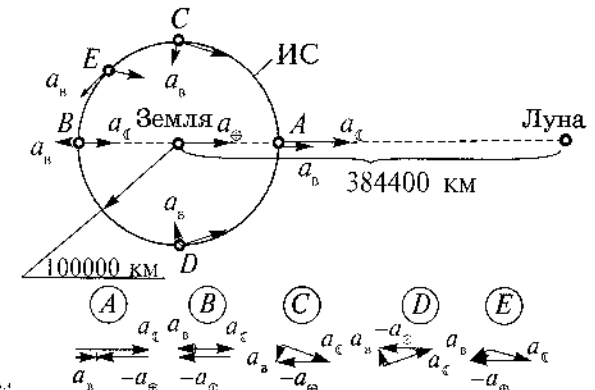
1. От каких параметров зависит сила сопротивления атмосферы КА при его движении вокруг Земли?
2. Какие параметры орбиты спутника претерпевают заметные изменения в результате такого понижения?

§ 9. Влияние Луны и Солнца на движение искусственного спутника

На искусственный спутник Земли заметное влияние оказывают сила притяжения Луны и Солнца. В результате довольно большое изменение претерпевает траектория ИС. При этом

Рис. 46. Влияние Луны и Солнца на движение ИС Земли.

В нижней части схемы приведены возмущающие ускорения, соответствующие точкам орбиты КА и состоящие из суммы ускорений, сообщаемых Луной ИС и Земле (последнее взято с отрицательным знаком).



из-за близости Луны ее влияние на траекторию ИС значительно больше, чем влияние Солнца. Рассмотрим возмущение орбиты спутника в результате возмущающего ускорения Луны.

На рисунке 46 показаны величины и направления возмущающего ускорения Луны в точках *A, B, C, D* орбиты. Отсюда видно, что в конечном итоге из-за влияния Луны орбита ИС как бы «деформируется» (удлиняется) вдоль линии соединения Земля — Луна.

Достигая максимальной величины, возмущающее ускорение Луны — $18 \cdot 10^6$ м/с² в точке *A* составляет 0,052 % гравитационного ускорения Земли, сообщаемого Землей ИС в этой точке, а в точке *B* оно чуть меньше и направлено от Луны.

Возмущающие ускорения от Солнца в точках *A* и *B* будут максимальны ($8,3 \cdot 10^6$ м/с², или 0,024 % от местного земного гравитационного ускорения), а в точках *C* и *D* их можно считать равными нулю.

При этом чем ближе спутник к Земле, тем меньше по величине возмущения со стороны Луны и Солнца (из-за малой разницы их расстояния). До высоты 20000 км лунные и солнечные возмущения меньше возмущений аномальных (из-за несферичности и неоднородности Земли и т. д.) сил тяжести, которые обычно учитываются при точных расчетах, а выше 50000 км превосходят их.

Наиболее сильные возмущения со стороны Луны и Солнца ИС испытывает на апогее орбиты, где возмущающее ускорение, во-первых, больше, чем в перигее, вследствие удаленности его от Земли, во-вторых, по той же причине возмущающее ускорение имеет большее значение, чем ускорение земного притяжения, в-третьих, Луна и Солнце воздействуют на сравнительно малую орбитальную скорость спутника. При этом эффект в апогее будет значительным в том случае, если возмущающее ускорение окажется направленным не поперек апогейной скорости, а вдоль или против нее. В первом случае Луна заставляет спутника постепенно повышать высоту сначала в апогее, затем — в перигее, а во втором случае, наоборот, понижать ее.

1. Влияет ли сила притяжения Луны и Солнца на орбиту ИС, обращающегося вокруг Земли? Если влияет, то как она отразится на орбите ИС?
2. В какой точке эллиптической орбиты спутника величина возмущающего ускорения достигает максимума?

§ 10. Движение ИС относительно земной поверхности

Линия соединения геометрических точек проекций ИС над поверхностью Земли при обращении его вокруг Земли называется *трассой спутника*. А *проекцией спутника на поверхность Земли* называется точка, в которой радиальная прямая (линия, соединяющая спутник с центром Земли) пересекает ее поверхность.

Трасса спутника — это соединение таких точек на Земле, через которые ИС в сутки один раз (в определенное время) проходит зенит небесной сферы. Из-за вращения Земли вокруг оси угол пересечения плоскости трассы спутника с земным экватором отличается от угла наклона орбиты спутника к земному экватору. На рисунке 47 *a* и *b* показаны трассы спутников, обращающихся вокруг Земли с периодами 20 и 30 часов (угол наклона орбит этих спутников к экватору составляет $\approx 65^\circ$). А на рисунке 47 *в* показаны трассы суточных спутников (т. е. обращающихся вокруг Земли с периодом = 23 ч 56 мин и 4 сек), орбиты которых наклонены к земному квадрату под углом 60, 40, 20, 0 соответственно. Они похожи на «8», т. е. не опоясывают земной шар, и в за-

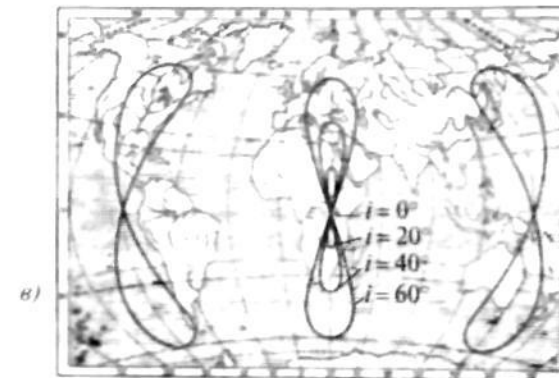
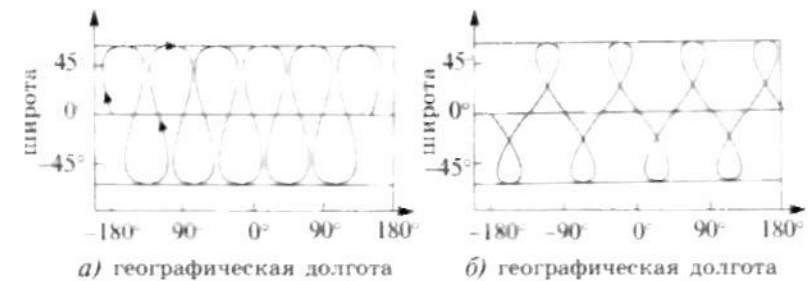


Рис. 47. Трассы спутников с различными периодами их обращения вокруг Земли:

- а) с периодом 20 часов;
- б) с периодом 30 часов;
- в) с периодом 24 часа.

висимости от наклона их орбит к экватору имеют разную высоту на поверхности земного шара. Очевидно, что чем меньше угол наклона, тем меньше высота «восьмерки», т.е. она доходит до небольшой географической широты.

Если у суточного спутника с периодом 23 ч 56 мин 04 сек. угол наклона равняется нулю ($i=0$), т.е. спутник экваториальный, то такие суточные спутники имеют точечную трассу. Другими словами, для наблюдателя, находящегося на этой точке земного экватора, ИС всегда будет находиться над его головой в зените. Такие искусственные спутники называются *стационарными*. Высота таких спутников над земной поверхностью составляет 35786 км. Они служат для передачи телевизионных программ, для обеспечения радиотелефонной связи между наземными пунктами в мировом масштабе.

1. Как называются линии соединения проекций ИС на земной поверхности?
2. Покажите на чертеже изменение трассы ИС в зависимости от его периода обращения вокруг Земли.
3. Какие трассы имеют ИС, обращающиеся вокруг Земли с одинаковым ее периодом вращения вокруг своей оси?
4. Как выглядят трассы ИС, вращающиеся вокруг Земли в течение суток, в плоскости ее экватора? Как называются такие спутники Земли?

§ 11. Орбитальные маневры

1. Изменение высоты орбиты искусственного спутника Земли. Всякое целенаправленное изменение орбиты спутника называется *орбитальным маневрированием*. Если намеченная орбита спутника – круговая и находится на большой высоте над поверхностью Земли или эллиптическая с высоким или низким перигеем, но с апогеем, расположенным в определенной точке пространства, то необходим предварительный вывод спутника на низкую промежуточную орбиту. При этом требуются дополнительные импульсы, сообщаемые верхней ступенью ракеты или бортовым двигателем спутника. Такие изменения орбиты широко применяются в практике.

Орбитальные маневры, осуществляемые обычно кратковременным включением двигателя, называются *одноимпульсными*, а маневры, проводимые путем многократного включения двигателя, *многоимпульсными*. Орбитальные маневры могут быть также осуществлены в процессе бесперебойной работы двигателей, обладающих малой силой тяги.

Предположим, что, имея космодром в точке A , мы хотим вывести спутник на эллиптическую орбиту с апогеем, расположенным над космодромом в точке D , а затем на нацеленную орбиту 3 (рис. 48 а). Для этого, разогнав сначала спутник до круговой скорости в точке B , выводим его на низкую промежуточную орбиту 1, затем, включив двигатель ступени ракеты в точке C , с помощью приращения скорости Δv_1 выводим его на эллиптическую орбиту 2 с апогеем в точке D . Сообщив в апогее эллиптической орбиты (D) спутнику дополнительную скорость Δv_2 , можем перевести его на цельную круговую орбиту 3. Если в точке D очередное сообщаемое спутнику приращение скорости больше, чем местная круговая, то он переходит на новую эллиптическую орбиту 4.

Мы познакомились с примерами многоимпульсных маневров ИС в околоземном пространстве. Пути достижения цели с помощью многоимпульсных маневров бывают разные. В качестве примера рассмотрим два способа запуска на высокую круговую орбиту – первый трехимпульсный, а второй – двухимпульсный, показывающие, как можно добиться уменьшения расхода топлива при запуске ИС.

Первоначально ракетоноситель выводит спутник в точке A с начальной скоростью v_0 на сильно вытянутую эллиптическую орбиту 1 (рис. 48 б). А затем при достижении его апогея в точке B эллиптической орбиты спутнику сообщаем дополнительный горизонтальный импульс скорости Δv_1 , который переводит его на новую эллиптическую орбиту 2 с перигеем в точке C на высоте, равной радиусу круговой орбиты. И, наконец,

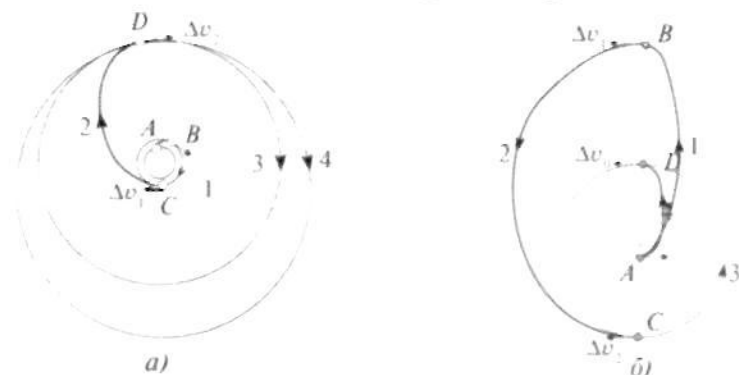


Рис 48. а) Орбитальные маневры для достижения орбиты-цели; б) вывод ИС на нацеленную орбиту с помощью двухимпульсной или трехимпульсной скорости для выявления их экономичности.

при достижении спутником перигея орбиты в точке C ему сообщаем тормозной импульс скорости Δv_2 , который заставляет спутника двигаться по нацеленной круговой орбите 3 .

Во втором случае на орбиту 3 спутник можно будет вывести другим, более простым способом. Для этого сначала ракетоноситель выводит спутник в точку A на эллиптическую орбиту 4 с апогеем в точке D и, сообщив ему в этой точке дополнительный импульс скорости Dv_0 , доводим скорость спутника до местной круговой. В результате спутник будет двигаться вдоль нацеленной орбиты 3 .

В результате мы выяснили, что сумма импульсов скоростей в точках A, B, C в первом случае (трехимпульсный маневр) меньше, чем сумма импульсов скоростей в точках A и D во втором случае (двухимпульсный маневр). Расчеты в дальнейшем показали, что если радиус круговой орбиты 3 превышает высоту, равную $11,9$ радиуса Земли, то описанный трехимпульсный маневр энергетически выгоднее, чем двухимпульсный.

Для того чтобы оценить изменение высоты спутника в апогее в зависимости от приращения скорости в перигее, приведем пример. Предположим, что спутник вращается вокруг Земли над ее поверхностью приблизительно на высоте 200 км со скоростью $7,789$ км/с по круговой орбите. На определенной точке орбиты, увеличив его на скорость 10 м/с, переведем спутник на новую эллиптическую траекторию. Рассмотрим, как изменилась высота спутника в результате маневра в апогее новой орбиты. Зная гравитационный параметр и радиус Земли ($K_{\oplus} = 3,986 \cdot 10^5$ км³/с²; $R_{\oplus} = 6370$ км), находим с помощью формулы интеграла энергии скорость достижения спутника в перигее:

$$v_p = \sqrt{K_{\oplus} \left(\frac{2}{R_{\oplus} + h_n} - \frac{1}{a} \right)},$$

отсюда
$$\frac{v_p^2}{K_{\oplus}} = \frac{2}{R_{\oplus} + h_n} - \frac{1}{a}, \text{ или } \frac{1}{a} = \frac{2}{R_{\oplus} + h_n} - \frac{v_p^2}{K_{\oplus}}.$$

Тогда величина большой полуоси новой эллиптической орбиты составит

$$a = \frac{K_{\oplus}(R_{\oplus} + h)}{2K_{\oplus} - v_p^2(R_{\oplus} + h)} = 6587 \text{ км},$$

а высота апогея будет равна $h_a = 2a - 2R_{\oplus} - h_n = 234$ км (где h_n — высота перигея; $h = 200$ км). Значит, за счет дополнительного

приращения скорости в перигее 10 м/с высота спутника в апогее по сравнению с радиусом круговой орбиты увеличилась на 34 км. Таким образом, увеличение скорости спутника на определенной точке круговой орбиты на 1 м/с может увеличить с противоположной стороны орбиты (т. е. в апогее) высоту спутника на $3,4$ км.

2. Изменение плоскости орбиты ИС. Во время космических полетов часто приходится изменять плоскости орбиты ИС. Допустим, необходимо повернуть плоскость на угол Δi в некоторый момент времени вокруг линии, соединяющей спутник с центром Земли (рис. 49 а, б).

Для этого выберем более простой случай — повернем плоскость орбиты спутника на угол Δi вокруг линии, лежащей в плоскости земного экватора, не меняя при этом высоту спутника в перигее и апогее и его период, т. е. не меняя величину скорости движения в точке маневра. Если при этом в точке маневра скорость спутника по орбите составляет \vec{v}_0 , то после сообщения ему дополнительной скорости $\vec{\Delta v}_0$ для поворота орбиты на величину Δi сумма этих скоростей будет $\vec{v}_{н.о.}$ (см. рис. 49 а, б):

$$\vec{\Delta v}_{н.о.} = \vec{\Delta v}_0 + \vec{\Delta v}$$

где $|v_0| = |v_{н.о.}|$

Из равнобедренного треугольника скоростей легко можно найти величину дополнительного импульса скорости Δv :

$$\frac{\Delta v}{2} = \sin \frac{\Delta i}{2},$$

отсюда его величина составляет

$$\Delta v = 2v_0 \sin \frac{\Delta i}{2}.$$

Для примера находим величину дополнительного импульса скорости при превращении экваториальной круговой орбиты в полярную или наоборот, $\Delta i = 90^\circ$.

Тогда из найденной выше формулы получим:

$$\Delta v = 2v_0 \sin \frac{90}{2} = \sqrt{2}v_0,$$

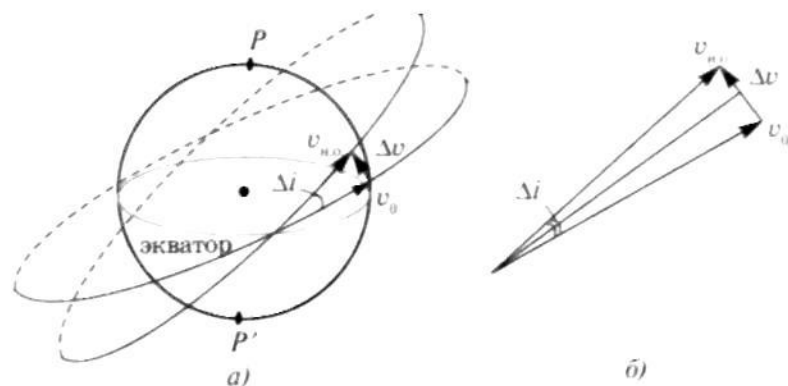


Рис. 49. Изменение плоскости орбиты ИС: а) изменение орбиты на угол Δi ; б) треугольник скоростей при изменении орбиты на угол Δi (v_0 — направление скорости ИС до изменения орбиты, $\Delta v_{n.o}$ — скорость после изменения, Δv — добавочный импульс скорости, необходимый для изменения орбиты).

т. е. дополнительный импульс скорости при этом будет равен величине второй космической скорости. Отсюда становится ясно, что процесс изменения плоскости орбиты спутника происходит с большой затратой энергии.

Следует, однако, отметить, что при необходимости поворота орбиты спутника больше чем на $48^\circ 54'$ существует способ изменения орбиты, который обходится намного дешевле (т. е. энергетически выгоднее) и который иногда называют поворотом в бесконечности. Для этого сначала с помощью дополнительного импульса скорости Δv спутник выводится почти на параболическую орбиту и в бесконечности, где скорость стремится к нулю ($v_\infty=0$), осуществляется маневр поворота, при этом величина дополнительной скорости также стремится к нулю ($\Delta v_\infty=0$), что видно из формулы. Затем, когда спутник находится недалеко от Земли (т. е. возвращается по нацеленной орбите), в перигее орбиты ему сообщается тормозной импульс скорости Δv_0 по величине, равной Δv_0 , и тем самым добивается движение спутника по нацеленной орбите.

Такой способ поворота особенно выгоден, если помимо изменения орбиты необходимо одновременно увеличить и высоту спутника над поверхностью Земли



1. Что такое орбитальные маневры?
2. Какой импульс скорости потребуется при изменении орбиты ИС?

§ 12. Траектория полета на Луну

Полет КА на Луну осуществляется многоимпульсными маневрами. Наиболее простым является полет КА с промежуточной орбиты, лежащей в плоскости орбиты Луны. Поэтому прежде всего в полетах к Луне с помощью многоимпульсных маневров КА выводится на круговую промежуточную орбиту Земли. Для простоты будем считать, что расстояние до Луны не меняется и оно равно среднему радиусу ее орбиты — 384400 км. Хотя на самом деле Луна в апогее удаляется от Земли и в перигее приближается к ней на 21000 км.

При осуществлении полетов радиус промежуточной орбиты берут в среднем 200 км (рис. 50). Переход с низкой круговой орбиты на более высокую осуществляется по так называемой гомоновской траектории, являющейся более экономичной. В нашем случае более низкой является промежуточная орбита, а более высокой — лунная круговая орбита. Такая переходная траектория, являясь полуэллиптической, в перигее касается низкой промежуточной круговой орбиты, а в апогее — верхней круговой лунной и называется гомоновской по имени немецкого ученого А. Гомона, впервые предложившего такую траекторию для межпланетных перелетов.

Ознакомимся с расчетами гомоновской траектории достижения Луны. Для этого сначала вычислим скорость КА, движущегося по круговой промежуточной орбите высотой 200 км над поверхностью Земли ($K_\oplus = 4 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$) и радиусом $r = 6570$ км (где радиус Земли — 6370 км, а высота 200 км). Она равняется

$$v_1 = \sqrt{\frac{K_\oplus}{R_\oplus + h}} = 7,789 \text{ км/с.}$$

Известно, что орбитальная скорость Луны составляет 1,108 км/с.

Поскольку гомоновская переходная траектория является полуэллиптической, ее большая полуось

$$a = \frac{r_{\text{лун}} + R_\oplus + h}{2} = 195485 \text{ км.}$$

А скорость КА в апогее переходной траектории

$$v_2 = \sqrt{K_\oplus \left(\frac{2}{r_{\text{лун}}} - \frac{1}{a} \right)} = 0,187 \text{ км/с.}$$

Поскольку апогей переходной орбиты касается лунной орбиты, то там скорость КА относительно Луны (т. е. скорость его падения на Луну) составляет

$$\Delta v = v_c - v_s = (1,018 - 0,187) \text{ км/с} = 0,831 \text{ км/с}.$$

Теперь, если вычислим промежуток времени достижения Луны, то он будет равен половине периода обращения КА по эллипсу, т. е. прохождению переходной траектории. А период обращения КА по эллипсу вычисляется по третьему закону Кеплера

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K}} a^{\frac{3}{2}}.$$

По известным значениям K , a и π :

$$T = \frac{a\sqrt{a}}{6028,92} \text{ мин} = 9 \text{ суткам } 22 \text{ часам } 56 \text{ минутам (т. е. } 9^{\text{д}} 22^{\text{ч}} 56^{\text{м}}).$$

Тогда промежуток времени полета КА t по переходной траектории

$$t = \frac{T}{2} = 4^{\text{д}} 23^{\text{ч}} 28^{\text{м}}.$$

Высота апогея полуэллиптической орбиты зависит от величины приращения скорости в точке перигея КА (переходной орбиты). Ошибка дополнительного импульса скорости в перигее на ± 2 м/с приводит к изменению высоты апогея переходной орбиты на ± 8000 км. Если сравнить его с диаметром Луны, то становится ясно, что допущение незначительной ошибки скорости в перигее может привести к непредсказуемым последствиям. Кроме того, поскольку истинная высота Луны меняется в пределах ± 2100 км, то для достижения Луны КА в таких случаях необходимо менять величину его дополнительной скорости в перигее переходной орбиты в пределах всего лишь ± 5 м/с.

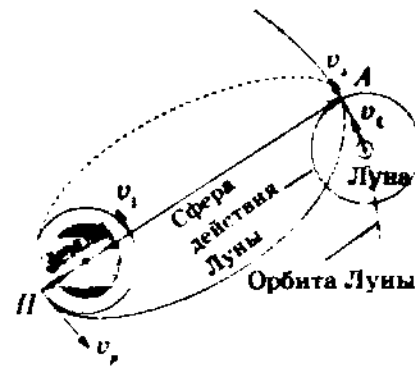


Рис. 50. Траектория полета на Луну.

5)

1. Какой вид для достижения Луны должна иметь наиболее экономичная геоцентрическая траектория?
2. Как определяется скорость в перигее и апогее такой орбиты?
3. Какова должна быть скорость КА в перигее для достижения Луны по гомоновской траектории?
4. Какова продолжительность полета по полуэллиптической траектории?

§ 13. Посадка на лунную поверхность

Движение КА недалеко от Луны можно анализировать на основе его первой и второй космической скорости относительно Луны. Если учитывать гравитационный параметр и радиус Луны ($K_L = 4,9 \cdot 10^3 \text{ км}^2/\text{с}^2$, $R = 1738 \text{ км}$), то величины ее первой и второй космической скорости выглядят так:

$$v_1 = \sqrt{\frac{K_L}{R}}, \quad v_1 = 1,680 \text{ км/с};$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2K_L}{R}}, \quad v_2 = 2,375 \text{ км/с}.$$

Если некоторое тело выбрасывается с поверхности Луны со второй космической скоростью (2,375 км/с), то у границы сферы действия Луны ($r_{c.д.} = 66000 \text{ км}$) величина его скорости на основе интеграла энергии составляет 0,385 км/с. Она и будет параболической относительно Луны в этой точке, так как

$$v_{\text{пар}} = \sqrt{\frac{2K}{r_{c.д.}}} = 0,385 \text{ км/с}.$$

Если тело, входя в сферу действия Луны с такой скоростью (0,385 км/с), будет падать на ее поверхность, то при падении из-за увеличения скорости за счет притяжения Луны оно будет ударяться о ее поверхность со второй космической скоростью (2,375 км/с).

Теперь нетрудно понять, что геоцентрическая скорость космического аппарата, движущегося по гомоновской траектории у апогея орбиты, т. е. в момент входа в сферу действия Луны, составляла 0,187 км/с (см. §12), а скорость относительно Луны в этом случае составляет 0,831 км/с. Тогда становится ясно, что у входившего в сферу действия Луны со скоростью 0,831 км/с аппарата при падении на Луну скорость будет значительно больше, чем вторая космическая (т. е. чем 2,375 км/с). Поэтому для



Рис. 51. Астронавт с «Аполлона» во время сбора образцов лунных пород.

мягкой посадки КА на Луну необходимо с помощью тормозного импульса постепенно гасить его скорость на спущившейся почти вертикально автоматической станции «Луна-9». С ее помощью в 1966 г. была впервые осуществлена мягкая посадка на Луну. При спуске был включен тормозной импульс с помощью ракетного двигателя на высоте 24 км. Когда до поверхности Луны осталось 150 м, он отключился. Дальнейшее

торможение станции «Луна-9» осуществлялось с помощью бортового двигателя мягкой посадки. Автоматические станции типа «Луна» осуществляли вначале мягкую посадку в основном таким образом. А автоматические станции, запущенные после «Луны-13», сначала выводились на окололунную орбиту, а затем с помощью тормозного импульса осуществляли мягкую посадку. Автоматические станции «Луна-16, -20, -24» с образцами лунного грунта и «Аполлоны» (США) с экипажами при возвращении с Луны имели стартовую скорость 2,7 км/с (рис. 51).

1. Чему равна первая космическая скорость Луны?
2. Какова вторая космическая скорость Луны?
3. С какой геоцентрической скоростью КА входит в сферу действия Луны по полуэллиптической траектории полета?
4. Какова будет при этом скорость КА относительно Луны?
5. Как происходит мягкая посадка КА на Луну?
6. Какие космические аппараты с экипажем осуществляли мягкую посадку на Луну?

§ 14. Траектории полета к планетам

Существует бесчисленное количество траекторий, по которым может быть совершен перелет с Земли на какую-либо планету Солнечной системы. Эти траектории различны по форме, продолжительности перелета, энергетическим затратам, требованиям к точности системы управления и т. п.

Рассмотрим общие закономерности движения космических аппаратов, предназначенных для автоматического исследования планет и выводимых на траекторию полета с помощью ра-

кет большой тяги. Чтобы упростить задачу полета, допускаем, что орбиты планет круговые и их плоскости совпадают с плоскостью эклиптики (т. е. с орбитой Земли) и перелеты осуществляются только по гомоновской траектории (рис. 52). При таких упрощениях ошибки незначительны, так как углы наклона орбит планет (кроме Меркурия и Плутона) к эклиптике небольшие и не сильно отличаются от круговой орбиты.

При изучении траекторий полета к планетам всю траекторию полета разбивают на три части: 1) движение КА внутри сферы действия Земли от границы сферы действия Земли до границы сферы действия планеты-цели, т. е. во всех участках движения КА задача сводится к решению задачи двух тел.

Для осуществления расчета по гомоновской траектории (т. е. полуэллиптической траектории) надо учитывать, что гелиоцентрическая скорость перигелия КА составляет сумму его скоростей: скорость, которую он приобретает у сферы действия Земли, и сообщаемый ему дополнительный импульс скорости за счет включения ракеты. Скорость КА у афелия полуэллиптической переходной траектории та же, что и гелиоцентрическая скорость достижения КА границы сферы действия планеты-цели. Для расчета скоростей КА в перигелии (V_p) и афелии (V_a) применяются следующие выражения интеграла энергии:

$$V_p = \sqrt{K_{\odot} \left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a} \right)} \quad \text{и} \quad V_a = \sqrt{K_{\odot} \left(\frac{2}{r_a} - \frac{1}{a} \right)}.$$

Если считать, что расстояние выражено в астрономических единицах, то

$$V_p = 29,785 \sqrt{\left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a} \right)} \quad \text{и} \quad V_a = 29,785 \sqrt{\left(\frac{2}{r_a} - \frac{1}{a} \right)},$$

где K_{\odot} — гравитационный параметр Солнца, $K_{\odot} = GM_{\odot} = -1,327 \cdot 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$, или $K_{\odot} = 887,153 \text{ км}^2 \cdot \text{а.е.} / \text{с}^2$ (если

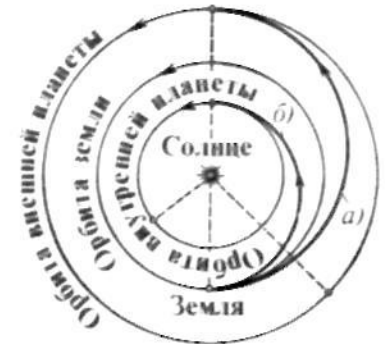


Рис. 52. Гомоновская траектория полета к внутренней и внешней планетам:

a — траектория полета к внешней планете;

б — траектория полета к внутренней планете.

расстояние в а. е.), r_p — расстояние точки перигелия от Солнца, r_a — расстояние афелия, a — большая полуось орбиты, которая вычисляется:

$$a = \frac{r_p + r_a}{2}.$$

Здесь $r_p = 150$ млн км, или 1 а. е., r_a — среднее расстояние планеты-цели от Солнца в км или а. е. А продолжительность полета по гомоновской траектории в сутках осуществляется по формуле (она легко выводится из третьего закона Кеплера):

$$t_{\text{гом}} = 64,57 \cdot \sqrt{(1 + r_{\text{ц.п.}})^3},$$

где $r_{\text{ц.п.}}$ — радиус планеты-цели в а. е.

Для примера производим расчет перелетной траектории КА по гомоновской орбите при полете на Юпитер (см. рис. 52). При этом для простоты допускаем, что ни Земля, ни Юпитер не действуют силой притяжения на КА. Тогда с учетом средних расстояний Земли и Юпитера от Солнца ($r_p = 1$ а. е., $r_a = 5,2$ а. е.) находим большую полуось переходной полуэллиптической орбиты:

$$a = \frac{r_p + r_{\text{Ю}}}{2} = \frac{1,0 + 5,2}{2} = 3,1 \text{ а. е.}$$

Тогда требуемая скорость КА у перигелия составляет:

$$V_p = 29,785 \sqrt{\left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a}\right)} = 29,785 \cdot 1,295 \text{ км/с} = 38,575 \text{ км/с.}$$

Поскольку орбитальная скорость Земли $V_{\oplus} = 29,785$ км/с, то требуемое для полета на Юпитер приращение скорости должно быть равно разности этих скоростей, т. е.

$$\Delta v_1 = V_p - V_{\oplus} = (38,575 - 29,785) \text{ км/с} = 8,790 \text{ км/с.}$$

А на самом деле для полета на Юпитер по полуэллиптической траектории с учетом притяжения Земли КА должен стартовать с ее поверхности со скоростью 14,23 км/с.

В афелии гомоновской орбиты (т. е. в точке касания КА орбиты Юпитера) скорость КА равняется

$$V_a = 29,785 \sqrt{\frac{2}{r_{\text{Ю}}} - \frac{1}{a}} = 29,785 \cdot \frac{1}{3,9} \text{ км/с} = 7,6 \text{ км/с,}$$

где $r_{\text{Ю}}$ — средний радиус Юпитера. Тогда скорость КА у сферы действия планеты относительно Юпитера есть разность скоростей Юпитера и КА в афелии, т. е.

$$\Delta v = (13,06 - 7,60) \text{ км/с} = 5,46 \text{ км/с.}$$

Продолжительность полета КА на Юпитер по гомоновской орбите при этом вычисляется по формуле

$$t = 64,567 \cdot \sqrt{(1 + 5,2)^3} \text{ сут} = 997,5 \text{ сут.}$$

В следующем параграфе для тех, кто интересуется, будет рассмотрен расчет гомоновской траектории при осуществлении полета на Юпитер с учетом притяжения Земли.



1. Как выглядит самая экономичная переходная гомоновская траектория, обеспечивающая полеты к планетам?
2. Найдите большую полуось полуэллиптической (гомоновской) переходной орбиты.
3. Как можно найти величину гелиоцентрической скорости в любой точке гомоновской орбиты по ее большой оси (a)?
4. Каковы скорости в перигелии и афелии при полете по гомоновской траектории КА с Юпитера на Землю (с учетом сил притяжения Земли и Юпитера)?
5. Сравните скорости из предыдущей задачи с гелиоцентрическими средними орбитальными скоростями Земли и Юпитера.

§ 15. Учет силы притяжения Земли и планеты-цели при полетах¹

Как мы уже убедились, гомоновская переходная траектория при полетах к планетам является самой экономичной и эффективной. При полетах к планетам в расчетах переходной гомоновской траектории необходимо учитывать силы притяжения Земли и планеты-цели, т. е. истинный характер движения КА внутри сферы действия Земли и планеты-цели.

С этой целью рассмотрим в качестве примера полет к Юпитеру. В этом случае для вывода КА на гомоновскую переходную траекторию необходимо разогнать его так, чтобы, покидая сферу действия Земли (т. е. точку входа в переходную траекторию), КА имел дополнительный (относительно Земли) импульс скорости, равный 8,790 км/с (см. предыдущий параграф). Понятно, что КА навсегда должен оставить Землю и для этого он должен достичь большую скорость, чем вторая космическая (11,187 км/с).

¹ Материал для углубленного изучения.

Таблица 2

№ п/п	Планеты	Дополнительная скорость, $v_{\text{доп}}$, км/с	Минимальная теоретическая скорость при старте, $v_{\text{мин}}$, км/с
1	Меркурий	-7,53	13,49
2	Венера	- 2,49	11,46
3	Марс	2,94	11,57
4	Юпитер	8,79	14,22
5	Сатурн	10,29	15,19
6	Уран	11,27	15,88
7	Нептун	11,64	16,14

На первый взгляд кажется, что если после выхода КА с такой скоростью из сферы действия Земли включением двигателя ступени ракеты можно сообщить ему дополнительную скорость (8,790 км/с) и вывести его на гомоновскую переходную траекторию, но такой способ не является оптимальным. (Хотя выводить КА на переходную орбиту с помощью такой двухимпульсной характеристической скоростью возможно.) В принципе, можно выводить КА на такую энергетически выгодную траекторию с намного меньшей характеристической скоростью. Этого можно добиться, если достигнем как можно большей скорости КА недалеко от земной поверхности. В действительности, исходя из известной нам формулы (§5, формула 11), т. е. существования зависимости между стартовой скоростью (v_0) от освобождаемой $v_{\text{осв}}$ (второй космической скорости) и гиперболического избытка скорости ($v_{\text{гип}}$) в бесконечности легко находим начальную стартовую скорость с Земли КА:

$$v_0 = \sqrt{v_{\text{осв}}^2 + v_{\text{гип}}^2}.$$

Тогда, сообщив КА недалеко от поверхности Земли скорость, равную стартовой

$$v_0 = \sqrt{(11,187^2 + 8,790^2) \text{ км/с}} = \sqrt{(125,149 + 77,264) \text{ км/с}} = \\ = \sqrt{202,413} \text{ км/с} = 14,220 \text{ км/с},$$

можно добиться удаления КА от сферы действия Земли со скоростью 8,790 км/с и продолжения в дальнейшем его движения вдоль полуэллиптической переходной траектории.

В действительности данный расчет показывает наименьшее теоретическое значение начальной характеристической скорости полета КА на Юпитер. На самом деле требуемая характеристическая скорость, если учитывать убывание ее из-за атмосферного сопротивления и гравитационного расхода, должна быть на 1,5–2 км/с больше теоретически найденной ее величины.

В таблице приведены необходимые величины дополнительных скоростей (третий столбец) и минимальные величины стартовых скоростей с поверхности Земли (четвертый столбец) при полетах к планетам.

Теперь определим продолжительность полета КА по гомоновской траектории относительно конфигурационного положения планеты-цели (т. е. ее положение относительно Земли и Солнца). Так как гомоновская орбита есть половина эллипса, в фокусе которого находится Солнце, то по третьему закону Кеплера продолжительность полета (t) измеряется половиной периода (T) обращения КА, движущегося по полному эллипсу:

$$t = \frac{T}{2}.$$

По третьему закону Кеплера период T можно найти по выражению

$$\frac{a^3}{T^2} = 1,0 \cdot \frac{(1 \text{ а.е.})^3}{(1 \text{ год})^2},$$

где в правой части выражения проставлены параметры Земли, а в левой части — космического аппарата. Здесь a — большая полуось гомоновской орбиты (в астрономических единицах), T — период обращения (в годах) КА по эллиптической орбите. Тогда время продолжительности полета

$$t = \frac{T}{2} = \frac{\sqrt{a^3}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{r_{\text{Ф}} + r_{\text{п.ц.}}}{2}}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{1 + 5,2}{2}}}{2} = \frac{\sqrt{(3,1)^3}}{2} = \\ = \frac{3,1 \cdot 1,76}{2} = 2,73 \text{ года} = 996,8 \text{ суток}$$

Отсюда видно, что для того, чтобы КА встретился в афелии с Юпитером, движущемся по своей орбите с угловой скоростью $0,0831$ град/сут, надо найти дугу, проходимую им за время t , с тем чтобы определить конфигурационное положение Юпитера на орбите в момент старта КА. Для этого находим величину дуги θ , описываемую Юпитером за время t :

$$\theta = 0,831 \text{ сут} \cdot 996,8 \text{ сут} = 82,8.$$

Следовательно, в момент старта КА с Земли Юпитер должен быть на своей орбите впереди Земли на угол $\gamma = 180 - \theta$

$$\gamma = 180 - 82,8 = 97,2.$$

Теперь, поскольку угловая скорость Земли на орбите ($0,9856$ сут) намного больше, чем у Юпитера, то она опережает Юпитер ежесуточно на

$$\Delta\gamma = 0,9856 - 0,0831 = 0,9025.$$

Отсюда становится ясно, что время старта КА с Земли наступит раньше, чем произойдет противостояние Юпитера, т. е.

$$\Delta t = 97,2 : 0,9025 = 107,7 \text{ сут}.$$

Поскольку известен период определенной конфигурации Юпитера (соединение или положение Юпитера в момент старта КА), т. е. его синодический период, то благоприятный момент запуска КА на планету с Земли наступит именно в этот период.



1. Как определяют стартовую скорость КА при осуществлении его полета на определенную планету?
2. Как вычисляются скорости КА у перигея и афелия при его движении по гомоновской орбите?
3. Как определяется время достижения КА планеты по полуэллиптической траектории?
4. Как находят конфигурационное положение планеты-цели для момента старта КА, если известно время полета?

ТЕЛЕСКОПЫ И ОБСЕРВАТОРИИ



§ 1. Телескопы. Оптические телескопы

Наиболее важный наблюдательный астрономический инструмент — телескоп. Телескоп увеличивает угол зрения, под которым наблюдаются небесные светила, и показывает их в несколько раз более яркими. По этой причине при наблюдении звездного неба в телескоп можно увидеть на поверхности близких к Земле небесных тел (Солнца, планет и Луны) такие детали, которые не видны невооруженным глазом, а также множество слабо светящихся звезд.

Объектив — одна из основных частей телескопа, используемая для сбора лучистой энергии и образования изображения наблюдаемого объекта. Объектив представляет собой линзу или систему линз, зеркало или систему зеркал, обращенную к объекту (рис. 53, 54). Полученное изображение наблюдаемого объекта может рассматриваться через окуляр непосредственно или проецироваться на приемник излучения — фотопластинку или фотопреобразователь.

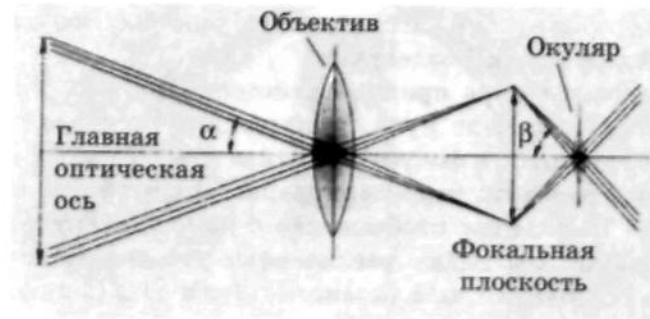


Рис. 53. Оптическая схема линзового телескопа (рефрактора), ход лучей.

Если объектив телескопа состоит из линзы или системы линз, то такой телескоп называется *рефрактором*. Путь лучей света в рефракторе показан на рис. 53.

Телескоп с зеркальным объективом называется *рефлектором*. Путь лучей света от наблюдаемого объекта в рефлекторах различных конструкций показан на рис. 54.

Можно следующим образом охарактеризовать выполняемые с помощью телескопа задачи:

1. Регистрация поступающего изображения непосредственным наблюдением, на фотографической пластинке или фотопреобразователе, спектрографе и т. д.

2. Получение изображений в фокальной плоскости объектива наблюдаемого светила или другого небесного тела.

3. Получение отдельных изображений объектов, которые из-за малых взаимных расстояний не различаются невооруженным глазом как отдельные.

Рассмотрим теперь принцип действия простого рефрактора. В таком телескопе лучи, приходящие от наблюдаемого объекта, собираются в фокусе объектива и дают изображение в фокальной плоскости, перпендикулярной главной оси телескопа. Изучая полученное изображение с помощью окуляра (выпуклой линзы), мы видим увеличенные угловые размеры наблюдаемого небесного тела (планеты, Луны или Солнца). Следовательно, телескоп дает нам более яркое и более увеличенное изображение. Яркость полученного изображения характеризуется отношением диаметра объектива D к его фокусному рас-

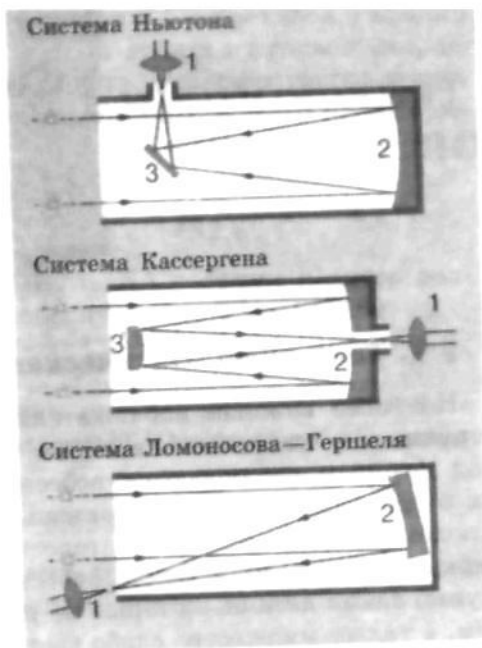


Рис. 54. Схемы зеркальных телескопов (рефлекторов): 1— окуляр; 2— объектив; 3— плоское зеркало; 3'— выпуклое зеркало.

стоянию F . Видимое увеличение телескопа определяется отношением фокусных расстояний объектива и окуляра. Если изображение фиксируется на фотопластинке или фотопреобразователе, то нет необходимости в окуляре, и фотопластинка или диафрагма электрофотометра устанавливается непосредственно в фокальной плоскости телескопа.

Первый рефрактор был сконструирован великим итальянским физиком и астрономом Галилеем в 1610 г. (рис. 55). Первый рефлектор сконструировал в 1648 г. великий английский ученый Исаак Ньютон. Диаметр объектива самого большого рефрактора, установленного в США, равен 1 м. Один из самых больших рефлекторов с диаметром зеркала 6 м установлен на Северном Кавказе (рис. 56). В Узбекистане самый

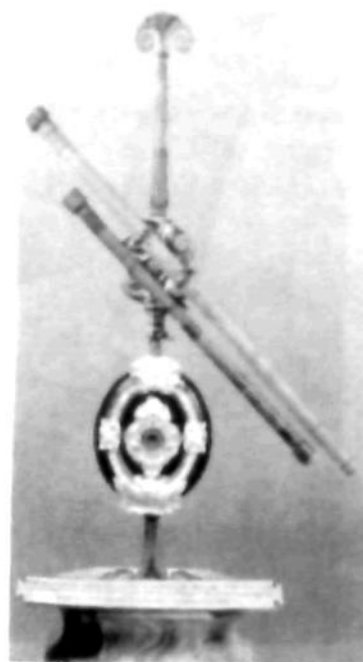


Рис. 55. Первый телескоп-рефрактор, сконструированный Галилеем.



Рис. 56. Башня телескопа-рефлектора с диаметром зеркала 6 м, установленного на Северном Кавказе.

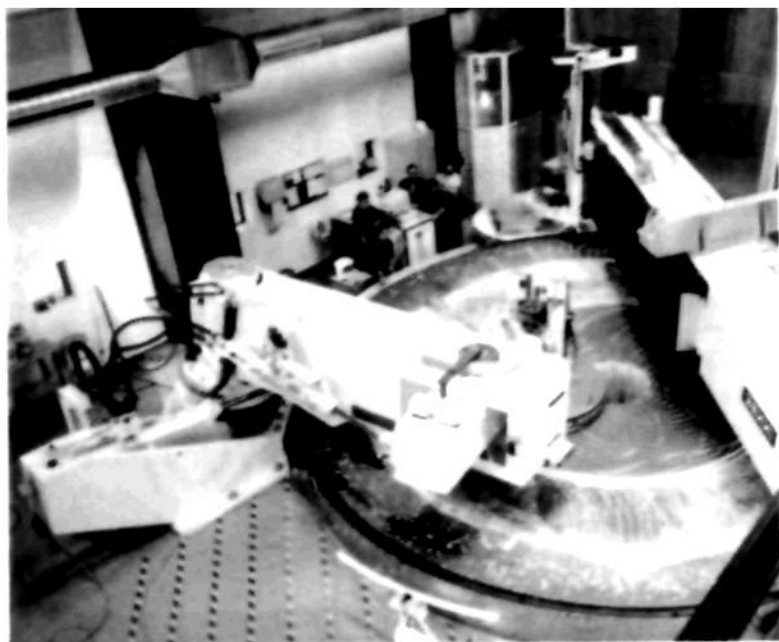


Рис. 57. Процесс шлифовки зеркала телескопа.

большой рефрактор (двойной астрограф) имеется в обсерватории в Китабе, диаметр его объектива 40 см. В Камашинском районе Кашкадарьинской области на высоте примерно 3000 м построена астрономическая обсерватория, рефлектор которой имеет диаметр 1,5 м.

Процесс шлифовки зеркала рефлектора диаметром 8 м изображен на рисунке 57.

1. Каков принцип действия оптического телескопа?
2. Как достигается усиление яркости наблюдаемого небесного тела?
3. Назовите типы оптических телескопов.
4. Начертите ход лучей в рефракторе.
5. Начертите оптическую схему рефлектора. Что вы знаете о других видах телескопов?

§ 2. Радиотелескопы

В 30-х годах XX столетия было установлено, что многие астрономические объекты излучают электромагнитную энер-

гию в радиодиапазоне. Для исследования небесных светил в радиодиапазоне используются различные виды радиотелескопов. Большинство мощных антенн радиотелескопов походят на рефлекторы (рис. 58). Антенны, собирающие радиоволны от небесных тел, изготавливаются из металла и достигают в диаметре десятков метров. Радиоизлучение, собранное в фокусе радиотелескопа специальным устройством — облучателем, передается на вход приемника, а затем с помощью усиления и детектирования регистрируется на специальных самопишущих электроизмерительных устройствах. В настоящее время на Земле одновременно работает целый ряд высокочувствительных радиотелескопов с диаметрами параболических ан-

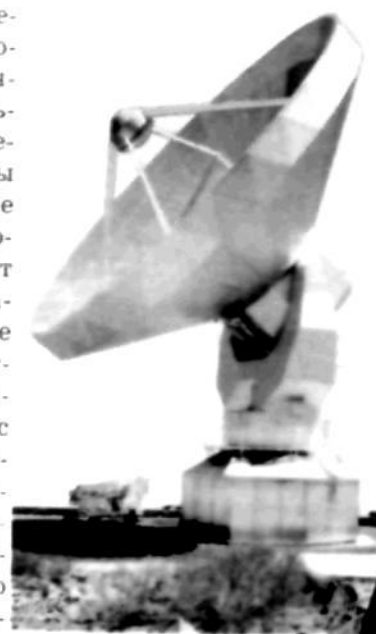


Рис. 58. Радиотелескоп с параболической антенной.

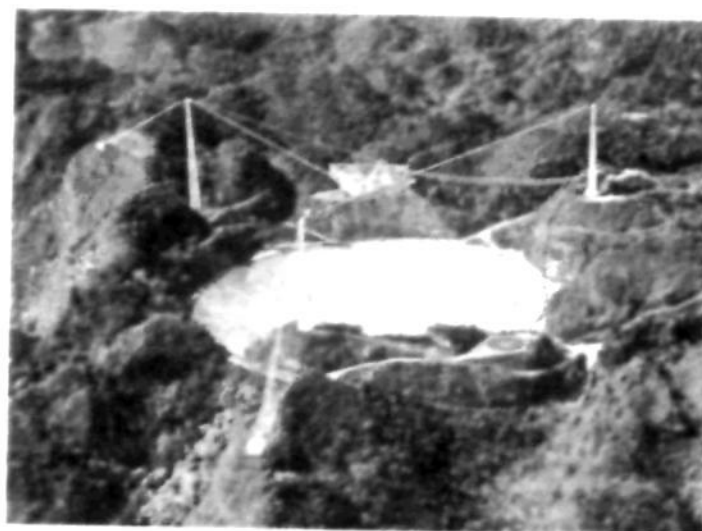


Рис. 59. Самый мощный в мире радиотелескоп (диаметр металлического зеркала — 30,0 м), США.



Рис. 60. У подножия Зааминских гор в местечке Суца в Джизакской области сооружается радиотелескоп с диаметром зеркала 70 м.

тени 65 м (Австралия), 76 м (Великобритания), 300 м (США) и 600 м (Россия). На рисунке 59 изображен самый мощный в мире радиотелескоп, установленный в США на острове Пуэрто-Рико.

В Узбекистане в Зааминском районе Джизакской области у подножия горы Суца сооружается радиотелескоп с диаметром 70 м (рис. 60). Этот инструмент позволит изучать даже небольшие детали объектов космического радиоизлучения.

1. Как работает радиотелескоп?
2. Назовите диапазон шкалы электромагнитного излучения, который изучается с помощью радиотелескопов.
3. Какие крупные радиотелескопы вам известны?

§ 3. Обсерватория Улугбека

В изучение небесных тел внесли вклад и наши соотечественники. Среди них наиболее известен внук Амира Темура Мирзо Улугбек.

В середине XV столетия Улугбек пригласил в Самарканд известных астрономов Кази-заде ар-Руми, Гияс ад-Дина Джамшида аль Каши и при их непосредственном участии построил астрономическую обсерваторию с самым большим инструментом для наблюдений — секстантом. С его помощью были определены и уточнены координаты более чем тысячи звезд, изучались движения Солнца, Луны и планет.

Градусная мера дуги секстанта составила примерно $70'$, а длина дуги секстанта немногим меньше 50 м. Начало дуги лежало на глубине 11 м, а верхняя часть секстанта возвышалась над Землей почти на 30 м. Длина дуги в $1'$ составляла примерно 70,2 см, обеспечивая измерения с точностью до $10''$ дуги. Этот уникальный астрономический инструмент был разрушен в результате войн, и его следы были потеряны. В 1908 году археолог В. Л. Вяткин определил его местонахождение и в результате раскопок была открыта и подземная часть сооружения (рис. 61). Внешний вид обсерватории в Самарканде до сих пор не определен и является предметом дискуссий среди ученых. Обсерватория Улугбека была в средние века крупнейшей на Востоке и прославилась своими точными измерениями и размерами. В обсерватории Улугбека работали, кроме выдающихся астрономов Гияс ад-Дин Джамшид аль Каши, Кази-заде ар-Руми, также и Муийн ад-Дин аль Каши, Али Кушчи.

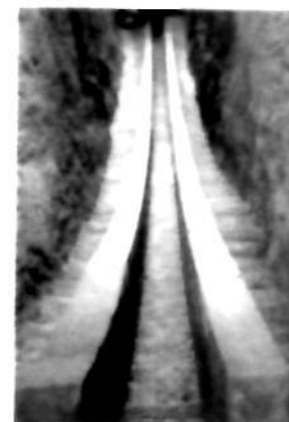


Рис. 61. Подземная часть секстанта — главного инструмента обсерватории Улугбека.

1. Как называется основной астрономический инструмент обсерватории Улугбека?
2. Что вы знаете об измерениях этого инструмента?
3. С какой точностью можно было проводить наблюдение с помощью секстанта?
4. Какие знаменитые ученые работали в обсерватории Улугбека?
5. Что вы знаете о результатах астрономических исследований в обсерватории Улугбека?

§ 4. Астрономия в Узбекистане. Майданакская обсерватория

11 сентября 1873 года в печати появилось сообщение о начале наблюдений в Ташкентской астрономической обсерватории. В то время Ташкентская обсерватория называлась Ташкентской астрономической и физической обсерваторией и относилась к Военно-топографическому отделению Туркестанского военного округа.

По решению АН Узбекистана 1 сентября 1966 года Ташкентская астрономическая обсерватория была преобразована в Институт астрономии АН Республики Узбекистан. При Институте астрономии один за другим начали функционировать несколько мощных астрономических инструментов, была организована «Служба точного времени», лаборатории «Физика Солнца» и «Физика переменных звезд». В 1919 г. прекратила свою работу расположенная в Чарджоу (Туркменистан) Международная широтная станция, и Ташкентская астрономическая обсерватория предложила организовать в городе Китабе Международную широтную станцию. Правительство Узбекистана поддержало это предложение, и в 1928 году в 2 км от г. Китаб на широте $39^{\circ}08'$ началось сооружение Международной широтной станции. Станция в короткое время была оборудована несколькими специальными телескопами, и несколько десятков известных ученых начали работу на этой станции. Фотографию крупнейшего среди ее телескопов вы видите на рисунке 62.

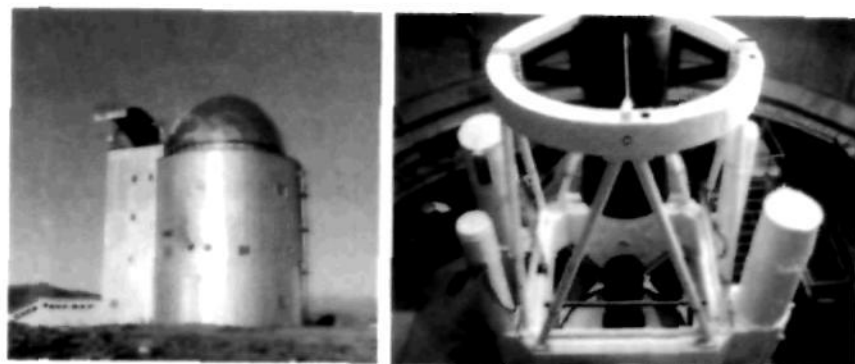
В 60-х годах ученые Ташкентской обсерватории занимались поисками места с хорошим астрономическим климатом (чистое небо, хорошие погодные условия и т. д.). В 100 км от



Рис. 62. 40-сантиметровый двойной астрограф на Международной широтной станции в Китабе.

Китаба на высоте 3000 м над уровнем моря было найдено подходящее место, где спустя некоторое время было начато сооружение крупной астрофизической обсерватории. Сегодня это известная в мире обсерватория, обладающая несколькими мощными телескопами (с диаметрами зеркал 1 м и 1,5 м), и один из крупных центров Института астрономии АН Республики Узбекистан (рис. 63 и 64).

В конце учебника приведены сведения об этих научных центрах. Любители астрономии, познакомившись с ними, смогут связать свое будущее с этими научными учреждениями.



а)

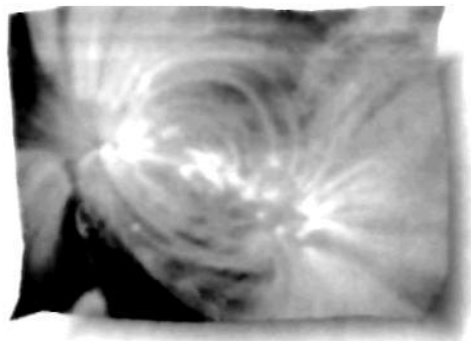
б)

Рис. 63. Башня самого большого телескопа Института астрономии АН РУз на высокогорной Майданакской обсерватории (а) и рефлектор внутри этой башни с диаметром зеркала 1,5 м (б).



Рис. 64. Вид на Майданакскую обсерваторию.

1. Расскажите об Институте астрономии АН Республики Узбекистан и существующих при нем научных лабораториях.
2. На какой широте находится Китабская Международная широтная станция?
3. Как называется высокогорная обсерватория в Камашинском районе и какими телескопами она оборудована?
4. Перечислите крупные научные астрономические центры Узбекистана и назовите, где они расположены.



VI СОЛНЦЕ — БЛИЖАЙШАЯ ЗВЕЗДА

§ 1. Общие сведения о Солнце

Ежедневное видимое движение Солнца так привычно нам, что мы считаем, что так было вечно. Так ли это? Солнце действительно неугасающее небесное тело? Что произойдет с нашей планетой, если Солнце вдруг погаснет?

Если Солнце погаснет, то не пройдет и минуты, как на Земле воцарится тьма. Луна и планеты светят отраженным солнечным светом, и поэтому сразу же не будут видны. Землю будет освещать только слабый свет звезд. Всю поверхность Земли заключит в свои «объятия» космический холод. Не пройдет и недели, как тропики окажутся погребенными под снегом, останутся реки, моря и океаны постепенно замерзнут на всю глубину, прекратятся завывания ветра. Одним словом, все вокруг погрузится в крошечную тьму и суровый холод. И даже если человечеству удастся в течение некоторого времени использовать накопленные запасы топлива, это не спасет его от гибели.

Именно поэтому Солнце во всех отношениях является источником жизни на Земле и заслуживает самого пристального внимания.

Солнце — одна из миллиардов звезд, не выделяющаяся ни величиной, ни температурой. Но наша планета Земля в качестве спутника Солнца находится от него на расстояниях в миллиарды раз более близких, чем от других звезд. Солнце видно нам под довольно большим углом в $32'$. Земля, как и другие планеты, движется вокруг Солнца. Среднее расстояние от Земли до Солнца (149,6 млн км) принимается за астрономическую единицу длины (1 а. е.). Свет преодолевает это расстояние примерно за 8,5 минут. Диаметр Солнца равен 1,4 млн км, что в 110 раз больше диаметра Земли. Иными словами, в объем, занимаемый Солнцем, поместилось бы более 1,3 млн планет с объемом, равным объему Земли. Масса Солнца в 332 тыс. раз больше массы Зем-

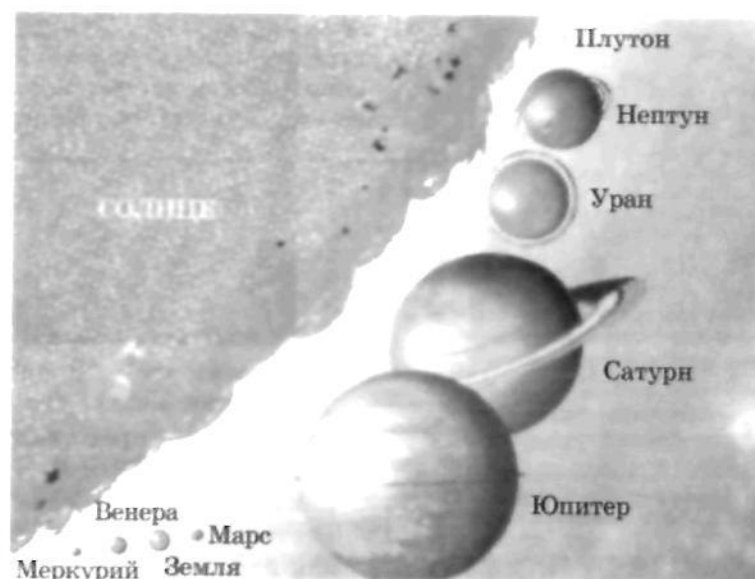


Рис. 65. Размеры планет Солнечной системы в сравнении с размерами Солнца.

ли. На рисунке 65 сравниваются размеры Солнца и планет Солнечной системы. Поверхность Солнца имеет температуру около 5800 C . Эта температура возрастает с приближением к центру Солнца и достигает примерно 16 млн градусов в его ядре. Лучевая энергия Солнца настолько велика, что за 1 секунду излучается $4 \cdot 10^{26}$ Дж, что равносильно энергии, полученной в результате сжигания $12 \cdot 10^{15}$ т угля. Энергия, достигающая поверхности Земли, составляет одну двухмиллиардную часть общей энергии Солнца.

Давление в центре Солнца достигает 200 млрд атмосфер. Средняя плотность вещества Солнца $1,41\text{ г/см}^3$. Солнце является гигантским огненным шаром, но газ, из которого он состоит, находится в состоянии, называемом *плазмой*. Материя, находящаяся в этом состоянии, состоит, в основном, из ионизированных газов и свободных электронов. Такая высокотемпературная плазма имеет непрерывный спектр излучения, но при этом излучение Солнца, проходя через слои его атмосферы, поглощается различными атомами, и на фоне спектра Солнца появляются десятки тысяч темных линий поглощения (рис. 66).

Солнце, подобно другим небесным телам, вращается вокруг своей оси с периодом примерно 25 суток.

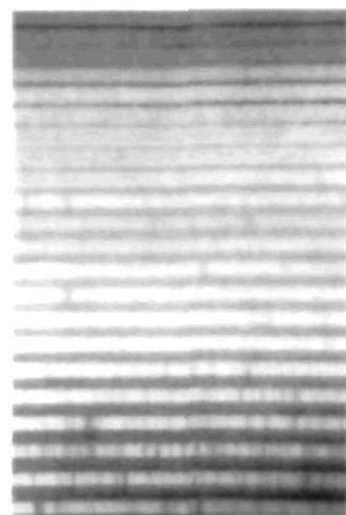


Рис. 66. Спектр Солнца.
Сверху: разбитый на участки; снизу: линии спектра, соответствующие различным химическим элементам.

1. Какими были представления о Солнце в древности?
2. Каким небесным телом является Солнце — звездой или планетой?
3. Приведите основные сведения о Солнце.
4. Сравните размеры Солнца с размерами Земли.
5. Каким является спектр Солнца?
6. В каком состоянии находятся газы, образующие вещество Солнца?

§ 2. Фотосфера Солнца: грануляция и факелы

Основная часть атмосферы Солнца, в которой образуется видимое излучение, называется *фотосферой* (рис. 67). Фотосфера при наблюдении Солнца в телескоп, при условии наибольшего спокойствия земной атмосферы, сильно отличается от равномерно яркого диска, который можно видеть невооруженным глазом. С помощью больших телескопов можно наблюдать отчетливую зернистую структуру фотосферы. Чередование ярких пятнышек, *гранул*, похожих на зерна риса («*гранула*» — зерно), окруженных темными промежутками, создает впечатление ячеистой структуры, *грануляции*, напоминающей пчелиные соты. В последние годы точные фотографии грануляции получены с помощью телескопов, вынесенных на специальных

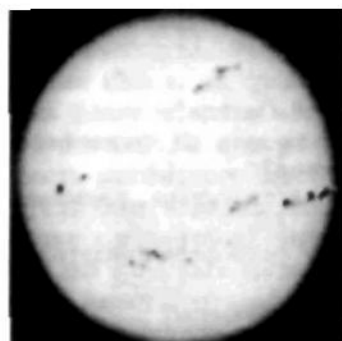


Рис. 67. Фотосфера Солнца (видны пятна).

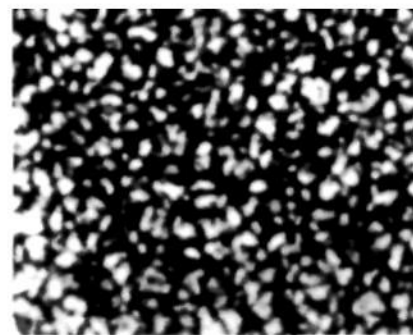


Рис. 68. Действительная структура поверхности Солнца — грануляция.

шарах в стратосферу. В результате изучения этих снимков удалось получить много новых сведений о яркости гранул, их спектрах, времени их «жизни», позволяющих понять их физическую природу. В частности, грануляция — свидетельство о происходящей под фотосферой конвекции, перемешивания масс газа (рис. 68).

Средние размеры гранул составляют 500 км, но встречаются гранулы размерами от 200 км до 700–800 км.

В фотосфере кроме гранул наблюдаются и более яркие, образующие как бы цепочку, структурные образования. Такие образования называются *факелами*, они возникают преимущественно в окрестности солнечных пятен (рис. 69).

Факелы хорошо видны на краю солнечного диска. В центральной части они не различимы. Причина этого в том, что температура верхней части факела выше окружающей фотосферы на 200–300°, и поэтому верхняя часть факела ярче окружающей поверхности фотосферы.

Факелы привлекают внимание и своей величиной. В поперечнике факелы достигают несколько сотен тысяч кило-

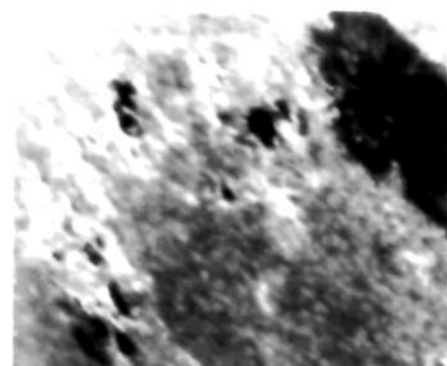


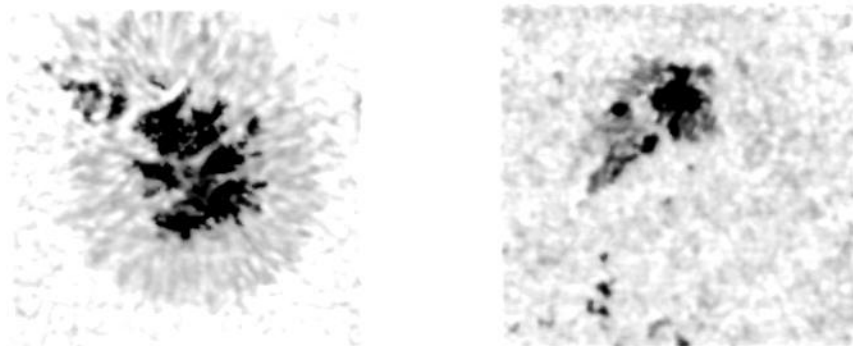
Рис. 69. Солнечные факелы (площадь несколько сотен миллионов км²).

метров, а общая площадь факела — несколько сотен миллионов квадратных километров.

1. Что вы понимаете под фотосферой Солнца?
2. Какие образования можно наблюдать на фотосфере при хороших условиях наблюдения?
3. На что по внешнему виду похожа структура, называемая грануляцией?
4. О каких физических процессах в фотосфере свидетельствует грануляция?
5. Какую структуру имеют факелы фотосферы?

§ 3. Солнечные пятна — островки магнетизма

Наблюдаемые в фотосфере объекты, природа которых с физической точки зрения не до конца исследована, — это солнечные пятна (рис. 70). Пятна имеют различную величину — от нескольких тысяч километров до нескольких сотен тысяч километров. Солнечное пятно, которое наблюдалось в 1858 г., было одним из самых крупных. Его диаметр достигал 230 тысяч километров, что в 9 раз больше диаметра Земли. Если размер пятна превосходит 40 тысяч километров, его можно увидеть на поверхности солнечного диска невооруженным глазом при восходе и заходе Солнца. Поэтому во многих средневековых рукописях можно встретить рассказы о пятнах на Солнце. Тем не менее, ни один из повествователей не верил, что эти пятна непосредственно связаны с природой Солнца. Галилей, который в 1610 г. наблюдал их в сконструированный им телескоп, был первым астрономом, который понял, что пятна — области на фотосфере.



а) Рис. 70. Солнечные пятна: б)
а) большое правильное солнечное пятно; б) группа пятен.

За почти четыре века, прошедших с тех пор, ученые добились существенного прогресса в определении причин возникновения пятен, их физической природы. Они возникают в областях факелов, когда напряженность магнитного поля в них резко возрастает. В центре крупного солнечного пятна напряженность магнитного поля Солнца достигает нескольких тысяч эрстед. Они изредка наблюдаются в виде отдельных пятен, но чаще в виде групп пятен (рис. 70 а, б). В этой группе появляются два крупных пятна — ведущее и хвостовое, где магнитное поле имеет противоположную полярность, кроме них различаются примыкающие к ним мелкие пятна. Так как температура пятен в среднем ниже температуры фотосферы на 1500—2500, они кажутся на ее фоне более темными образованиями.

Жизнь пятна может продолжаться от нескольких дней до одного-двух месяцев. Однако пятна с таким продолжительным сроком существования встречаются редко. Чаще пятна исчезают с поверхности Солнца гораздо раньше. Солнечные пятна появляются, как правило, в двух поясах по обе стороны солнечного экватора, между 5 и 35—40 гелиографической широты. Одной из загадок физики Солнца является то, что частота появления солнечных пятен меняется с выраженной периодичностью в 11,1 лет, как впервые показал в результате обработки наблюдений Солнца астрономами-любителями швейцарский астроном Р. Вольф.

Солнечные пятна — проявление наиболее активных процессов в атмосфере Солнца, непосредственно связанных с другими проявлениями этой активности, поэтому период в 11,1 лет называется *периодом солнечной активности* (см. рис. 76).

1. Расскажите об истории открытия солнечных пятен.
2. Почему солнечные пятна кажутся более темными на фоне фотосферы?
3. Какова магнитная природа отдельных пятен и групп пятен на Солнце?
4. В каких гелиографических широтах наблюдают солнечные пятна?
5. С каким периодом изменяется число солнечных пятен на Солнце?

§ 4. Протуберанцы — «языки» пламени

Не будет преувеличением сказать, что протуберанцы — самые красивые проявления солнечных образований (рис. 71). В средневековых рукописях упоминается о протуберанцах, кото-



Рис. 71. Один из гигантских объектов хромосферы — протуберанец.

рые можно наблюдать во время полного солнечного затмения. Верхний слой фотосферы, который называется *хромосферой* (от греческого «хромос» — цвет), простирается до высоты 14000 км. Плотность хромосферы так мала, что свет поглощается и излучается ею только в спектральных линиях. Таким образом, наблюдение при помощи спектрогелиоскопа позволяет получить представление о форме и величине хромосферного образования. Одно из самых грандиозных образований хромосферы — *протуберанцы*. Для наблюдателя эти объекты представляются «языками» пламени. Спектры протуберанцев дают возможность определить давление газа в них, температуру и скорость движения газов. В видимой области протуберанцы, так же как и хромосфера, имеют наиболее интенсивные линии *H* и *K* ионизированного кальция Ca^+ и линии спектра водорода H_α (длина волны 6562 Å).

В 1920 г. французский ученый Петит предложил метод наблюдения: делать снимки с помощью кинокамеры (16 кадров/с) в лучах спектральных линий Ca^+ или H_α хромосферы, что позволяет, в частности, зафиксировать на пленке быстро протекающую эволюцию протуберанцев. Поэтому во многих обсерваториях (в частности, в Ташкентской обсерватории) хромосферу изучают именно на их линиях спектра H_α с использованием специальных монохроматических фильтров, устанавливаемых на телескопах.

В лучах на этой красной водородной линии с длиной волны 6562 Å в проекции на солнечный диск были получены изображения протуберанцев в виде длинных изогнутых волокон, похожих на холмы, стога сена, дельты. Сравнивая их размеры с диаметром Солнца, удается определить, что ширина волокон протуберанцев достигает 6000–10000 км, тогда как длина протуберанца измеряется сотнями тысяч километров. Таким образом, наблюдения за протуберанцами дают представление о грандиозных процессах, происходящих на Солнце.

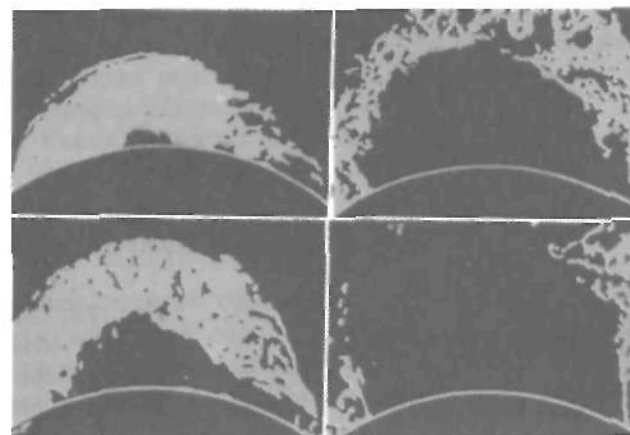


Рис. 72. Четыре стадии развития активного протуберанца.

В образовании и эволюции протуберанцев велика роль магнитного поля Солнца, поскольку активные протуберанцы наблюдаются на тех же участках, что и солнечные пятна. Эволюция одного из таких протуберанцев приводится на рисунке 72. Ввиду сложности экспериментов, в полном объеме исследование магнитного поля Солнца осуществляется только с 60-х годов XX в. Протуберанцы, являясь более плотными и холодными облаками плазмы (температура — 5000–10000 С, плотность — 10^{10} – 10^{12} частиц/см³), окутаны в сто раз более горячей солнечной короной.

1. Какой слой атмосферы Солнца называется хромосферой?
2. Какие атомы имеют наиболее интенсивные спектральные линии, в лучах которых можно наблюдать хромосферные образования?
3. Как выглядят протуберанцы?
4. Как выглядят протуберанцы в проекции на солнечный диск?
5. Существует ли связь между протуберанцами и солнечными пятнами?
6. Что вы знаете о размерах и температуре протуберанцев?

§ 5. Солнечные вспышки

Одни из самых мощных процессов, наблюдаемых на Солнце, — *хромосферные вспышки* (рис. 73).

Энергия, выделяемая вспышкой, продолжающейся несколько минут, достигает 1000 квадриллионов кВт (10^{14} – 10^{18} кВт).

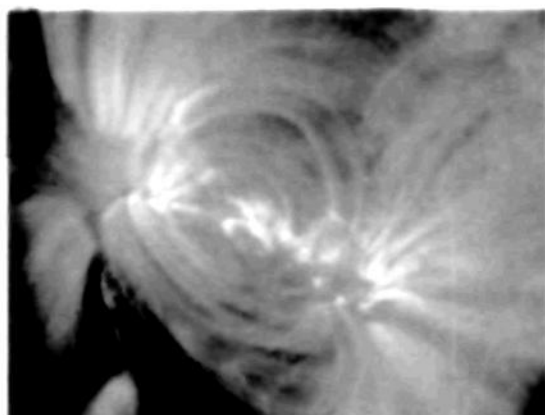


Рис. 73. Самые мощные объекты хромосферы — солнечные вспышки.

Иначе говоря, энергия, выделяющаяся в результате одной вспышки, эквивалентна энергии, которая была бы получена в результате сжигания всех природных запасов топлива на Земле. Хромосферные вспышки непосредственно связаны с солнечными пятнами и встречаются в областях между развивающимися солнечными пятнами вблизи линии раздела полярности магнитных полей. Во время вспышки усиление свечения этой области Солнца легко можно заметить на длине волны спектральной линии H_{α} . Наблюдаемое при этом усиление излучения Солнца в рентгеновском и радиодиапазонах также происходит в результате хромосферной вспышки. Иногда во время мощной хромосферной вспышки возникает сильное корпускулярное излучение (протонов и электронов), которое распространяется в межзвездное пространство (в частности в сторону нашей планеты). Это излучение создается протонами с энергией до 10–100 МэВ, и поэтому представляет серьезную опасность для экипажей космических кораблей. При взаимодействии протонов с металлическим корпусом корабля возникает жесткое гамма-излучение, чрезвычайно опасное для космонавтов.

Исследование спектра газа в области вспышки показывает, что заряженные частицы движутся со скоростями 500–1000 км/с. Этот корпускулярный поток называется *солнечным ветром*.

Солнечный ветер достигает орбиты Земли за 1,5–2 суток. Достигнув Земли, он вызывает различные геофизические явления и достаточно серьезно воздействует на биосферу Земли (см. § 8).

1. Что такое хромосферная вспышка?
2. Как связаны вспышки с солнечными пятнами?
3. В каких областях Солнца происходит большинство хромосферных вспышек?
4. Каких скоростей достигает изверженная во время вспышек масса плазмы?

§ 6. Солнечная корона

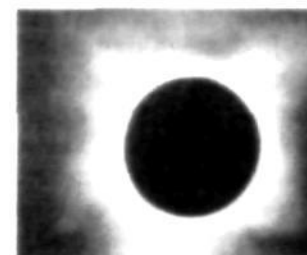
Во время полного солнечного затмения, когда диск Луны полностью заслоняет солнечный диск, вокруг Солнца возникает красивое серебристое свечение, распространяющееся на область размерами 1–2 солнечных радиусов (рис. 74 а, б). С глубокой древности люди наблюдали во время полного солнечного затмения это свечение, называемое *солнечной короной*.

Общий вид короны обусловлен уровнем активности Солнца. В период появления наибольшего числа пятен на Солнце, т. е. максимальный период его активности, корона окружает солнечный диск, уходя от него на наибольшее расстояние в областях наибольшей активности (рис. 74 а). В период минимальной активности Солнца корона уходит на значительное расстояние от диска только в плоскости солнечного экватора (рис. 74 б).

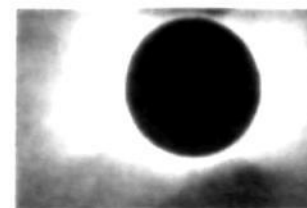
Изменения, наблюдаемые в короне, в частности, структура солнечной короны, свидетельствуют об активных процессах, идущих в атмосфере Солнца в слоях, находящихся непосредственно под короной. Наиболее яркие и протяженные образования, наблюдаемые в короне, располагаются над областями пятен и факелов фотосферы.

Основная часть излучения короны — это рассеянный свет фотосферы. Это не трудно установить, сравнивая спектрограммы короны и фотосферы.

Поляризация излучения короны свидетельствует о том, что рассеяние



а)



б)

Рис. 74. Солнечная корона в период: а) максимума солнечной активности; б) минимума солнечной активности.

света фотосферы происходит на свободных электронах. Вычисления показывают, что на 1 см^3 вещества короны приходится до 100 млн заряженных частиц.

Основная часть излучения Солнца в радиодиапазоне приходится на солнечную корону.



1. Когда и при каких природных условиях можно наблюдать солнечную корону?
2. На какие слои солнечной короны приходится основная часть радиоизлучения Солнца?
3. Связан ли вид короны с увеличением или уменьшением числа солнечных пятен?
4. Сравните протяженность короны с радиусом Солнца?

§ 7. Источник солнечной энергии

Из универсальных законов природы известно, что справедлив закон сохранения энергии: она не исчезает и не возникает. Естественно, возникает вопрос: что является источником энергии светящихся на ночном небе звезд и Солнца?

Возраст Солнца — около 5 млрд лет. Один из основных вопросов астрономии на протяжении веков — за счет чего происходит пополнение энергии Солнца, излучающего свет в течение столь продолжительного времени и, вообще, какие физические процессы обеспечивают потери энергии звезд? Ответы на эти вопросы порождали множество гипотез. Но большинство из них оказались несостоятельными. Наконец, в 1938–1939 гг. астрофизики А. Эддингтон, К. Вейдзеккер и Т. Бете показали, что источником энергии звезд являются ядерные реакции, происходящие в их недрах.

Известно, что протоны и нейтроны, образующие атомное ядро, связаны ядерными силами взаимодействия, и соответствующая этому энергия является чрезвычайно большой. Предположим, что в атомное ядро проникает внешний протон или электрон. Тогда возникает новое ядро и в результате этого выделяется ощутимая доля энергии ядра, так как проникшая в ядро частица связывается с частицами ядра ядерными силами. Полученная в результате излишняя энергия уносится протоном или нейтроном, электроном или позитроном. Такое событие называется *ядерной реакцией*. Однако условие для возникновения ядерных реакций состоит в том, что добавленная частица должна оказаться на расстоянии действия ядерных сил. Иными словами, добавоч-

ный протон или нейтрон должен сближаться с ядром атома с очень высокой скоростью (т. е. с высокой энергией).

Теоретические исследования показали, что температура в недрах Солнца достигает нескольких миллионов градусов, так что отдельные атомы движутся с огромными скоростями, что обеспечивает условие для возникновения термоядерной реакции. Нейтрон при таких высоких температурах распадается на протон, электрон и нейтрино, не участвуя более в ядерной реакции. Непрерывно происходящая в недрах реакция образования из четырех атомов водорода одного атома гелия восполняет потери звезды на излучение.

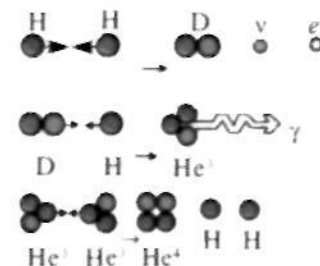
Масса протона в атомных единицах массы составляет 1,00813, соответственно масса четырех протонов 4,03252. А масса ядра одного атома гелия равна 4,00389. Тогда потеря массы в результате образования одного нормального атома гелия в единицах атомного веса составляет: $4,03252 - 4,003852 = 0,02863$ и называется *дефектом массы*. Дефект массы эквивалентен выделяемой энергии связи при образовании одного атома гелия, величина которой вычисляется по знаменитой формуле Эйнштейна:

$$E = mc^2 = 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot 0,02863 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ эрг.}$$

Здесь $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ — скорость света, m — дефект массы. Расчеты показывают, что сумма энергии, выделяющаяся в каждую секунду в центре Солнца, составляет $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$, т. е. каждую секунду происходит восполнение энергии, утраченной Солнцем на излучение.

Известны две реакции образования ядер гелия. Одна из них протон-протонная, происходящая в центре Солнца, вторая углеродно-азотная, происходящая, в основном, в центрах звезд с высокотемпературной поверхностью (рис. 75).

Рис. 75. Схема одного из вариантов протон-протонной реакции, протекающей в ядре Солнца (H — водород, D — дейтерий, ν — нейтрино, e^+ — позитрон, He^3 — изотоп гелия, He^4 — гелий, γ — гамма-квант).



1. Что является источником энергии Солнца?
2. В каких условиях протекает термоядерная реакция?
3. Какие термоядерные реакции в центре Солнца обеспечивают восполнение потерянной на излучение энергии?

§ 8. Активность Солнца и ее влияние на Землю

За многочисленные происходящие на Земле физические и биологические процессы, в частности, изменение климата, повторяющиеся эпидемии, процессы, идущие в ионосфере, магнитные бури и повышение уровня радиации, опасного для космонавтов, ответственны различные активные процессы, происходящие на Солнце. Все это давно известно науке. Хотя эта проблема еще не решена в полном объеме, в изучении взаимосвязи солнечной активности с указанными событиями достигнуты значительные успехи.

Как понимать существование органической связи такого рода между находящимися друг от друга на расстоянии 150 млн км двух небесных тел (Солнца и его спутника — Земли)? Что может служить основной причиной подобной зависимости на таком огромном расстоянии?

Солнце — источник жизни на Земле, и солнечные лучи освещают и дарят Земле тепло. Все это было известно с древних времен. Однако в последние годы было установлено, что электромагнитные волны в коротковолновом диапазоне также излучаются Солнцем с достаточной интенсивностью. Это ультрафиолетовые, рентгеновские и γ -лучи. И солнечная активность является определяющей для их интенсивности. Солнечные вспышки и эруптивные (изверженные) протуберанцы добавляют к этим излучениям потоки элементарных частиц высоких энергий. Солнечный ветер изменяет интенсивность этих потоков в соответствии с фазами солнечной активности. Интенсивность потоков приходящих от Солнца частиц и солнечной радиации связаны с изменением солнечной активности и происходят в одно и то же время с изменением числа солнечных пятен, и периодичность таких изменений 11,1 года. На рисунке 76 представлен график изменения солнечной активности. Безусловно, солнечный ветер, достигая Земли, служит причиной различных геофизических процессов, в частности, магнитных бурь. В свою очередь, геофизические процессы влияют на биосферу Земли. В резуль-

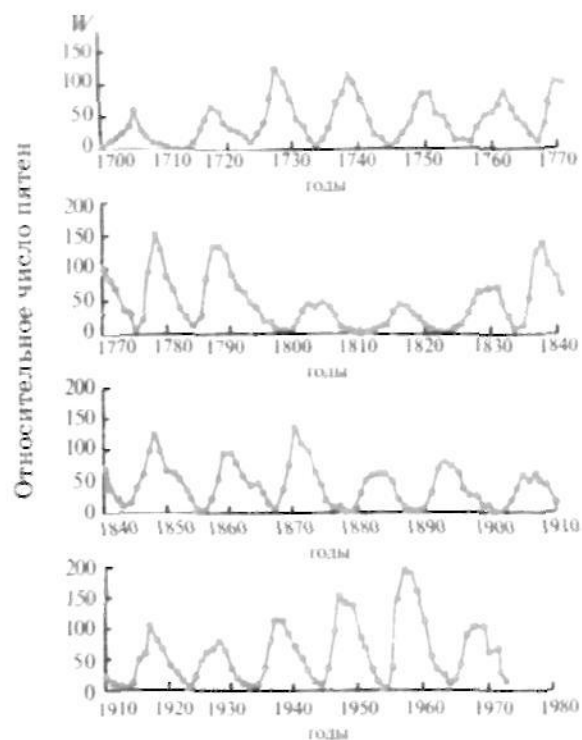


Рис. 76. График изменения солнечной активности (в зависимости от числа пятен).

тате в особенностях развития многих событий находят отражение и изменения солнечной активности. В первую очередь, на степень ее уменьшения или увеличения реагируют верхние слои атмосферы, в частности, солнечная радиация порождает ионизацию ионосферы. В свою очередь это меняет ее электропроводимость и отражение электромагнитного излучения. Иногда потоки заряженных частиц от Солнца так увеличивают концентрацию ионов ионосферы, что поглощение ионосферой коротких радиоволн является причиной прекращения связи в коротковолновом диапазоне на несколько минут. Например, 9, 10 и 12 мая 1959 г. на Солнце наблюдалось несколько вспышек. В результате 11 мая на территории США вышла из строя радио-, телеграфная и телефонная связь. 12 мая упомянутая вспышка послужила причиной появления северных сияний.

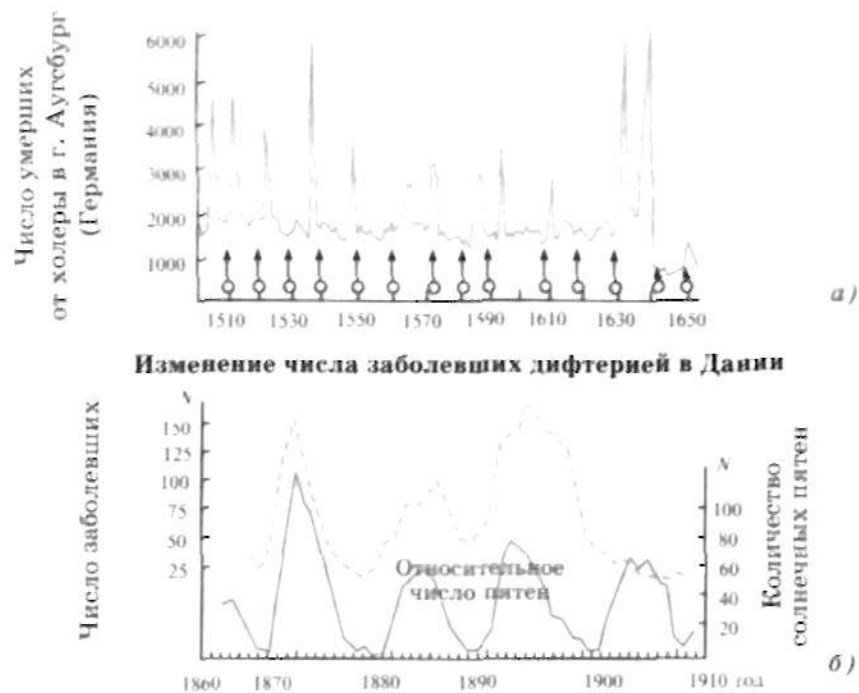


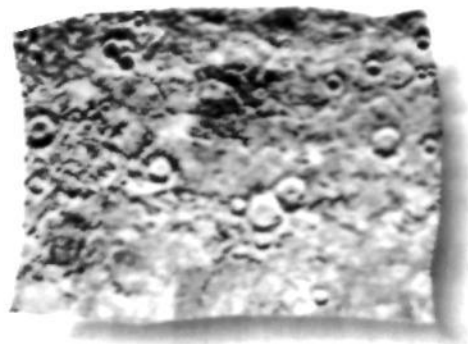
Рис. 77. Связь эпидемических фаз заболеваемости холерой (а) и дифтерией (б) с фазами солнечной активности (кружочками выделены годы максимума солнечной активности).

В изучение связей между солнечной активностью и эпидемическими заболеваниями внес большой вклад профессор А. Л. Чижевский (Россия). Изучая широко распространенные случаи падежа скота, вспышек заболеваний холеры, дифтерии, возвратного тифа и тому подобных инфекций, их начало, развитие и окончание, он восстановил непосредственную связь этих событий с солнечной активностью (рис. 77). Р. П. Богачева и В. М. Бойко изучали на протяжении нескольких десятилетий динамику полиомиелита в Риге и Узбекистане и установили связь роста числа заболевших с солнечной активностью. Установлена связь между сердечно-сосудистыми заболеваниями и инфарктом миокарда со вспышками на Солнце. Изучение связи между солнечной активностью и заболеваниями нервной системы человека привело к пониманию того, что солнечные вспышки могут

приводить к нарушениям нормальной деятельности нервной системы. Мы не останавливаемся на установлении влияния солнечной активности на изменение климата Земли, биологии растений и других процессов подобного рода, хотя доказана связь солнечной активности и с этими процессами.



1. С какими процессами на Солнце связана солнечная активность?
2. Каков средний период чередования проявлений солнечной активности?
3. В каких явлениях в атмосфере Земли находит свое отражение солнечная активность?
4. Какова связь солнечной активности с биологическими процессами на Земле?
5. Какие проявления солнечной активности способствуют появлению магнитных бурь на Земле?
6. Для каких больных опасно влияние магнитных бурь?



VII ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

§ 1. Меркурий

Среди девяти больших планет Солнечной системы ближайшая к Солнцу планета Меркурий. Орбита Меркурия отличается от орбит других планет, представляя собой вытянутый эллипс. Благодаря этому планета оказывается от Солнца на расстоянии 0,31 а. е. в перигелии и 0,47 а. е. — в афелии. Среднее расстояние от планеты до Солнца 58 млн км. Диаметр Меркурия 4880 км, сила тяжести на его поверхности в 2,6 раза меньше земной. Иными словами, человек, весящий на Земле 80 кг, будет весить на Меркурии 30 кг.

Меркурий обращается по своей орбите вокруг Солнца со скоростью 48 км/с, совершая полный оборот вокруг Солнца за 88 суток (т. е. его год). Звездный период вращения вокруг своей оси 58,65 земных суток, солнечные сутки на Меркурии продолжаются 176 земных суток, т. е. вдвое дольше меркурианского года.

Дневная температура в подсолнечной точке планеты, т. е. в точке, где Солнце находится в зените, достигает 620 К, температура ночного полушария 100 К.

Наблюдать Меркурий с близкого расстояния удалось американскому межпланетному кораблю «Маринер-10». Стартовавший в конце 1973 г., корабль оказался 21 сентября 1974 г. на расстоянии 47,981 тыс. км от планеты и сделал около 500 снимков Меркурия. По внешнему виду планета напоминает Луну. Подобно поверхности Луны, поверхность Меркурия подвергалась интенсивной метеоритной бомбардировке и покрыта кратерами, которые свидетельствуют, что Меркурий пережил и эпоху интенсивной бомбардировки метеоритами (рис. 78 и 79).

Интересно, что кратеры по глубине уступают лунным, хотя кратеры со светлыми лучами, с центральными горками и с ров-

ным дном, с резкими очертаниями валов и полуразрушенные напоминают лунные. Эти «рябинки» на лике планеты — ее дневник, повествующий об этапах образования Меркурия.

Плотность вещества, покрывающего поверхность Меркурия — 3,0–3,3 г/см³, средняя плотность планеты — 5,44 г/см³, почти равная средней плотности Земли. Возможно, планета имеет железное ядро или, по крайней мере, силикатное ядро, пребывающее под действием высокого давления в металлизированном состоянии (рис. 80).

«Маринер-10» обнаружил у Меркурия крайне разреженную атмосферу. Это легко объяснить высокой температурой на поверхности планеты и относительно небольшой силой тяжести. Повышение температуры влечет за собой увеличение скорости теплового движения молекул газов, составляющих атмосферу. Достижение высоких скоростей молекулы покидают пределы планеты. Даже Земля в течение одних суток теряет около 100 т водорода.

Имеющий удивительно малую массу (масса Меркурия составляет 5,5% массы Земли) и высокую температуру поверхности, Меркурий потерял основную часть своей атмосферы.

Давление атмосферы, состоящей главным образом из гелия, у поверхности планеты в 200 млрд раз меньше, чем давление этого газа в составе земной атмосферы. Давление всех газов атмосферы Меркурия в полмиллиона раз меньше земного.

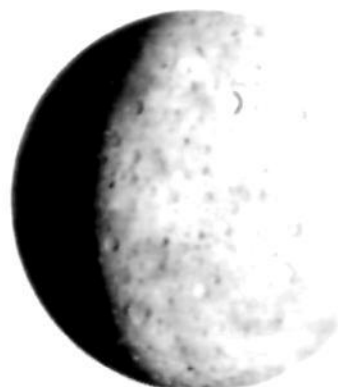


Рис. 78. Поверхность Меркурия (по снимкам КА «Маринер-10»).

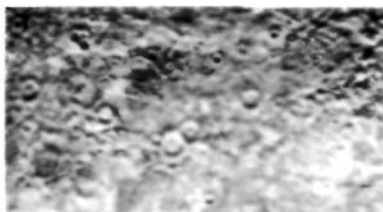


Рис. 79. Снимок поверхности Меркурия.

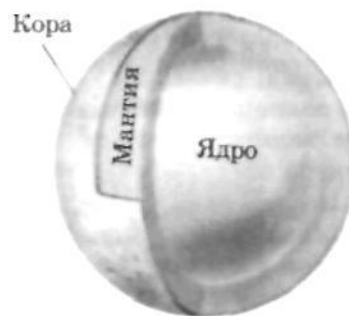


Рис. 80. Внутреннее строение Меркурия.

Меркурий, как и Луна, не имеет микроорганизмов в грунте поверхности, «климат» Меркурия резко отличается от лунного, поэтому можно с полным основанием утверждать, что жизни на Меркурии нет. Спутников Меркурий не имеет.



1. Какие планеты входят в число больших планет Солнечной системы?
2. Что вы знаете о размерах Меркурия?
3. Какие космические аппараты исследовали Меркурий?
4. Есть ли атмосфера у Меркурия, имеет ли он спутники?

§ 2. Венера

Планета, названная в честь богини любви римской мифологии, находится от Солнца на среднем расстоянии 108 млн километров. Венера обращается вокруг Солнца со скоростью 35 км/с, совершая полный оборот вокруг Солнца за 225 суток.

Стоящая по яркости вслед за Солнцем и Луной, эта планета привлекала внимание людей с глубокой древности. Ее движение на фоне неподвижных звезд незадолго до восхода или после захода Солнца было замечено очень давно. Поэтому она носит название «утренней звезды».

Когда в 1610 г. Галилей наблюдал Венеру в сконструированный им телескоп, он заметил, что у Венеры, так же как и у Луны, происходит смена фаз. Это было первым доказательством того, что Венера, как и Луна, имеет форму шара. Венера немного меньше Земли по размерам, ее диаметр составляет 12100 км.

6 июня 1761 г. астрономы стали свидетелями интересного события, связанного с Венерой: ее движение проецировалось на солнечный диск. Наблюдавший это удивительное событие великий русский ученый М. В. Ломоносов открыл, что Венера обладает атмосферой.

Исследование Венеры с помощью космических аппаратов, начиная с 60-х годов XX в., позволило получить ответы на многие вопросы, связанные с этой планетой. Удалось определить период обращения Венеры вокруг собственной оси и вокруг Солнца.

Известно, что ось вращения Венеры практически перпендикулярна (93°) плоскости ее орбиты, поэтому на Венере не наблюдается смены времен года. Кроме того, в результате радиолокационных измерений удалось установить, что Венера поворачивается вокруг своей оси за 243,2 суток и направле-

ние ее вращения, в отличие от других планет, происходит с востока на запад, т. е. Солнце восходит с запада.

Сложение двух движений планеты — вокруг оси и вокруг Солнца — приводит к тому, что солнечные сутки на Венере делятся 118 земных суток.

Химический состав атмосферы планеты, давление и температура на ее поверхности были установлены в результате исследований с помощью космических аппаратов (бывшего Союза и США). Первым к Венере приблизился на расстояние 100000 км космический аппарат «Венера-1». Так как наименьшее расстояние от Земли до Венеры (т. е. в нижнем соединении) равно 40 млн км, нетрудно представить, насколько близко подошла к планете «Венера-1». Особенно важные результаты были получены с помощью запущенных в октябре 1975 г. межпланетных станций «Венера-9» и «Венера-10» (рис. 81). Они впервые в истории астрономии вышли на орбиту искусственных спутников Венеры и спускаемые с этих спутников аппараты совершили посадку на поверхность планеты и отправили на Землю первые фотографии Венеры. Кроме того, с помощью этих аппаратов были определены количество радиоактивных элементов в почве Венеры, скорость ветра, количество водяных паров в атмосфере, температура, давление и освещенность на поверхности планеты.

В 1978 г. в направлении Венеры были запущены четыре КА. Два из них, «Венера-11» и «Венера-12», были советскими, два «Пионер — Венера-1» и «Пионер — Венера-2» — американскими.

Научная аппаратура, размещенная на спускаемых аппаратах «Венера-11, -12» и «Пионер — Венера-1, -2», определила состав газов и облачных образований атмосферы Венеры, сложную структуру атмосферы и концентрацию заряжен-



Рис. 81. Снимки поверхности Венеры, сделанные КА «Венера-9» и «Венера-10».

ных частиц. Она определила также температуру на поверхности планеты, давление и плотность, а также скорость ветра в нескольких районах планеты.

Подводя итоги, можно сказать, что в результате этих исследований были получены следующие сведения: атмосферное давление на поверхности планеты оказалось неожиданно высоким — 90 атм. 97% атмосферы состоит из углекислого газа, что в 400000 раз больше, чем в атмосфере Земли, 1% — водяные пары, 1,5% — кислород. Температура на поверхности 480 С. Столь высокая температура объясняется тем, что CO_2 и водяные пары интенсивно поглощают инфракрасные лучи, создавая парниковый эффект. В атмосфере Венеры имеется слой ионосферы, находящейся на высоте 140 км. Облака Венеры похожи на легкий туман, сквозь который видно на расстоянии до нескольких км. Но из-за плотного слоя облаков поверхность недоступна для непосредственных наблюдений с Земли.

С помощью специальных методов было установлено, что облака Венеры состоят на 75–85% из капель водного раствора серной кислоты. На высоте 40 км от поверхности планеты скорость ветра достигает 100–140 м/с, на высоте 10 км — 3–4 м/с.

Решением Генеральной Ассамблеи Международного Астрономического Союза в 1991 г. 116 рельефным элементам Венеры были присвоены имена всемирно известных женщин. В этом списке имеется и имя нашей соотечественницы, поэтессы Нодиры. Ее именем назван один из кратеров планеты.

На основе полученных результатов удалось установить внутреннее строение планеты и ее атмосферы (рис. 82).



Рис. 82. Внутреннее строение Венеры.

Подводя итоги сказанному, следует заметить, что хотя в изучении Венеры в последние годы были достигнуты значительные успехи, остаются нерешенными многие проблемы.

Естественных спутников Венеры не имеет.

1. Расскажите, что вы знаете о Венере.
2. Почему детали поверхности Венеры не видны в оптический телескоп?

3. Какие новые факты были открыты в результате исследования Венеры космическими аппаратами?
4. Что вы знаете об атмосфере Венеры, физических условиях (температуре, давлении и составе)?
5. Почему температура Венеры столь высока (+480 С)?
6. Есть ли у Венеры спутники?

§ 3. Земля

По степени удаленности от Солнца Земля находится на третьем месте в системе планет. Так как Земля обладает достаточно плотной атмосферой, она имеет высокую отражательную способность. На рисунке 83 приведена фотография Земли, сделанная с поверхности Луны. Экваториальный радиус Земли 6378 км. Обращаясь вокруг Солнца, Земля движется по орбите со скоростью 30 км/с, совершая полный оборот за $365^d,24$. Наклон оси Земли к плоскости орбиты равен $66^\circ,5$, что является причиной смены времен года. Суточное вращение Земли вокруг оси происходит за $23^h56^m4^s$ (звездные сутки). Продолжительность солнечных суток — 24 ч, разница в длительности объясняется тем, что направление на Солнце ежедневно меняется на 1° вследствие видимого годовичного движения Солнца по эклиптике.

Средняя плотность Земли — $5,5 \text{ г/см}^3$, масса приблизительно равна $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$. Атмосфера Земли, простираясь на тысячи километров, имеет массу 5 квадриллионов тонн. Такая обширная атмосфера играла определяющую роль в возникновении и развитии жизни на Земле. В частности, на высоте 20–30 км в атмосфере Земли расположен озоновый слой, богатый озоном O_3 . Озон подвергается фотохимическому разложению согласно формуле $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$ и поглощает в результате этой реакции ультрафиолетовое излучение Солнца, защищая тем самым поверхность Земли от его губительного воздействия. Примерно 21% атмосферы приходится на кислород, 78% — на азот. Ос-

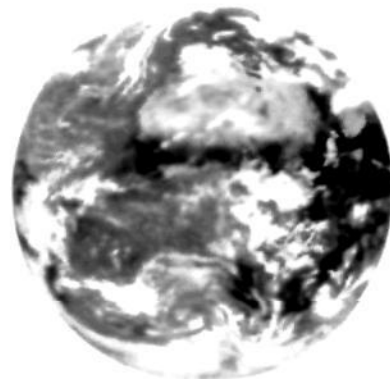


Рис. 83. Снимок Земли, сделанный с поверхности Луны.

тавшаяся часть — инертные газы, двуокись углерода и водяные пары.

Гидросфера Земли (Земля — единственная планета, обладающая гидросферой) состоит из океанов, морей и других источников воды. Объем воды в них — $1,37 \cdot 10^{18}$ м³, океаны занимают 71% поверхности Земли. Если принять среднюю высоту суши за 875 м над уровнем моря, то средняя глубина океана составит 3800 м.

Благодаря уникальным химическим и физическим свойствам воды она обеспечивает оптимальный тепловой режим Земли. Без воды органическая жизнь на Земле была бы невозможна. Вода, превратившаяся в лед под действием низких температур, занимает основную часть поверхности Антарктиды и Гренландии. Если растает ледовый панцирь этой части суши, уровень воды в Мировом океане повысится на 60 м, что уменьшит поверхность суши еще на 10%.

Основная масса Земли — **литосфера**. Находясь на ее поверхности, мы мало что знаем о ее внутреннем строении. Сейсмология, наука о землетрясениях, позволяет уточнить некоторые сведения о строении литосферы. Во время землетрясений от его эпицентра распространяются сейсмические волны, поперечные и продольные.

Поперечные волны не могут распространяться в жидкой среде, следовательно, литосфера до больших глубин является твердой. Но на глубине 40 км в ней имеется поверхность раздела, называемая поверхностью Мохоровичича. Часть литосферы, расположенная выше этой поверхности, называется **земной корой**, ниже — **мантией**.

Начиная с глубины 3000 км, сейсмические волны распространяться не могут. Это говорит о том, что на этой глубине находится граница **ядра** литосферы. Оно делится на две час-



Рис. 84. Внутреннее строение Земли.

ти: внутреннее ядро (радиус 1200 км) и жидкое внешнее ядро (радиус 2250 км) (рис. 84).

Температура быстро повышается при приближении к центру Земли, достигая у нижней границы мантии 5000 К, но температура в центре Земли не выше 10000 К.

Земля является гигантским магнитом, о чем свидетельствует стрелка компаса, указывающая направление магнитных силовых линий. Интересно, что геомагнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Координаты Северного геомагнитного полюса: $\varphi = 78^\circ,6$ с. ш., $\lambda = 70^\circ,1$ з. д.

Магнитная ось расположена под углом $11^\circ,5$ к земной оси. Напряженность магнитного поля возрастает от 0,31 Э на геомагнитном экваторе до 0,63 Э на геомагнитных полюсах. Магнитное поле в околоземном пространстве называется **магнитосферой** (рис. 85). Она не симметрична относительно земной оси. С дневной стороны Земли магнитосфера ограничена сферической поверхностью радиуса $\approx 8 - 14 R_{\oplus}$, с противоположной стороны «магнитный хвост» простирается на несколько сотен тысяч километров. Хотя в последние годы достигнут значительный прогресс в изучении Земли как планеты Солнечной системы, загадок остается не меньше, чем в исследованиях других планет. Особенно бедны наши сведения о недрах Земли. Конечно, в отличие от других планет Земля более доступна для изучения, и можно надеяться на дальнейшие успехи.

Вокруг Земли обращается ее единственный естественный спутник — Луна.

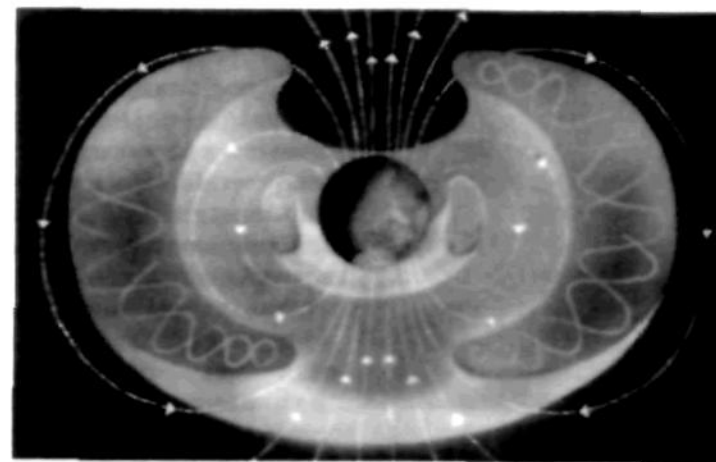


Рис. 85. Структура магнитосферы Земли.

1. Расскажите, что вы знаете о планете Земля.
2. Расскажите о строении атмосферы Земли.
3. Расскажите о внутреннем строении планеты.
4. Сколько естественных спутников имеет Земля?

§ 4. Луна

Самая близкая к Земле планета — Луна, ее естественный спутник (рис. 86). Луна обращается вокруг Земли так же, как все планеты вокруг Солнца, по эллипсу. В перигее она находится от Земли на расстоянии 363400 км, в апогее — 405400. Диаметр Луны 3476 км, ее объем составляет 0,02 объема Земли. Масса Луны в 81 раз меньше земной. Притяжение Луны в 6 раз меньше, чем у Земли. Ускорение свободного падения на Луне — 1,63 м/с². Средняя плотность вещества Луны 3,3 г/см³, т. е. меньше земной в 1,5 раза. Днем на экваторе температура +120 С, в полночь — 150 С.

Американские астронавты, оказавшись на Луне, в первую очередь почувствовали, что стали очень легкими. Это объясняется уменьшением силы притяжения. Если космонавт в скафандре весил на Земле 90 кг, то на Луне — всего 15 кг. Для посланцев Земли многое, к чему они привыкли, кажется диковинным. На Луне они не увидят пунцово-алой зари. Солнце, которого не было видно на небосводе, вдруг появится на горизонте. Интересно, что с восходом Солнца звезды



Рис. 86. Луна — естественный спутник Земли.

на небосводе не погаснут. На темном небе вместе с Солнцем целый день будут гореть яркие звезды. Вокруг Солнца будет видно неправильной формы кольцо красного цвета — его корона. На краю солнечного диска будут видны диковинные выбросы — протуберанцы.

Звезды на небе Луны, корона Солнца и невидимая зоря — все эти явления объясняются отсутствием на Луне атмосферы. С восхода Солнца до полудня пройдет почти

семь с половиной суток. Хотя температура будет возрастать, найти тенистое место на Луне нетрудно. Можно спрятаться за опоясывающими кратер валами, у подножия возвышенностей. Прохладно в этих местах из-за отсутствия на Луне атмосферы, молекулы которой переносят тепло. Поэтому в местах, куда непосредственно не падают лучи Солнца, сохраняется ночная температура на протяжении длительного времени. Человек, оказавшийся на Луне, не сможет позвать своего спутника иначе как по радио, т. к. тот не услышит ни звука. Звуковые волны распространяются в среде, которая также состоит из молекул воздуха, которых на Луне нет. Одна из прекрасных картин на лунном небе — вид планеты Земля (см. рис. 83). Земля видится красивым голубым шаром, в 4 раза большим по размерам, чем Луна на небе Земли, но больше половины земной поверхности будет скрыто за облаками. Земные континенты будут светлее, чем океаны. Обширная земная атмосфера и облачность будут затруднять видимость. Земля, так же как и Луна, будет видна в различных фазах. Это зависит от того, с какой стороны по отношению к Солнцу будет расположена Земля. Когда Земля будет видна полным диском, как Луна в полнолуние, она будет ярче Луны в 40 раз. Этому событию на Луне соответствует новолуние на Земле. Вокруг Земли на лунном небе будут видны в виде концентрических колец красивые темно-красные, желтые, голубые радуги.

Если космонавт окажется на Луне во время лунного затмения, он увидит затмение Солнца, и полная фаза этого затмения будет продолжаться не несколько минут, как на Земле, а 1,5 часа.

Если Северный полюс Земли близок на небесной сфере к Полярной звезде (α Малой Медведицы), то для Луны полюс в точности совпадает со звездой ω созвездия Дракона, и для наблюдателя на Луне кажущееся суточное движение небесной сферы будет происходить вокруг этой звезды. Положение заблудившегося на Луне человека будет довольно сложным. Так как у Луны нет магнитного поля, компас окажется бесполезным. Найти дорогу можно будет только ориентируясь по звездам.

На Луне не будет видно метеоров — «падающих звезд». На Земле они видны потому, что эти мелкие частицы сгорают при входе в атмосферу, оставляя видимый след. Из-за отсутствия на Луне атмосферы на ее поверхность из космоса могут падать любые предметы, независимо от их величины.

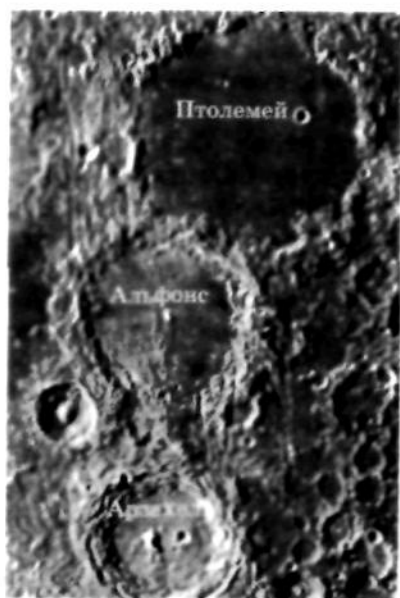


Рис. 87. Кратеры и «моря» Луны.

кратера Альфонс. Самые высокие горы на поверхности Луны названы Альпами, Апенниннами и Кавказом. Высота некоторых гор достигает 9 км. На Луне также много кольцеобразных гор. Среди таких гор, называемых цирками, выделяются цирки Клавия и Шиккарда, диаметр которых достигает 200 км. Разница между земными и лунными горами заключается в том, что лунные горы отвесны.

Рельеф обратной стороны Луны впервые удалось увидеть на снимках, сделанных в бывшем Союзе в 1959 году автоматической станцией «Луна-3». Благодаря фотоснимкам, полученным этим аппаратом, удалось создать первый лунный глобус. На обратной стороне Луны «морей» меньше, чем на видимой нами стороне Луны.

В последующие 15 лет исследования Луны с помощью КА позволили ближе познакомиться с Луной. КА «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» доставили на Землю образцы лунного грунта.

«Луна-17» и «Луна-21» высадили на Луну экспериментальные лаборатории («Луноход-1» и «Луноход-2»). Предназначенные для изучения лунной поверхности аппараты типа «Лу-

Основную часть лунной поверхности занимают кратеры. Но вместе с этим на Луне имеется множество объектов, похожих на земные. На Луне есть низменности, возвышенности, горы (рис. 87). Впервые все эти объекты увидел Галилео Галилей, сконструировавший в 1610 г. свой телескоп. Он назвал низменности «морями», это название сохранилось до наших дней, хотя в них нет и следа воды.

На поверхности Луны так же, как и на Земле, есть вулканы, извержение одного из них наблюдал в 1958 г. русский ученый Н. А. Козырев. В том же году с помощью мощного телескопа Крымской обсерватории ученый наблюдал газовое облако, выброшенное из

ноход» высадила на Луну автоматическая станция «Аполлон-15» (США) (рис. 88). Эти лаборатории, пройдя по поверхности Луны несколько десятков километров, позволили получить сведения о лунном рельефе, составе грунта, сейсмической и вулканической активности, космических лучах и многих других подобных явлениях, что было недоступно жителям Земли в течение многих тысяч лет.

Анализ образцов грунта, доставленного с Луны, показал, что лунный грунт состоит из четырех типов образований: мелкозернистые пористые изверженные породы, крупнозернистые пористые изверженные породы, *брекчии* (обломки изверженных пород и минералов) и *реголит* (мелкие частицы и пыль). Первые три группы имеют одинаковый химический состав, реголит содержит примеси метеоритного вещества и является наиболее характерным видом лунного грунта. В июле 1969 г. на Луну совершил посадку спускаемый аппарат космического корабля «Аполлон-11». Американские космонавты Н. Армстронг и Э. Олдрин совершали продолжительные прогулки по Луне и привезли на Землю драгоценные «подарки»: образцы камней, грунта, кристаллических пород. В 60-х — 70-х годах XX века «Аполлоны» доставили на Луну в общей сложности 12 астронавтов, которые получили ценные сведения о лунном рельефе и физической природе Луны.

Образцы грунта, взятые с поверхности «Моря спокойствия», имеют в составе 40–45% Al, 4–6% Ti и Mg («Аполлон-11»). Образцы, доставленные из «Моря бурь» («Аполлон-12»), несколько отличаются по составу, содержат в 2–3 раза меньше Ti, но больше Mg, Co, V и Sc. Если сравнивать состав лунных и земных пород, то именно в этом наблюдаются отличия. В частности, требует внимания так называемая «лунная пыль». В ее составе обломки кристаллических пород, частицы железоникелевых смесей, прозрачные, напоминающие обломки стекла, вкрапления, спекшиеся в отдельные частицы.



Рис. 88. Самоходный аппарат, доставленный на Луну КА «Аполлон-15» для передвижения космонавтов по ее поверхности.

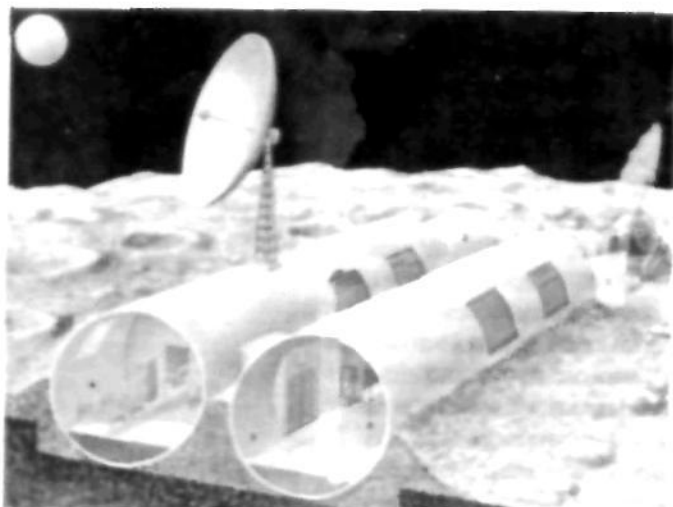


Рис. 89. Проект обитаемой научной станции на поверхности Луны.

Можно задать вопрос: "Какая польза от исследования Луны?". Для естественных наук ценность изучения Луны определяется тем, что на Луне нет атмосферы. Маленький телескоп, доставленный на Луну, по сравнению с большим земным телескопом дает возможность получить во много раз более качественные фотоматериалы. Небольшая лунная обсерватория превзойдет по качеству результаты работ десятков земных обсерваторий. Кроме того, земная атмосфера задерживает большинство космических лучей, приходящих на Землю. На Луне возможно исследование многих небесных тел и их систем в широком коротковолновом и длинноволновом диапазонах. На рис. 89 приведен макет будущей лунной научной станции.

1. Во сколько раз диаметр и масса Луны меньше земных?
2. С каким периодом обращается Луна вокруг Земли?
3. Есть ли на Луне атмосфера?
4. Что вы знаете о рельефе Луны?
5. Какие космические корабли доставили на Луну первых космонавтов?
6. Какой видится с Луны наша планета? Существует ли смена фаз Земли?
7. Во сколько раз сила притяжения Луны меньше земной?
8. Есть ли вода в лунных морях?
9. Из каких частей состоит лунный грунт?

§ 5. Марс

Планета, названная в честь бога войны Марса, — четвертая из планет земной группы. Ее орбита пролегает вне орбиты Земли. Среднее расстояние от Солнца 228 млн км. Марс — относительно небольшая планета. Диаметр Марса 6775 км, масса $6,44 \cdot 10^{23}$ кг (0,107 массы Земли). Средняя плотность $3,94 \text{ г/см}^3$, ускорение свободного падения $3,72 \text{ м/с}^2$. Марс по своим физическим свойствам является планетой, подобной Земле. Сутки на Марсе незначительно отличаются от земных: $24^{\text{h}}39^{\text{m}}29^{\text{s}},6$. На планете, как и на Земле, наблюдается смена времен года, так как ось вращения планеты наклонена под углом $65^{\circ}12'$ к плоскости ее орбиты, почти таким же как и у Земли. Однако год на Марсе длится 687 земных суток (669 марсианских). На широте 35 в полдень температура по Цельсию -20 , вечером -40 , ночью -70 . Зимой на широте 40 температура не повышается выше -50 , на широте 60 — выше $-80 \dots -90$ С. Минимальная температура на поверхности Марса не опускается ниже -125 С на полюсах.

Результатами исследований межпланетных автоматических станций (МАС) типа «Марс», «Маринер», «Викинг» установлено, что атмосфера Марса состоит из углекислого газа (95%), азота (2,5%), аргона (1,5–2%) и незначительного количества кислорода (0,2%) и водяного пара (0,1%).

Специальными исследованиями установлено, что «полярные шапки» — это замерзшая углекислота с примесью небольшого количества водяного льда.

Рельеф Марса — слегка отличающиеся друг от друга образования, большое место среди которых занимают кратеры. Область кратеров на севере доходит до 40 с. ш., на юге — до 80 ю.ш. Как показали снимки с космического аппарата «Викинг», в области от 20 до 55 с. ш. находится равнина Эллада, почти лишенная кратеров, изобилующая низинами и протянувшаяся на 2000 км. В южном полушарии имеется другая большая равнина — Аргир (рис. 90). На северо-западе от Аргира расположена равнина Тарсис, на которой много вулканов. За ней в северном полушарии расположены известные равнины Амазония и Утопия. От 50 до 70 с. ш. простирается большая пустыня, которая ограничена кольцом гор, окружающим Северный полюс.

Одно из чудес планеты Марс — ее горы. В районе Тарсис имеются четыре высокие горы конической формы. Эти горы возникли в результате вулканической деятельности. Самая



Рис. 90. Карта марсианских изгибов.

южная из них, гора Арзия, диаметр кратера на ее вершине — 130 км. Из этих гор наибольшей является гора Олимп, которая в несколько раз выше вулканов Земли. Диаметр основания Олимпа 600 км, высота — 27 км. На Земле высота самой высокой горы около 9 км, диаметр основания самого большого вулкана не превышает 250 км. Остальные вулканические горы на Тарсисе уступают Олимпу, но над облаками пыли, окутывающими их на высоте 15 км, выступают их вершины, значит, высота их не менее 15–20 км (по снимкам, полученным со станции «Маринер-9», 1971 г.). Это потухшие примерно сотни миллионов лет тому назад вулканы. Кратер вулкана на вершине горы Олимп достигает в диаметре 70 км и окружен высоким валом. Во время извержения раскаленная жидкая лава стекала по склону вулкана далеко вниз.

Еще одна особенность Марса — это образования, похожие на огромного размера трещины. На 20° к востоку от горы Арзия видна одна из таких трещин, протянувшаяся на 400 км. Ширина ее местами доходит до 30 км, глубина — до 2 км.

На поверхности «красной планеты» можно наблюдать и русла высохших рек. Среди них примерно на 30 ю. ш. выделяется русло реки Ниргал, имеющее длину 400 км и относящееся к древнейшим подобным образованиям (рис. 91). На фото с «Маринера-9» видно, что некогда Ниргал изливался в огромную котловину. Видна также другая река Маадим с длиной русла 700 км, в некоторых местах она имеет ширину 80 км. Точно известно, что сегодня в руслах этих рек нет никакой воды. Возникает вопрос: что же было причиной возникновения этих обра-

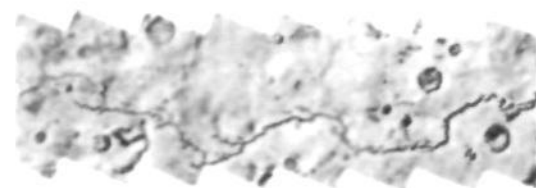


Рис. 91. Русло реки Ниргал на Марсе (длина более 400 км).

зований? Поиски ответа на него были предметом дискуссий на протяжении многих лет. Согласно гипотезе, которая от года к году становится все более и более правдоподобной, эти образования — русла бурных рек древних времен.

Есть ли жизнь на Марсе? — этот вопрос с давних пор интересует ученых. Для того чтобы ответить на него, с мыса Канаверал (США) в 1975 году к Марсу были направлены два КА «Викинг-1» и «Викинг-2». «Викинг-1», преодолев путь в 350 млн км, опустился 20 июля 1976 года на равнину Хрис, «Викинг-2» опустился на равнину Утопия в 6400 км к северо-востоку от этого места. «Викинг-1» в первый же день после «мягкой» посадки на «красную планету» отправил на Землю изображение окружающей его местности. На снимках видны различной величины валуны и песчаные дюны. Причиной появления этих дюн являются бури, бушующие на Марсе (рис. 92). «Викинг-1» прислал также и метеосводку: слабый ветер, который дул с востока, сменился в полночь ветром, дувшим с юго-западного направления. Его максимальная скорость 6–7 м/с, давление 7,7 миллибар, температура ранним утром –85,5 С, днем 30 С. На снимках, посланных на Землю, видно, как со дна кратеров и из трещин на поверхности поднимается туман. Этот туман, состоящий главным образом из водяных паров, подтверждает гипотезу о наличии на Марсе запасов воды (в виде льда).

Анализ образцов марсианского грунта показал, что в его составе имеется железо (до 12–15%), кремний (до 20%), алюминий (до 2–4%), кальций (до 3–5%), магний (до 5%), сера (до 3%), а также в малых количествах фосфор, рубидий и стронций.



Рис. 92. Снимок поверхности Марса, сделанный КА «Викинг-1» (США).

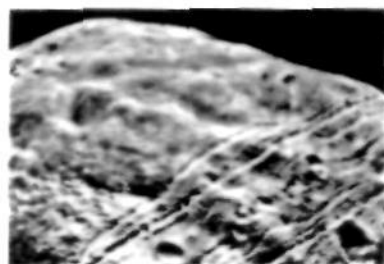


Рис. 93. Фобос — спутник Марса (размеры 18 × 22 км).

На основании первых биологических экспериментов было обнаружено ускоренное выделение из марсианского грунта двуокиси углерода после введения в него глюкозы — пищи для микроорганизмов, что могло бы служить подтверждением существования обмена веществ в почве, т. е. наличия в ней микроорганизмов. Однако вскоре количество выделяемого газа в почве резко уменьшилось. В результате

ученые так и не получили однозначного подтверждения гипотезы о существовании на Марсе простейших форм жизни.

У Марса есть два естественных спутника — Фобос и Деймос. Оба спутника были обнаружены в августе 1877 года американским астрономом А. Холлом. Интересно, что оба спутника имеют неправильную форму. Размеры Фобоса по двум взаимно перпендикулярным направлениям 18 и 22 км (рис. 93). Соответствующие размеры Деймоса — 10 и 16 км. Фобос находится от Марса на среднем расстоянии 2,8 радиусов планеты с периодом обращения $7^{\text{h}}39^{\text{m}}$. Деймос удален на 7,0 радиусов планеты с периодом обращения $30^{\text{h}}18^{\text{m}}$.



1. Какие свойства являются общими у Марса и Земли?
2. Каков рельеф Марса?
3. На чем основаны доводы ученых о наличии на Марсе воды?
4. Что вы знаете о марсианских горах?
5. Расскажите об атмосфере Марса и ее составе.
6. Действительно ли являлись руслами рек наблюдаемые на Марсе образования?
7. Есть ли жизнь на Марсе?
8. С помощью каких автоматических станций изучался Марс?
9. Есть ли спутники у Марса? Сколько их?

§ 6. Юпитер

Самая большая из планет Солнечной системы — Юпитер — по загадочности своей природы и внутреннего строения всегда привлекала к себе внимание астрономов. Средний радиус Юпитера в 11 раз больше радиуса Земли и равен 69150 км. Эта ги-

гантская планета обращается вокруг Солнца на среднем расстоянии от него 778 млн км. Скорость обращения планеты вокруг Солнца 13 км/с, один оборот вокруг Солнца она совершает за 12 лет. Иными словами, человек, которому на Земле 60 лет, имел бы юпитерианский возраст 5 лет. В отличие от планет земной группы, экваториальная часть Юпитера совершает один оборот вокруг оси быстрее, чем на широтах севернее и южнее экватора: $T_{\text{экв}} = 9^{\text{h}}56^{\text{m}}$. Причина того, что на разных широтах вращение Юпитера происходит с разными угловыми скоростями, заключается в том, что Юпитер не является твердым телом, а состоит из жидкости и газа. Кроме того, его поверхность покрыта облаками, «плывущими» в его атмосфере.

Объем Юпитера в 1314 раз больше объема Земли. Хотя плотность вещества Юпитера в 3,5 раза меньше земной, из-за больших размеров планеты его масса превосходит земную в 318 раз. Сила притяжения Юпитера по той же причине в 2,5 раза больше силы земного притяжения. Иными словами, на Юпитере человек весом 60 кг имел бы вес более 150 кг. Эта гигантская планета при наблюдении в телескоп видна как сильно сжатое у полюсов небесное тело, имеющее разнообразные объекты на своей поверхности. Это до сих пор загадочные полосы шириной в несколько тысяч километров, которые параллельны экватору планеты (рис. 94).

Согласно сведениям, полученным в последние годы, эти полосы можно рассматривать как плотные облака его атмосферы. Они расположены вдоль параллелей планеты и симметричны относительно ее экватора. Такая структура облачности распространена до 40 северной и южной широты и в некоторых случаях содержит пятна бурого или голубоватого цвета.

К прочим загадочным особенностям планеты относится и открытое в 1878 году Большое Красное Пятно. Это огромное овальное образование размерами 35000 км по долготе и 14000 км по широте (рис. 95). Интересно, что Большое Красное Пятно, участвуя в суточном вращении планеты, меняет к тому же свое положение, сдвигаясь на несколько градусов в разных направлениях. Это говорит о том,

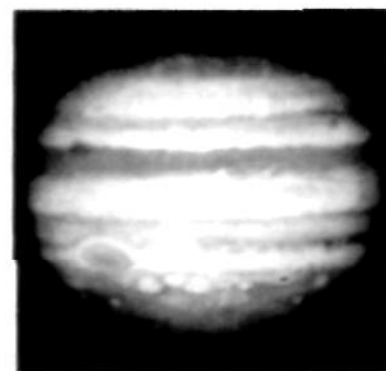


Рис. 94. Общий вид Юпитера.

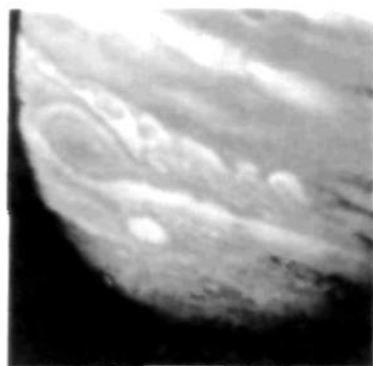


Рис. 95. Большое Красное Пятно, наблюдаемое на поверхности Юпитера.

что пятно не связано с поверхностью планеты. Русский ученый Г. Голицин выдвинул гипотезу, согласно которой Большое Красное Пятно представляет собой вихревое образование в атмосфере Юпитера. Эта гипотеза, получившая подтверждение при дальнейших наблюдениях, является достаточно правдоподобной. На снимках, полученных американскими космическими аппаратами «Пионер-10» и «Пионер-11», видно, что детали и структура Большого Красного Пятна, являясь достаточно хорошо изученными, по-прежнему продолжают оставаться загадочными. До сих пор неизвестна и природа его красного цвета.

Атмосфера Юпитера резко отличается от земной и состоит из водорода, гелия, метана и аммиака. Значительную часть атмосферы составляют водород и гелий. Согласно наблюдениям «Пионера-10», гелий составляет 26% атмосферы, что равно по массе 70 массам Земли. На долю водорода приходится 70% атмосферы, что по массе составляет 225 масс Земли. Кроме того, при анализе спектрограмм планеты удалось обнаружить в ее атмосфере в достаточных количествах ацетилен C_2H_2 и этан C_2H_6 . То, что атмосфера гигантской планеты содержит водяной пар, было большой неожиданностью, так как при температуре облачных слоев $-120 \dots -130$ С и ниже вода должна была быть в замерзшем состоянии.

Гигантская планета обладает магнитным полем, захватывающим положительно и отрицательно заряженные частицы солнечного ветра и имеющим сложную структуру. Тороидальный радиационный пояс планеты наклонен к плоскости экватора планеты под небольшим углом и имеет протяженность от 1,5 до 6 планетных радиусов. Электроны, захваченные магнитным полем, имеют энергию от 3 до 30 МэВ.

Юпитер расположен на расстоянии 5 а. е. от Солнца и поэтому получает от Солнца количество энергии в 27 раз меньшее, чем Земля. Несмотря на это, вся поверхность планеты, главным образом в радио- и инфракрасном диапазонах, излучает энергию в 2,5 раза большую, чем получает от Солнца. Одна из гипотез механизма этого излучения — гравитационное сжатие. На

основе сведений, полученных о планете, была построена математическая модель ее внутреннего строения. Согласно этой модели, высота атмосферы планеты от 2000 км до 6500 км. Если принять среднюю высоту атмосферы планеты равной 4200 км, то на поверхности планеты атмосферное давление достигает 200 тыс. атмосфер, а температура близка к 2000 К. По внешнему виду поверхность представляет собой не имеющие резких границ моря из водородогелиевой смеси в газообразной, жидкой и твердой фазах. Примерно на глубине 18000 км при давлении 1 млн атмосфер водород находится в металлическом состоянии. В самом центре планеты находится ядро, состоящее из силикатов, магниевых, железных и никелевых оксидов, находящихся в металлической фазе (рис. 96). Давление в ядре 20–100 млн атмосфер, температура 15–25 тыс. градусов.

Юпитер вместе со своими спутниками образует семейство планет. Число его спутников, включая небольшие, превосходит 50. Самые большие спутники этого семейства обнаружил в 1610 г. Г. Галилей. Большие спутники Юпитера можно разбить, в соответствии с их параметрами, на три группы. В первую группу войдут четыре спутника планеты (Ио, Европа, Ганимед и Каллисто) (рис. 97), а также обращающаяся вокруг Юпитера на расстоянии 110 тыс. км Амальтея. Самая далекая от Юпитера планета этой группы находится на расстоянии 1,8 млн км, обращающаяся вокруг него с периодом 16,7 земных суток. Наименьшая из планет этой группы Амальтея имеет диаметр 150 км, самая большая Каллис-



Рис. 96. Внутреннее строение Юпитера.

Юпитер вместе со своими спутниками образует семейство планет. Число его спутников, включая небольшие, превосходит 50. Самые большие спутники этого семейства обнаружил в 1610 г. Г. Галилей. Большие спутники Юпитера можно разбить, в соответствии с их параметрами, на три группы. В первую группу войдут четыре спутника планеты (Ио, Европа, Ганимед и Каллисто) (рис. 97), а также обращающаяся вокруг Юпитера на расстоянии 110 тыс. км Амальтея. Самая далекая от Юпитера планета этой группы находится на расстоянии 1,8 млн км, обращающаяся вокруг него с периодом 16,7 земных суток. Наименьшая из планет этой группы Амальтея имеет диаметр 150 км, самая большая Каллис-



Рис. 97. Сравнение размеров галилеевых спутников Юпитера.

то — 5300 км. Средняя плотность галилеевых спутников уменьшается по мере удаления от Юпитера от 3,2–3,6 г/см³ (для Ио) до 1,6 г/см³ (для Каллисто). Согласно сведениям, полученным от «Пионера-10», Ганимед и Ио имеют атмосферу. Температура на поверхности Ганимеда –115 С. Альbedo (отражательная способность) галилеевых спутников свидетельствует о том, что их поверхности покрыты льдом.

Спутники второй группы находятся на среднем расстоянии 12 млн км от планеты и обращаются вокруг нее за 250 земных суток. Спутники этой группы имеют относительно небольшие размеры и о них мало что известно. Число больших спутников этой группы равно 8.

Спутники третьей группы находятся на расстоянии 23 млн км от Юпитера и имеют период обращения около двух лет.

В марте 1979 года к Юпитеру на расстоянии 278 тыс. км вышла автоматическая станция «Вояджер-1», позже «Вояджер-2». Они внесли большой вклад в изучение Юпитера и

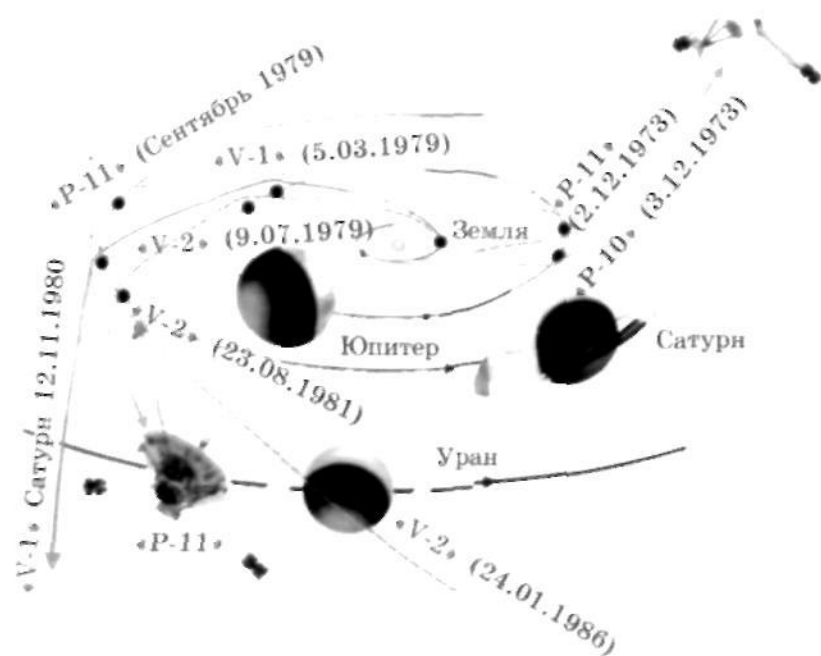


Рис. 98. Траектории МПС «Пионер-10», «Пионер-11» («P-10», «P-11») и «Вояджер-1», «Вояджер-2» («V-1», «V-2»).

его спутников (рис. 98). На снимках с «Вояджеров» можно наблюдать растянувшееся на 30 тыс. км полярное сияние планеты, подобное земному, и вспышки, сверкающие в его атмосфере наподобие молний. Кроме того, на высоте 57 тыс. км от его поверхности обнаружено кольцо шириной 8700 км и толщиной не более 30 км, похожее на кольца Сатурна. По мнению ученых, это кольцо состоит из камней, размерами от нескольких десятков до нескольких сотен метров, состоящих из скальных пород и льда.

Автоматическая станция прошла вблизи галилеева спутника Ио на расстоянии 19 тыс. км и обнаружила на его поверхности извержение вулкана (высотой 160 км), гористые образования, растянувшиеся на несколько сотен километров, и пропасти. Десятки обнаруженных на поверхности Каллисто и Ганимеда ярких пятен можно предположительно считать кратерами. Один из кратеров Каллисто окружен концентрическими кольцами гор, расстояние между которыми в отдельных местах достигает 1600 км.

Хотя сведения, полученные в результате космических исследований, многое объяснили в том, что касается природы Юпитера и его спутников, существует еще множество проблем, решение которых растянется на несколько десятилетий. Главные результаты следует ожидать от планируемых к запуску на Юпитер космических станций. Но следует заметить, что если посадка аппарата на Юпитер является очень дорогой, то посадить космическую станцию на один из его спутников будет с точки зрения затрат энергии гораздо более дешевым предприятием. Поэтому ученые намереваются организовать экспедицию на один из больших спутников планеты.



1. Что вы знаете о Юпитере?
2. Из каких газов состоит атмосфера Юпитера?
3. Расскажите о внутреннем строении Юпитера.
4. Каким образованием является Большое Красное Пятно Юпитера?
5. Какие спутники Юпитера относятся к галилеевым спутникам?
6. Какие автоматические станции исследовали планету?
7. Какие важные сведения удалось получить в результате этих экспедиций?

§ 7. Сатурн

Планета названа в честь римского бога времени и судьбы. Эта последняя из планет Солнечной системы, которая видна невооруженным глазом. Именно поэтому в течение многих лет орбита Сатурна рассматривалась как граница Солнечной системы.

Сатурн уступает по величине только Юпитеру, его диаметр 120800 км. Среднее расстояние от Солнца 9,5 а. е., т. е. Сатурн находится от Солнца на расстоянии 1427 млн км. По своей орбите планета движется со скоростью 9,6 км/с, обращаясь вокруг Солнца с периодом 29 лет 5 месяцев 16 дней. Так же, как и у Юпитера, скорость вращения Сатурна вокруг своей оси является различной на разных широтах планеты. Период вращения на экваторе составляет 10 часов 14 минут, в приполярных областях — 10 часов 28 минут.

Экваториальная плоскость планеты составляет с плоскостью ее орбиты угол $26^{\circ}45'$. У Сатурна имеется кольцо шириной 60000 км и толщиной 10–15 км. Из-за наличия этого кольца Сатурн по внешнему виду резко отличается от других планет (рис. 99). Хотя это кольцо впервые наблюдал Галилей в 1610 году, он не сумел определить истинный вид этого кольца. Причиной этому послужило то, что с одной стороны изображение колец в телескопе Галилея было не очень качественным, с другой стороны планета была распо-

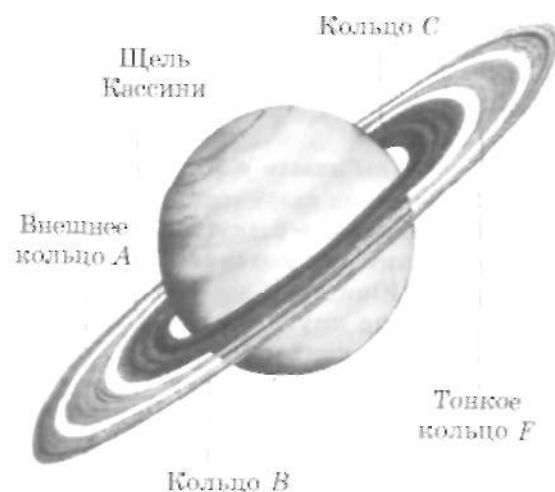


Рис. 99. Сатурн и его кольца.

ложена по отношению к Земле так, что плоскость кольца в этот период лежала относительно наблюдателя ребром. За время одного оборота Сатурна вокруг Солнца планета в таком виде видна всего два раза. После этой безуспешной попытки Галилей на протяжении полувека о кольцах Сатурна ничего не было известно. И только в 1657 году молодой астроном Христиан Гюйгенс, направив на Сатурн сконструированный им самим телескоп, обнаружил красивое плоское кольцо, концентричное телу планеты, но отстоящее от него на некотором расстоянии.

Наблюдение кольца Сатурна притягивало к себе многих ученых. Дело в том, что ни одна из наблюдавшихся ранее планет не обладала кольцами. Поэтому к изучению природы колец Сатурна одновременно приступили несколько астрономов. Среди них были итальянец Джованни Кассини, англичанин Роберт Гук, немец Иоганн Энке, американец Джорж Бонд и русский математик и астроном Софья Ковалевская.

В 1857 году известный английский физик Джеймс Максвелл теоретически доказал, что кольцо Сатурна не может быть монолитным и образовано из твердых частиц различной величины. Наблюдения, проведенные в последние десятилетия, существенно обогатили наши представления о природе колец Сатурна. Гигантский шаг в этом направлении был сделан после того, как в результате шестилетнего «путешествия» в 1979 г. на расстоянии 21400 км от Сатурна прошла американская автоматическая станция «Пионер-11». На основе наблюдений со станции удалось определить, что величина частиц кольца достигает нескольких сантиметров и в среднем составляет 1 см.

Осенью 1980 года вблизи Сатурна прошла другая американская станция «Вояджер-1». Эта станция с массой 825 кг была запущена 5 сентября 1977 года с помощью ракеты «Титан Кентавр» в направлении Сатурна. Снимки, сделанные камерами этой станции, показали, что имеются десятки, даже сотни самостоятельных колец Сатурна и что в их плоскости вокруг Сатурна обращаются, достигающие 80 км в диаметре, небольшие естественные спутники (рис. 100). Температура на поверхности планеты -180°C . В атмосфере планеты так же, как и в атмосфере Юпитера обнаружен метан CH_4 и аммиак NH_3 . В 1974 году в атмосфере планеты был обнаружен этан C_2H_6 . Планета состоит на 99 % из гелия и водорода. Атмосфера Са-

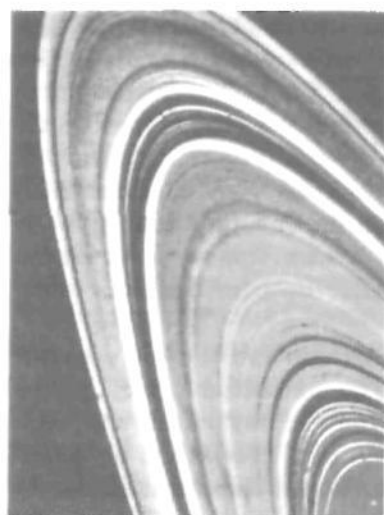


Рис. 100. Кольца Сатурна по снимкам МПС «Вояджер».

турна простирается от планеты на 1000 км, ниже ее находится слой водородно-гелиевой смеси. На глубине, равной половине радиуса планеты, температура достигает 1000 °С, давление около 3 млн атмосфер. На глубине 0,7–0,8 планетного радиуса водород находится в металлической фазе. Наконец, ниже этого слоя расположено силикатно-металлическое ядро, масса которого равна примерно девяти массам Земли (рис. 101). У Сатурна КА «Пионер-11» обнаружены магнитные поля. В отличие от Земли и Юпитера магнитная ось планеты совпадает с ее осью вращения.

Первый спутник Сатурна был обнаружен в 1655 году Гюйгенсом. В особенности большая заслуга в изучении планеты принадлежит Кассини. Спустя некоторое время после открытия Гюйгенса он обнаружил четыре спутника Сатурна.

Всего у Сатурна обнаружено до 30 спутников. Самый большой из них Титан, находящийся на втором месте по ве-



Рис. 101. Внутреннее строение Сатурна.

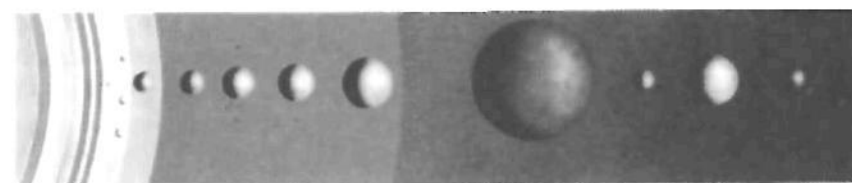


Рис. 102. Спутники Сатурна (посредине самый большой спутник Титан).

личине после спутника Юпитера Ганимеда (рис. 102). Его диаметр 4850 км. В 1949 году Дж. Койлер нашел на нем следы метана и определил, что этот спутник Сатурна обладает атмосферой. Позже было доказано, что в атмосфере Титана имеется в большом количестве водород. «Вояджер-1» в 1980 году обнаружил шесть новых спутников Сатурна.



1. Что вы знаете о Сатурне?
2. Из чего состоят кольца Сатурна?
3. Что вы знаете об атмосфере этой гигантской планеты?
4. Расскажите, как вы представляете себе внутреннее строение Сатурна.
5. Какие автоматические станции изучали Сатурн?
6. Сколько естественных спутников обращается вокруг Сатурна?
7. Что вы знаете о Титане, самом большом спутнике Сатурна?

§ 8. Уран

Планета Уран была открыта музыкантом, а впоследствии знаменитым астрономом В. Гершелем в 1781 г. Согласно сведениям об этой планете, ее наблюдали еще за 100 лет до этого, но считали слабой звездой. Орбиту планеты первым определил петербургский астроном А. И. Лексель.

Диаметр Урана 52300 км, масса в 14,6 раз больше земной, средняя плотность 1,2 г/см³. Она находится от Солнца на расстоянии 19,2 а. е.

Орбитальная скорость Урана 6,8 км/с, период обращения вокруг Солнца — 84 года. Однако вокруг своей оси планета вращается достаточно быстро, период обращения 10 ч. 49 мин.

Хотя детали поверхности увидеть не удастся, но удастся наблюдать периодические изменения яркости ее поверхности.

Экватор планеты образует угол 98° с плоскостью орбиты, направление ее вращения так же, как и у Венеры происходит в направлении, обратном направлению вращения Земли. По этой причине планета имеет особый характер смены времен года, дня и ночи. В частности, в течение 21 года из 84 лет Солнце постоянно поднимается над горизонтом. На определенном полушарии планеты лето продолжается несколько лет, но солнечное тепло планеты не достигает, так как на небе Урана Солнце имеет видимый угловой диаметр всего $2'$ дуги. В результате радионаблюдений установлено, что температура на поверхности Урана -200°C .

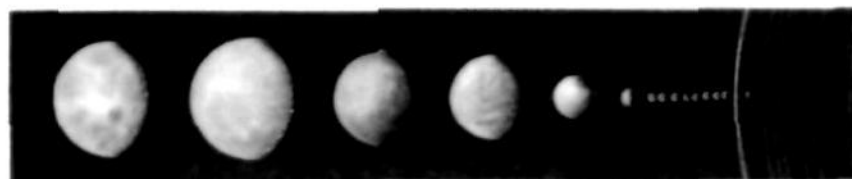
Уран, состоящий в основном из водорода и гелия, содержит также метан. Его внутреннее строение ученые представляют в соответствии с полученными сведениями так, как показано на рис. 103.

Известен 21 спутник планеты. Два самых больших из них открыты Гершелем и названы Титания и Оберон. Впервые эти имена упоминались во французском эпосе XII в. Позже, когда эти имена были использованы В. Шекспиром в комедии «Сон в летнюю ночь», они стали известными и популярными.

Через 64 года после открытия этих спутников астроном Лексель открыл еще 2 спутника планеты. Они также названы именами персонажей комедии Шекспира Умбриэль и Ариэль. Наконец, в 1948 г. Дж. Койпер открыл пятый спутник планеты, названный Мирандой по имени персонажа пьесы-сказки Шекспира «Буря». Обнаруженные в 80-х годах КА «Вояджер-2» спутники Урана также носят имена персонажей пьес Шекспира (рис. 104).



Рис. 103. Уран — планета, лежащая на боку, и ее внутреннее строение.



Оберон Титания Умбриэль Ариэль Миранда

Рис. 104. Спутники Урана — герои шекспировских пьес.

Спутники Урана обращаются вокруг него в том же направлении, что и сама планета. Плоскости их орбит близки к плоскости экватора Урана.

1. Кем и когда была открыта планета Уран?
2. Что вы знаете о планете Уран?
3. Расскажите о внутреннем строении Урана.
4. Сколько спутников имеет Уран?
5. Какими именами названы спутники Урана?

§ 9. Нептун

До 1820 г. были известны следующие семь планет Солнечной системы — Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн и Уран вместе с их спутниками.

В 1820 г. парижский астроном А. Бювар составил очень точные таблицы движений Юпитера, Сатурна и Урана.

Но спустя 10 лет Уран отклонился от предвычисленного положения на $20''$ дуги, еще через 10 лет — на $1,5'$, наконец, в 1845 г. — на $26''$. Допустить такие ошибки в наблюдениях было невозможно, и было высказано предположение, что причиной таких отклонений является притяжение неизвестной планеты.

За разрешение этой достаточно трудной математической задачи взялись независимо друг от друга двое ученых — французский математик У. Лаверье и молодой английский астроном Дж. Адамс. Завершив в 1846 г. свои вычисления, Лаверье направил в Берлинскую обсерваторию, известную своими точными звездными картами, сообщения о том, где, по его мнению, находится новая планета, и 23 сентября 1846 г., в тот же вечер по получении письма Лаверье, немецкий астроном профессор Галле обнаружил новую планету всего в $1'$ от указанного Лаверье места. Планете было присвоено имя бога морей и океанов Нептуна (римск. мифология).

Данная планета по яркости примерно в 6 раз слабее, чем самая слабая звезда, которую можно увидеть «невооруженным» глазом. Поэтому ее можно наблюдать только с помощью телескопа или бинокля, увеличение которых не менее 6-ти раз.

Нептун немного больше, чем Уран, его диаметр 50100 км. Плотность $1,6 \text{ г/см}^3$, расстояние от Солнца 30,1 а. е. Масса планеты в 17,2 раза больше массы Земли. Орбитальная скорость 5,5 км/с, период обращения вокруг Солнца 164 года 280 дней. Один оборот вокруг своей оси Нептун совершает за 15,8 ч.

Спектроскопические наблюдения указывают на наличие водорода и метана. Так как плотность на поверхности Нептуна выше плотности Юпитера и Сатурна, то было высказано также предположение, что она содержит больше тяжелых элементов (рис. 105)

В 1846 г. астроном Лассель обнаружил большой спутник Нептуна, который был назван по имени сына бога морей Посейдона (по греч. мифологии) Тритоном. Тритон является очень массивным спутником планеты и имеет диаметр до 4500 км. Тритон обращается вокруг Нептуна, находясь от него на расстоянии 383 тыс. км. Направление обращения спутника противоположно направлению осевого вращения Нептуна. Кроме того, Тритон обладает достаточно плотной атмосферой.

В 1949 г. еще один спутник Нептуна был найден Койпером и ему было дано имя древнегреческой нимфы Нереиды. Его диаметр - 300 км.

Несколько новых спутников Нептуна обнаружил «Вояджер-2» в 1989 г. (рис. 106). Общее количество спутников на сегодня 8.



Рис. 105. Внутреннее строение Нептуна согласно современным представлениям.



Рис. 106. Спутники Нептуна (посредине самый большой спутник Тритон).

1. Расскажите об истории открытия Нептуна. Почему его называют планетой, открытой на «кончике пера»?
2. Какая автоматическая станция пролетала вблизи Нептуна? Когда?
3. Как вы представляете себе внутреннее строение Нептуна?

§ 10. Плутон (планета из группы карликов)

Английский астроном Форбс, вдохновленный успехами Леверье, в 1840 г. предположил, что за Нептуном имеется еще одна планета. После сложных вычислений он определил, что планета должна находиться в созвездии Весов. Форбс провел несколько бессонных ночей, наблюдая за этим участком неба, изучал, вооружившись лупой, фотографические пластины с его изображениями, но поиски оказались безрезультатными: планету, находящуюся за Нептуном, ни Форбсу, ни Тодду, который также занялся ее поиском, найти не удалось.

В начале прошлого столетия поисками неизвестной планеты занялся астроном Р. Ловелл. Его вычисления были так трудоемки, что вычисления Леверье казались рядом с ними просто элементарными. Но на фотопластинках заданного района неба обнаружить планету не удалось и ему тоже. В 1930 г. Ловелл умер. Но уже 13 марта 1930 г. молодой астроном К. Томбо из обсерватории Ловелла нашел в точно предсказанном им месте неба искомую планету. Оказалось, что и сам Ловелл наблюдал ее в свое время, но решив, что слабо видимая звезда не может быть новой планетой, не обратил на нее должного внимания.

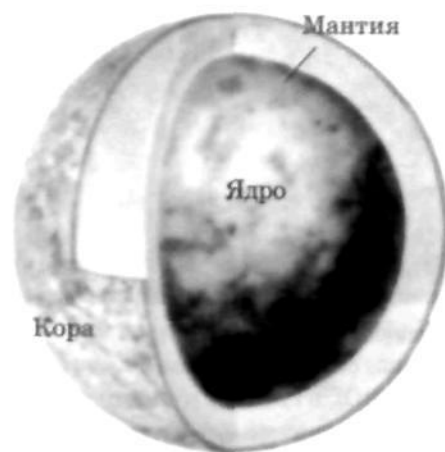


Рис. 107. Плутон и его внутреннее строение.

Плутон имеет яркость, в 4000 раз более слабую, чем самые слабые звезды, видимые невооруженным глазом. Его орбита — вытянутый эллипс, так что в перигелии Плутон подходит к Солнцу ближе, чем Нептун, но в афелии удаляется от орбиты немного меньше, чем на 3 млрд км. Планета расположена от Солнца на среднем расстоянии 5,9 млрд км (39,5 а. е.). Если на этом расстоянии наблюдать за Солнцем, оно

покажется маленькой светящейся точкой. Освещенность поверхности Плутона в 1600 раз меньше земной. Температура на поверхности планеты -220 С, физическая природа планеты изучена по этой причине недостаточно хорошо.

Астрономы из Гавайских островов Д. Толену и М. Бьюи вычислили диаметр планеты на основе новых данных. Он составляет -1123 км, предполагаемая плотность -2,0 г/см³. Яркость Плутона меняется с периодом 6,4 суток. Этот срок принят за период вращения Плутона вокруг собственной оси. Внутреннее строение планеты показано на рис. 107. Его поверхность покрыта слоем замерзшего льда толщиной 240 км, выше этого слоя имеется еще один слой, толщиной в несколько километров, состоящий из замерзшего метана.

Средняя скорость движения планеты по орбите меньше, чем скорость других планет, и составляет 4,7 км/с. Год на Плуtone продолжается 248 земных лет. Плоскость орбиты Плутона составляет достаточно большой угол с плоскостью орбиты Земли -17°.

В результате при своем движении по орбите Плутон покидает в определенное время пояс зодиакальных созвездий.

У Плутона найден всего один спутник — Харон, который находится на расстоянии 18–20 тыс. км и совершает один оборот вокруг Плутона за 6,4 суток. Предполагается, что его диаметр не превосходит 1200 км.

1. Каков средний радиус орбиты Плутона, условно ограничивающий Солнечную систему?
2. Можно ли считать точными сведения о Плуtone (относительно массы и плотности)?
3. Есть ли у Плутона спутники?

§ 11. Малые планеты (астероиды)

В 1596 г. в своей книге «Тайны космографии» Иоганн Кеплер высказал предположение, что между орбитами Марса и Юпитера должна находиться еще одна планета. Эта гипотеза получила подтверждение спустя два столетия, когда была найдена эмпирическая формула для среднего расстояния планет от Солнца. В 1772 г. виттенбергский астроном Иоганн Тициус нашел формулу, согласно которой большая полуось орбит планет следующим образом выражается в астрономических единицах:

$$a = (0,4 + 0,3 \cdot 2^n) \text{ а. е.}, \quad (*)$$

где $n = -\infty, 0, 1, 2, 3, \dots$

В таблице 3 большие полуоси орбит планет, найденные с помощью этой формулы, сравниваются с их действительными значениями.

Таблица 3

№	Планета	n	Большая полуось орбиты планеты, найденная по формуле (*) (а.е.)	Среднее расстояние планеты до Солнца (а.е.)
1	Меркурий	$-\infty$	0,4	0,4
2	Венера	0	0,7	0,7
3	Земля	1	1,0	1,0
4	Марс	2	1,6	1,52
5	?	3	2,8	-
6	Юпитер	4	5,2	5,2
7	Сатурн	5	10,0	9,5

Берлинский астроном Иоганн Боде, узнав об открытии Тициуса, перепроверил его расчеты и приложил много усилий для того, чтобы привлечь к ним внимание. После этого формула (*) получила название *правила Тициуса — Боде*. В результа-

те предположение Кеплера о планете между орбитами Марса и Юпитера получит подтверждение в случае, если неизвестная планета будет находиться от Солнца на расстоянии 2,8 а. е., что и побудило астрономов заняться ее поисками.

Последующие четырехлетние поиски не принесли положительного результата. Но в 1801 г. итальянский астроном Джузеппе Пиацци открыл планету, находившуюся от Солнца на расстоянии примерно 3 а. е. в созвездии Тельца.

Эта планета получила название Церера. 28 марта 1802 г. берлинский астроном Ольберс обнаружил при наблюдениях Цереры неподалеку от нее маленькую неизвестную ранее звездочку. В результате семейство планет Солнечной системы пополнилось еще одной малой планетой, которую назвали Палладой. Хотя Паллада находилась от Солнца на расстоянии 2,8 а. е., угол наклона плоскости ее орбиты к плоскости орбиты Земли оказался равным 34°.

2 сентября 1804 г. в созвездии Рыб астрономом Гардингом была обнаружена следующая малая планета, названная Юноной, а 29 марта 1807 г. Ольберс обнаружил планету, которую назвали Вестой.

После этого гипотеза о существовании планеты, которая когда-то находилась между Марсом и Юпитером, но была в какой-то момент разрушена вследствие столкновения с другими телами, вновь стала популярной среди астрономов. Отсюда следовало, что в области между Марсом и Юпитером должны находиться и другие обломки разрушенной планеты. Десятки астрономов-любителей принялись искать другие неизвестные малые планеты. Большинство этих попыток оказались безрезультатными. Но в 1845 г. усилия почтового работника 15-летнего Карла Генке увенчались успехом: им была обнаружена новая малая планета, которую назвали Астреей. После этого поиски новых планет стали более успешными. К 1890 г. были обнаружены 302 малые планеты.

Вначале малым планетам присваивались имена богинь римского пантеона богов, с 45-й по счету планеты им стали давать обычные женские имена, наконец, малым планетам стали присваивать имена, образованные от названий областей наук, географических пунктов и т. д.

Во время Второй мировой войны работавший на Китайской широтной станции сотрудник Крымской обсерватории

профессор Г. Неуймин одной из открытых им планете (№ 1351) в честь нашей республики дал имя «Узбекистания».

По виду малые планеты неотличимы от звезд, поэтому их называют также астероидами (звездopodobными). Интересно, что орбиты астероидов изменяются вследствие влияния на них притяжения со стороны планет Юпитера и Сатурна, поэтому необходимо все время вычислять их изменяющиеся орбиты и, наблюдая их в соответствии с этими изменениями, использовать новые координаты для более точных расчетов. Но несмотря на это «потеряны» более тысячи планет. В начале XX в. (1901–1905) из 300 открытых астероидов были потеряны 179. По той же причине за период 1936–1940 гг. из 1176 астероидов фиксированное место в списке получили только 136 планет.

Для предотвращения подобных затруднений в 1873 г. был учрежден вычислительный центр в Берлине, который до 1945 г. был центром исследования малых планет. После окончания войны его место занял основанный в 1920 г. Институт теоретической астрономии в Санкт-Петербурге. Таблицы для вычисления орбит небесных тел, которые издаются этим институтом, используются во всех обсерваториях мира. В настоящее время установлены точные координаты более 2000 астероидов.

Даже размеры самых больших астероидов очень малы по сравнению с радиусом Земли. Самые большие из них — Церера (поперечное сечение — 1000 км), Паллада (610 км), Веста (540 км) и Гигея (450 км). Только 14 астероидов имеют поперечное сечение большее 250 км, остальные гораздо меньше. У самых маленьких поперечное сечение около 1 км (Гермес). Массы астероидов очень малы, масса Цереры $1,4 \cdot 10^{21}$ кг, что в 4,4 тыс. раз меньше массы Земли, масса Гермеса — 10^{12} кг. Средняя плотность меняется от 2 г/см³ (каменные астероиды) до 7–8 г/см³ (железоникелевые). На рисунке 108 изображено взаимное расположение орбит группы астероидов.

Астероиды Икар, Гермес, Эрос и Адонис периодически приближаются к Земле. При этом их расстояния до Земли меняются от 6 млн км до 23 млн км, что представляет определенную угрозу для Земли.

Но не следует переоценивать эту опасность. Вычислением орбит этих астероидов занимается большая группа астрономов, поэтому об опасности столкновения Земли с прибли-

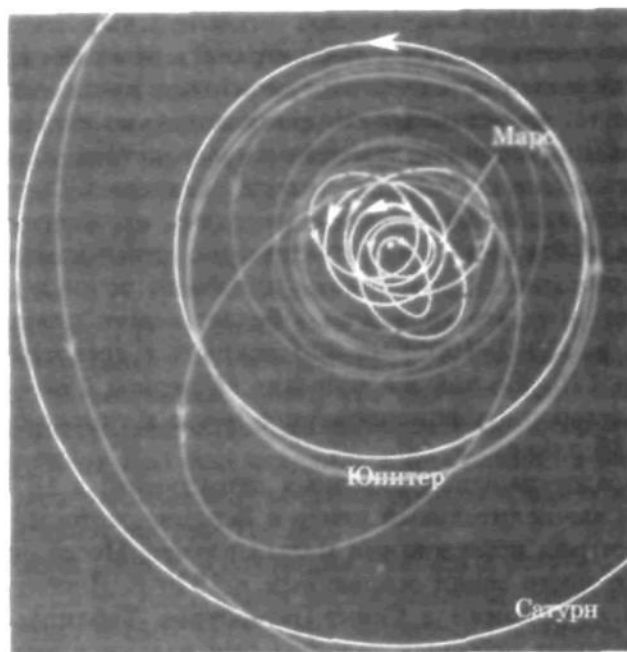


Рис. 108. Орбиты группы малых планет.

жающимся астероидом будет известно заранее. Учеными разработаны мероприятия, которые помогут избежать подобного столкновения.

1. Какие параметры планетных орбит вычисляются с помощью правила Тициуса-Боде?
2. Назовите орбиты планет, между которыми могут располагаться орбиты астероидов.
3. Кто нашел первые астероиды? Каковы их размеры?
4. Какие астероиды периодически приближаются к Земле?
5. Каково примерное число астероидов, занесенных в списки?

§ 12. Кометы («хвостатые звезды»)

Комета в переводе с греческого означает «длинноволосая». Кометы называют и «хвостатыми звездами», потому что, когда они проходят вблизи Солнца, их первоначальный вид резко меняется. Когда комета очень далека от Солнца (соответствен-

но, от Земли), она видится в виде небольшого туманного пятнышка с уплотнением в центре, *ядром*, в котором сосредоточена ее масса. Но когда она приближается к Солнцу, ее яркость возрастает, ядро окутывает *кома* — разреженное облако газов. Яркость комы возрастает по направлению к ядру.

По мере приближения к Солнцу появляется и яркий *хвост*, направленный в сторону, противоположную Солнцу (рис. 109).

Интересно, что кома, окутывающая ядро, вместе образуя *голову* кометы, имеет размеры до миллиона километров, хвост может растянуться на несколько миллионов километров. Ядро и хвост кометы отражают солнечный свет, и спектр ядра тождествен спектру Солнца.

Эта своеобразная «звезда», состоящая из сравнительно небольшой головы и длинного хвоста, во все времена считалась небесным телом, предвещающим людям грядущие беды. Даже в XII в. в широко распространенном на Западе сборнике «Истории чудес» говорилось, что кометы — посланцы разгневанного Бога. В частности, в упомянутых историях можно прочитать: «Несомненно, что комета предвещает несчастья. Каждый раз вскоре после того, как люди становятся свидетелями лунных затмений, появления комет, землетрясений, кровавых дождей и тому подобных грозных предвестников потрясений, случаются ужасные события — кровопролития, убийства, смерть великих монархов, измены, разорения, разрушение империй и королевств, голод и дороговизна, одним словом, человечество переживает пору тяжелых невзгод. Поэтому никто не должен усомниться в том, что наступают необыкновенно тяжелые времена, ибо на пороге сто-

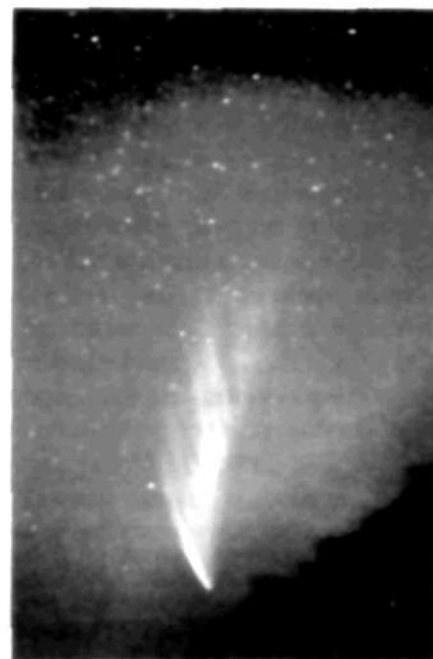


Рис. 109. Вид «хвостатой звезды» — кометы.

ят и стучатся в двери дикие посланцы неба и предвестники бед». Еще до недавних пор можно было встретить людей, считавших, что кометы предвещают несчастья.

Но наука почти до конца XVI в. относила кометы к числу атмосферных явлений. И только в 1577 г. знаменитый датский астроном *Тихо Браге* обнаружил, что кометы являются небесными телами, движущимися на фоне звезд. Спустя некоторое время, в начале XVII в. И. Кеплер и Г. Галилей высказали предположение, что «хвостатые звезды» перемещаются среди планет Солнечной системы и навсегда покидают ее. Для изучения закономерности изменения яркости кометы большое значение имеет определение ее истинной траектории. Значительных успехов добился в этом польский астроном Я. Гевелий. Он предположил, что кометы движутся по криволинейным траекториям. В 1681 г. Георг Дерфель показал, что траектории комет являются параболами (в фокусе параболы находится Солнце). Исаак Ньютон доказал, что движение комет может происходить и по параболической траектории. Ученик и друг Ньютона Эдмонд Галлей вычислил по способу Ньютона орбиты 24 комет, наблюдавшихся с 1337 по 1698 годы, и в 1705 г. опубликовал каталог об элементах их орбит. Интересно, что три из них, наблюдаемые в 1531, 1607 и 1682 гг., имели очень схожие элементы орбит. Галлей не верил, что эти совпадения случайны. Он писал: «Мысль о том, что комета, которую наблюдал в 1531 г. Аппиан, в 1607 г. Кеплер и Лонгомонтан, а в 1682 г. непосредственно я сам, является одной и той же кометой, не покидает меня. Элементы всех трех орбит этих комет совпадают, поэтому, я полагаю, что эта комета вернется в 1758 году. Если это произойдет, то не останется сомнений в том, что и другие кометы периодически возвращаются к Солнцу».

Комета, о которой говорил Галлей, прошла 12 марта 1759 г. через перигелий. К сожалению, Галлей не дождался ее появления. Самым первым обнаружил комету крестьянин — любитель астрономии Г. Палих, живший в окрестностях Дрездена. Во Франции первым наблюдал комету 21 января 1759 г. сотрудник Парижской морской обсерватории Мессье.

Таким образом, сбылось предсказание Галлея. Это, в свою очередь, подтвердило справедливость ньютоновской теории тяготения: движение кометы происходило по вытянутому эллип-

су, в фокусе которого находилось Солнце. Комета, которая оказалась объектом Солнечной системы, получила имя в честь ее первого исследователя Галлея. На рисунке 110 вы видите очередное прохождение кометы Галлея вблизи Солнца на снимке, сделанном сотрудниками Института астрономии АН РУз в 1986 г.

Одним из создателей теории движения комет был русский астроном *Ф. А. Бредихин*, который во второй половине XIX в. создал законченную механическую теорию движения комет. Согласно этой теории, существует сила, в несколько раз превосходящая силу притяжения кометы к Солнцу. В середине XIX в. английский физик Дж. Максвелл показал, что свет оказывает давление на встречающиеся на его пути препятствия. Однако убедиться на опыте в его существовании было трудно, так как величина этого давления чрезвычайно мала. В 1900 г. русский ученый Н. П. Лебедев осуществил тонкий эксперимент, доказавший существование светового давления. Световое давление в особенности ощутимо действует на молекулы газа и мелкие частицы.

Ядро кометы состоит из замерзших газов и частичек пыли, камней и металлов. Замерзшие газы — это аммиак, метан, двуокись углерода, циан и азот. При приближении кометы к Солнцу начинается бурное испарение этих газов и



Рис. 110. Прохождение кометы Галлея в 1986 г. вблизи Солнца.

образуется окутывающее ядро облако газов — кома. Хвосты комет образуются в результате действия на кому давления солнечного света и солнечного ветра. Под действием светового давления на разреженные газы и пыль комы и возникает ее гигантский хвост, направленный от Солнца.

Спектры хвостов пылевых комет, частицы которых отражают солнечный свет, совпадают со спектром Солнца. Масса кометы сосредоточена главным образом в ее ядре. Но даже у самых больших комет она не превосходит одной сто миллионной части массы Земли. Плотность вещества комы $10^{12} - 10^{13}$ г/см³. Диаметр головы кометы меняется от 25 000 км для малых и слабых по яркости комет, до 2 000 000 км для ярких комет. Хвост может достигать 150 000 000 км. Эти сведения были получены в результате полетов к комете Галлея автоматических станций «Джотто» (Великобритания), «Планета» (Япония) и «Вега» (бывший СССР). Кометы, видимые невооруженным глазом, встречаются очень редко, один раз в несколько лет. Но с помощью телескопов астрономы наблюдают их каждый год.

До 1950 года было обнаружено более 1500 комет. Из них около 400 наблюдались до появления телескопов, остальные являются телескопическими кометами.

Орбиты группы комет Солнечной системы приведены на рисунке 111.

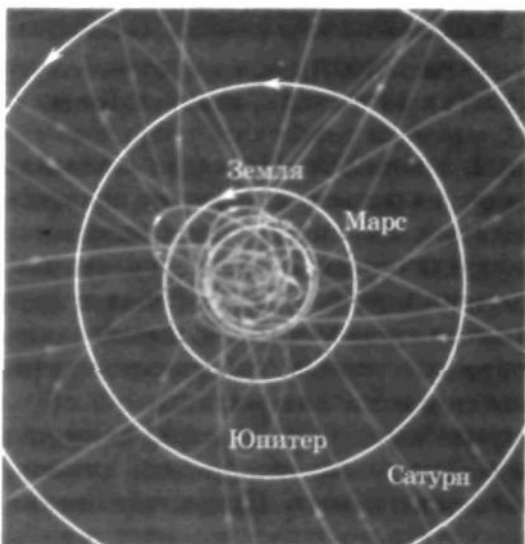


Рис. 111. Орбиты группы комет в окрестности Солнца.

Где зарождаются кометы? Голландский астроном Й. Оорт выдвинул гипотезу, согласно которой источником возникновения комет является гигантское облако кометных ядер, которое окутывает Солнечную систему и простирается на расстояние до 20 000 а. е.

Перигелии большинства комет Солнечной системы находятся на очень большом расстоянии от Солнца и Земли, поэтому такие кометы практически недоступны для наблюдения. Ядра таких комет имеют очень низкую температуру, и поэтому, не теряя составляющих ядро газов, они в течение миллиардов лет остаются неизменными. Иногда под действием звездных возмущений орбиты некоторых ядер изменяются, в результате чего такие кометы появляются вблизи Солнца. Вычисления показывают, что некоторые из них могут навсегда покинуть Солнечную систему, двигаясь по параболическим траекториям.



1. Как переводится слово «комета»?
2. Действительно ли «хвостатые звезды» являются звездами?
3. Кем и каким образом была открыта первая периодическая комета?
4. Расскажите о строении комет.
5. Почему хвосты комет направлены в сторону, противоположную Солнцу?
6. Из чего состоит их ядра?
7. Что вы знаете о комете Галлея?
8. В чем смысл изучения комет?
9. Где зарождаются кометы?

§ 13. Метеоры («падающие звезды») и метеорные «дожди»

Кто не видел на небе красивые светящиеся следы падающих звезд? Но, наверное, не каждый знает, что к звездам они никакого отношения не имеют. В действительности, это путешествующие по небу каменные частички, их размеры порядка от долей миллиметра до нескольких миллиметров, массы — несколько миллиграммов. Приближаясь к Земле, они входят в ее атмосферу со скоростью от 10 км/с до 70–80 км/с. Частицы, входящие в атмосферу с такой скоростью, разогреваются в результате ударов молекул воздуха и сгорают на высоте около

80 км. Ясно, что длина пути, пройденного в атмосфере этими частичками, или *метеорами*, зависит от их величины.

Естественно возникает вопрос, как появляются метеоры, где они зарождаются. Дело в том, что некоторые кометы, в отличие от других тел Солнечной системы, разрушаются с течением времени. Каждый раз, проходя вблизи Солнца, комета теряет часть газов и пыли своего ядра. Поэтому ясно, что спустя некоторое время у кометы не останется ни головы, ни хвоста и вся ее материя распределится по орбите. Отсутствие хвоста и комы у кометы, проходящей перигелий, — это свидетельство ее «старости». Можно вычислить, в течение какого времени комета потеряет весь газ, составляющий ее ядро. Русский астроном С. В. Орлов провел такие вычисления для кометы Галлея и оказалось, что после того, как она совершит 330 оборотов вокруг Солнца, т. е. через 25000 лет, комета лишится всего запаса газов своего ядра.

Астроном С. К. Всехсвятский на основании своих исследований показал, что при каждом возвращении кометы к Солнцу она становится менее яркой. Это тоже свидетельство того, что запасы газов ядра уменьшаются с каждым разом. Потеряв все запасы газов ядра, комета потеряет и кому, и хвост. Причиной исчезновения кометы может стать и механическое разрушение в результате столкновения кометы с другим небесным телом. Удалось наблюдать разрушение многих комет, проходящих вблизи Солнца. Например, в 1846 г., проходя около Солнца, распалась на две части комета Биэлы, так что астрономы наблюдали две близкие кометы вместо одной. Комета Биэлы наблюдалась после этого еще один раз в 1857 г., при этом расстояние между ее частями достигло 2 млн км. После этого, несмотря на все усилия, наблюдать комету не удалось. Зато в 1872 г., когда Земля приближалась к орбите кометы Биэлы, наблюдался интенсивный метеорный «дождь» (рис. 112).

В 1950 г. астроном Д. Д. Дубяго глубоко изучил роль разрушения комет в возникновении метеорных потоков. Согласно его вычислениям, облако метеорных частиц, покинувших ядро кометы под воздействием притяжения Солнца, не покидает орбиту кометы, но растягивается на огромные расстояния. И поэтому это облако, в качестве метеорного потока, можно будет наблюдать в плоскости орбиты кометы. Разрушившиеся кометы превращаются в будущем в метеорные по-

токи. Это подтверждается непосредственными наблюдениями. Для этого необходимо лишь сравнить орбиту распавшейся кометы с метеорными потоками, ежегодно возникающими в той же области небесной сферы. На основе таких наблюдений удалось установить, что усиливающиеся в августе каждого года метеорные дожди, известные под названием Персеиды, — это результат разрушения кометы «1862 III». Известная комета Галлея также является причиной возникновения двух метеорных потоков — Орионид и Акварид, наблюдаемых в мае. На рисунке 113 изображен красивый метеорный поток



Рис. 112. Метеорный «дождь».



Рис. 113. Метеорный «дождь» Дракониды, проецирующийся на созвездие Дракона.

Дракониды, ежегодно наблюдаемый 8–12 декабря. Заметим, что названия метеорных дождей происходят от названий созвездий, в которых лежат их *радианты*, т. е. точки, откуда как бы исходят метеоры. От созвездия Лиры и Льва получили свое название Лириды и Леониды, от созвездия Персея — Персеиды, от созвездия Водолея — Аквариды.



1. Имеют ли «падающие звезды» отношение к звездам?
2. Чем по существу являются эти сгорающие «звезды»?
3. Расскажите о метеорных дождях.
4. Какая существует связь между метеорными дождями и распавшимися кометами?
5. Почему метеорные дожди носят названия, происходящие от названия созвездий?

§ 14. Метеориты



Рис. 114. След болида — падающего на Землю метеорита.

Иногда блуждающие в космосе осколки небесных тел под действием земного притяжения меняют свою орбиту и проходят через земную атмосферу в виде *болидов*, ярких огненных шаров, летящих по небосводу и падающих на Землю (рис. 114). Их называют *метеоритами*.

Падение метеоритов на Землю воспринималось как дар неба землянам. Камень, найденный на месте падения, объявлялся священным. Метеорит, упавший на территорию одного из германских княжеств в 1514 г., был помещен в расположенной поблизости церкви и даже оку-

тан цепями, чтобы предотвратить его возвращение на небо. С тех пор эта церковь стала местом паломничества.

Метеориты по химическому составу делятся на три большие группы: каменные, железокремнистые и железные, но иногда состоят из льда. Истории известны случаи, когда на Землю падали метеориты, состоящие из льда. Одно из таких событий наблюдалось в Киевской области: 8 мая 1970 г. в городе Яготин с безоблачного неба на землю упал большой кусок льда, который разрушился при падении. Общая масса всех частей составила 15 кг.

В рукописях времен Карла Великого говорится о том, что с небес на Землю упал кусок льда величиной с дом.

В 1908 году в сибирскую тайгу упал огромный метеорит, споры о природе вещества которого продолжаются до сих пор. Он упал на правый берег реки Подкаменная Тунгуска в 100 км к северо-западу от селения Вановаре. При падении произошел взрыв, вызвавший сильное сотрясение Земли, зарегистрированное всеми сейсмическими станциями мира. В результате взрыва образовалась ударная волна, под действием которой были повалены деревья тайги на несколько десятков километров вокруг, небо осветилось ярким огнем, звуковые волны от взрыва были зарегистрированы практически на всей территории России. Метеорит получил название Тунгусского метеорита.

Как показывают расчеты, на Землю ежегодно падают более 500 метеоритов. Большинство из них исчезает без следа, падая в океаны и моря (около 350 метеоритов) и в необжитые места суши (более 150).

12 февраля 1947 года на Землю упал Сихоте-Алинский метеорит. Свидетелем этого события был художник Медведев. По его рассказу, болид, оставивший после себя след в виде дымной полосы, с большой скоростью направился в сторону горизонта. Затем раздался звук сильного взрыва. Экспедиции, направленные для изучения этого события, обнаружили несколько воронок в местах падения на Землю осколков этого метеорита. Диаметр воронок составлял от 60 см до 28 м, найденные в них остатки метеорита имели массу от 1 до 70 кг. Общая масса всех частей железного метеорита составила не менее 100 тонн.

Можно спросить, откуда на Землю падают эти небесные тела? Дело в том, что тысячи тысяч небесных тел различ-

ной величины и природы обращаются подобно планетам вокруг Солнца. Среди них имеются как тела с различными орбитами, так и те, что обращаются по близким орбитам. В частности, осколки разрушившейся кометы продолжают двигаться по ее орбите. Иногда движущаяся Земля оказывается недалеко от них, и тогда под воздействием притяжения Земли они изменяют свою орбиту и падают на ее поверхность. При падении метеорита на Землю он оставляет воронку, соответствующую его размерам. Глубина воронки зависит от его массы, скорости падения и твердости поверхностного слоя Земли в месте падения.

10 декабря 1871 года на рисовое поле вблизи Бандунга (Индонезия) упал метеорит массой 8 кг и углубился в землю на 1 м. 12 июля 1910 г. метеорит, упавший на Землю около местечка Сант-Михель (Финляндия), имел массу 10 кг и образовал воронку глубиной 0,5 метра. В 1948 г. рядом с городом Нортон в штате Канзас (США) на кукурузное поле упал метеорит с массой, близкой к 1 тонне, и оставил воронку глубиной 3 метра.

Хотя метеориты при вхождении в атмосферу имеют скорость, равную десяткам километров в секунду, сопротивление атмосферы тормозит их и уменьшает скорость в момент падения до 200–300 м/с. К. П. Станюкович доказал, что падение метеоритов, движущихся со скоростью до 4 км/с, обязательно сопровождается взрывом. На месте падения образуется кратер, а осколки метеорита разлетаются на несколько километров. Если скорость падения превышает 4 км/с, то энергия, выделяющаяся при падении, в несколько раз превышает энергию обычного взрывчатого вещества той же массы. Часть энергии метеорита, падающего с такой скоростью, идет на то, чтобы испарить его, а оставшаяся часть идет на образование кратера и на нагревание почвы. Масса такого большого метеорита чрезвычайно велика и иногда достигает 100 т. Именно поэтому метеориты массой более 100 т бесследно исчезают, оставляя после себя только кратер. Один из таких огромных кратеров был найден в штате Аризона (США): его диаметр 1300 м, глубина 175 м (рис. 115).

В 1871 г. группа американских ученых отправилась в экспедицию по штату Аризона и в центре пустыни обнаружила огромный кратер. В его окрестностях на расстоянии до

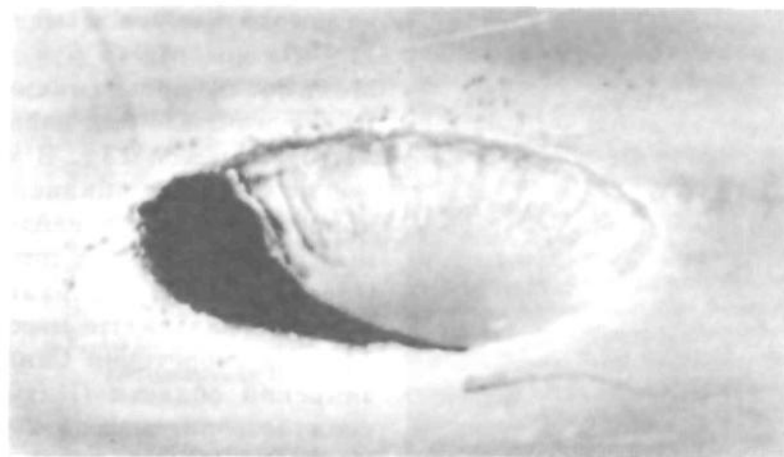


Рис. 115. Воронка, оставленная метеоритом в пустыне штата Аризона ($d = 1300$ м, $h = 175$ м).

10 км были найдены обломки скальных пород, часть почвы была превращена в пыль, а другая часть оплавилась. Общая масса найденных обломков превысила 20 т. Ученые пришли к выводу, что кратер образовался в результате взрыва. Они расспросили живущих неподалеку местных жителей, которые принадлежали одному из известных в ту пору индейских племен, и узнали от них, что зона вокруг кратера является Долиной Злого Духа и, согласно легендам, «на эту Землю спустился на своей огненной колеснице бог».

Еще один такой же огромный кратер был найден в штате Техас (США). Его диаметр 162 м, а глубина 5 м. В кратере и в его окрестностях было найдено около 1000 осколков железного метеорита. В 1931 г. в австралийской пустыне Хенберри были найдены 13 кратеров, оставленных метеоритным «дождем», самый большой из них имел диаметр 165 м и глубину 15 м. На площади, занятой этой группой кратеров, было найдено около 500 осколков метеоритов. Аборигены считают, что кратеры являются результатом бомбардировки «небесными камнями». Массы найденных камней от нескольких килограммов до полутонны (рис. 116).

В различных музеях мира имеются экспонаты, рассказывающие о десятках метеоритов, упавших на Землю. Найденный в Чихухуада (Мексика) метеорит Морито имел форму пра-

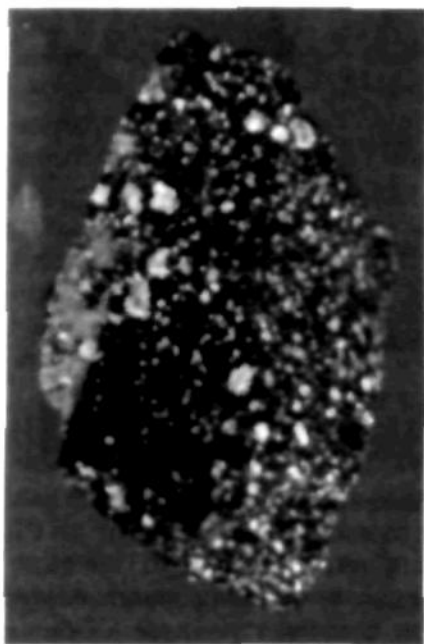


Рис. 116. Обломок метеорита, найденный в пустыне Хенберри в Австралии.

вильного конуса и массу 11 т. Он хранится в музее в Мехико. В аргентинской Кампо-дел-Сьело был найден метеорит массой 13 т. В музее истории американской природы находится найденный в 1902 г. в лесах штата Орегон (США) железный метеорит Вильяметте массой 14 т. На территории Синьдзяньской области (Китай) упал метеорит массой 20 т. Метеорит Мбози, упавший на территории Танганьики, имел длину 4 м и высоту 120 см. Его масса 25 т. Не отстает от прочих и метеорит, упавший на территории штата Синапоа (Мексика), его длина 4 м, ширина ок. 2 м, толщина 1 м 60 см и масса 27 т. Метеорит Кей-

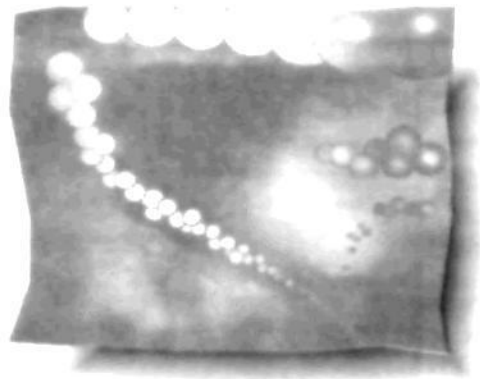
Йорк, упавший в Западной Гренландии, раскололся при падении на несколько кусков, один из них имеет массу 30 т («Палатка»), второй — 3 т («Женщина»), третий — 480 кг («Собака»). Этот метеорит был доставлен в 1897 г. в Нью-Йорк и хранится там в музее.

Из найденных на нашей планете монолитных метеоритов самый большой упал в Юго-Западной Африке. Длина и ширина этого гигантского метеорита — 3 м, масса 60 т! Согласно подсчетам ученого С. Гордона, при вхождении в атмосферу он имел массу 100 т.

Как было сказано выше, вероятность падения метеорита в обжитые человеком места очень мала. За всю историю человечества только 15 метеоритов упало на крыши домов. И только в 4 случаях люди не погибли, а были ранены или получили контузию.



1. Что такое болиды?
2. Расскажите о типах метеоритов.
3. Какие ледяные метеориты вы знаете?
4. Какова была примерная масса Сихоте-Алинского метеорита?
5. С какой скоростью падают на Землю взрывающиеся метеориты?
6. Что вы знаете о метеоритном кратере в штате Аризона?
7. Расскажите, что вам известно о Тунгусском метеорите.
8. О каких еще метеоритах вы слышали?
9. Куда упал самый тяжелый железный метеорит? Каковы его размеры и масса?



VIII ЗВЕЗДЫ

§ 1. Видимая звездная величина

Звезды — самые распространенные объекты во Вселенной. По этой причине изучение физической природы звезд считается для астрономии задачей первостепенной важности.

Для того чтобы сравнивать видимые яркости звезд (степени блеска), вводится понятие *звездной величины*. Термин звездная величина не имеет никакого отношения к истинным размерам звезд, а служит для оценки интенсивности ее потока излучения, доходящего до Земли, который составляет ничтожную часть общего излучения звезды.

Известно, что интенсивности видимого излучения светил определяются создаваемой ими *освещенностью* приемников излучения (глаза, фотопленки, фотоэлемента и т. д.). В астрономии, в отличие от физики, освещенность, создаваемая светилом, выражается не в единицах освещенности (люксах), а в относительных единицах, называемых *звездными величинами* (обозначается m). Это связано с тем, что глаз человека воспринимает не абсолютные, а относительные различия освещенности.

Необходимо отметить, что, по определению, чем больше звездная величина, тем слабее видна звезда, т. е. меньше создаваемая ею освещенность, и наоборот. Поэтому шкала звездных величин записывается в виде следующей последовательности:

$$\dots, -5^m, -4^m, -3^m, -2^m, -1^m, 0^m, 1^m, 2^m, 3^m, 4^m, 5^m, \dots$$

Это примерно соответствует тому, что предложил древнегреческий астроном Гиппарх (II в. до н. э.), который разбил все звезды, наблюдаемые невооруженным глазом, на 6 групп, от-

нося к звездам первой величины самые яркие звезды, а к звездам шестой величины — самые слабые, поместив между ними звезды промежуточных яркостей 2-й, 3-й, 4-й и 5-й величин, выбранные таким образом, чтобы при переходе от одной звездной величины к другой глаз ощущал изменение яркости.

Когда были разработаны точные фотометрические способы измерения яркости звезд, оказалось, что отношение блеска звезд первой величины к звездам шестой величины примерно равно 100. Но это отношение соответствует интервалу в 5 звездных величин, следовательно, отношение блеска звезд, отличающихся на одну звездную величину, равно $\sqrt[5]{100} = 2,512$. Действительно, если звездные величины двух звезд соответственно равны m_1 и m_2 , а их разность $m_1 - m_2 = 5$, тогда создаваемые ими освещенности соответственно равны

E_1 и E_2 , следовательно их отношение $\frac{E_1}{E_2} = 100$, т. е. будет уместно следующее равенство:

$$100 = \frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_1 - m_2} = 2,512^5,$$

откуда, логарифмируя по основанию 10, получаем

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = -(m_1 - m_2) \lg 2,512 = -0,4(m_1 - m_2).$$

Эта же формула, как легко видеть, справедлива и в общем случае. Она называется *формулой Погсона*.

Следовательно, можно сказать, что *звездная величина — это взятый со знаком минус логарифм по основанию 2,512 от освещенности, создаваемой светилом на площадке, перпендикулярной исходящим от него лучам*.

Человек с нормальным зрением видит невооруженным глазом звезды до 6-й звездной величины. Приведем звездные величины наиболее ярких звезд, планет и Солнца: $+0^m,04$ — Вега (α Лиры), $-4^m,4$ — Венера (в наибольшей элонгации), $-12^m,5$

Луна (в полнолуние), $-26^m,8$ — Солнце. Наиболее слабые звезды, которые можно увидеть в самые мощные земные телескопы имеют звездную величину $+24^m$, $+25^m$. Создаваемая ими освещенность в 10 млрд раз меньше освещенности, создаваемой звездой нулевой величины.



1. Почему звезды отнесены к числу важных объектов Вселенной?
2. Имеет ли звездная величина звезды какое-либо отношение к ее истинной величине?
3. Что понимается под яркостью звезды и создаваемой ею освещенностью?
4. Какая связь существует между видимой звездной величиной звезды и создаваемой ею освещенностью?
5. Запишите формулу Погсона и объясните ее смысл.

§ 2. Абсолютная звездная величина

Видимые звездные величины не дают возможности сравнивать светимость звезд (полную энергию излучения за единицу времени). На самом деле две звезды, имеющие одну и ту же светимость, но лежащие на различных расстояниях, не могут иметь одну и ту же видимую звездную величину. Для того чтобы решить эту проблему, астрономы условно помещают все звезды на одно и то же расстояние от Земли (или Солнца), тогда можно сравнить их действительные светимости, определив их звездные величины. В качестве такого стандартного расстояния астрономы выбирают расстояние 10 пс. Звездная величина звезды, помещенной на расстояние $10 \text{ пс} = 2 \cdot 10^6 \text{ а. е.}$, называется ее *абсолютной звездной величиной* и обозначается M . Если известна видимая звездная величина m звезды и расстояние r до нее (в пс), то ее абсолютная звездная величина может быть подсчитана по формуле:

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Вычислив косвенным образом видимую звездную величину Солнца и выразив его расстояние в парсеках ($1 \text{ а. е.} = \frac{1}{206265} \text{ пс}$) и применяя данную формулу, можно установить абсолютную звездную величину Солнца. Она будет равна $M_{\odot} = 4,8$.

Для звезды α Центавра (напомним, что буквой α обозначается самая яркая звезда созвездия) расстояние до Земли 1,33 пс, видимая звездная величина $0^m,1$. Из данной формулы находим: $M = 0,1 + 5 \lg \frac{10}{1,33} = 4,5$, что достаточно близко к M_{\odot} .



1. Можно ли сравнить светимость звезд, если известны их видимые звездные величины?
2. Что называется абсолютной звездной величиной звезды?
3. Запишите формулу, связывающую видимую и абсолютную звездные величины. Что в этой формуле выражает и в каких единицах измеряется r ?

§ 3. Цвет и температура звезд

Человек, который внимательно смотрит на звездное небо, легко заметит разницу в цветах звезд. Известно, что если нагревать железо до температуры плавления, то оно сначала приобретет темно-красный цвет, далее, если температура будет повышаться, его цвет станет темно-желтым, затем желтым и, наконец, белым.

Точно так же и цвет звезд говорит о температуре их поверхности. В частности, Солнце представляется желтой по цвету звездой, значит, температура его поверхности около 6000 К. Температура звезд темно-красного цвета 2500–3000 К, темно-желтых — 3500–4000 К, белых — около 17000–18000 К. Самые горячие звезды нашего неба — голубые звезды, их температура 25000–50000 К.

Существует несколько способов определения температуры поверхности звезд. Согласно одному из них температуру определяют по распределению энергии излучения в спектре звезды. При этом по длине волны, соответствующей максимуму энергии излучения, по закону смещения Вина находят (рис. 117):

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0,29 \text{ см} \cdot \text{град.}$$

Подобно этому, в соответствии с разницей в энергии излучения различных участков спектра звезды, астрономы определяют точный ее цвет и в соответствии с этим температуру поверхности звезды. По мере приближения цвета звезд к голубому, ее температура увеличивается. Определяемая этими методами температура звезды относится только к ее поверхности. Температуру внутри звезды находят, используя сведения о спектре звезды, ее массе, плотности и давлении внутри звезды с помощью трудоемких вычислений. Определяемая таким образом температура внутренних областей звезды находится в

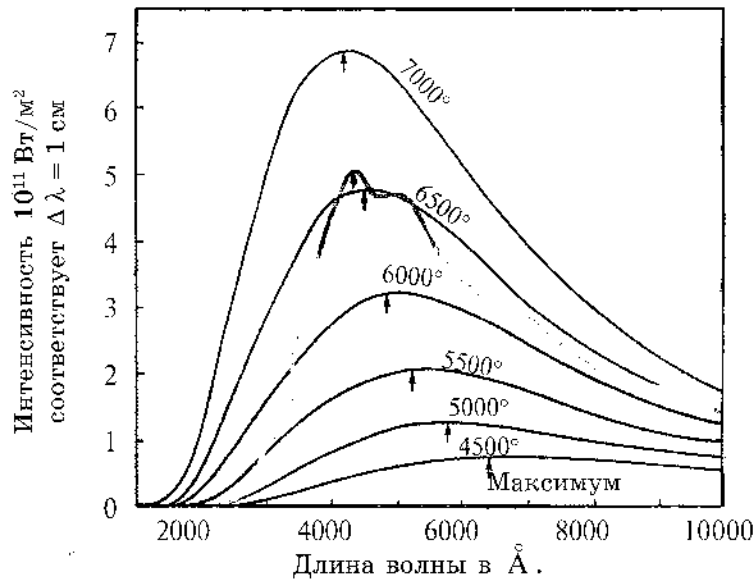


Рис. 117. Распределение энергии в спектре звезд (красная линия соответствует спектру Солнца).

пределах от нескольких миллионов до десятков миллионов градусов в ее центре. Температура в центре Солнца достигает 16 млн градусов. Температура в центре голубых звезд достигает 100 млн градусов.



1. От каких характерных величин зависит температура звезд? Объясните почему.
2. Является ли цвет звезды показателем температуры ее поверхности?
3. Как меняется цвет звезды в соответствии с ее температурой?
4. Какие вы знаете способы определения температуры звезды?
5. Назовите нижнюю и верхнюю границы изменения температуры поверхности звезды.
6. Назовите цвет и температуру на поверхности и в центре Солнца.

§ 4. Светимость звезд

Хотя большинство звезд по видимой яркости похожи друг на друга, но в действительности они резко различаются по природе. Одна из причин этого заключается в том, что они находятся на различных расстояниях от Земли, вторая — что они имеют различные мощности излучения.

Мощность излучения звезды называется ее *светимостью*, она характеризуется полной энергией излучения звезды в секунду. Светимость звезд выражается в единицах светимости Солнца. Светимость Солнца, т. е. мощность энергии, излучаемой Солнцем в 1 секунду, равна $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт. Видимая звездная величина Солнца m_{\odot} (на расстоянии 1 а. е.), после того как Солнце будет условно перенесено на расстояние r а. е., будет равна m' , где

$$m' = m_{\odot} + 5 \lg r.$$

Тогда разность между m' и m_* — видимой звездной величиной звезды, находящейся на расстоянии r а. е., выражается через отношение их энергий излучения по той же формуле, что и для освещенностей и видимых звездных величин (VIII, § 1):

$$m' - m_* = 2,5 \lg \frac{L_*}{L_{\odot}},$$

где L_* и L_{\odot} — светимости звезды и Солнца соответственно. Из этой формулы получаем соотношение между логарифмом $\frac{L_*}{L_{\odot}}$, видимой звездной величиной звезды и расстоянием до нее в а. е.:

$$\lg \frac{L_*}{L_{\odot}} = 0,4(m_{\odot} - m_* + 5 \lg r).$$

Если принять $L_{\odot} = 1$, то в единицах светимости Солнца

$$\lg L_* = 0,4(m_{\odot} - m_* + 5 \lg r).$$

Если известны абсолютные звездные величины Солнца и звезды, то $\lg L_* = 0,4(M_{\odot} - M_*)$.

В результате изучения светимости звезд было установлено,

что они заключены в пределах от 0,0001 L_{\odot} до нескольких десятков тысяч L_{\odot} .

Особое место среди очень ярких звезд занимают звезды, называемые гигантами и сверхгигантами. Основная часть гигантов имеет низкую температуру поверхности ($3,4 \cdot 10^4$ К) и, в соответствии с их цветом, они называются *красными гигантами*. Таковы, например, Альдебаран (α Тельца), Арктур (α Волопаса) и другие подобные им звезды.

Сверхгиганты, светимость которых в десятки тысяч раз превосходит светимость Солнца, имеют разный цвет: голубые сверхгиганты, как Ригель (β Ориона), красные сверхгиганты, как Антарес (α Скорпиона) и Бетельгейзе (α Ориона).

Спектры звезд с различными светимостями также отличаются друг от друга. Поэтому, зная спектры звезд, можно определить их светимость и абсолютную звездную величину M . А затем по известной из наблюдений видимой звездной величине m можно найти по формуле

$$M = m + 5 + 5 \lg \pi$$

спектральный параллакс звезды π и соответствующее ему расстояние r :

$$r = \frac{1}{\pi}$$

Метод определения расстояний до звезд таким путем называется методом *спектральных параллаксов*. В отличие от *тригонометрических параллаксов* (III, § 6; VIII, § 7), которые невозможно определить для звезд, находящихся на расстоянии больше 100 пс., спектральные параллаксы могут быть использованы для определения расстояний до тех удаленных звезд, спектры которых известны.



1. Что понимают под светимостью звезды?
2. Какая связь существует между абсолютными звездными величинами и светимостями звезд?
3. Как можно оценить светимости звезд, зная их видимые звездные величины?
4. В каких границах меняются светимости звезд в единицах светимости Солнца?
5. Связана ли светимость звезд с их температурой? Их размерами?

§ 5. Спектры и спектральные классы звезд

Важные сведения, относящиеся к звездам, можно получить при изучении их спектров. Спектры звезд являются линейчатыми спектрами поглощения, которые образуются в результате накладывания линии поглощения атомов, ионов и молекул на яркий непрерывный спектр звезды.

Спектры звезд различаются по распределению энергий излучения в непрерывном спектре в соответствии с длинами волн. Точно так же они различаются и по количеству и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, соответствующих химическим элементам, составляющим структуру их атмосфер.

Химические составы звезд, температуры которых близки между собой, различаются незначительно. Атомы водорода и гелия составляют основную долю всей массы звезды, определяя тем самым ее спектр. Степень интенсивности линий этих элементов в спектре звезды определяют физическое состояние ее атмосферы, которое во многом определяется ее температурой.

Звездные спектры условно распределены в семь спектральных классов: *O, B, A, F, G, K, M*. Спектры каждого класса в свою очередь делятся на подклассы, число которых доходит до 10. Например, спектральный класс *A* делится на подклассы *A0, A1, ..., A9* (например, Солнце по своему спектру относится к классу *G2*).

Последовательность классов отражает прежде всего различия в температуре и цвете звезд. Тогда как в спектрах относительно холодных красных звезд в большом количестве встречаются спектральные линии нейтральных атомов и даже молекулярных соединений, а в спектрах горячих голубых звездах наиболее интенсивны линии ионизированных атомов.

Класс O. Непрерывный спектр звезд этого класса характеризуется большой интенсивностью ультрафиолетовой области спектра. Наибольшей интенсивностью обладают линии ионизованного гелия и многократно ионизованных атомов углерода, кремния, азота и кислорода. Температура голубых звезд этого класса достигает 25000–30000 К.

Класс B. Наиболее интенсивны линии нейтрального гелия. Голубовато-белого цвета звезды этого класса имеют температуру около 17000 К. Типичная звезда — Спика (α Девы).

Класс А. Наиболее интенсивны в спектрах этого класса линии поглощения водорода. Цвет звезд белый, температура около 11000 К. Типичные звезды — Вега (α Лиры) и Сириус (α Большого Пса).

Класс F. Линии водорода становятся слабее, более интенсивны линии ионизованных металлов (кальция, железа, титана). Цвет звезды желтоватый, температура ~7000 К. Типичная звезда — Процион (α Малого Пса).

Класс G. Широко представлены в спектре интенсивные линии поглощения частного нейтральных и частично ионизованных атомов металлов, линии водорода не выделяются среди них. Цвет желтый, температура 6000 К. Типичная звезда — Солнце.

Класс K. Интенсивны линии поглощения атомов и молекулярных соединений металлов. Цвет красноватый, температура ~3500 К. Типичная звезда — Арктур (α Волопаса) и Альдебаран (α Тельца).

Класс M. В спектре линии поглощения молекул окиси титана и других молекулярных соединений. Цвет красный, температура 2500 К. Типичная звезда — Бетельгейзе (α Ориона).

Различия в спектрах звезд объясняются физическими свойствами, химическим составом и самое главное — различными температурами их атмосфер. С ростом температур звезд молекулы их атмосфер распадаются на атомы, при еще более высоких температурах атомы теряют электроны и ионизируются. Все это легко увидеть из анализа спектральных классов звезд.

1. Какой спектр имеет большинство звезд?
2. Что вы знаете о спектральных классах звезд?
3. Как связаны спектральные классы звезд с их температурой и цветом?
4. Каковы цвет и спектр звезд, близких по природе к Солнцу?
5. Чем различаются горячие звезды (класс O) и сравнительно холодные (класс M)?

§ 6. Диаграмма «спектр — светимость»

Связь между спектральными классами звезд и их температурой была установлена в результате наблюдений. Точно так же в результате наблюдений была установлена связь между

светимостями звезд и их абсолютными звездными величинами. В результате ученые задумались над тем, существует ли связь между видом спектра и светимостью звезд. Эту связь независимо друг от друга открыли в начале XX в. датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астрофизик Г. Рессел. Они представляли эту зависимость в виде графика, характеризующего связь между светимостью и спектральными классами. Если на оси абсцисс откладывать спектральные классы звезд, а на оси ординат — их абсолютные звездные величины, то звезды можно разбить на несколько групп в зависимости от связи между этими параметрами. Такой график был назван *диаграммой «спектр — светимость»*, или *диаграммой Герцшпрунга — Рессела*. В той же системе координат на оси, параллельной оси абсцисс, откладываются показатели цвета или эффективные температуры, на оси, параллельной оси ординат, откладываются светимости звезд (в единицах светимости Солнца, т. е. $L_{\odot} = 1$) (рис. 118).

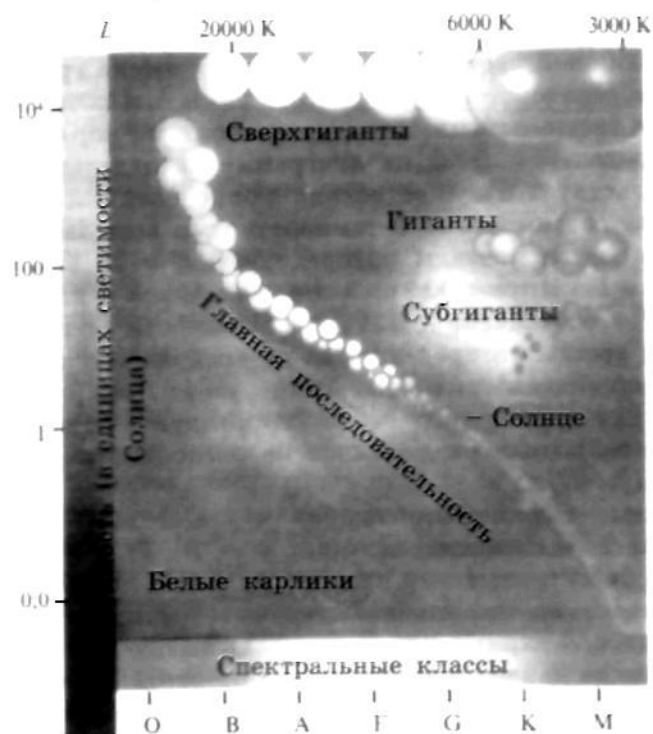


Рис. 118. Диаграмма «спектр — светимость».

Диаграмма Герцшпрунга — Рессела, на которой звезды разбиты на группы в соответствии с их физической природой, дает возможность установить связи между их температурами, светимостями, спектральными классами и абсолютными звездными величинами. Эта диаграмма играет важнейшую роль в изучении физики звезд.

Основная часть звезд расположена на этой диаграмме вдоль кривой, называемой *главной последовательностью*. В ее верхней части расположены звезды высокой светимости, принадлежащие к начальным спектральным классам, и по мере движения вдоль диаграммы вниз и вправо светимости расположенных на ней звезд (а, значит, и их температуры) убывают, а сами звезды относятся к следующему спектральному классу.

Выше главной последовательности на диаграмме расположены звезды с относительно низкой температурой, но очень большими диаметрами. Они обладают высокими светимостями и являются сверхгигантами (абсолютная звездная величина -4^m , -5^m) и гигантами (абсолютная звездная величина -0^m). В нижней части диаграммы расположена группа звезд, главным образом, спектрального класса А и с относительно низкими светимостями, которые называются *карликами*.

Распределение звезд на диаграмме на отдельные группы свидетельствует о существовании определенной зависимости между светимостями и температурами всех звезд. В соответствии с этим звезды распределяются и по *классам светимости* I—VII (рис. 119). Солнце относится к классу светимости V и обозначается G2V. В зависимости от классов светимости звезды распределяются по следующим классам:

I класс — сверхгиганты. Такие звезды занимают место на верхней части диаграммы Герцшпрунга—Ресселла и в свою очередь сами разделяются на несколько подгрупп (I_{a0} , I_a , I_{ab} и I_b);

II класс — яркие гиганты;

III класс — гиганты;

IV — субгиганты;

V класс — звезды главной последовательности;

VI класс — яркие субкарлики. Отличаются по яркости примерно на 1 звездную величину от звезд главной последовательности и в диаграмме располагаются под ними;

VII класс — белые карлики — звезды, которые получают место в нижней части диаграммы.

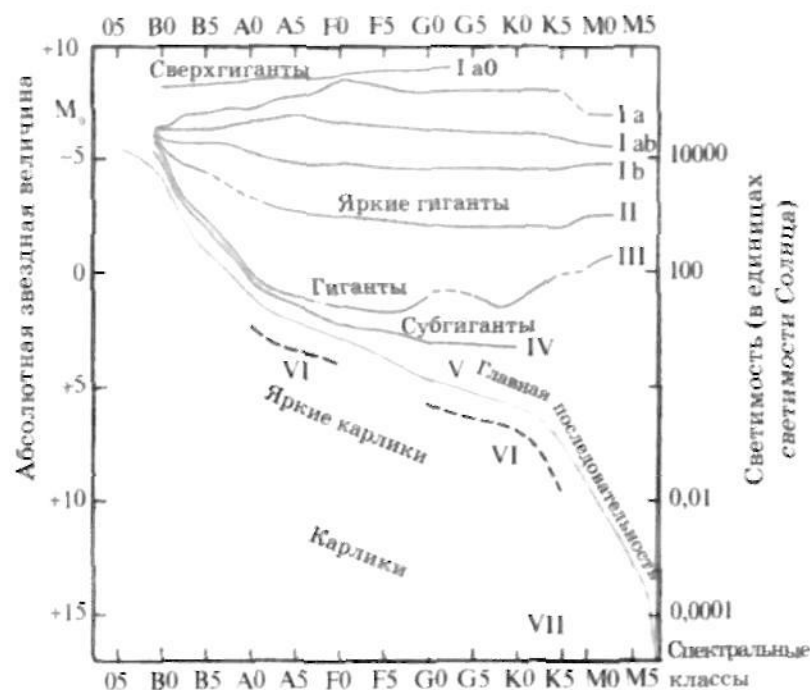


Рис. 119. Классы светимости звезд.

Отношение определенной звезды к какому-либо классу диаграммы светимости определяется по свойству ее спектра. Например, спектры сверхгигантов в отличие от спектра белых карликов, содержащих широкие спектральные линии, имеют тонкие и в то же время глубокие (высокоинтенсивные) линии. Линии определенного спектрального класса белых карликов отличаются от спектров такого же спектрального класса гигантов тем, что некоторые металлические линии в спектрах белых карликов заметно слабее таких линий в спектрах гигантов, а линии других металлов в спектрах обоих классов по интенсивности почти не отличаются.

Совместное изучение спектров спектральных классов звезд с их светимостью позволяет определить их абсолютную звездную величину. Определенная их абсолютная звездная величина в свою очередь даёт возможность вычислить расстояния звезд.

Метод определения расстояний звезд на основе эмпирической связи светимости звезд с отношением интенсивностей определенных линий в их спектрах называется *методом*

спектрального параллакса. Примечательность спектрального параллактического метода в отличие от тригонометрического метода при определении расстояний звезд заключается в том, что спектральный параллакс позволяет вычислить расстояние светил, находящихся на слишком больших расстояниях (в несколько десятков парсека) и дающих возможность получения их спектров (см. § 4, VIII раздел)



1. Какие физические параметры звезд связывает диаграмма «спектр – светимость»?
2. Какие параметры звезд откладываются на осях «спектральных классов» и «светимости» и параллельных им осях?
3. Какие особенности отличают звезды главной последовательности от гигантов и карликов?
4. Какими звездами являются гиганты и сверхгиганты?
5. Какими звездами являются карлики?
6. Какие классы светимостей вы знаете?

§ 7. Годичный параллакс и определение расстояний до звезд

Измерение расстояний до ближайших к Земле звезд основано на знании их параллактических смещений. Заметим, что ввиду малости эксцентриситета земной орбиты ($e_{\oplus} = 0,01670$) ее можно, не допуская значительной погрешности, считать окружностью с радиусом, равным 1 а. е. Тогда, смещаясь вместе с Землей по ее орбите, наблюдатель обнаружит, что выбранная звезда описывает на небесной сфере, на фоне далеких звезд, окружность (если звезда находится в направлении, перпендикулярном плоскости земной орбиты) или эллипс (если звезда находится в направлении, которое с плоскостью земной орбиты образует угол, отличный от прямого).

Угловая величина, описываемая таким образом звездой на фоне более отдаленных звезд в течение года (круг или эллипс), имеет разное значение в зависимости от расстояния звезды и называется *параллактическим смещением*. Измерение величины этой дуги дает возможность определить угол π , под которым воображаемому наблюдателю, находящемуся в центре светила, виден радиус земной орбиты, перпендикулярный к лучу зрения (на рис. 120: годичные параллаксы π_1 и π_2 для звезд M_1 и M_2). Этот угол π называется *годичным параллаксом светила* и дает

возможность определить расстояние от Земли до светила. Действительно, из прямоугольного треугольного QEM_1 или QEM_2

$$\sin \pi'' = \frac{r}{l} \text{ или } l = \frac{r}{\sin \pi''},$$

где r — радиус земной орбиты, l — расстояние светила до Солнца, π'' — годичный параллакс в секундах. Так как годичные параллаксы звезд очень малы (не бывает более $1''$), то измеряя расстояния в а. е., находим

$$l = \frac{r}{\pi \sin 1''} = \frac{1}{\pi} \frac{206265}{1} \text{ а. е.}$$

Если расстояния измеряются в парсеках, то $l = \frac{1}{\pi''}$.

Впервые с помощью подобных вычислений было определено расстояние до Веги (α Лиры). Ее годичный параллакс равен $0'',12$. Тогда расстояние до этой звезды, вычисленное впервые основателем Пулковской обсерватории Я. Струве в 1838 г., равно 8,1 пс.

Этот метод тригонометрических параллаксов позволяет вычислить расстояния относительно близких звезд ($\pi \geq 0'',01$). На рисунке 121 вы видите звезды, расположенные от Солнца на расстоянии до 10 световых лет. Для более удаленных звезд расстояния измеряются по формуле

$$\lg r = \frac{m-M}{5} + 1 \text{ (пс)},$$

где m и M — видимая и абсолютная звездная величина. Для звезды Проксима Центавра $\pi = 0'',762$, $r = 1,31$, для звезды α Центавра — $\pi = 0'',751$, $r = 1,33$ пс.



1. Что называется годичным параллаксом звезды?
2. Покажите на чертеже годичный параллакс звезды.
3. Как найти расстояние до звезды в парсеках, если известен ее годичный параллакс в секундах π'' ?

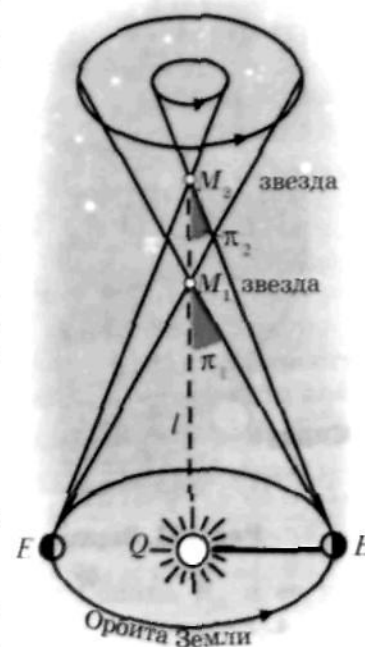


Рис. 120. Годичные параллаксы звезд.

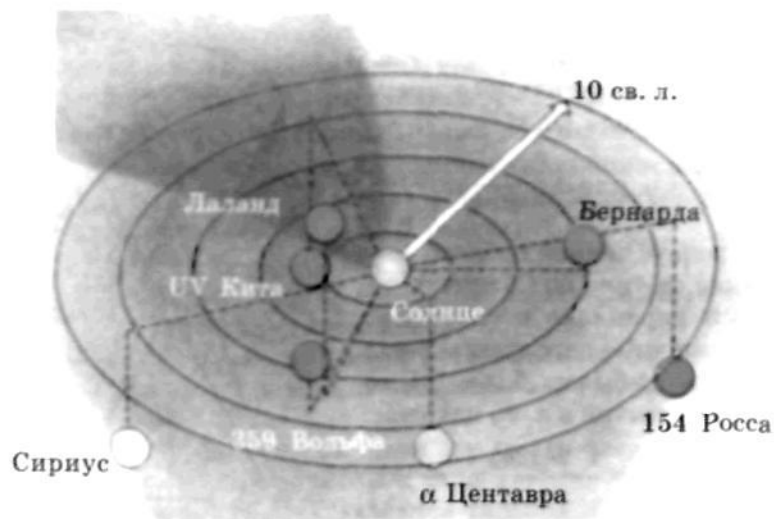


Рис. 121. Звезды, расположенные на расстоянии до 10 св. л. от Солнца.

4. Является ли метод тригонометрических параллаксов единственным методом определения расстояний до звезд?
5. Какие еще методы определения расстояний до звезд вы знаете?
7. Какой из этих методов применяется для нахождения расстояний до ближайших к Солнцу звезд?

§ 8. Определение размеров звезд

Так как звезды находятся от Земли на очень больших расстояниях, то даже в самые большие телескопы они видны в виде светящихся точек. Только для некоторых звезд можно определить их угловые размеры с помощью специальных инструментов — звездных интерферометров. Если известны видимый угловой диаметр (d^*) и расстояние (l) до звезды, то линейный диаметр (D) звезды можно найти по формуле:

$$D = l \sin d^*.$$

Однако для определения размеров большинства звезд, которые видны в виде точек, используются косвенные методы.

Известно, что если представить звезду в виде абсолютно черного тела, то полная мощность ее излучения $L_* = S_* \cdot \sigma \cdot T_*^4$,

здесь σ — постоянная Стефана–Больцмана $5,7 \cdot 10^8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$, S_* — площадь поверхности звезды, T_* — температура поверхности звезды, откуда получаем для L_* :

$$L_* = 4\pi R_*^2 \cdot \sigma T_*^4.$$

В частности, для Солнца имеем $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma T_{\odot}^4$. Разделим эти равенства почленно друг на друга:

$$\frac{L_*}{L_{\odot}} = \left(\frac{T_*}{T_{\odot}}\right)^4 \cdot \left(\frac{R_*}{R_{\odot}}\right)^2.$$

Если удастся определить светимость S_* на поверхности и температуру T_* звезды с помощью других методов, то для ее радиуса в единицах радиуса Солнца ($R_{\odot}=1$) приходим к формуле:

$$\lg R_* = \frac{1}{2} \lg \frac{L_*}{L_{\odot}} - 2 \lg \frac{T_*}{T_{\odot}}.$$

Например, связь между радиусом Солнца R_{\odot} и ее угловым радиусом ($\rho = 16'$) выражается формулой: $\text{tg } \rho = \frac{R_{\odot}}{\Delta}$,

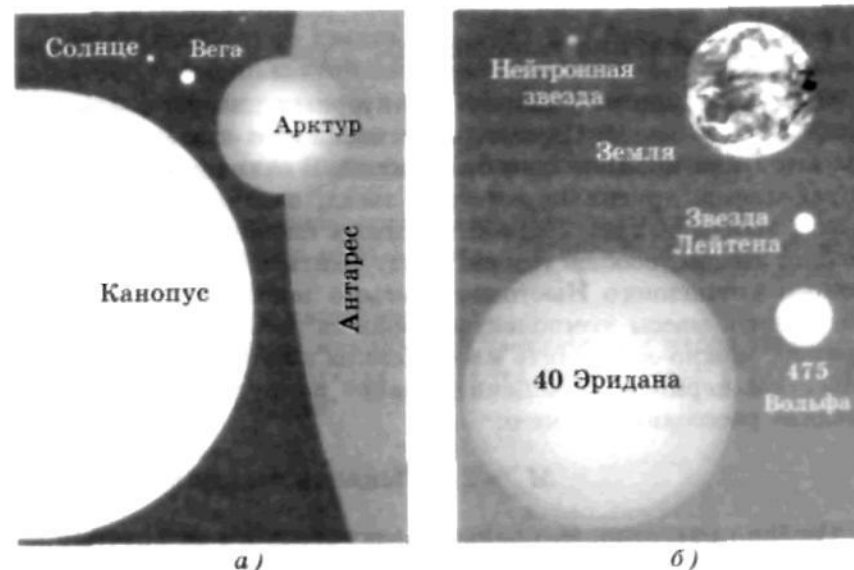


Рис. 122. Гигантские звезды в сравнении с Солнцем (а) и карликовые звезды в сравнении с Землей (б).

где $\Delta = 1,5 \cdot 10^{11}$ м — расстояние от Земли до Солнца. Тогда радиус Солнца $R_{\odot} = 1,5 \cdot 10^{11} \operatorname{tg} 16' = 7 \cdot 10^8$ м, т. е. 700 000 км.

Среди гигантов и сверхгигантов встречаются звезды, диаметр которых в тысячи раз больше диаметра Солнца. Например, у звезды VV созвездия Цефея радиус в 6 000 раз больше радиуса Солнца. У Сириуса (α Большого Пса) радиус вдвое больше радиуса Солнца, т. е. 1 400 000 км. Напротив, радиусы некоторых звезд меньше радиуса Солнца в несколько десятков раз, т. е. примерно равны радиусам планет. Так как большинство этих звезд имеют белый цвет, то они называются *белыми карликами*. На рисунке 122 приведены условные изображения красных гигантов и белых карликов для сравнения с размерами Солнца и Земли.



1. Какие вы знаете способы определения размеров звезд?
2. Какая связь существует между светимостями звезд и их радиусами?
3. Сравните радиусы гигантов и сверхгигантов с радиусом Солнца.
4. Оцените радиусы карликов по сравнению с радиусами Земли и Солнца.

§ 9. Вычисление масс звезд

Одна из наиболее важных характерных для звезды величин — это ее масса. Параметры, относящиеся к звезде, связаны в той или иной степени с ее массой. В отличие от задач по определению других параметров звезд, задача определения массы звезды является одной из самых сложных. Массу одиночной звезды, вообще говоря, сразу найти невозможно. С помощью уточненного Ньютоном третьего закона Кеплера можно оценить массы компонентов двойных звезд (III. § 10). Например, можно определить массу Солнца по этому закону, если известны периоды обращения планет вокруг Солнца и их средние расстояния от него:

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

Сегодня известно, что большинство звезд имеет спутники, но обнаружить их даже с помощью самого крупного телескопа невозможно из-за огромного до них расстояния. Поэтому для таких звезд определить их массы пока еще не удается.

Среди двойных звезд есть такие, которые называются *визуально-двойными*. В отличие от других двойных, звезды в такой системе видны раздельно, и поэтому можно проследить их движения вокруг общего центра их масс. Для таких звезд удается определить их массы по периодам обращения и соотношениям больших полуосей орбит этих звезд. При этом пользуются третьим законом Кеплера. Как показывают вычисления, массы отдельных компонентов двойных звезд составляют от $0,1M_{\odot}$ до $100M_{\odot}$. Звезды с массами от $10M_{\odot}$ до $50M_{\odot}$ встречаются относительно редко.

Даже самые маленькие звезды имеют массы, в сотни раз превосходящие массы планет Солнечной системы. Звезды с массами до $0,1M_{\odot}$ не излучают свет в видимых лучах, т. е. не могут быть названы звездами. При изучении зависимости между массами звезд и их светимостями удалось обнаружить важную закономерность. Отношение светимостей звезд пропорционально четвертой степени отношения их масс:

$$\frac{L_{*}}{L_{\odot}} = \left(\frac{M_{*}}{M_{\odot}} \right)^4.$$

Мы видим, что если звезда имеет массу в 3 раза большую массы Солнца, то ее светимость в 81 раз больше светимости Солнца. С помощью этой зависимости можно определить массы звезд, если известны их светимости. Этот способ определения масс используется для нахождения масс одиночных звезд или звезд, спутников которых наблюдать не удается.



1. Можно ли определить массу одиночной звезды?
2. Какой закон используется при определении масс двойных звезд?
3. Как найти массу Солнца?
4. Как связаны между собой светимости и массы звезд?
5. В каких пределах меняются массы звезд в единицах массы Солнца?

§ 10. Двойные звезды

На первый взгляд звезды на небосводе кажутся одиночками, но среди них динамически связанными могут оказаться и две звезды, и более двух звезд: тройные, четверные и прочие *кратные* звезды. Но все же большинство таких звезд являются

двойными. Тем не менее, визуально близкие звезды могут быть никак не связаны между собой, они лишь случайно могут оказаться расположенными в одном направлении. Такие звезды называются *оптически двойными*. Нас же будут интересовать системы двух звезд, компоненты которых физически взаимосвязаны. Такие звезды называются *физическими двойными звездами*.

Если физические двойные звезды достаточно разделены, так что их можно наблюдать как две отдельные звезды, то их называют *визуально-двойными*. Если компоненты звездной системы так близки друг к другу, что не видны по отдельности, то их двойственность может быть обнаружена либо фотометрически (по изменению блеска звезды), либо спектральными ме-

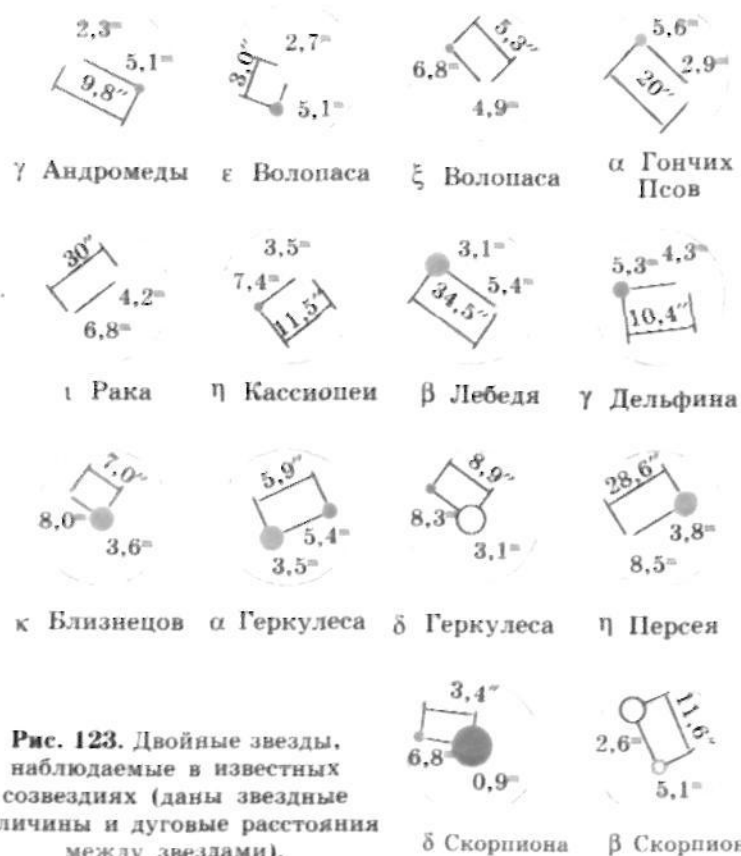


Рис. 123. Двойные звезды, наблюдаемые в известных созвездиях (даны звездные величины и дуговые расстояния между звездами).

тодами. Такие звезды называются *затменно-двойными*, или *спектрально-двойными* звездами.

В качестве примера визуально-двойной звезды можно привести звезду ζ Большой Медведицы, которая располагается второй от конца в «ручке ковша», она называется Мицар. Рядом с ней можно заметить слабую звезду, которая называется Алькор (в переводе с арабского «всадник»). Эту пару звезд можно назвать визуально-двойной. Они удалены друг от друга на 11'. Многократно упоминавшаяся нами одна из ближайших к Земле звезд α Центавра также является двойной. В обыкновенный бинокль можно увидеть много двойных звезд (рис. 123). На рисунке 124 приведена орбита представителя визуально-двойной звезды ζ Большой Медведицы и ее спутника.

Типичным представителем затменно-двойной звезды является звезда Алголь (β Персея), что в переводе означает «Глаз дьявола» (рис. 125). Плоскости орбит звезд этой системы лежат по лучу зрения, и когда они обращаются вокруг общего центра масс, то попеременно затмевают одна другую. В результате можно заметить, что ее блеск меняется с периодом ~ 3 суток, что свидетельствует о том, что она является затменно-двойной звездой.

Наконец, спектрально-двойные звезды, имея каждая свой собственный спектр, будут иметь спектр, образованный в ре-

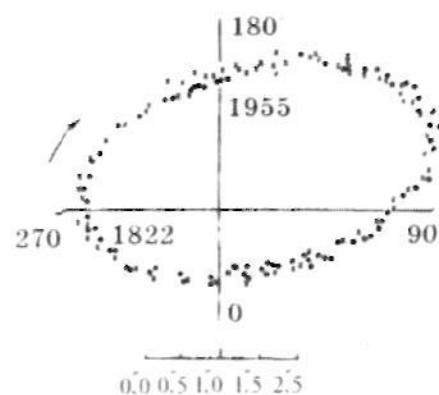


Рис. 124. Орбита визуально-двойной звезды (ζ Большой Медведицы).

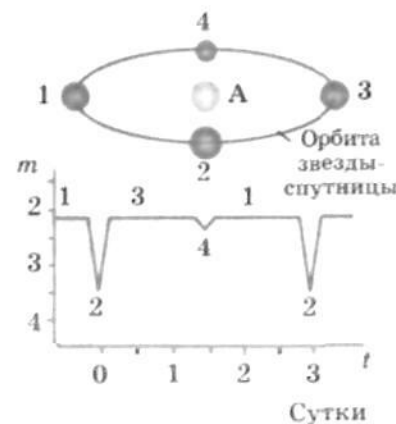


Рис. 125. Затменно-двойная звезда (Алголь — β Персея).

зультате наложения спектров компонент, что приведет к раздвоению некоторых спектральных линий. Иными словами, в спектре двойной звезды будет периодически наблюдаться смещение раздвоенных спектральных линий относительно друг друга в соответствии с периодом обращения пары.

Для того чтобы определить, является ли наблюдаемая двойная действительно физической двойной звездой или она оптически двойная звезда, требуются наблюдения в течение многих лет. В результате наблюдений можно установить орбитальное движение звезд относительно друг друга: они имеют почти одинаковые траектории, т. е. эллипсы с одинаковым эксцентриситетом. В настоящее время число двойных звезд, природа двойственности которых установлена различными методами, достигает десятков тысяч. Примерно у 10% этих звезд установлены относительные орбиты (относительно главной звезды).

Компоненты двойной звезды движутся в соответствии с законами Кеплера вокруг их общего центра масс по эллиптическим орбитам. Интересно отметить, что эксцентриситеты их орбит примерно одинаковы. Большая полуось орбиты спутника звезды относительно главной складывается из больших полуосей орбит звезд, составляющих двойную звезду.

Если в этом случае удастся определить отношение больших полуосей орбит компонента системы, то удастся определить и отношение их масс. Точно так же, зная большую полуось спутника главной звезды, можно по отдельности, с помощью уточненного закона Кеплера, определить их массы. По этой причине особенно важно изучение двойных звезд. Это позволяет получить знания, относящиеся к эволюции звезд: знание массы звезды позволяет сделать определенные выводы о ее строении и атмосфере, о ее дальнейшей судьбе.



1. В чем разница между истинно двойными и оптически двойными звездами?
2. Какие типы физических двойных звезд вы знаете?
3. Какие двойные звезды называются визуально-двойными?
4. Какие двойные звезды называются затменно-двойными? В чем причина периодичности изменения блеска таких звезд?
5. По каким признакам можно установить двойственность спектрально-двойной звезды?
6. Вокруг какой точки обращаются компоненты двойной звезды?

§ 11. Физические переменные звезды

Физическими переменными звездами называются звезды, которые меняют свою светимость в отличие от затменно-двойных звезд. Это изменение происходит в результате физических процессов, происходящих в недрах звезд. Физические переменные звезды по характеру изменения их блеска разбиваются на пульсирующие и эруптивные звезды.

Пульсирующие переменные звезды. Они характеризуются равномерным изменением их светимости. Изменение блеска этого типа переменных звезд происходит благодаря пульсации их атмосфер, т. е. периодическому изменению величины их радиусов. При увеличении размеров их радиусов растут их светимости и температуры, достигая максимума. Затем процесс расширения звезды сменяется сжатием, в результате чего падают их светимость и температура. В зависимости от длины периода между максимумами их температуры и светимости пульсирующие переменные звезды разбиваются на цефеиды и звезды типа RR Лиры.

Цефеидами по имени типичного представителя этого типа переменных звезд звезды δ Цефея называются звезды, кривая блеска которых имеет особую форму, пример которой приведен на рисунке 126.

Изменение их видимой звездной величины в пределах от $0^m,1$ до $2^m,0$ происходит с периодичностью от нескольких суток до нескольких десятков суток.

В максимуме светимости цефеиды принадлежат к спектральному классу F, в минимуме светимости — спектральному классу G. Такое изменение светимости соответствует изменению их температур в среднем на 1500 К. Линии поглощения, наблюдаемые в спектрах цефеид, в зависимости от фазы изменения, сдвигаются соответственно в красную или фиолетовую области спектра. Такие сдвиги спектральных линий, наблюдаемые у цефеид, соответствуют минимуму светимости при максимальном сдвиге в красную область спектра и максимуму светимости при максимальном сдвиге в фиолетовую область спектра. Между периодами и светимостями цефеид существует линейная зависимость: чем меньше видимая звездная величина цефеиды, тем больше период изменения ее светимости. Так как цефеиды классов F и G относятся к гигантам и сверхгигантам, их можно наблюдать и вне пределов нашей Галактики.

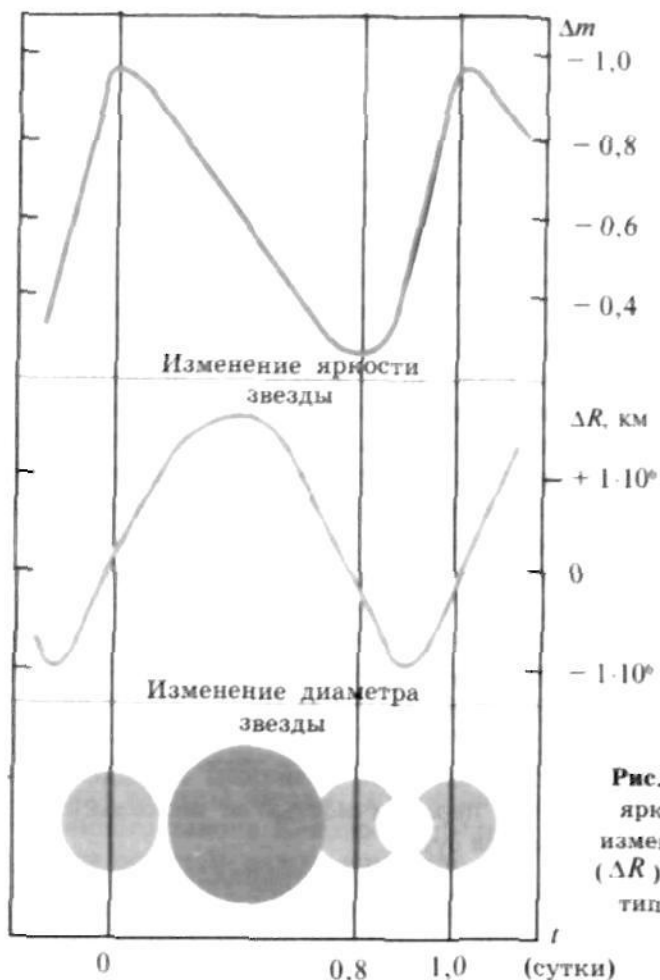


Рис. 126. Кривые яркости (Δm) и изменения радиуса (ΔR) цефеид (звезд типа δ Цефея).

Переменные звезды типа RR Лиры принадлежат к гигантам спектрального класса А, меняя свою звездную величину в пределах $1^m - 2^m$. Их спектральные классы ограничиваются классами А и F. Яркости этих звезд изменяются с периодом от 0,05 суток до 1,2 суток. Причем, как у цефеид, период изменения блеска каждой звезды является постоянным с большой степенью точности (рис. 127).

Звезда β Цефея или звезда β Большого Пса напоминают по характеру изменения блеска звезду типа RR Лиры, но отличаются от нее очень малым изменением блеска. Они являются

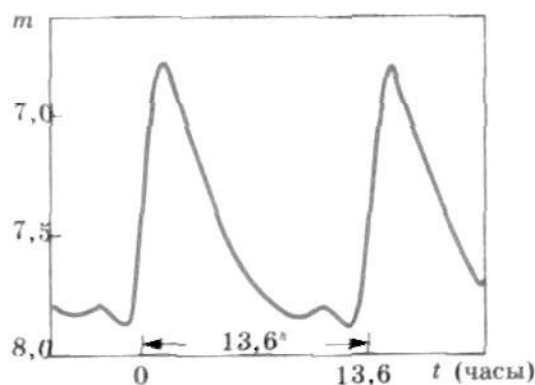


Рис. 127. Кривая изменения яркости RR Лиры.

короткопериодическими звездами с периодом от 3 до 6 часов. Как и у цефеид, существует зависимость между светимостью и периодом изменения блеска.

Кроме переменных звезд этих двух основных типов, существуют долгопериодические переменные звезды.

Звезды типа RV Тельца сильно отличаются по периоду изменения светимости от других типов физических переменных звезд. Их период меняется в пределах от 30 до 150 суток, светимость меняется в интервале до 3^m . Звезды этого типа относятся к спектральным классам от К до G.

Звезды типа α (омикрон), или Миры, Кита являются долгопериодическими переменными звездами, кривая блеска которых меняется с периодичностью от 80 до 1000 и более суток. Амплитуда изменения яркости достигает $5,5^m$. В спектрах этих звезд присутствуют эмиссионные линии водорода (в максимуме яркости) или металлов (в минимуме яркости).

Заметим, что переменные звезды, включая затменно-двойные, обозначались, в случае, если они не обозначены буквами греческого алфавита, буквами R, S, T, ..., а начиная с 335-го — буквой V. Например RR Лиры, T Лисички, α Кита, β Персея.

1. Какие физические параметры периодически изменяются у физических переменных звезд?
2. Какие типы переменных звезд вы знаете?
3. Какие пульсирующие звезды относятся к цефеидам?
4. В чем заключаются характерные особенности этого типа переменных звезд?
5. В чем заключается различие между переменными звездами типа RR Лиры и цефеидами?

§ 12. Эруптивные переменные звезды

Эруптивными переменными звездами называются звезды, изменение блеска которых происходит в результате всевозможных выбросов вещества звезды (эрупций). Типичные представители эруптивных переменных звезд — новые и сверхновые звезды.

Новые звезды — это эруптивные переменные звезды, но название «новые» не означает, что это вновь появившиеся звезды, а является условным названием, отражающим только определенную стадию переменности звезд.

Звезды этого типа характеризуются тем, что они внезапно и резко вспыхивают, уменьшая свою видимую звездную величину на $10^m - 13^m$. Следовательно, увеличивают свою светимость в десятки и сотни тысяч раз. В среднем абсолютная звездная величина в максимуме достигает $8^m,5$ и звезды этого типа становятся похожими в максимуме вспышки на сверхгиганты типа А-Ф.

Кривые блеска новых звезд характеризуются некоторыми особенностями (рис. 128). Очень быстро, в течение 2-3 суток происходит резкое увеличение светимости. Незадолго до максимума она несколько замедляется, затем, после прохождения через максимум, происходит уменьшение светимости в течение нескольких лет. Светимость плавно меняется на первые три звездные величины, уменьшение на последующие три звездные величины происходит в течение переходной стадии. При этом возможны колебания светимости, характеризующиеся резким



Рис. 128. Схема кривой яркости вспышки новой звезды.

падением светимости с последующим возвращением к прежнему значению. В конце концов звезда приобретает ту же светимость, что и до вспышки.

До сих пор нет ясности в механизме происхождения звездных вспышек. Согласно одной из гипотез, вспышка звезды может явиться результатом внутренних физических процессов. Согласно другим гипотезам, она объясняется воздействием внешних факторов.

Причиной взрыва новой звезды является, возможно, обмен вещества между компонентами тесной двойной системы звезд. Например, если вещество основной звезды, богатое водородом, попадет на поверхность ее спутника — карликовой звезды, то возможно возникновение термоядерной реакции, в результате которой выделяется количество энергии $10^{38} - 10^{39}$ Дж, равносильное суммарному излучению Солнца в течение нескольких десятков тысяч лет.

При этом общая структура звезды не меняется, так как выброс вещества звезды — результат отрыва от нее оболочки с массой $10^4 - 10^5 M_{\odot}$ со скоростью до 1500–2000 км/с. В результате вокруг звезды образуется газовая туманность. Действительно, подобные туманности можно наблюдать рядом с ближайшими к Солнцу новыми звездами. На сегодняшний день известно около 300 вспышек новых звезд, около 150 из них наблюдались в нашей Галактике, а около 100 — в соседней галактике Андромеда.

Сверхновые звезды — эруптивные переменные звезды, светимость которых в результате вспышки резко увеличивается. За несколько дней светимость возрастает в десятки миллионов раз. В максимуме яркость звезды достигает яркости всей галактики, в которой она находится или даже превосходит ее в 3–4 раза. В максимуме яркости ее абсолютная звездная величина достигает $-18^m \dots -19^m$, а иногда даже -20^m . Максимум своей яркости сверхновая звезда достигает за 2–3 недели, а затем в течение нескольких месяцев ее яркость уменьшается в 25–30 раз. Во время вспышки сверхновой выделяется количество энергии, составляющее $10^{41} - 10^{42}$ Дж.

Сверхновые звезды наблюдаются 1–2 раза в течение 100 лет в определенных галактиках. Из истории астрономии известно, что в нашей Галактике удалось наблюдать несколько вспышек сверхновых звезд. Особенно замечательной была вспышка сверхновой в созвездии Тельца, которую в 1054 году наблюдали китайские и японские астрономы. Через несколько дней

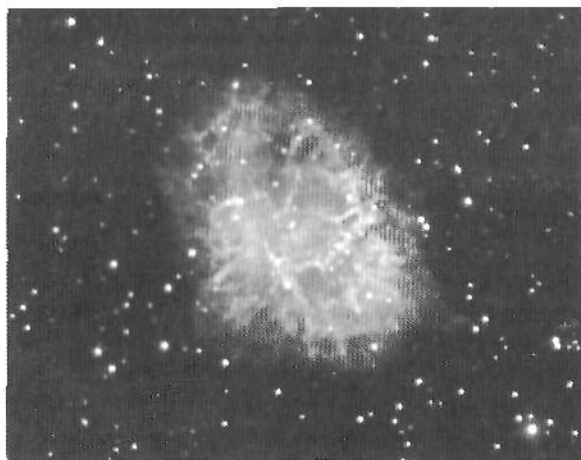


Рис. 129. Крабовидная туманность в созвездии Тельца — остаток взрыва сверхновой звезды в 1054 г.

после взрыва эту звезду, которая была ярче Венеры, можно было наблюдать даже днем. Во время вспышки такие звезды теряют количество вещества от $0,1$ до $1,0 M_{\odot}$, извергая его в межзвездное пространство со скоростью 6000 км/с. Даже спустя почти 1000 лет можно по-прежнему определить в образовавшейся после взрыва туманности скорость расширения, достигающую 1000 км/с. Извергнутая в результате взрыва масса газа образовала гигантскую газовую туманность. Такая газовая туманность, возникшая в созвездии Тельца, известна под названием Крабовидной туманности (рис. 129). Вспышку другой сверхновой звезды в созвездии Кассиопеи наблюдал в 1572 г. Тихо Браге. В 1604 году вспышку сверхновой в созвездии Змееносца наблюдал И. Кеплер. Центральная часть звезды, взрыв которой можно было наблюдать в виде вспышки сверхновой, резко сжимается после взрыва, и плотность ее вещества достигает плотности атомного ядра (10^{14} г/см³). При такой плотности атомы ядра превращаются в результате слияния протонов и электронов в нейтроны, а самая центральная часть звезды в так называемую *нейтронную звезду*. Хотя механизм вспышки сверхновой по-прежнему до конца не ясен, можно утверждать, что такую стадию эволюции испытывают в конце своей жизни звезды с массой, равной $2-3 M_{\odot}$ и больше.



1. Какие переменные звезды называются эруптивными переменными звездами?
2. Как происходит вспышка новой звезды? Действительно ли они являются новыми звездами?
3. Чем сверхновые звезды отличаются от новых звезд?
4. Что известно о наблюдениях сверхновых звезд в нашей Галактике?
5. К каким небесным объектам относятся остатки сверхновых звезд?
6. Знаете ли вы, в результате вспышки какой сверхновой звезды появилась Крабовидная туманность в Тельце?



IX

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 1. Открытие галактик. Наша Галактика

В начале XX века господствующей была идея, что Вселенная ограничена единственной звездной системой — нашей Галактикой. Позже ученые пришли к выводу, что и за пределами Галактики существует много больших звездных систем. Астрономы, которые полагали, что эти далекие звездные системы должны иметь форму туманностей, прежде всего искали их в различных уголках неба.

При этом было обнаружено, что большинство туманностей не имеют в своем составе звезд, и эмиссионные линии их спектров свидетельствуют о том, что эти туманности являются исключительно межзвездными диффузными газовыми туманностями. Но, с другой стороны, ученые нашли десятки больших скоплений звезд, спектры которых были похожи на звездные спектры. Типичным представителем таких скоплений была Туманность Андромеды.

Необходимо было определить, является ли эта туманность, расположенная в созвездии Андромеды, простой газовой туманностью, расположенной на границе Галактики, или самостоятельной галактикой, находящейся за ее пределами. Эту загадку разрешил в 20-х годах XX века американский астроном Э. Хаббл. Наблюдая Туманность Андромеды в рефлектор с диаметром зеркала в 2,5 м, он обнаружил в ней некоторые звезды, в частности цефеиды. Благодаря этому удалось определить расстояние до туманности, используя зависимость между периодом цефеиды и ее светимостью. Это расстояние оказалось настолько большим, что ученый при-

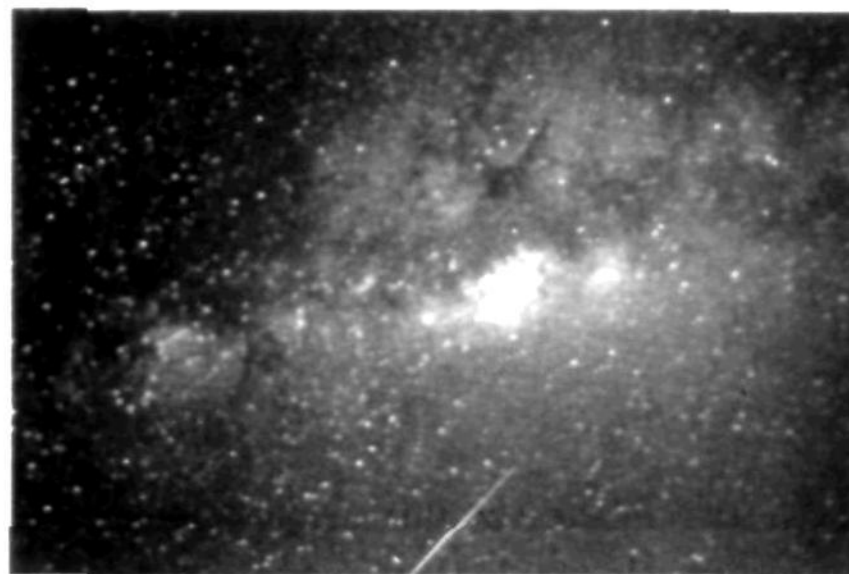


Рис. 130. «Пояс» нашей Галактики — Млечный Путь.

шел к выводу, что эта туманность является независимой звездной системой — галактикой, не имеющей никакого отношения к нашей Галактике.

Остановимся теперь на звездной системе — нашей Галактике, в пределах которой находится Солнечная система.

Если безоблачной темной ночью посмотреть на небо, то можно увидеть протянувшийся через весь небосвод яркий «пояс» звезд, про который нам с детства говорили, что это Млечный Путь. Действительно, это часть нашей Галактики, в которой звезды расположены очень плотно (рис. 130). Она образует с небесным экватором угол 62° . Если наблюдать звездное небо вдоль Млечного Пути, то можно заметить, что ширина этого пояса звезд будет различной. Если рассматривать Млечный Путь в обыкновенный полевой бинокль или слабый телескоп, мы увидим, что он очень плотно заполнен звездами, хотя в некоторых его участках звезд почти не видно. Причина этого заключается в том, что в этой части Млечного Пути расположены облака космической пыли, которые полностью поглощают излучение звезд, находящихся

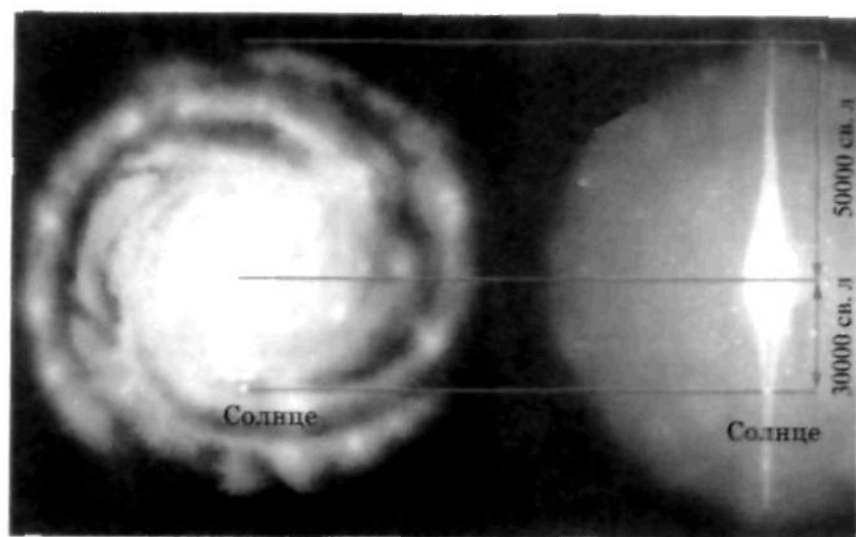


Рис. 131. Вид нашей Галактики сверху и сбоку.

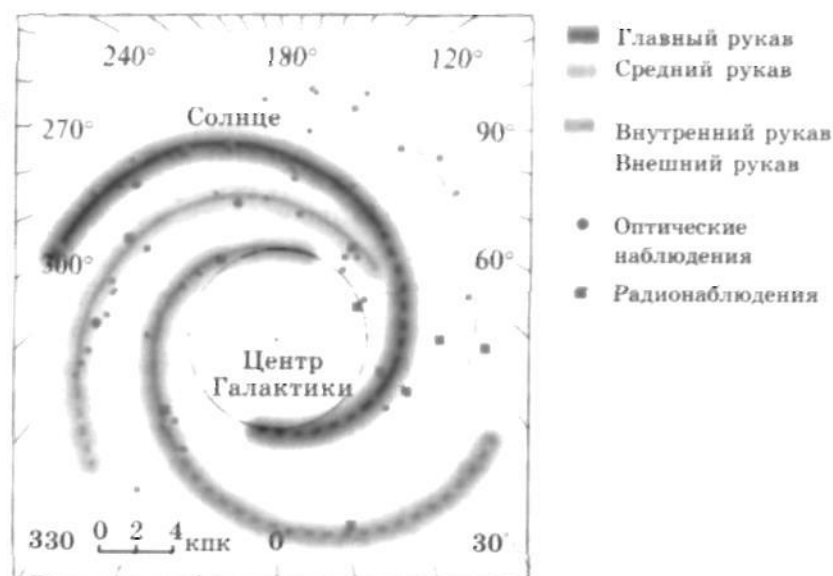


Рис. 132. Спиральные рукава нашей Галактики (вид сверху).

за ними. Все звезды, видимые на небосводе, входят в состав нашей Галактики.

Так как наше Солнце является членом этой гигантской системы, мы называем ее нашей Галактикой. Основная часть звезд Галактики сосредоточена в скоплении звезд, имеющем форму двояковыпуклой линзы. Диаметр этой части нашей Галактики немного меньше 100000 световых лет, но ее толщина равна 7000 световых лет и в ней сосредоточена основная масса Галактики. Солнечная система расположена от центра Галактики на расстоянии, равном $2/3$ ее радиуса (т. е. 33000 св. л.) (рис. 131 и 132).

Если посмотреть на диск Галактики в направлении, перпендикулярном его плоскости, то можно обнаружить расходящиеся от ее центра спиральные рукава Галактики, расположенные вдоль ее плоскости и напоминающие по своему внешнему виду часовую маятниковую пружину. Если смотреть на центральное ядро Галактики со стороны Солнечной системы, то можно заметить, что оно проецируется на созвездие Стрельца.

Согласно расчетам, число звезд в Галактике близко к 150 миллиардам. Звезды составляют основную часть Галактики. Но это не значит, что Галактика состоит только из звезд. Помимо звезд в нее входят кратные звезды, группы звезд и звездные скопления, межзвездные газопылевые облака и туманности, молекулярные облака, космические лучи и т. д. В результате специальных исследований установлено, что это гигантское скопление звезд, в частности, газопылевые туманности, обращающиеся вокруг центра Галактики. Все звезды, в частности и Солнце вместе с окружающими его планетами, обращаются вокруг центра Галактики в плоскости, близкой к плоскости Млечного Пути (она называется экваториальной плоскостью нашей Галактики). При этом скорости движения звезд различны в зависимости от их расстояния до ядра Галактики.

Скорости вращения Солнца и ближайших к нему звезд составляют 240 км/с, период обращения около 200 миллионов лет.

1. Кем и когда были открыты внешние галактики?
2. С помощью какого метода были открыты внешние галактики?
3. К какой части Галактики относится Млечный Путь?
4. Сколько звезд в Галактике?
5. Что вы знаете о ее размерах?
6. Какой вам представляется Галактика по внешнему виду?
7. В каком месте Галактики расположена Солнечная система?
8. Какие еще крупные объекты, кроме звезд, имеются в нашей Галактике?

§ 2. Шаровые и рассеянные звездные скопления

В Галактике имеются не только одиночные звезды, но и динамически зависимые пары звезд, кратные звезды и, наконец, скопления, состоящие из сотен и тысяч звезд. Группы, содержащие от 10 до нескольких тысяч звезд, связанных между собой динамическими зависимостями, называются *звездными скоплениями*.

По внешнему виду различают рассеянные и шаровые звездные скопления. *Рассеянные скопления* заключают в себе от нескольких десятков до нескольких тысяч звезд. *Шаровые скопления* — от десятков тысяч до сотен тысяч звезд.

В Галактике имеется около 800 рассеянных звездных скоплений с диаметрами от 1,5 пс до 20 пс. К хорошо известным рассеянным скоплениям относятся скопления Плеяды и Гиады в созвездии Тельца. Плеяды находятся на расстоянии 130 пс от Солнца (рис. 133), Гиады — на расстоянии около 40 пс.

Шаровые скопления отличаются от рассеянных своим химическим составом. В частности, если тяжелые элементы в спектрах рассеянных скоплений составляют 1–4%, то в шаровых скоплениях — всего 0,01–0,1%. Это говорит о том, что возникновение рассеянных и шаровых скоплений происходило в различных условиях. Поэтому шаровые скопления, согласно одной из гипотез, представляют собой протогалактические газовые туманности, бедные тяжелыми элементами и

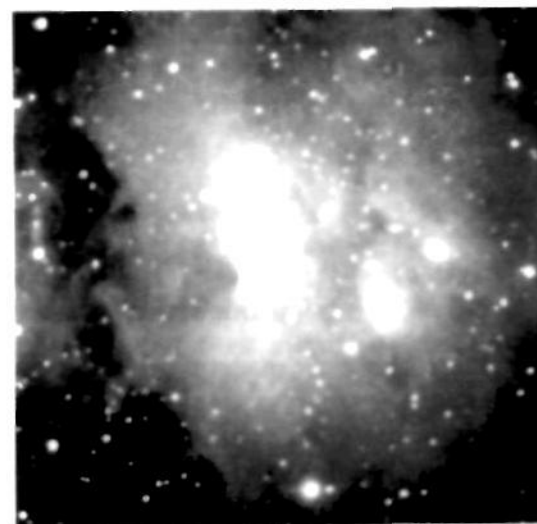


Рис. 133. Рассеянное скопление звезд Плеяды.

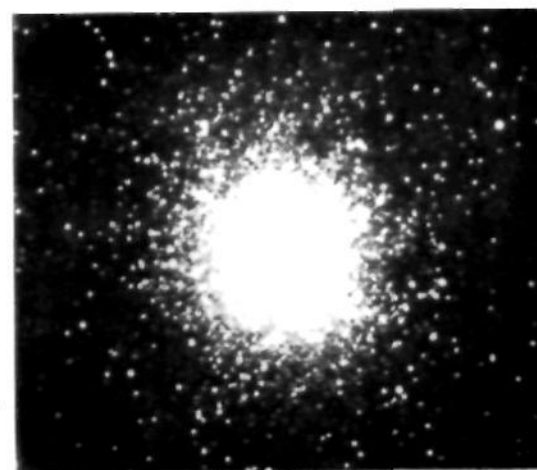


Рис. 134. Шаровое скопление звезд М-13, содержащее более 20000 звезд.

имеющие сферическую форму. Шаровые звездные скопления, в отличие от рассеянных скоплений, выделяются на фоне звезд благодаря большому числу входящих в них звезд и своей сферической формой. Они имеют средний радиус около 40 пс и в нашей Галактике насчитывается около 100 таких скоплений. Типичный представитель этого класса — шаровое скопление М-13, расположенное в созвездии Геркулеса. В нем содержится около 20 000 звезд и оно расположено от Солнца на расстоянии 24 000 световых лет (рис. 134).



1. Какие виды шаровых скоплений вы знаете?
2. Что вы знаете о размерах и составе шаровых скоплений?
3. Чем отличаются друг от друга рассеянные и шаровые скопления?
4. Расскажите о размерах и составе рассеянных скоплений.
5. Приведите пример известных рассеянных и шаровых скоплений.

§ 3. Межзвездная пыль и межзвездный газ

Глядя на фотографические снимки звездного неба, можно заметить сильную неоднородность распределения звезд. Главная причина того, что некоторые звезды в областях, где их можно наблюдать, кажутся значительно менее яркими, состоит в том, что в этих областях неба имеется большое количество космической пыли, поглощающей свет звезд. Межзвездное поглощение света открыл более 100 лет тому назад известный астроном В. Я. Струве. В 1930 г. существование подобных межзвездных образований было окончательно установлено.

Межзвездная пыль. Согласно подсчетам, в распыленном состоянии находится примерно 3% вещества Галактики,



Рис. 135. Пылевая туманность «Конская голова» в созвездии Ориона.

средняя плотность $\sim 10^{-23}$ г/см³. Замечательными примерами пылевых туманностей являются темные туманности: «Угольный мешок», который проецируется на созвездие Южного Креста, и «Конская голова», видимая на фоне созвездия Ориона (рис. 135).

Темная туманность «Угольный мешок» располагается от нас на расстоянии около 150 пс, ее размеры 8 пс, угловой радиус больше 3'. Она расположена вблизи Млечного Пути и кажется темным пятном по сравнению с яркими его областями. При наблюдении в телескоп в ее видимых границах можно увидеть слабые звезды, которых в 3 раза меньше, чем в соседних областях с такой же площадью. Из этого следует, что «Угольный мешок», поглощая излучение расположенных за ним звезд, уменьшает его интенсивность примерно в 3 раза, что соответствует ослаблению света, выраженному в звездных величинах на $\Delta m = 1^m, 2$.

Множество таких темных туманностей образует в Галактике широкую темную полосу, которая начинается в созвездии Лебеда и проходит через созвездия Орла, Змеи, Стрельца и Скорпиона. Скрывая от наблюдения свет звезд в этой области Галактики, она образует Большую Развилку Млечного Пути. Особенно густой является эта темная полоса в направлении центра Галактики, что очень затрудняет наблюдение этого крайне интересного в научном отношении центрального сгущения Галактики.

Диффузные газовые туманности. На темном безлунном небе даже невооруженным глазом можно заметить самую известную газопылевую туманность в созвездии Ориона, растянувшуюся на более чем 6 пс (рис. 136). Такие же замечательные газовые туманности Омега, Лагуна и Трехраздельная можно наблюдать в созвездии Стрельца, туманности Северная Америка и Пеликан — в созвездии Лебеда, Розетка — в созвездии Единорога и многие другие (рис. 137). Таких объектов в Галактике насчитывается около 400.

Внутри газовой туманности или непосредственно вблизи от нее можно всегда обнаружить горячую звезду спектральных классов O или B0. В спектре этих туманностей выделяются водородные линии H_α и H_β, дважды ионизованные линии кислорода O III ($\lambda = 5007 \text{ \AA}$, $\lambda = 4950 \text{ \AA}$), линии азота и



Рис. 136. Газовая туманность в созвездии Ориона.



Рис. 137. Газовая туманность «Розетка» в созвездии Единорога.

других элементов. Эти горячие звезды являются источниками очень мощного ультрафиолетового излучения. Большая часть энергии излучения идет на ионизацию атомов, остаток энергии расходуется на увеличение кинетической энергии электронов, т.е. превращается в тепло.

В ионизованном газе происходят также процессы *рекомбинации*, т.е. возврата электронов в связанное состояние. При этом вместо первоначально поглощенного кванта жесткого ультрафиолетового излучения атомы туманности излу-

чают несколько квантов видимых лучей (этот процесс называется *флуоресценцией*). Это излучение приводит к понижению температуры газов.

В итоге температура туманности устанавливается на некотором определенном уровне порядка 10^4K , что подтверждается и наблюдениями теплового радиоизлучения туманности.

Распределение в Галактике нейтрального водорода. Водород, сосредоточенный в холодных газах Галактики, излучает в радиодиапазоне волны длиной 21 см. Наблюдения на этой линии показали, что большая часть массы водорода Галактики нейтральна. По его спектру можно судить о распределении водорода в Галактике.

Если бы весь нейтральный водород в Галактике был неподвижен, его нельзя было бы наблюдать дальше расстояния 1 кпс (толщина слоя, не прозрачного к радиоизлучению на волне 21 см), составляющем 6% радиуса Галактики. Но такое положение наблюдается только в направлении на центр Галактики и в диаметрально противоположном направлении (так как в этих направлениях движения газа происходят только в направлениях, перпендикулярных лучу зрения, так что *лучевая скорость*, т.е. компонента скорости, направленная по лучу зрения, равна 0). Поэтому нейтральный водород в областях Галактики, характеризующихся различными значениями лучевых скоростей, излучает, благодаря красному смещению, на волнах, длина которых немного отличается от 21 см. Профиль каждой такой линии дает возможность судить о плотности газа на расстояниях, соответствующих эффекту *дифференциального вращения* Галактики. Угловая скорость убывает по мере удаления от центра Галактики, линейная скорость вначале возрастает, а затем убывает.



1. Как удалось определить наличие не прозрачного к излучению вещества Галактики?
2. Что происходит с излучением звезд, проходящим сквозь межзвездную пыль?
3. В чем отличие диффузных газовых туманностей от пылевых?
4. В чем особенности спектров диффузных газовых туманностей?
5. Что является причиной свечения диффузных газовых туманностей?

6. Назовите наиболее известные пылевые и газовые туманности.
7. Как удается определить распределение нейтрального водорода в Галактике?

§ 4. Распределение звезд в Галактике¹

Познание расстояния звезд и определение их расстояния в пространстве дает возможность изучения структуры Галактики. Для того чтобы оценить количество звезд на разных участках нашей Галактики, обычно вводят понятие о плотности звезд. Оно характеризует количество звезд в одном кубическом парсеке. Из вычислений становится ясно, что в околосолнечном пространстве плотность звезд составляет 0,12. Это означает, что на 8 кубических парсеков приходится примерно одна звезда.

Для определения плотности звезд на разных участках неба необходимо вычислить количество звезд, приходящихся на каждый квадратный градус его площади. Результаты подсчетов показывают, что концентрация звезд резко возрастает с приближением к плоскости Млечного Пути. Это показывает, что наша Галактика имеет сжатую по ее оси форму и Млечный Путь отражает ее сплюснутый участок. Линия, проведенная через середину Млечного Пути, называется экватором нашей Галактики. Солнечная система в Галактике находится недалеко от этой экваториальной плоскости.

На основе другой идеи, вычисление общего количества звезд в определенном участке неба производится не сразу, а суммированием количества звезд для отдельно взятого участка Галактики. А звезды отдельного участка, в свою очередь, вычисляются суммированием количества звезд, видимые звездные величины которых находятся в меньшей и равной определенной звездной величине, т.е. $m \leq k$, $m \leq k + 1$, $m \leq k + 2$ и т. д.

Если при этом допустить, что плотность звезд с расстоянием не изменяется и их светимость остается постоянной, то становится ясно, что увеличение количества звезд в связи с их ослаблением яркости происходит с увеличением объема пространства, пректируемого на единичную площадь неба.

Известно, что количество звезд с видимой величиной m и

меньше согласно формуле $M = m + 5 - 5 \lg r$ находится в шаровом секторе, радиус которого определяется по выражению

$$\lg r_m = 1 + 0,2(m - M),$$

так как мы предположили, что светимость у всех звезд (соответственно и абсолютная звездная величина M) одинакова. Аналогичная формула получится для радиуса шарового сектора, в котором находятся все звезды с видимой звездной величиной, не превышающей $m + 1$. Вычитая их друг из друга, получим

$$\lg r_{m+1} - \lg r_m = 0,2 \text{ или } \lg \frac{r_{m+1}}{r_m} = 0,2.$$

При постоянной звездной плотности их количество должно быть пропорционально объему пространства, т. е. кубу радиуса. Поэтому

$$\lg \frac{N_{m+1}}{N_m} = 0,6,$$

$$\frac{N_{m+1}}{N_m} = 4$$

Однако из наблюдений становится ясно, что в действительности количество звезд возрастает с увеличением m не так быстро, и для небольших значений m отношение $\frac{N_{m+1}}{N_m}$ близко к 3, а с увеличением m оно уменьшается и для звезд с видимой звездной величиной 17 равно примерно 2.

Если бы светимости всех звезд были одинаковыми, то по наблюдаемому отношению N_{m+1}/N_m легко было бы определить изменение звездной плотности по мере удаления их от Солнца.

Действительно, при $N_{m+1}/N_m = 4$ с увеличением расстояния в 1,6 раза (что соответствует переходу от звездной величины m к $m + 1$) звездная плотность была бы постоянна, а при $N_{m+1}/N_m = 3$ она убывала бы в отношении 3:4. Данное отношение N_{m+1}/N_m говорит о том, что по мере удаления от Солнца в каждом данном направлении звездная плотность убывает. Если в этом направлении межзвездное поглощение света несущественно, то можно оценить протяженность нашей

¹ Для самостоятельного изучения.

звездной системы в этом направлении. В результате оказывается, что наша Галактика ограничена.

На самом деле звезды имеют различные светимости, а наблюдения же сильно искажены межзвездным поглощением света. Чтобы охарактеризовать, сколько в данной области пространства содержится звезд различной светимости, вводят функцию светимости $f(M)$, которая показывает, какая доля от общего числа звезд имеет данное значение абсолютной звездной величины, скажем, от M до $M+1$.

Если бы функция светимости нам была известна, то задача определения звездной плотности на различных расстояниях принципиально ничем не отличалась бы от рассмотренного случая одинаковых светимостей звезд.

Если бы мы знали звездную плотность от расстояния в различных направлениях, то можно было бы составить представление о структуре нашей Галактики.

На рис. 138 представлена схема общей структуры Галактики. Из нее видно, что она действительно является сплюснутой системой, симметричной относительно главной плоскости, называемой *главной плоскостью Галактики*, которая совпадает с Млечным Путем. Центр этой системы — центр Галактики — при наблюдении из Солнечной системы проецируется в созвездии Стрельца, в точке с координатами $\alpha=265^\circ$ и $\delta=-29^\circ$. По направлению к центру Галактики, а также по мере приближения к ее главной плоскости звездная плотность возрастает.

Таким образом, распределение звезд в Галактике имеет две ярко выраженные тенденции: во-первых, очень сильно концен-



Рис. 138. Основные составляющие нашей Галактики

трируются в галактической плоскости; во-вторых, концентрируются к центру Галактики. Последняя тенденция усиливается по мере приближения к центральной части Галактики, называемой центральным сгущением Галактики, или ядром.

Установлено, что Солнце удалено от центра Галактики на расстояние около 10000 пк (10 Кпк), а граница Галактики в направлении антицентра находится на расстоянии 5000 пк от Солнца. В итоге окажется, что диаметр Галактики составляет около 30000 пк, или 30 Кпк, т. е. более чем 100000 световых лет. Точнее указать размеры Галактики нельзя, поскольку по мере удаления от ее центра звездная плотность убывает постоянно, и резкой границы не существует.

Солнце расположено близ плоскости Галактики и удалено от нее к Северному полюсу на расстоянии около 25 пк. Большинство звезд спектральных классов O и B , цефеиды, не принадлежащие шаровым звездным скоплениям, сверхновые звезды, рассеянные звездные скопления и темные туманности образуют плоскую систему (или составляющую) Галактики (см. рис. 138). А звезды типа RR Лир, W Девы и μ Цефея, субкарлики и шаровые звездные скопления занимают в Галактике эллипсоидную форму, для которой галактическая плотность является диаметральным сечением. Поэтому пречисленные небесные объекты принято относить к сфероидальной (или сферической) подсистеме Галактики.

Остальные объекты, например, новые звезды, переменные звезды типа RV Тельца, долгопериодичные переменные, белые карлики, звезды спиральных классов C и S , а также планетарные туманности располагаются в пределах более или менее сплюснутых эллипсоидов. Они составляют объекты промежуточной подсистемы Галактики.

Некоторые объекты Галактики, такие как горячие звезды класса O и B , встречаются в ее плоскости не всюду, но преимущественно на определенных расстояниях от ее центра, образуя спиральную структуру, подобную структуре туманности Андромеды. Спиральная структура нашей Галактики подтверждается также результатами изучения распределения в ней диффузного вещества и магнитного поля.

§ 5. Внешние галактики.

Классы и спектры галактик

Внегалактическая астрономия, изучающая объекты, лежащие вне нашей Галактики, берет свое начало, как мы уже упо-

минали, в 20-х годах XX в. Некоторые наблюдаемые туманности оказались галактиками, лежащими за пределами Галактики, во многом похожими на нее. Расстояния до галактик определяются по красному смещению линий в их спектре.

Одна из гигантских внешних галактик известна как Туманность Андромеды в созвездии Андромеды и видна в темную безлунную ночь даже невооруженным глазом в виде светлого туманного пятнышка (рис. 138). Данная галактика расположена от нас на расстоянии 2 млн световых лет.

Галактики широко распространены в космосе. Другая подобная галактика известна под названием М-51 и наблюдается в созвездии Гончих Псов (рис. 139). Расстояние до нее 1,5 млн световых лет. В южном полушарии небесной сферы расположены близкие к нам галактики неправильной формы — Большое и Малое Магеллановы Облака.

В зависимости от размеров внешние галактики могут состоять из миллиардов (гигантские галактики) и нескольких миллионов (карликовые галактики) звезд. Гигантские галактики могут иметь радиусы до 50 кпс, самые маленькие — до нескольких сотен пс.

Сегодня с помощью наблюдений на мощных телескопах зафиксировано несколько миллиардов галактик. Но только небольшая их часть занесена в каталоги, изучена их структура и проанализирована их статистика. Один из полных каталогов «Морфологический каталог галактик», состоящий из 4 томов, составлен под руководством Б. А. Воронцова-Вельяминова и содержит сведения о примерно 30000 галактик, звездная величина которых меньше чем 10^m . Хотя по внешнему виду галактики весьма разнообразны, их можно разбить в соответствии с классификацией, предложенной в 1925 г. Э. Хабблом, на 3 класса: *эллиптические* (E), *спиральные* (S) и *неправильные* (Irr).

Эллиптические галактики (E) — это галактики, по внешнему виду напоминающие эллипсоид или шар. Характерным свойством этих галактик является то, что их яркость равномерно уменьшается по мере удаления от центра к краю. Внутри этих галактик не наблюдается никаких структурных элементов (рис. 140).

Спиральные галактики (S) чрезвычайно широко распространены во Вселенной, по крайней мере половина наблюдае-



Рис. 138. Знаменитая Туманность Андромеды (галактика в созвездии Андромеды).

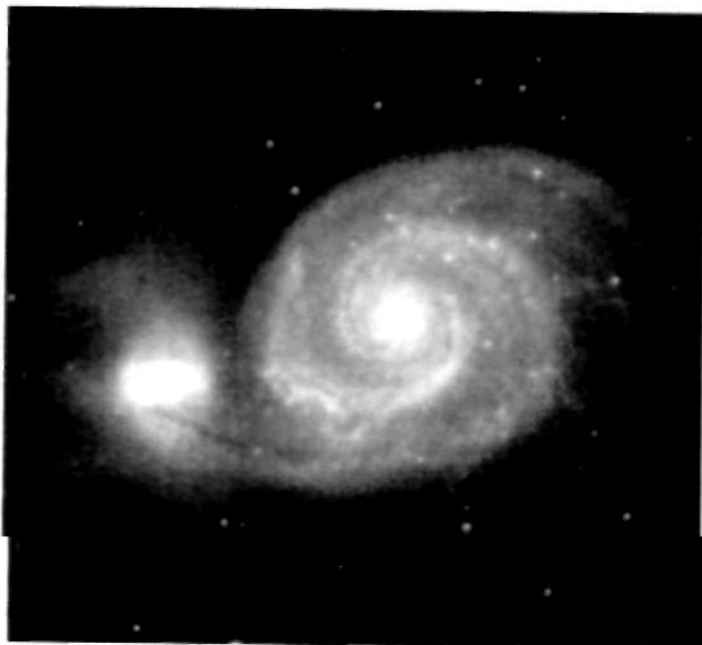


Рис. 139. Известная спиральная галактика М-51 в созвездии Гончих Псов.

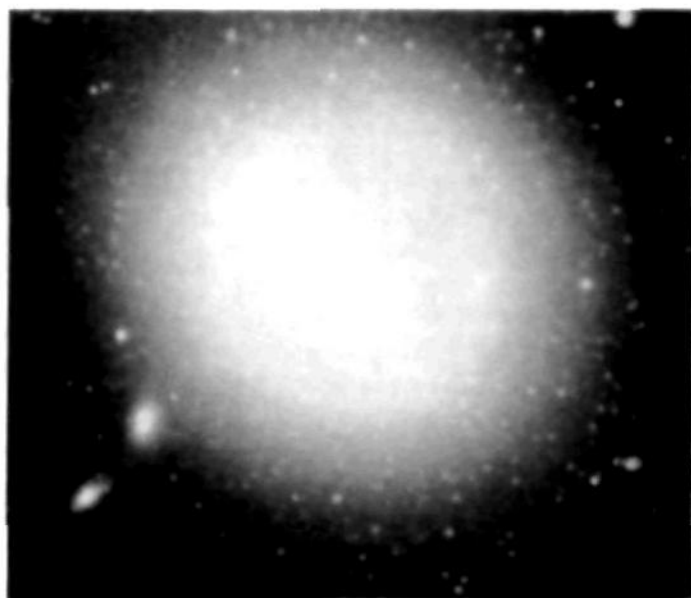
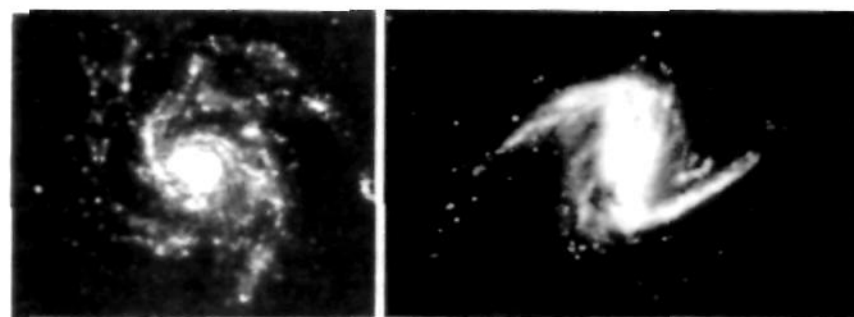


Рис. 140. Эллиптическая галактика.

мых галактик — спиральные. В отличие от других галактик, их структура определяется наличием характерных спиральных ветвей. Наша Галактика и Туманность Андромеды — типичные представители этого класса галактик. Различаются два типа спиральных галактик. Одни из них похожи на нашу Галактику, обозначаемую S (или SA), их спиральные ветви отходят непосредственно от ядра галактики (рис. 141 а). У галактик второго типа, обозначаемых SB, спиральные ветви начинаются от концов продолговатой структуры — перемычки, пересекающей ядро по диаметру (рис. 141 б). По степени развития спиральной структуры галактики подразделяются на дополнительные классы Sa, Sb, Sc, Sd (или SBa, SBb, SBc, SBd).

Промежуточные между спиральными и эллиптическими галактиками — это *линзообразные галактики* (S0).

Неправильные галактики (Irr) не имеют наблюдаемого ядра и симметричной структуры. В качестве примера таких галактик можно привести Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако. К неправильным галактикам относятся и так называемые *пекулярные галактики*, кото-



а)

б)

Рис. 141. Спиральные галактики:

а) — спиральные ветви отходят из центра;

б) — спиральные ветви отходят от перемычки.

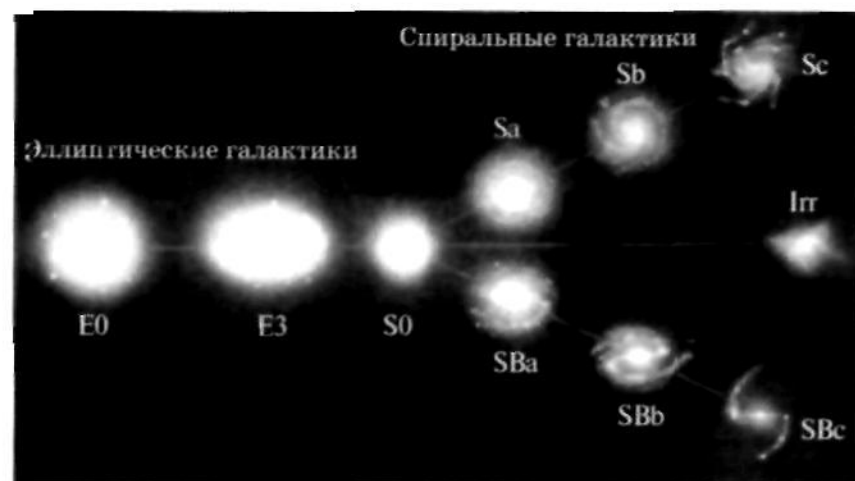


Рис. 142. Эволюция галактик.

рые по внешнему виду нельзя отнести ни к одному из рассмотренных типов.

Внешний вид галактики связан с ее возрастом, эволюция галактик соответствует ступеням, изображенным на рисунке 142.

Спектры галактик. Внегалактические туманности обладают спектрами, напоминающими спектры звезд, преимущественно спектральных классов А, F и G. Иногда на их спектры накладываются эмиссионные линии, это означает, что

внегалактические туманности состоят из звезд и диффузной материи.

Спектры неправильных галактик относятся к классам А и F, спиральных — F и G, а эллиптических — G и K.

Принадлежность спиральных и неправильных галактик к ранним спектральным классам означает, что в их составе имеется много молодых и горячих звезд, тогда как эллиптические галактики состоят из старых звезд поздних спектральных классов. По цвету галактик можно судить о спектральных классах, к которым принадлежит большинство звезд галактики. Цвета галактик и их частей находят теми же методами, что и для звезд.



1. Назовите первую из найденных внешних галактик.
2. Какие вы знаете галактики, соседние с нашей Галактикой?
3. Как определяются расстояния до внешних галактик?
4. К каким спектральным классам относятся внешние галактики?
5. Какие характерные особенности присущи спиральным, эллиптическим и неправильным галактикам?
6. Связана ли классификация галактик с их спектральными классами? Если связана, то как различаются их спектры?

§ 6. Радиогалактики

За последние 40 лет астрономы открыли более 10 тысяч дискретных источников радиоизлучения и составили их каталоги. Среди них выделяется Третий Кембриджский каталог (3С). Несколько из мощных радиоисточников принадлежат нашей Галактике, в большинстве они относятся к остаткам сверхновых звезд.

Однако во многих случаях источники радиоизлучения принадлежат внешним галактикам, но мощность радиоизлучения составляет 10^{-6} от мощности их оптического излучения. Спиральные и неправильные галактики связаны с относительно слабыми источниками радиоизлучений.

В дециметровом диапазоне энергия их излучения составляет $\sim 10^{32}$ Вт. Радиоизлучение эллиптических галактик в этом диапазоне превышает их энергию более чем в 100 раз и достигает 10^{36} Вт.

Галактики, мощность радиоизлучения которых сравнима с мощностью их излучения в оптическом диапазоне или превосходит его в несколько раз, называются *радиогалактиками*. Одна из таких мощных радиогалактик связана с одним из источников радиоизлучения в созвездии Лебедя, называемым Лебедь А. Определяемое по красному смещению расстояние до нее равно примерно 330 Мпс. Самая удаленная радиогалактика — Центавр А удалена от нашей Галактики на расстояние 2500 Мпс. Радиоизлучение радиогалактик не является тепловым, что, возможно, объясняется резким торможением релятивистских электронов в их магнитных полях.



1. Излучают ли галактики в радиодиапазонах?
2. Какие галактики называются радиогалактиками?
3. Связано ли радиоизлучение галактик с их классами?
4. Галактики какого класса имеют более мощное радиоизлучение?
5. Какие радиогалактики вы знаете?

§ 7. Квазары

Очень мощные источники радиоизлучения, находящиеся вне пределов нашей Галактики, — это *квазары* (квазизвездные радиоисточники). Первый квазар был обнаружен в 1960 г. в созвездии Треугольника в виде объекта, похожего на звезду 16-й звездной величины и был обозначен 3С48 (номер в Кембриджском каталоге). В 1963 г. такой радиообъект, видимый как звезда 13-й звездной величины, был обнаружен в созвездии Девы и получил обозначение 3С 273.

В течение длительного времени не удавалось проанализировать их спектры. И только по красному смещению удалось определить, что в спектре квазаров наблюдаются линии водорода. Красное смещение означает, что квазары удаляются от нас с очень большими скоростями. Согласно закону Хаббла, удалось определить расстояние до них. Оказалось, что они удалены от нашей Галактики на расстояние в миллиарды световых лет. Расстояние до квазара OQ172 — более 10 миллиардов св. лет.

Вызывающая изумление мощность излучения квазаров — их светимость — соответствует 10^{40} – 10^{41} Вт. Эти светимости

превосходят в сотни миллиардов раз светимости звездных систем — галактик — и относятся к наименее изученным космическим объектам. По предположениям ученых, квазары относятся к галактикам, находящимся на ранних ступенях эволюции. Возможно, высокая температура и светимость квазаров объясняются гравитационным сжатием облаков газа с массой, равной миллиардам масс Солнца.



1. Какие объекты, имеющие мощное радиоизлучение, относятся к квазарам?
2. Как обозначен первый обнаруженный квазар?
3. Принадлежат ли квазары к нашей Галактике?
4. На каких расстояниях от нас находятся квазары?
5. В каких пределах меняется мощность квазаров?

§ 8. Распределение галактик в пространстве. Крупномасштабная структура Вселенной

Изучение распределения галактик во Вселенной производится по методикам, используемым и для изучения распределения звезд. Обозначим через N_m число галактик в участке небесной сферы размерами около одного квадратного градуса и имеющих видимую звездную величину, не превосходящую m . Анализируя в 1934 г. фотографии 1283-го участка неба, сделанные с помощью рефлектора с диаметром зеркала 2,5 м, Э. Хаббл насчитал на площади в один квадратный градус 131 галактику со звездной величиной, не большей 20-й звездной величины. Вся небесная сфера, площадь которой составляет 41253 кв. градусов, будет в таком случае содержать $5,4 \cdot 10^6$ галактик. В самый сильный телескоп можно наблюдать объекты до 24-й звездной величины, что соответствует числу галактик, равному $1,4 \cdot 10^9$ (рис. 143).

Кроме того, Хаббл показал, что распределение галактик неоднородно, но изотропно, т.е. является одним и тем же по всем направлениям. Глубокое изучение этой проблемы показало, что на расстоянии до 40 кпс галактики расположены отдельными группами и скоплениями. В местную группу галактик объединяются наша Галактика, Туманность Андромеды (M-31), галактика созвездия Треугольник (M-33), Большое и Малое Магеллановы Облака и еще несколько галактик.

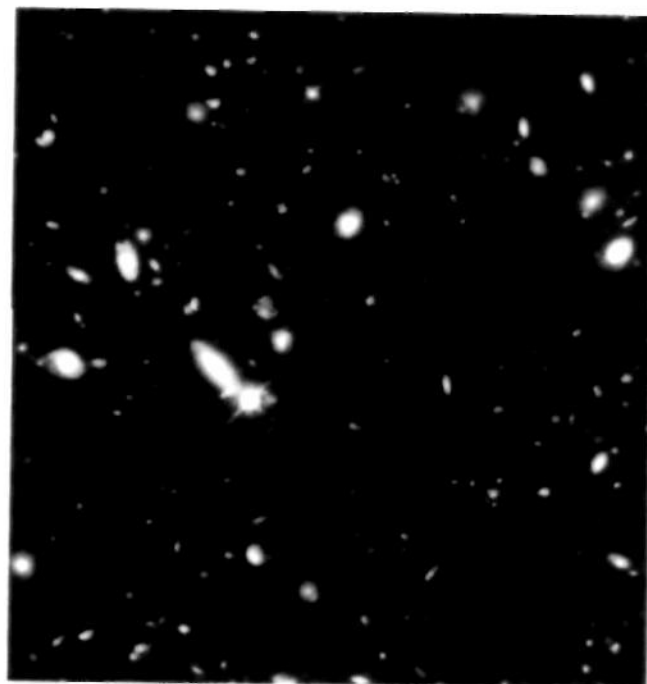


Рис. 143. Внешние галактики, наблюдаемые на относительно небольшой площади небесной сферы (несколько кв. градусов).

Известно около 4000 подобных местных групп. Их средние размеры около 8 Мпс. Одно из крупных галактических скоплений проецируется на созвездие Волосы Вероники. Это скопление содержит около 40000 близких галактик и находится от нас на расстоянии 70 Мпс, имея угловой диаметр 12° . Ближайшая к нашей местной системе группа галактик находится в созвездии Девы на расстоянии 12 Мпс. Она содержит 7 гигантских галактик (одна из них радиогалактика Дева А) и 10 спиральных галактик. Эти гигантские галактики, возможно, являются сверхгалактиками, заключающими в себе несколько местных групп галактик. Диаметр таких сверхгалактик достигает 12 Мпс. На сегодняшний день в результате наблюдений с помощью сверхмощных телескопов удалось обнаружить до 50 подобных сверхгалактик.



1. Сколько галактик до 24-й звездной величины может находиться внутри участка небесной сферы площадью в 1 кв. градусе?
2. Сколько примерно галактик входит в местную группу галактик, включающую нашу Галактику?
3. Сколько на сегодняшний день обнаружено местных групп галактик?
4. Сколько галактик имеется в большом скоплении галактик в созвездии Волосы Вероники?
5. Как называется скопление нескольких местных систем галактик?

§ 9. Элементы космологии¹

Космология — наука о строении Вселенной как целого. Среди наиболее существенных вопросов, которые космология, — геометрическая структура пространства и времени, эволюция Вселенной, образование и развитие различных ее объектов, особенно галактик и их скоплений. Эмпирические сведения космология черпает из данных внегалактической астрономии, а ее теоретические основания опираются на наиболее общие законы физики.

При описании Вселенной как целого необходимо учитывать, что современным методам астрономических наблюдений доступна ограниченная часть Вселенной, получившая название *Метагалактики*. Размеры Метагалактики составляют всего около 6000 Мпк. Кроме того, масштабы времени, с которыми при этом имеют дело, ничтожно малы по сравнению с характерными масштабами эволюции Вселенной и объектов, ее заполняющих. Наконец, все известные физические законы относятся к умеренным значениям плотности, температуры и других физических величин, в то время как теоретическая космология допускает сверхвысокие температуры и плотности вещества Вселенной на определенных этапах ее эволюции. Таким образом, при обсуждении строения и эволюции Вселенной возникает серьезная проблема о правомочности экстраполяции наших знаний на всю Вселенную в целом.

На каких же наиболее общих наблюдательных данных внегалактической астрономии базируется космология?

Наблюдения указывают на то, что скопления и сверхскопления галактик распределены в Метагалактике однородно и

изотропно. Этот наблюдательный факт космология переносит на всю Вселенную в целом, считая ее однородной и изотропной. Из этого предположения, в частности, следует, что Солнце, а с ним и Солнечная система и человек на Земле не являются чем-то выделенным во Вселенной. Следующий наблюдательный факт — разбегание галактик, объясняющийся красным смещением линий в спектрах внешних галактик. Космология приписывает его нестационарности, расширению Вселенной в целом.

Так как определяющей силой в Метагалактике является сила гравитации, а в масштабах Метагалактики имеют дело с огромными массами и явлением разбегания галактик, наиболее далекие из которых обладают скоростями, близкими к скорости света, то при описании Вселенной как целого необходимо использовать общую теорию относительности — *релятивистскую теорию гравитации*, развитую А. Эйнштейном.

Общая теория относительности накладывает определенные ограничения на геометрические свойства пространства, которое уже нельзя считать евклидовым. Согласно этой теории, время не имеет абсолютного характера в смысле ньютоновской механики, а движение и распределение материи в пространстве нельзя рассматривать в отрыве от геометрических свойств пространства и времени.

Впервые космологическую модель однородной и изотропной Вселенной в рамках общей теории относительности рассмотрел учёный математик А. Фридман. Он показал, что однородная изотропная Вселенная должна быть нестационарной, и тем самым объяснил наблюдаемую картину разбегания галактик. Согласно этой модели расстояние между двумя любыми объектами во Вселенной в момент времени t определяется выражением $r(t) = R(t)r_0$, где r_0 — расстояние между объектами в начальный момент времени, а $R(t)$ — так называемый *масштабный фактор*, зависимость которого от времени и определяет характер расширения Вселенной. Скорость изменения расстояния определяется законом Хаб-

бла: $v(t) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \cdot r(t) = H(t) \cdot r(t)$. При этом в зависимости от значения средней плотности вещества во Вселенной ρ расширение может происходить неограниченно во времени или

¹ Для самостоятельного изучения.

же со временем сменится сжатием. Эта зависимость определяется значением критической плотности

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

На рис. 144 показано изменение масштабного фактора от времени и соотношения между ρ и $\rho_{кр}$.

Если $\rho > \rho_{кр}$, то расширение Вселенной со временем сменится сжатием. При этом геометрические свойства пространства определяются сферической геометрией (геометрией пространства с положительной кривизной). Эта модель получила название *замкнутой (замкнутой) модели Вселенной*.

Если $\rho = \rho_{кр}$, то геометрия Вселенной евклидова (кривизна пространства равна нулю), расширение Вселенной будет происходить неограниченно.

Если $\rho < \rho_{кр}$, то геометрия Вселенной аналогична геометрии на поверхности Лобачевского (пространство отрицательной кривизны), расширение не ограничено во времени.

Модель Вселенной с $\rho \leq \rho_{кр}$ получила название *открытой модели Вселенной*.

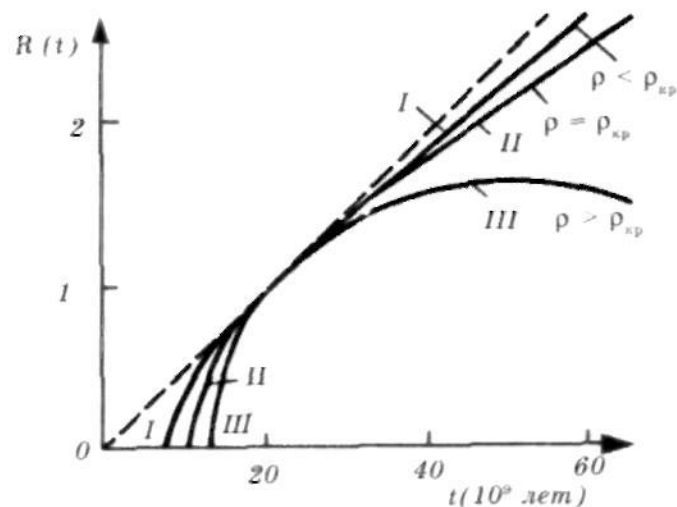


Рис. 144. Три типа космологических моделей.

Внегалактическая астрономия дает значение для постоянной Хаббла $H = 50$ км/(с · Мпк), следовательно, $\rho_{кр} \approx 5 \cdot 10^{-30}$ г/см³.

Подсчеты галактик показывают, что в Метагалактике их около 10^{11} . Если принять, что масса каждой из них такая же, как и у нашей Галактики, то при размере Метагалактики около 600 Мпк средняя плотность вещества в ней $5 \cdot 10^{-31}$ г/см³. Так как это значение плотности на порядок меньше критического, то модель Вселенной описывается геометрией пространства отрицательной кривизны и наблюдаемое ее расширение будет носить неограниченный характер.

При оценке средней плотности вещества во Вселенной учитывалась только наблюдаемая (излучающая) масса вещества. В настоящее время обсуждается вопрос о существовании невидимой массы, которую трудно обнаружить по ее излучению. Эта масса, возможно, сосредоточена в форме мало-массивных звезд малой светимости или в форме нейтрино. Учет этой невидимой массы увеличит значение средней плотности вещества во Вселенной.

Независимо от точного значения средней плотности все рассмотренные модели однородной и изотропной Вселенной характеризуются состоянием с $R=0$, которое имело место конечный промежуток времени t_0 в прошлом. В этом так называемом *сингулярном состоянии* плотность вещества была бесконечной. Так, например, в случае евклидова про-

странства $t_0 \approx \frac{2}{3H} \approx 13$ млрд лет. Иногда время t_0 называют «возрастом» Вселенной, подразумевая под ним интервал времени, до которого мы еще можем экстраполировать известные нам физические законы. В частности, при огромных плотностях в раннюю эпоху расширения Вселенной, которые предсказывает однородная изотропная модель, общая теория относительности вообще становится неприменимой, и поэтому на ее основании уже нельзя делать какие-либо выводы относительно состояния материальной среды, ничего определенного нельзя сказать не только о самом характере расширения, но и его продолжительности в ту эпоху.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

1. Астрономическая школа Улугбека

Построенная в XV веке обсерватория Улугбека и ее главный инструмент — секстант был заметным событием не только в пределах страны, но и во всем мире.

До этого самым крупным наблюдательным инструментом был секстант (шестая часть круга имеет такое название) с радиусом 20 метров, установленный в горах Таборака недалеко от города Рея (Иран) в X веке работавшим у Султана Фахр ад-Давла Абу Махмудом Хамидом ибн Хизра аль-Ходжанди.

К сожалению, пока еще сведения о точной дате начала постройки и внешнем виде обсерватории имеют много неточностей.

Ни изучения остатков обсерватории археологом В.Л.Вяткиным, ни сведения историков Абдураззака Самарканди, Зухриддина Бабура, приведенные в их трудах, не могли дать точного определения относительно внешнего вида Улугбекской обсерватории и ее главного инструмента — секстанта.

Еще в первые дни изучения остатков обсерватории в 1908 году В. Л. Вяткин обнаружил на ее месте круглую стену шириной в обычный кирпич и высотой почти два метра и диаметром 48 метров. С наружной стороны стена была покрыта узорчатыми плитками, а сверху — ровными мраморными плитами. По всей длине круга на верхних плитах на одинаковом расстоянии были высечены в десятиричной системе цифры, выраженные арабскими буквами. Решили, что данный круг был предназначен для определения азимута (угловое расстояние оснований вертикального полукруга, проходящего через светило от южной точки горизонта) светила. А недалеко от центра круга были найдены две не очень высокие, толщиной в два кирпича стенки, отделенные друг от друга лестницей на расстоянии 51 см. Когда ступеньки



Памятник Улугбеку
в Ташкенте.

лестницы очистили от грунта, стало видно, что опускающиеся вниз стенки были покрыты мраморными плитками и градуированы, т. е. являлись дугами главного инструмента — секстанта.

Последующие исследования показали, что этот главный инструмент обсерватории, установленный вдоль меридиана, имел радиус 40,2 м. В дуге секстанта 1° соответствовал 70,2 см, а 1' по длине — 11,7 мм, т. е. он мог работать с точностью почти до 10". Длина дуги инструмента составляла почти 50 м, а его диоптр (отверстие на вершине инструмента, куда поступал свет от светил в момент их кульминации) с диаметром 20 см находился на высоте 28 метров от поверхности Земли.

В.Л. Вяткин установил, что нижняя часть инструмента на южной его стороне имела глубину -11 м, такая глубина обеспечивала жесткую устойчивость инструмента. Началу дуги на такой глубине соответствовало 90°, а у поверхности Земли дуга имела значение почти 45°, чуть позже среди найденных остатков инструмента была обнаружена плитка с 57 отметкой. Минутные и секундные отметки в дуге были простав-



Улугбек (третий слева) среди ученых-астрономов с мировыми именами (из «Звездного атласа» Яна Гевелия, XVII в.).

лены на медной пластинке, места укрепления которых остались на мраморной дуге инструмента в виде углублений. Отсутствие углубленных мест для укрепления медных пластинок на плитках с минутными и секундными знаками свидетельствует о том, что рабочая часть инструмента доходила до высоты светил 80. На основе последних исследований остатков обсерватории М.Я. Массон отмечает, что усилиями общественности и ученых были найдены плиты с обозначениями 22, 21 и 19. Исходя из высказываний историков и астрономов последних веков астроном Г. Джалолов доказал, что найденный инструмент был секстантом.

Эту версию подтверждают многие исторические факты: обсерватория занималась наблюдением таких ярких объектов, как Солнце, Луна и планеты. Это подтверждается тем, что в условиях Самарканда на широте $\sim 40^\circ$ небесный экватор наклонен к горизонту $\sim 50^\circ$. Небольшое вычисление показывает, что этого достаточно, чтобы на небе Самарканда можно было наблюдать Солнце, Луну и пять планет, которые видны невооруженным глазом. В частности, относительно

Солнца можно сказать, что поскольку плоскость его видимого годового пути (эклиптики) составляет угол с небесным экватором $23^\circ 26'$, то в Самарканде его высота от горизонта в течение года изменяется от $26^\circ,5$ до $73^\circ,5$ и вполне доступна наблюдению в течение года. Поскольку плоскость орбиты Луны составляет $5^\circ 09'$ с плоскостью эклиптики, т.е. с плоскостью годового движения Солнца, то его высота в Самарканде в течение года изменяется от $-21^\circ,5$ до $-78^\circ,5$, т.е. также доступна наблюдению в течение года.

Что касается пяти планет, то среди них самое большое отклонение от плоскости эклиптики имеет планета Меркурий, оно составляет -7° . И, несмотря на это, даже Меркурий будет хорошо виден в течение года над горизонтом Самарканда, изменяя высоту от $80^\circ,5$ до $19^\circ,5$.

Таким образом, можно прийти к заключению, что секстант вполне охватил бы наблюдения таких ярких светил, как Солнце, Луна и планеты. Отсюда следует, что не было никакой необходимости делать инструмент квадрантом.

2. Институт астрономии АН Республики Узбекистан и его филиалы

В 1966 году Ташкентская астрономическая обсерватория была преобразована в Институт астрономии АН РУз и считается крупнейшим научно-исследовательским центром в Центральной Азии. Первые наблюдения в обсерватории начали проводить в 1873 году. В 1927 году при ней был открыт отдел времени, в котором решали задачи определения точного времени и географических долгот под многолетним руководством В. П. Щеглова известные ученые П. П. Логинов, Б. В. Ясевич, О. С. Турсунов, Е. Санакулов и Е. Иногамов.

В 1919 году на широте $39^\circ 08'$ начала работу Китабская международная широтная станция в содружестве с подобными станциями Юкайя и Гейтерсберг (США), Мицузава (Япония) и Карлофорте (Италия). В течение многих лет в Китабском филиале под руководством А. М. Калмыкова группа ученых, в составе которой были С. Эшанкулов, Д. Фазылова и др., плодотворно работают в рамках международной широтной службы.



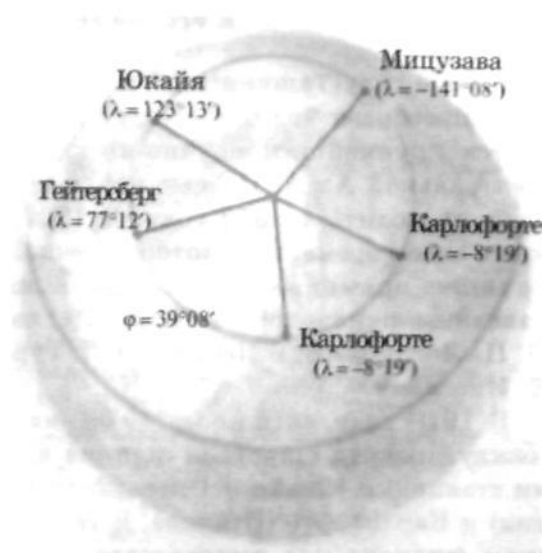
Отражение движения Солнца, Луны и планет на секстанте Улугбека



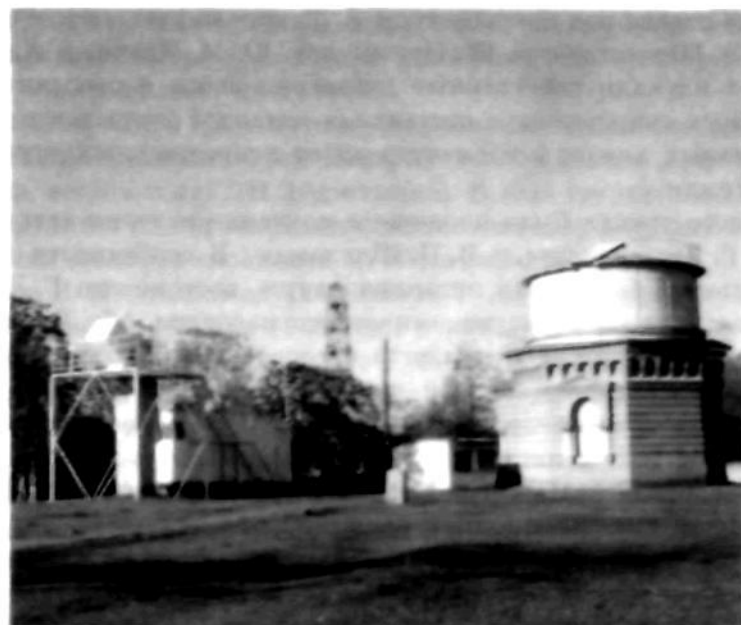
Административное здание Института астрономии
АН Республики Узбекистан.

В 1932 году в Ташкентской обсерватории была организована лаборатория по изучению солнечной активности. В этой лаборатории трудились над изучением физической природы активных процессов на Солнце и солнечной активности Ю. М. Слоним, И. Саттаров, З. Б. Коробова, К. Ф. Кулешова, Ч. Шердонов и М. Сайдалиева.

В 1893 году в Ташкентскую обсерваторию по рекомендации известных пулковских астрофизиков Ф. А. Бредихина и А. А. Бело-



Международные широтные станции,
расположенные на широте 39°08'.



Нормальный астрограф, установленный в Ташкентской
астрономической обсерватории в
1895 г. (справа), и специальный телескоп для
гелиосейсмологии (слева).

польского был установлен нормальный астрограф для изучения физики переменных звезд, наблюдения на котором были начаты в 1895 году. В течение многих лет физику переменных звезд изучали известные астрономы В. В. Стратонов, Б. В. Кукаркин, Н. Ф. Флоря, И. М. Ищенко, В. С. Шевченко, М. М. Зокиров и К. Гранкин.

В 1957 году, в связи с привлечением Китабской широтной станции в программу Международного геофизического года, в Ташкентской обсерватории в отделе службы времени вступил в строй второй пассажный инструмент, были установлены кварцевые часы с ошибкой хода 0,0003, зенитный телескоп ЗТЛ-180, а в лаборатории физики Солнца хромоферно-фотосферный телескоп.

С запуском первого искусственного спутника Земли начала свою деятельность в составе обсерватории лаборатория фотографической астрометрии. На протяжении многих лет

в этом отделе под руководством А. Латипова ученые А. Рахимов, Э. Мирмахмудов, Ш. Примкулов, Ю. М. Иванов и А. Кадыров изучали собственные движения звезд в рассеянных звездных скоплениях и составляли каталоги точных координат малых планет и элементов орбит искусственных спутников Земли.

Много трудов было вложено в изучение истории астрономии Г. Джалаловым и В. П. Щегловым. В особенности значительным был вклад историка науки, востоковеда Г. Джалалова в изучение астрономического наследия Абу Райхана Беруни, истории строительства обсерватории Улугбека, деятельности астрономической школы Улугбека и важных результатов отечественных ученых в развитии астрономии.

В 1966 году в институте был установлен большой солнечный телескоп (АЦУ-5), снабженный спектрографом АСП-20 с мощной дифракционной решеткой.

В 60-х годах была организована экспедиция по изучению астрономического климата Средней Азии и Казахстана (спокойствие атмосферы, количество ясных ночей, степень их прозрачности и т. д.). В результате в Кашкадарьинской области в 100 км от г. Китаба в Майданакских горах на вы-

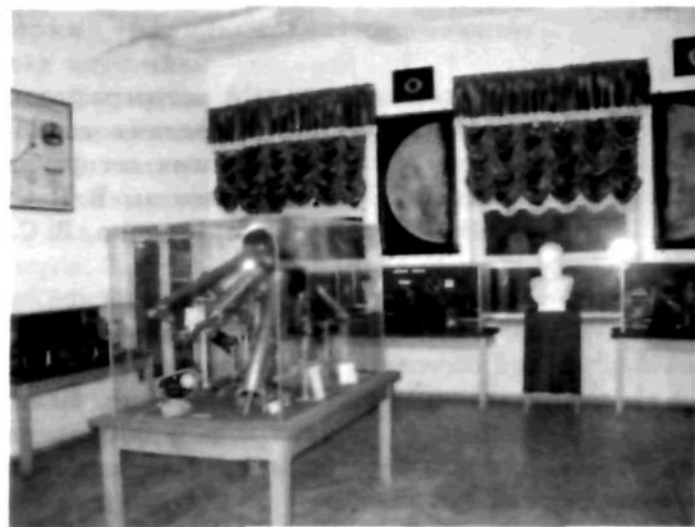
соте 3000 м над уровнем моря было обнаружено место с прекрасным астрономическим климатом, где был организован новый филиал института.

В 1990 году в Институте астрономии был организован Отдел галактик, руководителем которого был назначен д. ф.-м. н., проф. астрономии С. Н. Нуритдинов. В этой группе плодотворно трудятся над проблемами физики квазаров и галактик, динамики звездных скоплений М. Ибрагимов, М. Муминов, Э. Рахматов, К. Миртаджиева, О. Рахимов, Т. Ахунов и Е. Гайнулина.

В период с 1983 по 1995 годы руководил Астрономическим институтом академик АН РУз Т. С. Юлдашбаев. Большая заслуга его заключается в организации строительства филиала института высокогорной обсерватории на горе Майданак Кашкадарьинской области.

С 1995 года в Институте астрономии под руководством известного ученого, проф. Ш. А. Эгамбердиева над проблемами нового направления физики Солнца — гелиосейсмологии на основе международных программ IRIS и TON начала работать группа молодых ученых в составе С. П. Ильясова, Ш. Халикова, А. Серебрянского и др.

В сотрудничестве с учеными Франции и Тайваня изучение гелиосейсмологии ведется с помощью телескопов, установленных на территории Астрономического института и в Паркенте.



В музее института экспонаты древних астрономических приборов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Астрономические постоянные

Скорость света c	299792458 мс ⁻¹
Экваториальный радиус Земли	6378140 м
Наклон эклиптики к экватору (2000 г.)	23° 26' 21",448
Постоянная гравитации	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^2$
Отношение массы Луны к массе Земли	1/81,368
Параллакс Солнца π	8",794148
Отношение массы Солнца к массе Земли	332946,0
Масса Солнца	$1,989 \cdot 10^{30}$
Продолжительность года (в средних солнечных сутках):	
тропический год	$365^{\text{д}},2422 = 365^{\text{д}}05^{\text{ч}}48^{\text{м}}46^{\text{с}}$
звездный год	$365^{\text{д}},2564 = 365^{\text{д}}06^{\text{ч}}09^{\text{м}}10^{\text{с}}$

Сведения о Солнце

Диаметр	$D_{\odot} = 109,12D_{\oplus} = 1390600 \text{ км}$
Площадь поверхности	$S = 11930S_{\oplus} = 608,7 \cdot 10^{10} \text{ км}^2$
Объем	$V = 1303800V_{\oplus} \text{ см}^3 = 1,412 \cdot 10^{18} \text{ км}^3$
Масса	$M_{\odot} = 333434m_{\oplus} = 1,989 \cdot 10^3 \text{ кг}$
Средняя плотность	$\bar{\rho}_{\odot} = 0,256\bar{\rho}_{\oplus} = 1,409 \text{ г/см}^3$
Ускорение свободного падения	$G_{\odot} = 2,7398 \cdot 10^4 \text{ см/с}^2$
Критическая скорость (вторая космическая скорость)	$v_{\text{кр}} = 617,7 \text{ км/с}$
Синодический период вращения точки экватора	27 ^д ,35
Наклон экватора Солнца к эклиптике	7°15'00"
Среднее значение солнечной постоянной ...	$1,388 \cdot 10^6 \text{ эрг/с} \cdot \text{см}^2$
Общая радиация, излучаемая Солнцем	$(3,88 \pm 0,03) \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$
Апекс движения Солнца	$\alpha = 18^{\text{ч}}00^{\text{м}}, \delta = +30^{\circ}$
Скорость обращения Солнца вокруг центра Галактики	-240 км/с
Период обращения Солнца вокруг центра Галактики	-200 млн лет

Сведения о Земле

Экваториальный радиус	6378,140 км
Полярный радиус Земли	6356,774 км
Средний радиус Земли	6371,032 км
Поверхность Земли	510100000 км^2
Объем Земли	$1,0832 \cdot 10^{12} \text{ км}^3$

Масса m_{\oplus}	$5,977 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Угловая скорость вращения Земли	$15",041 \text{ с}^{-1}$
Линейная скорость точки экватора	$465,119 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Линейная скорость точки на широте φ	$465,119 \cos \varphi \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Наибольшая скорость (в перигелии)	$30,287 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$
Наименьшая скорость (в афелии)	$29,291 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$
Ускорение Земли к Солнцу	$0,59 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$
Ускорение (стандартное) свободного падения на Земле	$980,665 \text{ см} \cdot \text{с}^{-2}$
Период обращения (с учетом прецессии) оси Земли вокруг оси эклиптики	25725 лет
Координаты Северного геомаг- нитного полюса	$\varphi = 78,6 \text{ с.ш.}; l = 70,1 \text{ з.д.}$
Напряженность поля на геомагнитных полюсах	0,63

Сведения о Луне

Средний суточный горизонтальный параллакс	57' 2",61
Среднее расстояние Луны от Земли	384400 км
Наибольший видимый угловой диаметр	32' 53",5
Наименьший видимый угловой диаметр	29' 28",1
Диаметр	$3476,0 \text{ км} = 0,27256 d_{\oplus}$
Объем	$2195,3 \cdot 10^7 \text{ км}^3 = 0,020266V_{\oplus}$
Поверхность	$3,796 \cdot 10^7 \text{ км}^2 = 0,0743S_{\oplus}$
Масса	$7,35 \cdot 10^{25} \text{ г} = 0,012300m_{\oplus}$
Средняя плотность	$3,347 \text{ г/см}^3 = 0,607\bar{\rho}_{\oplus}$
Ускорение свободного падения	$1,623 \text{ м/с}^2$
Критическая скорость (вторая космическая скорость)	$2,375 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
Средний наклон лунной орбиты к эклиптике	5° 8' 43",4
Средний наклон лунного экватора к плоскости орбиты ..	6° 40',7
Часть поверхности Луны, не видимая с Земли	0,410
Средняя видимая угловая скорость (в сутках)	$13 \cdot 10^{-35}''$
Средняя скорость движения по орбите	$1,023 \cdot 10^3 \text{ м/с}$
Ускорение Луны к Земле	$0,272 \text{ см/с}^2$
Сидерический месяц	$27^{\text{д}}7^{\text{ч}}43^{\text{м}}11^{\text{с}},47$
Синодический месяц	$29^{\text{д}}12^{\text{ч}}44^{\text{м}}2^{\text{с}},78$
Драконический месяц	$27^{\text{д}}05^{\text{ч}}05^{\text{м}}36^{\text{с}}$
Температура в подсолнечной точке	+ 130 С
Температура ночной стороны Луны	- 150 С

Солнечные затмения

Время затмения	Вид затмения	Время достижения максимума	Место наилучшего наблюдения
3.10.2005	Кольцеобразное	9 ^h 32 ^m	Полоса затмений: Атлантический океан, Африка, Испания, Индийский океан
29.03.2006	Полное	9 ^h 07 ^m	Полоса затмений: Атлантический океан, Африка, Европа, Азия
22.09.2006	Кольцеобразное	12 ^h 09 ^m	Полоса затмений: южная часть Атлантического океана
19.03.2007	Частичное	—	Северо-Восточная Европа
11.09.2007	Частичное	—	Южная Америка, Антарктида, южная часть Тихого океана
7.02.2008	Кольцеобразное	7 ^h 12 ^m	Полоса затмений: Антарктида, южная часть Тихого океана
1.08.2008	Полное	7 ^h 27 ^m	Полоса затмений: Гренландия, Арктика, Западная Сибирь, Китай
26.01.2009	Кольцеобразное	12 ^h 56 ^m	Полоса затмений: Индийский океан, Индонезия
22.07.2009	Полное	11 ^h 40 ^m	Полоса затмений: Юго-Восточная Азия, Тихий океан
15.01.2010	Кольцеобразное	16 ^h 11 ^m	Африка, Индийский океан, Юго-Восточная Азия

Сведения о планетах Солнечной системы

Планеты	Экваториальный радиус	Среднее расстояние до Солнца	Масса	Средняя плотность		Объем (относительно объема Земли)	Период обращения вокруг оси	Наклон орбиты к эклиптике	Эксцентриситет	Гравитационное ускорение, $\Gamma = 1$	Критическая скорость (км/с)	Период обращения вокруг Солнца	Орбитальная скорость (км/с)
				Числитель	Знаменатель								
Меркурий	2437	57,91	0,055	0,330	0,99	5,45	58 ^h 65	7 ^h 0'	0,2056	0,38	4,3	87 ^d ,97	48,0
Венера	6050	108,21	0,816	4,872	0,95	5,25	243 ^h ,16	3 ^h 23'	0,0068	0,90	10,4	224 ^d ,7	35,0
Земля	6378	149,60	1,000	5,978	1,00	5,52	23 ^h 56 ^m 04 ^s	0 ^h 00'	0,0167	1,00	11,2	365 ^d ,26	30,0
Марс	3394	227,94	0,107	0,642	0,71	3,94	24 ^h 37 ^m 23 ^s	1 ^h 51'	0,0933	0,38	5,0	686 ^d ,98	24,1
Юпитер	71400	778,3	317,84	1900	0,24	1,34	9 ^h 50 ^m	1 ^h 18'	0,0484	2,66	60,4	4332 ^d ,59	13,1
Сатурн	60400	1429,3	95,17	568	0,13	0,70	10 ^h 14 ^m	2 ^h 29'	0,0558	1,15	36,2	10759 ^d ,21	9,6
Уран	24800	2875,03	14,59	87	0,26	1,41	10 ^h 42 ^m	0 ^h 46'	0,0471	0,98	21,8	30685 ^d	6,8
Нептун	25050	4504,4	17,25	103	0,29	1,58	15 ^h 48 ^m	1 ^h 47'	0,0085	1,12	23,5	60188 ^d	5,4
Плутон	2900	5900	0,03-0,02	0,18-1,2	?	?	6 ^h 19 ^m 17 ^s	17 ^h 07'	0,2472	?	?	90700 ^d	4,7

СОДЕРЖАНИЕ

От автора 3

I. ВВЕДЕНИЕ

- § 1. Астрономия и ее происхождение 6
- § 2. Краткий исторический очерк 7
- § 3. Видимые положения звезд. Созвездия 13
- § 4. Видимые движения Солнца, Луны, планет и звезд 15
- § 5. Доказательство вращения Земли вокруг своей оси 17

II. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

- § 1. Небесная сфера, ее основные точки и линии 21
- § 2. Видимое годовое движение Солнца. Эклиптика 23
- § 3. Небесные координаты 24
- § 4. Звездные карты 26
- § 5. Связь между высотой Полюса мира и географической широтой места наблюдения 27
- § 6. Видимое суточное вращение небесной сферы на различных географических широтах 28
- § 7. Приближенное определение широты места наблюдения с помощью астрономических наблюдений 31
- § 8. Кульминации звезд и высоты кульминаций 32
- § 9. Основы измерения времени 33
- § 10. Календарь 37
- § 11. Календарь Омара Хайяма 39

III. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ МИРА

- § 1. Строение Солнечной системы 42
- § 2. Планеты Солнечной системы и их размеры 45
- § 3. Планетные конфигурации и условия их видимости 47
- § 4. Движение планет вокруг Солнца. Их периоды 48
- § 5. Законы Кеплера 49
- § 6. Определение расстояний до небесных тел Солнечной системы 51
- § 7. Единицы расстояния в астрономии 53
- § 8. Определение размеров небесных тел Солнечной системы 54
- § 9. Закон всемирного тяготения 55
- § 10. Определение масс небесных тел 55
- § 11. Видимое движение и фазы Луны 57
- § 12. Солнечные и лунные затмения 59

IV. ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОНАВТИКИ

- § 1. Космонавтика и ее связь с другими науками 62
- § 2. Силы, действующие на космический аппарат во время полета 66
- § 3. Невесомость 67
- § 4. Центральное поле тяготения 68
- § 5. Траектория тела в центральном поле тяготения 70
- § 6. Сфера действия и приближенный расчет траектории КА 75
- § 7. Орбитальные элементы искусственного спутника (ИС) Земли 77
- § 8. Орбитальная эволюция ИС в атмосфере Земли 78
- § 9. Влияние Луны и Солнца на движение искусственного спутника 79
- § 10. Движение ИС относительно земной поверхности 81
- § 11. Орбитальные маневры 82
- § 12. Траектория полета на Луну 87
- § 13. Посадка на лунную поверхность 89
- § 14. Траектория полета к планетам 90
- § 15. Учет силы притяжения Земли и планеты-цели при полетах 93

V. ТЕЛЕСКОПЫ И ОБСЕРВАТОРИИ

- § 1. Телескопы. Оптические телескопы 97
- § 2. Радиотелескопы 100
- § 3. Обсерватория Улугбека 102
- § 4. Астрономия в Узбекистане. Майданакская обсерватория 103

VI. СОЛНЦЕ — БЛИЖАЙШАЯ ЗВЕЗДА

- § 1. Общие сведения о Солнце 106
- § 2. Фотосфера Солнца: грануляция и факелы 108
- § 3. Солнечные пятна — островки магнетизма 110
- § 4. Протуберанцы — «языки» пламени 111
- § 5. Солнечные вспышки 113
- § 6. Солнечная корона 115
- § 7. Источник солнечной энергии 116
- § 8. Активность Солнца и ее влияние на Землю 118

VII. ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

- § 1. Меркурий 122
- § 2. Венера 124
- § 3. Земля 127
- § 4. Луна 130
- § 5. Марс 135

§ 6. Юпитер	138
§ 7. Сатурн	144
§ 8. Уран	147
§ 9. Нептун	149
§ 10. Плутон (планета из группы карликов)	151
§ 11. Малые планеты (астероиды)	153
§ 12. Кометы («хвостатые звезды»)	156
§ 13. Метеоры («падающие звезды») и метеорные «дожди»	161
§ 14. Метеориты	164

VIII. ЗВЕЗДЫ

§ 1. Видимая звездная величина	170
§ 2. Абсолютная звездная величина	172
§ 3. Цвет и температура звезд	173
§ 4. Светимость звезд	175
§ 5. Спектры и спектральные классы звезд	177
§ 6. Диаграмма «спектр-светимость»	178
§ 7. Годи́чный параллакс и определение расстояний до звезд	182
§ 8. Определение размеров звезд	184
§ 9. Вычисление масс звезд	186
§ 10. Двойные звезды	187
§ 11. Физические переменные звезды	191
§ 12. Эруптивные переменные звезды	194

IX. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§ 1. Открытие галактик. Наша Галактика	198
§ 2. Шаровые и рассеянные звездные скопления	202
§ 3. Межзвездная пыль и межзвездный газ	204
§ 4. Распределение звезд в Галактике	208
§ 5. Внешние галактики. Классы и спектры галактик ...	211
§ 6. Радиогалактики	216
§ 7. Квазары	217
§ 8. Распределение галактик в пространстве. Крупномасштабная структура Вселенной	218
§ 9. Элементы космологии	220

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

1. Астрономическая школа Улугбека	224
2. Институт астрономии АН Республики Узбекистан и его филиалы	227

ПРИЛОЖЕНИЕ	232
------------------	-----

Учебное издание

МАМАДМУСА МАМАДАЗИМОВИЧ
МАМАДАЗИМОВ

АСТРОНОМИЯ

Учебник для академических лицеев и
профессиональных колледжей

Издание второе

*Издательско-полиграфический творческий дом
„O‘qituvchi“
Ташкент — 2008*

Перевод с узбекского

Редактор *Г. И. Александрова*
Художественный редактор *Ш. Каххаров*
Технический редактор *Т. Грешникова*
Компьютерная верстка *Ш. Юлдашевой*
Корректор *В. Тараненко*

Подписано в печать с оригинала-макета 13.08.2008. Формат 60×90^{1/16}.
Кегль 10,5; 9,5 н/шпон. Гарн. Школьная. Печать офсетная.
Печ. л. 15,8. Узд. л. 14,8. Тираж 1455. Заказ №319.

Издательско-полиграфический творческий дом „O‘qituvchi“ Узбекского
агентства по печати и информации. Ташкент, 129,
ул. Навои, 30. // Ташкент, массив Юнусабад, ул. Мурадова, дом 1.
Договор 14-64-08.