

М. Мамадазимов

АСТРОНОМИЯ

*Учебник для 11 классов средних и средних специальных,
профессиональных учебных учреждений*

Первое издание

*Утверждено Министерством народного образования
Республики Узбекистан*

«DAVR NASHRIYOTI»
Ташкент – 2018

УДК 52(075.3)
ББК 22.6я72
М 23

Данный учебник предназначен для 11 классов средних, средних специальных учебных учреждений и специализированной школы при Институте астрономии Академии наук Республики Узбекистан.

Степень сложности учебного материала обозначена звёздочками. Тексты и задания, обозначенные одной (*) звёздочкой, предназначены для средних общеобразовательных школ и специализированных школ, учебный материал в которых освещается при помощи специальных устройств. Учебный материал, обозначенный двумя (**) звёздочками предназначен только для углубленного и расширенного изучения в специализированных школах. Раздел «Элементы космонавтики», в котором даются начальные знания по аэронавтике, предназначен для специализированных школ.

Рецензенты:

Ш.А. Эгамбердиев – директор Института астрономии АН РУз, доктор физико-математических наук, академик;

С.Р. Ильясов – заместитель директора Института астрономии АН РУз, доктор физико-математических наук;

Б.Д. Сатторова – доцент ТГПУ имени Низами, кандидат педагогических наук;

У.Э. Алимухамедова – преподаватель средней общеобразовательной школы №9 Юнусабадского района г. Ташкента;

Э.Р. Жуманиёзов – преподаватель средней общеобразовательной школы №8 Сергелийского района г. Ташкента;

Н.Б. Бердирасулов – преподаватель средней общеобразовательной школы №104 Сергелийского района г. Ташкента.

М 23 **Астрономия** [Текст]: учебник для 11 классов средних и средних специальных, профессиональных учебных учреждений с русским языком обучения / М.Мамадазимов. – Ташкент: DAVR NASHRIYOTI, 2018. – 176 с.

УДК 52(075.3)

ББК 22.6я72

Издано на средства Республиканского целевого книжного фонда.

ISBN 978-9943-5024-8-2

© М. Мамадазимов, 2018

© ООО «DAVR NASHRIYOTI», 2018

ВВЕДЕНИЕ

ТЕМА 1.

§ 1. Что изучает астрономия?

История её развития и связь с другими науками

Наука, изучающая далёкие и близкие космические объекты, движения космических систем и их физическую природу называется астрономией. Слово *астрономия* греческого происхождения: *астрон* – звезда, *номос* – наука. Это наука о небесных телах, их происхождении и строении, движении, физической природе и эволюции.

Краткая история развития астрономии. Астрономия, как и другие науки, возникла из практических потребностей человечества. Истоки астрономии берут свое начало в Вавилоне, Египте, Центральной Азии, Китае, Индии несколько тысячелетий назад.

В древности греческие астрономы пытались объяснить причины наблюдаемых ими астрономических явлений. В частности, Пифагор высказал предположение о том, что Земля имеет форму шара, а Аристотель, предположив, что неподвижная Земля находится в центре Вселенной, стал основоположником учения о геоцентрической системе мира.

Эратосфен, живший в Александрии в III в. до н. э., первым вычислил длину 1° дуги меридиана Земли, а позже, основываясь на этом, и радиус нашей планеты. Знаменитый греческий учёный и философ Гиппарх составил первый звёздный каталог (таблицу), в котором приведены координаты сотен звёзд. Живший во II в. до н. э. великий греческий астроном Клавдий Птолемей в своем сочинении «Мегале синтаксис» («Великое построение»), обобщив достижения греческой астрономии, создал новое учение, объясняющее видимые движения планет и основанное на геоцентрической теории Аристотеля – Гиппарха, по которой именно Земля находится в центре Вселенной (рис. 1).

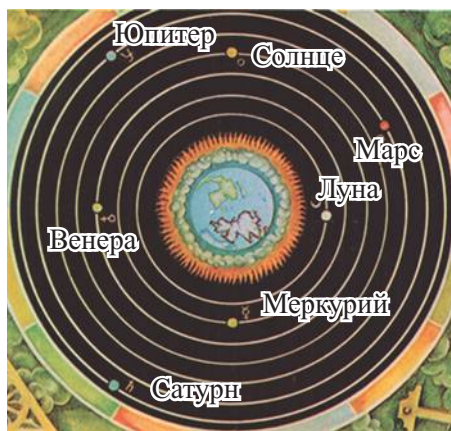


Рис. 1. Строение мироздания по Аристотелю (IV в. до н. э.).

Согласно этому учению, каждая из известных к тому времени пяти планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн) движется вокруг Земли по малому кругу, называемому *эпициклом*. Центры этих малых кругов, в свою очередь, движутся по большим кругам, называемым *деферентами*. Несмотря на то, что эта геоцентрическая теория не отражала действительное строение Вселенной, она просуществовала почти 15 веков.

В IX–XV вв. в странах Ближнего и Среднего Востока, Центральной Азии были построены крупные астрономические обсерватории. В них работали такие известные ученые, как аль-Баттани, аль-Хорезми, аль-Фергани, Абу Махмуд Худжанди, Абу-ль-Вефа Буждани, Абдурахман ас-Суфи, ибн Юсуф и др.

В частности, аль-Баттани, обобщив достижения греческих астрономов, вычислил некоторые данные, относящиеся к движению Луны. Сочинение аль-Фергани «Основы астрономии» выполняло роль астрономической энциклопедии того времени. Арабские астрономы прославились своими достижениями в изучении Луны и её движения и работами по вычислению длины меридиана Земли. Известно более 40 трудов нашего учёного Беруни, в которых приведены сведения о движении Солнца, Луны и планет, их строении, дана информация о календарях.

В XV в. в Самарканде под руководством великого представителя астрономической школы Востока Мирзо Улугбека была построена самая крупная астрономическая обсерватория того периода. В течение нескольких десятилетий функционирования обсерватории при ней была образована астрономическая школа, в которую входили известные ученые того времени – Кази-заде Руми, Джамшид аль-Каши и Али Кушчи и др.

Дальнейшее развитие астрономии связано с фундаментальными открытиями ряда ученых Европы. Особенно плодотворными в этой области были исследования польского астронома Николая Коперника, итальянских учёных Джордано Бруно и Галилео Галилея, немецкого математика Иоганна Кеплера и английского физика Исаака Ньютона. С XVI в. до начала XX в. большинство открытий и законов в области естествознания было связано с именами этих учёных.

Примерно в середине XIX в. применение спектрального анализа и фотографии открыло новые горизонты для астрономии. Появились большие возможности для изучения физической природы небесных тел. В результате

были заложены основы новой науки – *астрофизики*, занимающейся изучением физической природы небесных тел и их систем.

Связь астрономии с другими науками. Астрономия неразрывно связана со всеми другими науками. В развитии астрономии особенно велика роль *физико-математических наук*. В свою очередь и астрономия в течение последних десятилетий вносит своими открытиями ощутимый вклад в развитие этих наук.

Множество идей, теорий и методик физико-математических наук проходит апробацию в ходе астрономических исследований. В их числе законы механики, основные идеи теории относительности, квантовая физика, строение атома, ядерные реакции, теории о взаимодействии излучения и вещества.

Химический состав небесных тел, молекулярные соединения, образующие их атмосферы, вопросы возникновения жизни на Земле относятся к числу вопросов, показывающих связь астрономии с *химией* и *биологией*.

Значительная часть задач в *методологической*, *мировоззренческой* и *экологической* областях астрономии отражает 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. В создании усовершенствованных приборов для астрономических исследований особую роль играют *техника* и *радиоэлектроника*. Всё это может быть важным доказательством неразрывной связи астрономии с другими науками.

Вопросы и задания

1. Кто одним из первых определил, что Земля является шарообразным небесным телом?
2. Кто в древности одним из первых сумел вычислить радиус Земли?
3. Назовите имена ученых Центральной Азии и Европы, внесших большой вклад в развитие астрономии в средние века.
4. Где в средние века на территории Узбекистана находился центр изучения астрономии?
5. Что вы знаете о связи астрономии с другими науками?

ЧАСТЬ I

I РАЗДЕЛ. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

ТЕМА 2.

§ 2. Суточное видимое движение светил. Созвездия

Суточное видимое движение звёзд. Наверное, нет человека, который бы остался равнодушным к красоте безоблачного ночного неба, усыпанного множеством звёзд. И хотя на первый взгляд кажется, что звёзд на видимой небесной полусфере небе бесчисленное множество, на самом деле невооружённым глазом можно увидеть не более 3000 звёзд. Если ночью наблюдать за звёздами с одного определенного места на Земле в течение нескольких часов, то будет казаться, что все звёзды небесной сферы вращаются вокруг воображаемой оси, проходящей через наблюдателя – *оси мира*. Во время этого вращения каждое светило меняет свое положение относительно сторон горизонта. Период такого видимого обращения звёзд на небе составляет одни сутки. Для наблюдателя, смотрящего в сторону юга, звёзды движутся слева направо, т. е. в направлении часовой стрелки.

Если наблюдатель будет снимать на фотоаппарат северную часть неба,



Рис. 2. Видимое суточное вращение звезд вокруг Полярной звезды (по снимкам, сделанным в течение нескольких часов фотокамерой, направленной на Полюс мира).

то сможет увидеть, что часть звёзд, восходя на востоке, будет заходить на западе, а незаходящие звёзды будут описывать концентрические окружности (вокруг определённой невидимой точки). Это обусловлено движением Земли вокруг своей оси (*рис. 2*).

В древности на Востоке, для того чтобы ориентироваться по звёздному небу, люди объединили яркие звёзды в отдельные группы, которые назвали *созвездиями*. Созвездиям давались названия животных или мифических существ (Большая Медведица, Лебедь, Лев, Кит, Дракон), героев греческих мифов (Кассиопея, Андромеда, Пегас и т. д.). Если созвездие было похоже на геометрическую фигуру или предмет, то его так и называли (Треугольник, Весы, Ковш и т. д.).

В настоящее время небесная сфера условно разделена на 88 частей, или созвездий. Яркие звёзды, входящие в определённые созвездия, служат хорошим ориентиром для определения положения тусклых звёзд, входящих в это или в соседнее созвездие.

Для того чтобы легко находить на небе определённые созвездия или звёзды, необходимо хорошо изучить звёздные карты и атласы и практиковаться с их помощью.

Видимое суточное движение Солнца, Луны и планет также происходит в направлении с востока на запад, но, в отличие от звёзд, их точки восхода и захода и максимальная высота 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 звёздами. Но если понаблюдать за движением Луны в течение нескольких дней, то можно обнаружить *истинное движение* Луны вокруг Земли. На фоне звёзд Луна сдвигается с запада на восток за каждые сутки примерно на 13° , совершая полный оборот вокруг Земли за 27,32 суток.

В результате систематического наблюдения за Солнцем в течение нескольких месяцев можно обнаружить, что Солнце также, подобно Луне, движется с запада на восток. Такое *видимое движение* Солнца по сравнению с Луной намного меньше, и полный оборот совершается один раз в год. Это обусловлено истинным годичным движением Земли вокруг Солнца.

§ 3. Доказательства вращения Земли вокруг своей оси *. Маятник Фуко

Внимательно наблюдая за ночным небом в течение нескольких минут, с помощью несложных вычислений можно обнаружить, что звёзды перемещаются с востока на запад со скоростью $15^\circ/\text{ч}$. Если разделить 360° на 15° , получим 24 (часа). Таким образом, видимое движение звёзд вокруг Земли



Рис. 3. Демонстрация вращения Земли вокруг своей оси при помощи маятника Фуко.

происходит с периодом в 24 часа, что соответствует периоду вращения Земли вокруг своей оси в направлении с запада на восток. Вращение Земли вокруг оси доказывается следующими экспериментами.

Подвесим над одним из полюсов Земли маятник, заменив груз наполненным песком сосудом, в днище которого проделано маленькое отверстие (такой маятник называется *маятником Фуко*). Придав ему колебательное движение, заметим, что плоскость колебаний маятника, сохраняя неподвижность относительно звёзд, будет вращаться относительно поверхности Земли по направлению часовой стрелки, и песок, высыпавшийся из сосуда, покроет равномерным слоем внутренность двух круговых секторов с вер-

тикальными углами при вершинах. Это доказывает вращение Земли вокруг своей оси. Маятник Фуко, с длиной нити подвеса 60 м установлен в парижском Пантеоне. Вращение плоскости его колебаний наглядно демонстрирует вращение Земли вокруг своей оси (рис. 3). Поэтому камень, отпущенный с определённой высоты, падает на землю не по радиусу Земли, а с некоторым сдвигом к востоку. Проведённый эксперимент доказывает вращение Земли вокруг своей оси.

§ 4. Небесная сфера, её основные точки, круги и линии

Для изучения видимых положений и движений небесных тел необходимо определить их местоположение на момент наблюдения. Нет необходимости определять расстояния до них, достаточным будет определение положения светил по отношению к известным направлениям. Для изучения видимых положений и движений светил на поверхности небесной сферы определяют точки, линии и окружности, служащие для соответствующих измерений.

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой – глаз наблюдателя, на внутренней поверхности небесной сферы светила находятся в таком же взаимном расположении, в каком реальные светила находятся на небе в момент наблюдения.

Вертикальная прямая, проходящая из центра небесной сферы через наблюдателя, называется вертикальной линией. Она пересекает небесную сферу в двух точках: в зените (Z), находящемся над головой наблюдателя, и в надире (Z') – точке, диаметрально противоположной зениту (рис. 4).

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.

Но на поверхности Земли есть точки и линии, которые не меняют своего положения в зависимости от изменения положения наблюдателя. К таким точкам и линиям относятся *полюс мира, ось мира, небесный экватор*.

Точки пересечения линии оси Земли с небесной сферой называются *полюсами мира*. Точка пересечения небесной сферы с продолжением линии северного полюса Земли называется *Северным полюсом мира* P , точка пересечения небесной сферы с продолжением линии южного полюса Земли называется *Южным полюсом мира* P' . Ось, соединяющая полюса мира, называется *осью мира*. Большой круг небесной сферы, перпендикулярный оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор лежит в одной плоскости с земным экватором. Малые круги небесной сферы, плоскости которых параллельны плоскости небесного экватора, называются *суточными параллелями*. Большие круги небесной сферы, проходящие через полюса мира, называются *кругами склонения*.

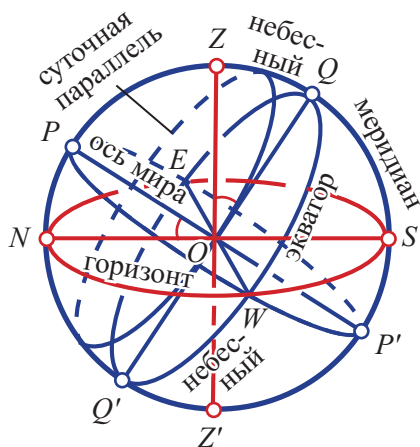


Рис. 4. Основные точки, линии и круги небесной сферы.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого проходит через полюса мира, зенит и надир называется *небесным меридианом*. Небесный меридиан пересекается с математическим горизонтом в двух точках: в *точке Севера* (N , которая ближе к северному полюсу), и в *точке Юга* (S , которая ближе к южному полюсу). Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в двух точках: в *точке Востока* (E) и в *точке Запада* (W). Плоскость небесного меридиана и плоскость математического горизонта пересекаются по прямой линии, которая называется *полуденной линией*.

§ 5. Видимое годичное движение Солнца. Эклиптика

Видимое на фоне звёзд движение солнца известно с давних времен. Это перемещение равно примерно 1° в сутки. Видимый путь Солнца – это большой круг небесной сферы, который называется *эклиптикой*. Если в течение года систематически, стоя в определённом месте в полдень, измерять расстояние Солнца от зенита, то можно определить наклонение эклиптики к небесному экватору под углом от $+23^\circ 26'$ до $-23^\circ 26'$. Отсюда следует, что плоскость земной орбиты наклонена к плоскости небесного экватора под углом $\varepsilon = 23^\circ 26'$ (рис. 5). Четыре основных точки эклиптики: две точки пересечения эклиптики с небесным экватором, две точки наибольшего отклонения от не-

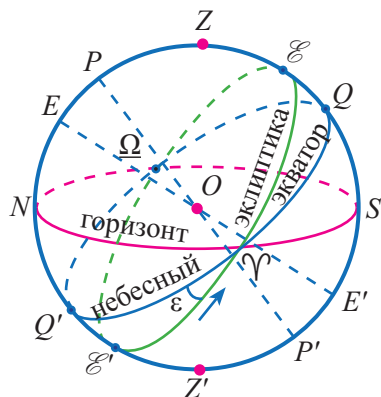


Рис. 5. Видимое годовое движение Солнца. Эклиптика (ε – угол между плоскостями эклиптики и небесного экватора).

бесного экватора. Одна из точек пересечения эклиптики с небесным экватором (когда Солнце пересекает небесный экватор, переходя из южного полушария небесной сферы в северное) называется *точкой весеннего равноденствия* (γ), Солнце проходит через неё 21 марта. Диаметральнао противоположная точка на эклиптике называется *точкой осеннего равноденствия* (Ω). Солнце проходит через эту точку 23 сентября. 22 июня в полдень склонение Солнца составляет $(+23^\circ 26')$ и находится в точке эклиптики ($\mathcal{E}$), называемой *точкой летнего солнцестояния*. А 22 декабря его склонение $(-23^\circ 26')$ и находится в точке эклиптики ($\mathcal{E}'$), называемой *точкой зимнего солнце-*

стояния (рис. 5). Солнце в своем годичном движении проходит через созвездия, образующие 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* (рис. 6). Поскольку видимое годичное движение Солнца (эклиптика) есть отражение истинного движения Земли вокруг Солнца, то плоскость орбиты Земли совпадает с плоскостью эклиптики. Следовательно, плоскость земной орбиты наклонена к плоскости небесного экватора также под углом $23^{\circ}26'$.

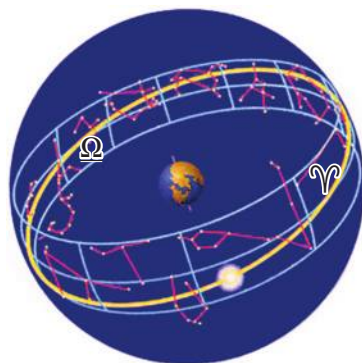


Рис. 6. Созвездия, находящиеся на эклиптической плоскости — зодикальная зона.

Вопросы и задания

1. В чём причина движения звёздного неба с востока на запад?
2. Действительным или кажущимся является движение Солнца и Луны вокруг Земли с востока на Запад?
3. Чем доказывается вращение Земли вокруг своей оси?
4. Покажите точки, линии, круги небесной сферы на модели небесной сферы.
5. Под каким углом наклонена плоскость эклиптики к плоскости небесного экватора?
6. Определите основные точки эклиптики (точки весеннего и осеннего равноденствия и точки зимнего и летнего солнцестояния).

ТЕМА 3.

§ 6. Небесные координаты

При изучении небесных координат необходимо вспомнить знакомую нам из курса географии точку пересечения экватора с меридианом, проходящим через город Гринвич (Великобритания), считающуюся точкой отсчета для определения координат населённых пунктов (рис. 7). Вспомним координаты Ташкента — географическую долготу — λ_T и широту — φ_T . Положение небесных тел в системе экваториальных координат определяют с помощью двух координат: прямого восхождения α (альфа) и склонения δ (дельта).

По определению, началом координат условно принято считать одну из точек пересечения эклиптики с небесным экватором – точку весеннего равноденствия Υ (рис. 8 а, б).

Для определения прямого восхождения α светила M находим сначала точку K пересечения небесного экватора с плоскостью круга склонения светила, проходящего через полюсы мира и точку весеннего равноденствия Υ . Затем отсчитывается угол α от точки весеннего равноденствия до точки K пересечения круга склонения, проходящего через светило M , с небесным экватором. Эта дуга измеряется центральным углом $\angle \Upsilon OK$, проведённым из центра сферы O , т. е. $\alpha = \angle \Upsilon OK$.

Второй координатой светила M является склонение δ – дуга ($K\bar{M}$), соединяющая точку K на круге склонения со светилом M . 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. Склонение светил отсчитывается в пределах от 0 до $\pm 90^\circ$ (минус для светила, находящегося в южном полушарии) в градусах, минутах и секундах дуги. При составлении звёздных карт используют именно эти координаты.

Ещё одной координатой светила в экваториальной системе координат является часовой угол (t). Это дуга небесного экватора $\bar{Q}K$, от точки пересечения небесного экватора с южной частью небесного меридиана Q до точки пересечения K круга склонения с экватором. Измеряется центральным углом $\angle QOK$ (рис. 8 а, б). Часовой угол измеряется в часах, минутах и секундах в

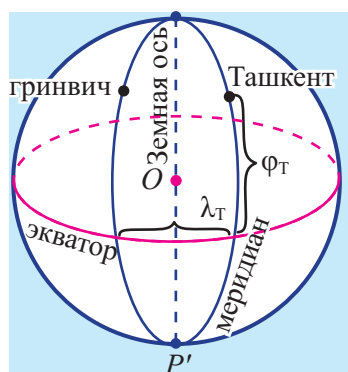


Рис. 7. Географическая система координат.

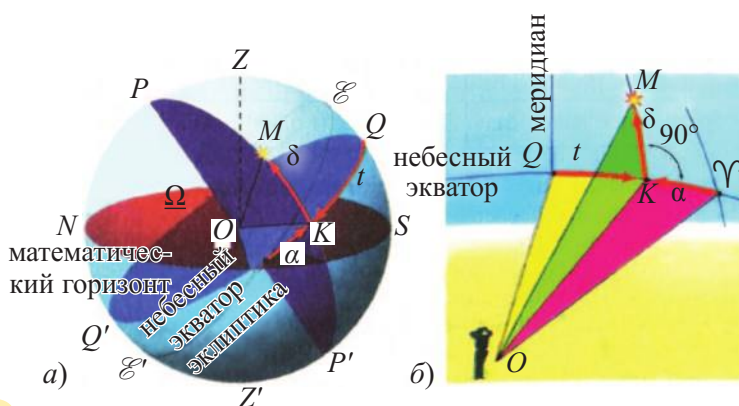


Рис. 8. Экваториальные системы координат.

пределах от 0 до ± 12 часов (минус для измерения в направлении, противоположном суточному вращению сферы, т. е. к востоку) или иногда в пределах от 0 часов до 24 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^h	1^h	4^m	1^m	4^s	1^s

§ 7. Звёздные карты

Звёздные карты, подобно географическим, строятся посредством проецирования соответствующей части небесной сферы на плоскость. Подобная карта приведена на *рис. 9*.

На ней *прямое восхождение α* и *склонение δ* светила откладываются на двух взаимно перпендикулярных осях. 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 звёзды, из точки *M*, соответствующей этой звезде, опускают перпендикуляр на линию, выражающую небесный экватор (ось абсцисс). Координата точки пересечения этого перпендикуляра с осью абсцисс определит прямое восхождение звёзды, 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: $\alpha \approx 4^h 35^m$, $\delta \approx +16^\circ$.

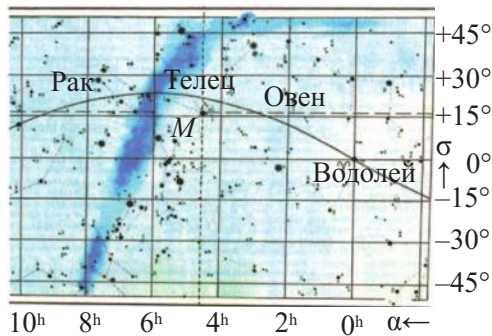


Рис. 9. Звездная карта.

§ 8. Видимые звёздные величины *

Звёзды являются одними из наиболее распространенных видимых объектов во Вселенной. Поэтому изучение их физической природы является одним из наиболее важных вопросов в астрономии.

Для того чтобы сравнивать видимые яркости звёзд (степени блеска), вводится понятие звёздной величины. Термин *звёздная величина* служит для оценки интенсивности её потока излучения, достигающего до Земли, который составляет ничтожную часть общего излучения звезды.

Известно, что интенсивность видимого излучения светил определяется создаваемой ими *освещённостью* приёмников излучения (глаза, фотопленка, фотоэлементы и т. д.). В астрономии, в отличие от физики, освещённость, создаваемая светилом, выражается не в единицах освещённости (люксах), а в относительных единицах, называемых *звёздными величинами* (обозначается m). Это связано с тем, что глаз человека воспринимает не абсолютную, а относительную разницу в освещённости.

Шкала звёздных величин m выражается в последовательности m : ... -5^m , -4^m , -3^m , -2^m , -1^m , 0^m , 1^m , 2^m , 3^m , 4^m , 5^m , ... с увеличением которой интенсивность (свечение) звезды к Земле уменьшается.

Современная шкала звёздных величин берёт начало в Древней Греции. Её предложил во II веке до н. э. Гиппарх, разделив звёзды, видимые невооружённым глазом, по шести величинам. Согласно его шкале звёзды, отличающиеся на одну звёздную величину, по свечению отличаются друг от друга примерно в 2,5 раза.

В настоящее время принят научный способ определения величины звёзд, с учётом психофизиологических законов чувствительности человеческого глаза. Когда были разработаны точные фотометрические способы измерения яркости звёзд, оказалось, что отношение блеска звёзд первой величины к блеску звёзд шестой величины равно примерно 100. Но это отношение соответствует интервалу в 5 звёздных величин, следовательно, отношение блеска звёзд, отличающихся на одну звёздную величину, равно $\sqrt[5]{100} = 2,512$. Действительно, если звёздные величины двух звёзд соответственно равны m_1 и m_2 , а их разность $m_2 - m_1 = 5$, тогда создаваемые ими освещённости соответственно равны E_1 и E_2 , следовательно их отношение $E_1 = 100E_2$, т. е. будет уместно следующее равенство:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{(m_2 - m_1)}$$

Логарифмируя обе части этого уравнения, получаем:

$$\lg \frac{E_1}{E_2} = (m_2 - m_1) \cdot 0,4$$

Это выражение называется *формулой Погсона*.

Следовательно, шкалой звёздной величины называют логарифмическую шкалу сравнения видимого свечения светил.

Человек с нормальным зрением видит невооруженным глазом звёзды до 6-й звёздной величины. Приведем звёздные величины наиболее ярких звёзд, планет и Солнца: Вега (самая яркая звезда в созвездии Лиры) $+0,04^m$, Венера (в наибольшей элонгации) $-4,4^m$, Луна (в полнолуние) $-12,5^m$, Солнце $-26,7^m$. Наиболее слабые звёзды, которые можно увидеть в самые мощные земные телескопы имеют звёздную величину примерно $+24^m \div +25^m$. Современные телескопы могут увидеть звёзды, свечение которых в 100 млн раз слабее свечения звёзд, видимых глазом.

Вопросы и задания

1. Каким линиям небесной сферы соответствуют вертикальные прямые на данной выше звёздной карте? А горизонтальные прямые этой карты?
2. Объясните по схеме, каким образом определяются α и δ экваториальных координат светил на карте.
3. Что за координата часовой угол (t) и как он измеряется?
4. Как называется связь между абсолютными звёздными величинами и светимостями звёзд?
5. Объясните формулу Погсона.

ТЕМА 4.

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

С любой точки Земного шара высота h_p Полюса мира над математическим горизонтом всегда равна географической широте φ места наблюдения.

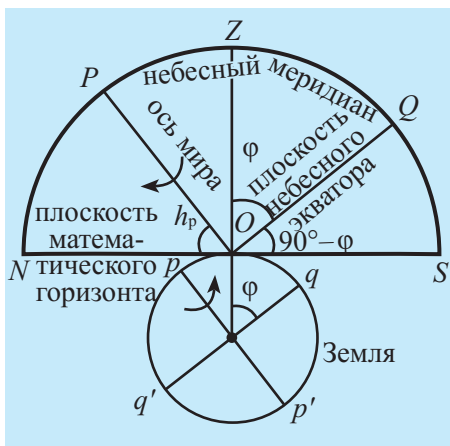


Рис. 10. Связь между высотой Полюса мира и широтой места наблюдения.

Это утверждение доказывается следующим образом: как видно из рисунка 10, расстояние от зенита до небесного экватора, измеренное по небесному меридиану, равно ZQ . Если наблюдатель находится в точке O , географическая широта места его наблюдения равна длине дуги $qO = \varphi$, то, как видно из чертежа, она равна центральному углу ($\angle QOZ$). Соприкасающийся с дугой NP , характеризующей высоту Полюса мира угол NOP и угол QOZ имеют взаимно перпендикулярные стороны. Тогда $ON \perp OZ$ и $OP \perp OQ$. Из геометрии известно, что одноименные углы со взаимно перпендикулярными сторонами равны $\angle NOP = \angle QOZ$. Следовательно, $\angle NOP = h_p$, $\angle QOZ = \varphi$, откуда и следует, что $h_p = \varphi$.

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

Видимое суточное вращение небесной сферы – 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 ($\varphi = 0^\circ$). Тогда, согласно формуле $h_p = \varphi = 0$, высота Полюса мира равна 0, т. е. полюса мира (PP') лежат на математическом горизонте, а ось мира совпадает с полуденной линией (рис. 11, а).

В этом случае небесный экватор перпендикулярен математическому горизонту и проходит через зенит и надир. Суточные движения светил про-

исходят 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 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 ($\delta=0^\circ$), то светило проходит через зенит.

Для того чтобы определить суточное движение Солнца в определенный день года, находят положение Солнца на эклиптике и проводят через найденную точку суточную параллель Солнца, плоскость которой параллельна плоскости небесного экватора. Движение Солнца в данный день происходит именно по этой параллели.

Посмотрим, как происходит видимое суточное движение Солнца в определённые дни для наблюдателя, находящегося на экваторе. 22 декабря в день зимнего солнцестояния склонение Солнца $\delta = -23^\circ 26'$, т. е. достигает своего максимального значения в южном полушарии. Тогда высота Солнца в полдень $h=90^\circ-|-23^\circ 26'|=66^\circ 34'$. Когда Солнце находится в точке весеннего и осеннего равноденствия, 21 марта и 23 сентября соответственно, то его склонение равно 0° ($\delta = 0^\circ$). Следовательно, Солнце движется по небесному экватору. В обоих этих случаях Солнце проходит в полдень через *зенит*. Когда Солнце придет в *точку летнего солнцестояния*, его прямое восхождение $\alpha=6^h$, а склонение $\delta = +23^\circ 26'$, т. е. достигает своего максимального значения в северном полушарии, поэтому в этот день полуденная высота Солнца на меридиане, т. е. в полдень, $h=90^\circ-23^\circ 26'=66^\circ 34'$. Следовательно, вместо четырех времен года на экваторе только два. Самое жаркое время года соответствует весне и осени у нас, более прохладное – нашим лету и зиме. На экваторе в *течение всего года* продолжительность дня равна продолжительности ночи.

Второй случай – предположим, что наблюдатель находится на полюсе 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. 11, б). В этом случае все звёзды северного полушария имеют суточные параллели, плоскости которых параллельны плоскостям математического горизонта и, следовательно, не восходят и не заходят и всегда видны.



Рис. 11. Суточное вращение звездного неба на различных широтах:
а) на земном экваторе; б) на полюсе Земли; в) на некоторой промежуточной широте.

Солнце будет незаходящим светилом с 21 марта по 23 сентября, когда склонение Солнца $\delta \geq 0$, и будет невосходящим с 23 сентября по 21 марта, когда его склонение $\delta < 0$. 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: $h_0 = \delta_0 = 23^\circ 26'$. После этого Солнце начинает приближаться к горизонту, опускаясь все ниже и ниже. 23 сентября Солнце заходит, заканчивается полярный день. Солнце появляется после окончания полярной ночи 21 марта следующего года. На Южном полюсе Земли ($\varphi = -90^\circ$) 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 $0 < \varphi < 90^\circ$, т. е. наблюдатель находится не на экваторе и не на полюсах (рис. 11, в). В этом случае суточные параллели либо не пересекаются с математическим горизонтом, либо, пересекаясь, делятся на неравные части: большая часть суточной параллели проходит над горизонтом. Эта разница связана со склонением δ светила, и чем оно больше, тем большей будет эта разница.

Для звёзд южного полушария часть суточной параллели, проходящая над горизонтом, меньше той, которая проходит под горизонтом. Таким образом, в этих местах можно наблюдать звёзды, которые являются незаходящими, и звёзды, которые являются невосходящими. Это их свойство определяется широтой места наблюдения. По рисунку можно определить: $\delta > 90^\circ - \varphi$ для

незаходящих светил северного полушария; для невосходящих звёзд южного полушария $|\delta| > 90^\circ - \varphi$.

В северных широтах, когда Солнце находится в северном полушарии, с 21 марта по 23 сентября день длиннее ночи, а когда оно находится в южном полушарии, с 23 сентября по 21 марта ночь длиннее дня (рис. 12). Однако за Северным и Южным полярными кругами (от $66^\circ 34'$) 22 июня Солнце может быть незаходящим и невосходящим светилом. Полярный день и полярная ночь на Земле в зависимости от широты местности длится от 24 часов до полугода.

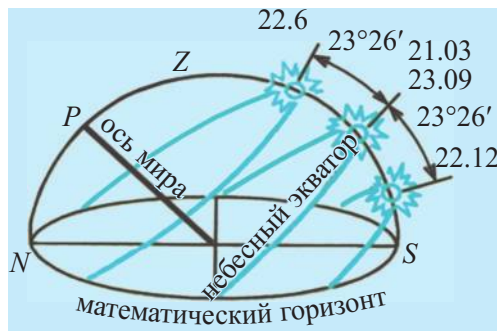


Рис. 12. Изменение полуденной высоты Солнца в течение года.

§ 11. Кульминация светил и высота кульминации

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. 13).

Высота светила во время кульминации связана с географической широтой φ места наблюдения и склонением δ светила.

В момент верхней кульминации K светила измеряется SK , где $h_B = \overset{\sim}{SK} = \overset{\sim}{SQ} + \overset{\sim}{QK}$, где $\overset{\sim}{SQ}$ равна углу наклона к горизонту, т. е. $\overset{\sim}{SQ} = 90^\circ - \varphi$, $\overset{\sim}{QK}$ равна склонению светила (δ), поэтому $h_B = 90^\circ - \varphi + \delta$. 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.

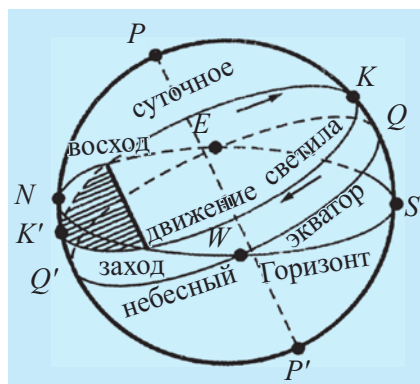


Рис. 13. Кульминация светил.

§ 12. Приближенное определение широты места наблюдений с помощью астрономических наблюдений**

Метод 1. Полярная звезда (альфа – самая яркая звезда созвездия 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 (h_p). Если высота Северного полюса мира над горизонтом в Ташкенте приблизительно равна $41^\circ 20'$, 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 Полюса мира над горизонтом.

Метод 2. Например, определив в населённом пункте высоту Солнца $h_\odot$ в полдень, по известному склонению Солнца $\delta_\odot$ в этот день можно определить широту места наблюдений:

$$h_\odot = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot, \text{ отсюда } \varphi = 90^\circ - h_\odot + \delta_\odot.$$

Вопросы и задания

1. Объясните связь высоты полюса мира и географической широты местности.
2. Объясните, каким будет суточное видимое вращение звёзд, если наблюдатель будет находиться в определённой точке местности. А если наблюдать с экватора?
3. Как происходит видимое суточное вращение Солнца на различных широтах?
4. Какой метод существует для приблизительного определения широты места наблюдения?
5. В Термезе ($\varphi = 35^\circ$). На какой высоте будет северный полюс мира?
6. Что называется кульминацией светил и сколько видов её существует?
7. Как выражается кульминация светила, его наклон и широта места наблюдения?

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 *рис. 14* изображены солнечные часы, сооруженные в Древней Индии. 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.

Полный оборот Земли вокруг какой-либо звезды называется *звёздными сутками*. Но ежедневно наше время определяется восходом и заходом Солнца, поэтому основой для измерения нашего времени являются *солнечные сутки*. Время между двумя последовательными верхними кульминациями центра видимого диска Солнца (иными словами – между двумя полднями) единица времени, называемая *истинными солнечными сутками*.

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* – 24 часа.

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*. Звёздные сутки – это промежуток времени между двумя верхними кульми-



Рис. 14. Солнечные часы, которыми пользовались в Древней Индии.

нациями какой-либо определенной звезды. На практике при определении среднего солнечного времени используются точные соотношения между солнечными и звёздными сутками, которые для любого момента времени уже определены и предлагаются в виде таблиц.

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

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:

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

Всемирное время – это местное среднее солнечное время нулевого меридиана, проходящего через Гринвичскую обсерваторию в Лондоне (рис. 15). Тогда связь между долготой λ места наблюдения и местным T_λ и всемирным T_0 временем определяется формулой:

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

Поясное время. Пользоваться только местным временем неудобно, поскольку систем местного времени имеется столько, сколько географических меридианов. Поэтому с 1884 г. применяется система *поясного времени*. Для



Рис. 15. Исчисление времени начинается с времени гринвичского меридиана.

этой цели вся поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса (рис. 16). 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 $0^h, 1^h, 2^h, \dots, 23^h$, и

основные меридианы проходят приблизительно посередине часового пояса.

Часовые пояса пронумерованы в направлении на восток от Гринвича от 0 до 23. Связь между местным временем (T_m) какого либо пункта (λ_m) и поясным временем (T_n) его часового пояса дается следующей формулой:

$$\lambda_m - \lambda_{осн} = T_m - T_n,$$

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

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

$$T_n = T_m - \lambda_m + N^h \quad \text{или} \quad T_m = T_n - N^h + \lambda_m.$$

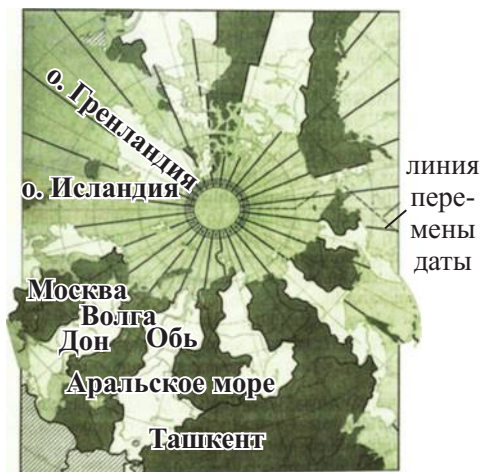


Рис. 16. Часовые пояса Земли.

§ 14. Календари

Система счисления длительных промежутков времени (сутки – день, неделя, месяц и годы) называется *календарём*. За основу календаря берётся смена фаз луны или смена времён года (тропический год). Если он основан на периодичности фаз луны, или лунного месяца, продолжительность которого 29,53 средних солнечных суток, такой календарь называется *лунным календарём*. Если календарь основан на смене времён года – *солнечным календарём*.

Несоизмеримость числа суток в синодическом месяце (промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны) и тропическом году (солнечный цикл смен времён года) создает много трудностей при попытке согласовать между собой различные календари, поскольку календарный месяц и календарный год должны содержать целое число суток.

Солнечный календарь. Один из первых солнечных календарей появился в Древнем Египте (3000 лет до н. э.). Египтяне разработали календарь, смена времён года которого составляла 360 дней, которые делились на 12 месяцев по 30 дней. После определения года в 365 суток, к двенадцатому месяцу было добавлено 5 дополнительных дней. В III веке до нашей эры египетские астрономы определили, что год состоит из 365,25 суток.

Новая реформа календаря была произведена в I в. до н. э. Юлием Цезарем – римским полководцем и государственным деятелем. При помощи астрономов он составил календарь, продолжительность года в котором была 365,25 суток. В честь Цезаря новый календарь получил название *юлианского календаря*. Три года подряд имели продолжительность 365 суток, а четвертый год – 366, поскольку остаток в 0,25 за 4 года составлял ровно сутки. Этот год назывался *високосным*. Дополнительный день каждые 4 года добавлялся в феврале.

За несколько столетий стало понятно, что и в этом календаре есть погрешность. Для её исправления папа Римский Григорий XIII в феврале 1582 года составил новый календарь, взяв за основу календарь, с учетом 365,242 дней.

Новый календарь стал называться *григорианским*. Он ведет отсчет лет 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, Афродита, Марс, Майя, Юнона), июль и август – в честь императоров Юлия Цезаря и Августа, названия оставшихся месяцев соответствуют порядковым номерам в старом римском календаре, апрель получил свое название от слова «*aperire*» – прорасти, распускаться. Год стал начинаться не в марте, а с 1 января.

В России в старину начало года праздновалось в марте и сентябре. В 1342 году митрополит Московский издал указ, по которому Новый год праздновали 1 сентября. В конце XVII века по указу царя Петра I в 1700 году начало года было определено с 1 января. С тех пор Новый год празднуется 1 января.

Вопросы и задания

1. Период обращения какого небесного тела взят за основу времяисчисления?
2. Как определяются солнечные и лунные сутки? Равны ли они?
3. Что называют местным и всемирным временем? Какая связь существует между этими временами?
4. Как определяют поясное время?
5. Какие периоды, связанные с движениями небесных тел, положены в основу календарей?
6. Как называется календарь, в основу которого положен синодический месяц? Как называется календарь, в основу которого положен тропический год?
7. Что вы знаете о юлианском и григорианском календарях?

ТЕМА 6. § 15. Видимое движение, фазы и периоды Луны

Луна – единственный естественный спутник Земли, который совершает один оборот вокруг Земли за 27,32 суток. Этот период времени называется *сидерическим*, или *звёздным*, 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 звёзд 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. Но если наблюдать в течение сидерического месяца за Луной, то она будет менять свою форму, начиная с узкого серпа, который обращён выпуклостью к Солнцу и бывает виден на западной стороне неба, до полного круга (т. е. до полнолуния), а затем вновь до узкого серпа, обращённого выпуклостью в противоположную сторону. Наконец, в течение 2–3 дней Луна совершенно не видна на небе. В этот период она проходит воз-

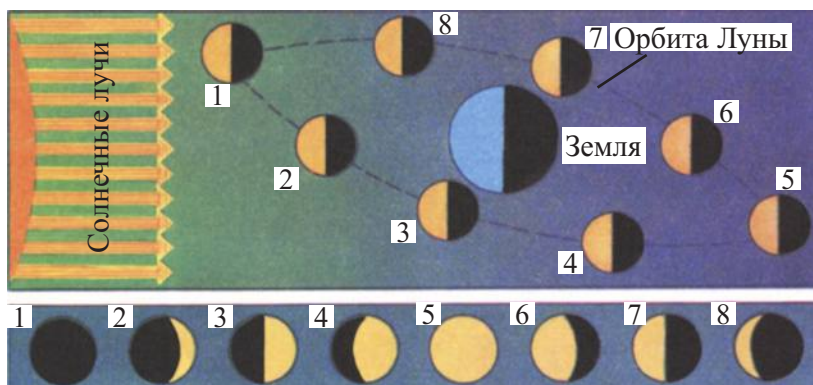


Рис. 17. Изменение фаз Луны. 1. Новолуние. 3. Первая четверть. 5. Полнолуние. 7. Последняя четверть.

ле Солнца и поэтому не будет видна. Формы лунного диска называются *фазами Луны*. Изменение фаз Луны происходит из-за периодического изменения условия освещения её Солнцем по отношению к наблюдателю (рис. 17).

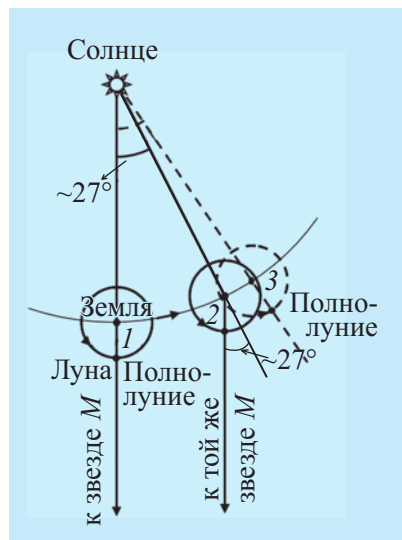


Рис. 18. Объяснение синодического и сидерического периодов вращения Луны вокруг Земли.

Промежуток времени между одноименными фазами Луны называется *синодическим месяцем* и равен 29,53 средних солнечных суток.

Лунный диск не виден с Земли в *новолуние* (первое положение) или виден полностью в *полнолуние* (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 одно-

именными фазами Луны называется *синодическим* месяцем и равен 29,53 средних солнечных суток.

Разница в продолжительности синодического и сидерического месяцев объясняется движением Земли вокруг Солнца (*рис. 18*).

§ 16. Мусульманские солнечный и лунный календари хиджры *

Лунный календарь. Если в основе календаря лежит продолжительность синодического месяца в 29,53 суток, такой календарь называется лунным, а если тропический год в 365,2422 суток – солнечным. Несоответствие 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.

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 педеля, по числу «блуждающих» звёзд – 5 планет, Солнца и Луны. Эти небесные тела обожествлялись во всех древних религиях, и их названия 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.

Возникновению эры мусульманского летосчисления послужило переселение пророка Мухаммеда 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.

Возникновению эры мусульманского летосчисления послужило переселение пророка Мухаммеда из Мекки в Медину. Начало этого календаря совпадает с началом года лунно-солнечного календаря, действующего в то

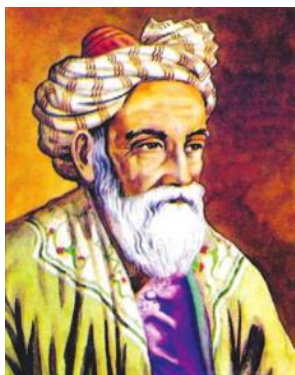


Рис. 19.
Омар Хайям.

время в Мекке, и соответствует 16 июля 622 г. по григорианскому календарю. Названия месяцев мусульманского календаря: *Мухаррам, Сафар, Рабиуль-авваль, Раби ус-сони, Джумад уль-аввал, Джумад ус-сони, Раджаб, Шаабан, Рамадан, Шавваль, Зудькаада, Зуль-хиджа*. По этому календарю новый год – 1 мухаррама 1440 года наступит 11 сентября 2018 года.

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 перво-классные астрономические наблюдения, были определены и уточнены координаты более 100 ярких звёзд 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: определить момент наступления астрономического равноденствия и 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 пред-

ложил приурочить начало каждого года Навруз. Високосные годы в календаре Хайяма распределены в каждом периоде из 33 лет следующим образом: годы с номерами 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 и 33 имели продолжительность 366 дней, остальные 25 лет – по 365 дней. Средняя длина года в нем составляла $365 \frac{8}{33} = 365,24242$. Сравнивая её с точным значением тропического года, находим разницу в $0,00022 \approx 19,55^s$. 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.

На 21 марта 2018 г. приходится начало Нового 1397 года солнечной хиджры.

§ 17. Солнечные и лунные затмения

1. Солнечное затмение. Луна при своем движении вокруг Земли иногда заслоняет Солнце своим диском, в таком случае говорят о солнечном затмении (рис. 20). Это всегда бывает в новолуние.

Наблюдатель, находящийся внутри конуса лунной тени, видит *полное солнечное затмение* (О). Если наблюдатель окажется в полутени от Луны (в точке А или В), то диск Луны закрывает только часть солнечного диска, и наступает *частичное солнечное затмение*. Иногда вместо полного солнечного затмения, наблюдатель будет видеть *кольцеобразное солнечное затмение*, при котором вокруг темного, образуемого Луной, диска на поверхности Солнца будет видно узкое яркое кольцо от Солнца.

2. Лунное затмение. Луна, вращаясь вокруг Земли, иногда попадает в её тень. В таком случае говорят о лунном затмении. Конус земной тени длиннее конуса лунной тени, и если Луна полностью попадет в него, то произойдет *полное лунное затмение*. Если Луна попадает в полутень Земли, говорят о *полутеневом затмении* (рис. 21). Лунное затмение может произойти только во время полнолуния.

В определённых местах на Земле лунное затмение наблюдается чаще, чем солнечное. Из-за небольшого размера лунной тени солнечное затмение

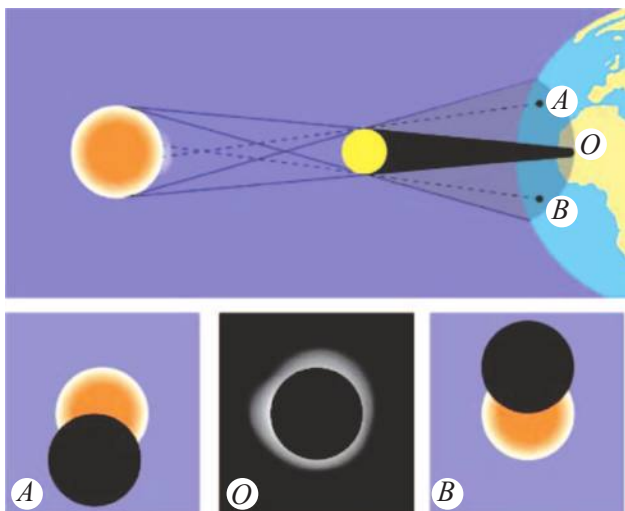


Рис. 20. Солнечное затмение (на нижних рисунках виды солнечных затмений в точках Земли А, О, В).

может быть видно только на небольшой территории Земли. Лунное затмение видно на всём полушарии Земли, обращённом к Луне.

При полном затмении Луна приобретает темно-красный цвет, так как солнечный свет все же освещает Луну, но синие и голубые лучи, преломляясь в атмосфере Земли, рассеиваются, и Луна освещается преимущественно красными лучами. Плоскость Луны наклонена к эклиптике, в связи с несопадением орбит Луны и Земли солнечные и лунные затмения не наблюдаются при каждом новолунии и полнолунии.

В момент солнечного затмения Луна находится в астрономической фазе новолуния, центр Солнца находится на $16,5^\circ$ меньше одного из узлов Луны,

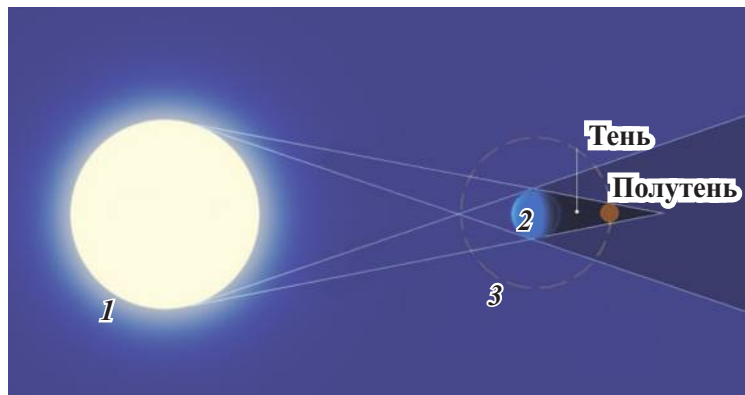


Рис. 21. Лунное затмение. 1 – Солнце; 2 – Земля; 3 – орбита Луны; Луна в конусе тени Земли.

в момент лунного затмения Луна находится в фазе полнолуния, центр Солнца находится на $10,6^\circ$ меньше дуги одного из узлов Луны. В год бывает от 1 до 5 солнечных затмений, лунных затмений может и не быть ни разу в год, или максимально до 3 раз. Поэтому в год может быть до 7 затмений, или только 2 солнечных.

В древности солнечные и лунные затмения наводили ужас на людей. В настоящее время наступление солнечных и лунных затмений вычисляется на много лет вперед, поэтому затмения никого не пугают.

Вопросы и задания

1. Каков период вращения Луны вокруг своей оси? Вокруг Земли?
2. По какой причине Луна всегда повернута к Земле одной и той же стороной?
3. Как называются основные фазы Луны?
4. Что называется синодическим периодом Луны?
5. Сравните календарь Омара Хайяма и григорианский календарь.
6. Объясните затмения Луны и Солнца.
7. Назовите причины, по которым не происходят затмения Солнца в каждое новолуние, а Луны в каждое полнолуние.

II РАЗДЕЛ. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

ТЕМА 7.

§ 18. Строение солнечной системы

1. Развитие представлений о строении Солнечной системы. История развития представлений о строении мира берёт начало в глубокой древности. 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 IV в до н. э., когда известный греческий философ Аристотель доказал, что Земля, которая имеет форму шара, находится в центре Вселенной, в со-

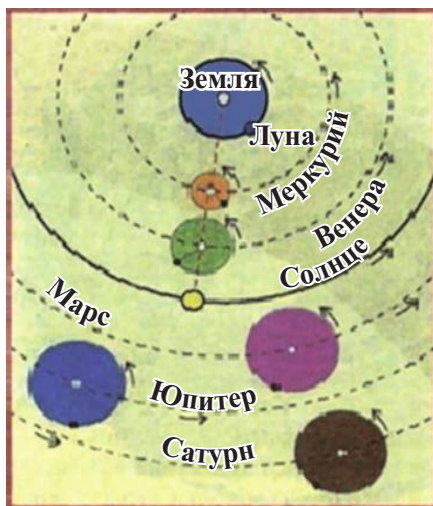


Рис. 22. Геоцентрическая система Птолемея.

знании людей сложилось представление, что в центре Вселенной расположен жестко закрепленный земной шар, вокруг которого движется небо вместе с прикрепленными к нему звёздами.

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 рис. 22. На самой внешней сфере на *одинаковом* расстоянии от Земли расположены звёзды, которые также вращаются

вокруг Земли.

Однако с течением времени тщательное изучение движения планет затрудняло объяснение сложного перемещения планет на фоне звёзд. В результате, когда стало ясно, что существующая теория о строении Вселенной не может правильно отразить структуру Вселенной, возникла необходимость заменить ее новой теорией, основанной на наблюдениях.

2. *Учение Коперника о гелиоцентрическом строении мира.* В XVI в. известный польский астроном *Николай Коперник* (1473–1543) после многолетних астрономических наблюдений создал *гелиоцентрическую теорию* 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. 23). Звёзды, 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 звёзд и вращение Земли в ряду других *планет вокруг Солнца* (рис. 24).

Теория Коперника о строении мира стала называться *гелиоцентрической теорией*.

Позже вклад в развитие гелиоцентрической теории внес известный итальянский учёный и философ *Джордано Бруно* (1548–1600). Он считал, что звёзды находятся на различном расстоянии от Солнца, что Солнце не является центром Вселенной, а всего лишь одна из ее звёзд, и вокруг звёзд также могут обращаться планеты. Дальнейшие астрономические подтвердили его правоту.

В формировании представлений о строении Вселенной есть большая заслуга и нашего соотечественника – великого 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. 25*). 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.



Рис. 23. Гелиоцентрическая система строения мира.
(в центре – Солнце).

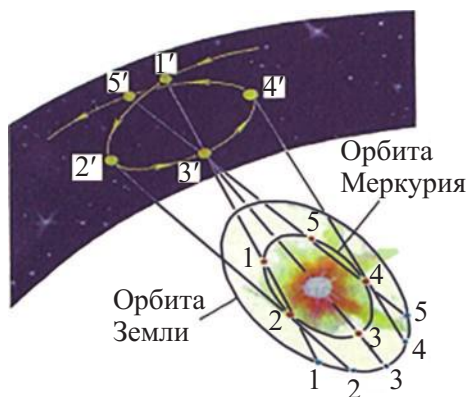


Рис. 24. Объяснение видимого попятного движения планет.

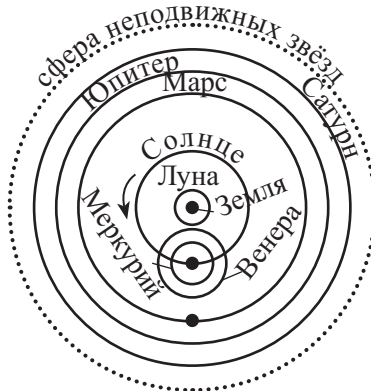


Рис. 25. Представления Беруни о строении мира. Согласно им, Солнце вместе со своими спутниками – Меркурием и Венерой – вращается вокруг Земли.

§ 19. Масштабы и состав Солнечной системы

С объектами Солнечной системы мы впервые познакомились на уроках природоведения. Известно, что Солнце – самое большое светило этой системы. Его диаметр в 109 раз больше диаметра Земли, масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли (рис. 26). Вокруг Солнца обращается 8 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 и Нептун*.

Находящаяся почти на самой границе Солнечной системы планета Нептун расположена от Солнца на расстоянии, почти в 30,1 раз превосходящем расстояние от Земли до Солнца. Если расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 149,6 млн км, то Нептун удален от Солнца на расстояние 4495 млн км. Для того чтобы достигнуть Земли, солнечному свету требуется 8 минут, тогда как до Нептуна солнечный свет приходит примерно за 4,5 часов (рис. 27).

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 звёзды» – *кометы*, твердое ядро которых окутано облаком газа.

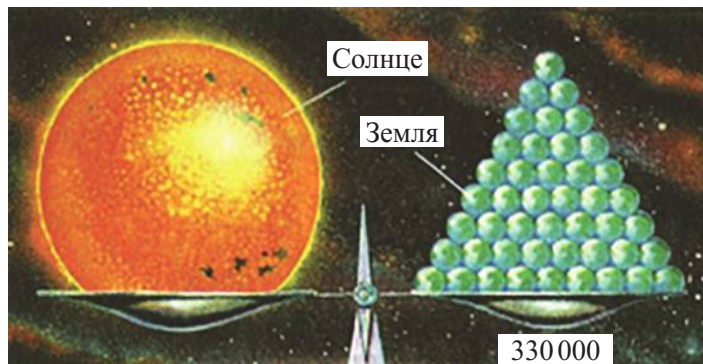


Рис. 26. Сопоставление масс Солнца и Земли.

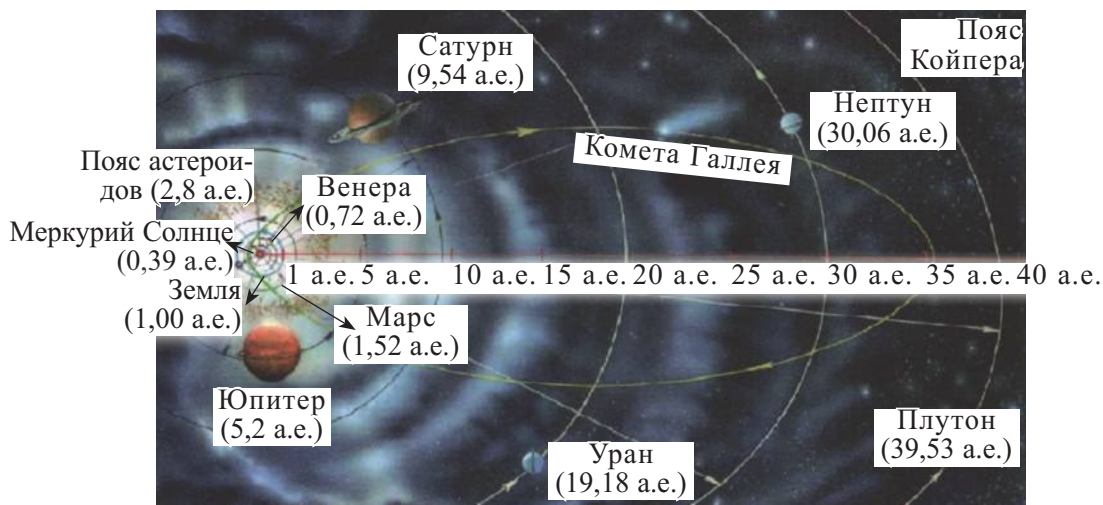


Рис. 27. Масштабы солнечной системы (а.е. — астрономическая единица).

Хвосты комет образуются при их приближении к Солнцу и в основном направлены в противоположную от Солнца сторону.

В пределах Солнечной системы вокруг Солнца также обращаются многочисленные малые космические тела, они называются *метеорами*.

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 0,15 % от массы Солнечной системы, на массу Солнца приходится 99,85%. Поэтому Солнце является причиной движения всех тел Солнечной системы.

§ 20. Конфигурации планет и условия их видимости *

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

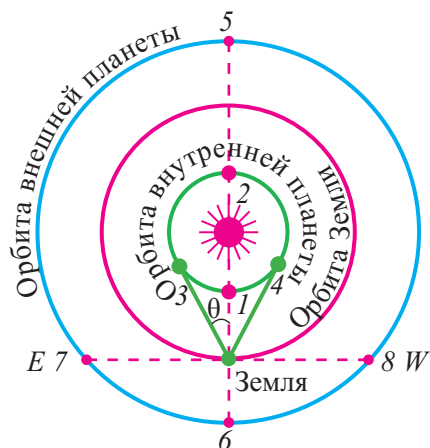


Рис. 28. Конфигурации планет и условия видимости.

Рассмотрим конфигурации двух планет. На рис. 28 схематически изображены орбиты двух планет Солнечной системы. Орбита одной из них – это орбита внутренней планеты (так называются планеты, орбиты которых лежат внутри земной орбиты, например, Меркурий и Венера). Орбита другой – это орбита внешней планеты (так называются планеты, орбиты которых лежат вне земной орбиты).

Если внутренняя планета находится в одной из четырёх указанных на рисунке точек, то говорят, что она находится относительно 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) планета, в *восточной* (7) и в *западной* (8) квадратурах соответственно. В точке (6) относительно соединения планета находится под углом в 180° .

В соединении с Солнцем (5) планета будет не видна для наблюдающего с Земли. В периоде противостояния (6) планета будет находиться напротив Солнца, 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 её 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.

§ 21. Периоды движения планет вокруг Солнца *

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, планета Нептун – за 165 лет. Скорости их движения также различны.

В приложении приведена таблица, в которой собраны сведения, относящиеся к движению планет вокруг Солнца, и приведены величины углов, образуемых плоскостями их орбит с эклиптической. Как видно из таблицы, все планеты движутся по орбитам, близким к эклиптике.

Сидерическим периодом обращения планеты ($T_{\text{пл}}$) называют промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите. *Синодическим периодом* обращения планеты ($S_{\text{пл}}$) называют промежуток времени между её 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 ($T_{\text{пл}}$). Так как суточное угловое перемещение внутренней планеты по орбите равно $\frac{360^\circ}{T_{\text{пл}}}$, Земли $\frac{360^\circ}{T_{\oplus}}$, то

$$\frac{360^\circ}{S_{\text{пл}}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{пл}}} - \frac{360^\circ}{T_{\oplus}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{S_{\text{пл}}} = \frac{1}{T_{\text{пл}}} - \frac{1}{T_{\oplus}},$$

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:

$$T_{\text{пл}} = \frac{T_{\oplus} \cdot S_{\text{пл}}}{T_{\oplus} + S_{\text{пл}}}.$$

Для внешних планет $\frac{1}{S_{\text{пл}}} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T_{\text{пл}}}$,

отсюда
$$T_{\text{пл}} = \frac{T_{\oplus} \cdot S_{\text{пл}}}{S_{\text{пл}} - T_{\oplus}}.$$

Вопросы и задания

1. Объясните разницу геоцентрической и гелиоцентрической теорий строения Вселенной.
2. Как на основании гелиоцентрической теории объясняются движения планет на фоне неподвижных звёзд?
3. Какие новые идеи о строении Вселенной высказал Джордано Бруно?
4. Нарисуйте модель строения Вселенной по Беруни.
5. Во сколько раз диаметр и масса Солнца больше Земли?
6. В какой конфигурации бывают внешние и внутренние планеты, двигаясь вокруг Солнца?
7. Что называется синодическим периодом планет?
8. Как определяется сидерический период планет по их синодическому периоду?

ТЕМА 8.

§ 22. Суточный и суточно-горизонтальный параллакс. 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*.

От небесного светила (M) к центру Земли (O), до точки места наблюдения (K) на поверхности Земли проводим линии. Угол с вершиной в центре светила и со сторонами, направленными к центру Земли и в точку наблюдения, есть *суточный параллакс* (рис. 29). Он очень мал, его дуга измеряется в секундах.

Для определения угла суточного параллакса светила нужно наблюдать светило с двух точек (K и C) определённого меридиана Земли. На фоне далёких звёзд звезда будет видна в двух точках (M_1 и M_2). Если по отношению к наблюдателю звезда будет находиться на горизонтальной линии, её параллакс будет суточным горизонтальным параллаксом. На основе параллаксов

ческих сдвигов можно определить угол p'' горизонтального параллакса и определить расстояние до планеты:

$$\sin p'' = \frac{R_{\oplus}}{L},$$

отсюда $L = \frac{R_{\oplus}}{\sin p''} = \frac{206265}{p_0} \cdot R_{\oplus}$, поскольку

ку p_0 – измеряется в секундных дугах и можно записать: $\sin p'' = p_0 \cdot \sin 1''$, $\sin 1'' = \frac{1}{206265}$. Здесь $R_{\oplus}$ – радиус Земли.

2. В настоящее время расстояние до небесных тел Солнечной системы можно определить методом радиолокации.

Если время, за которое радиосигнал (электромагнитная волна), отправленный с Земли на какую-либо планету пройдет туда и обратно равно t , его путь равен $2L$, а скорость распространения радиоволны равна скорости света, можно записать $c = \frac{2L}{t}$, тогда расстояние до небесного тела будет

$$L = \frac{ct}{2}.$$

Именно таким методом определены расстояния от Земли до небесных тел Солнечной системы, например, расстояние до Солнца (1 астрономическая единица = 149 598 500 км) определено с большой точностью.

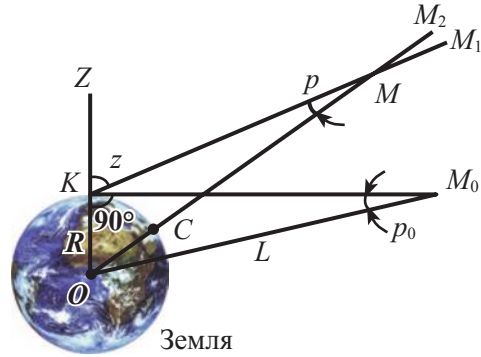


Рис. 29. Суточный (p) суточно-горизонтальный (p_0) параллакс светила.

§ 23. Определение радиусов небесных тел Солнечной системы **

Для того чтобы определить истинный радиус r наблюдаемой с Земли планеты, нужно определить её суточный горизонтальный параллакс p_0 . Тогда из прямоугольного треугольника OEP (рис. 30) имеем:

$$\sin p_0 = \frac{OE}{OP} = \frac{R_{\oplus}}{L}$$

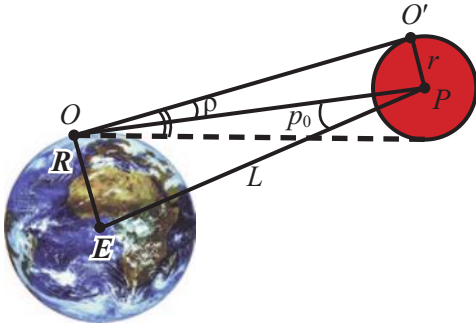


Рис. 30. Метод вычисления радиусов небесных тел Солнечной системы.

Из прямоугольного треугольника OPO' для углового (видимого радиуса ρ планеты находим:

$$\sin \rho = \frac{O'P}{OP} = \frac{r}{L}$$

Подставляя значение r , находим: $r = L \sin \rho$. Подставляя значение L найденное в предыдущем параграфе, определяем радиус планеты (r) по формуле:

$$r = L \sin \rho = \frac{R_{\oplus}}{\sin p_0} \sin \rho.$$

Выражая p_0 и ρ в секундах дуги, получаем искомую формулу

$$r = \frac{R_{\oplus}}{p_0''} \rho''$$

поскольку $\sin p_0'' = p_0 \cdot \sin 1''$, $\sin \rho'' = \rho \cdot \sin 1''$.

Если видимый радиус небесного тела достаточно большой (например, для Луны), то до него расстояние:

$$r = \frac{R_{\oplus} \cdot 206265}{p_0} \cdot \sin \rho.$$

Вопросы и задания

1. Какой угол небесного тела Солнечной системы называется углом параллакса?
2. Как определяются расстояния до небесных тел Солнечной системы?
3. Как с использованием метода радиолокации определяются расстояния до небесных тел?
4. Как определить размеры (радиусы) небесных тел Солнечной системы? Какие параметры небесных тел необходимо определить для этого?
5. Запишите формулы для вычислений радиуса (r) планеты, если известны её суточный горизонтальный параллакс (p_0) и видимый радиус (ρ)?

В астрономии выражать расстояния до небесных тел в СИ – Международной системе единиц (в метрах) неудобно, поэтому в астрономии приняты специальные единицы расстояний:

1. **Астрономическая единица (а.е.)** – среднее расстояние от Земли до Солнца $\sim 149,6$ млн км; Эта единица используется, в основном, для выражения расстояний до небесных тел Солнечной системы (планет, комет, Луны и др.).

2. **Световой год (с.г.)** – 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» и «секунда») – расстояние до звезды, годичный параллакс которой равен $1''$.

$$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ с.г.} = 206265 \text{ а.е.} = 30,86 \cdot 10^{12} \text{ км.}$$

Расстояния в астрономии измеряют и в более крупных единицах; килопарсек – 1000 пк, мегапарсек = 10^6 пк. Их используют для выражения расстояний небесных тел, находящихся за пределами Солнечной системы (звёзд, звёздных скоплений, туманностей и т.д.) и размеров внешних галактик и расстояний между ними.

§ 25. 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 нескольких 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.

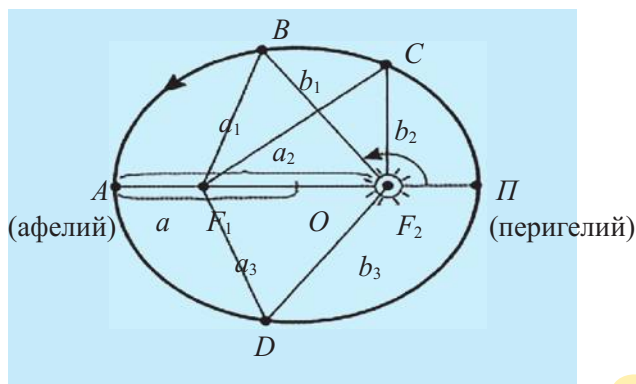


Рис. 31. Движение планеты по эллипсу.

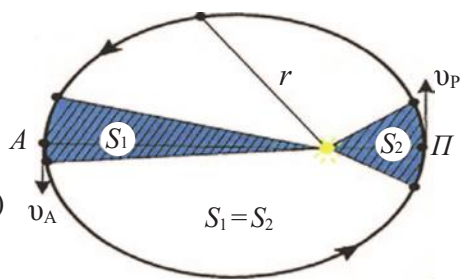


Рис. 32. За равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади.

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 её 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 *радиус-вектором* точки. Обобщив результаты своих почти 24-летних исследований, Кеплер открыл три закона планетных движений, которые формулируются следующим образом:

1. Каждая из планет движется вокруг Солнца по эллипсу, 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.

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

Если за единицу времени принять один звёздный 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:

$$T^2 (\text{год}) = a^3 (\text{а. е.}).$$

§ 26. Определение масс небесных тел *

Масса Земли планет. Закон всемирного тяготения Ньютона дал возможность определять важную характеризующую величину – массу небесного тела. В частности, определяя массу Земли на основе этого закона, используя связь между скоростью свободного падения и массой Земли, мы можем написать:

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

здесь: M – масса Земли; R – её радиус; G – гравитационная постоянная. Подставляя их значения ($g=9,8$ м/с², $R=6370$ км, $G=6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг²), определяем массу Земли: $M=6 \cdot 10^{24}$ кг.

Если остановиться на вычислении масс небесных тел, то для определения используется III закон Ньютона, обобщённый (уточнённый) Ньютоном:

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

Здесь: для T_1 и T_2 – сидерический период (период вращения вокруг Солнца) двух произвольных планет; M – масса Солнца; m_1 и m_2 – массы вышеназванных планет, a_1 и a_2 – большие полуоси их орбит.

Используя универсальность этого закона, можно вычислить массу любой другой планеты. Согласно третьему (уточнённому) закону Кеплера (III), сравниваются движение спутника планеты, массу которого требуется вычислить и движение спутника Земли (сравниваются периоды и большие полуоси их орбит), в итоге:

$$\frac{T_{\text{пл}}^2}{T_{\oplus}^2} \cdot \frac{m_{\text{пл}} + m_1}{m_{\oplus} + m_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

здесь: $T_{\text{пл}}$ и $T_{\oplus}$ – периоды вращения спутников планеты и Земли, $m_{\text{пл}}$ и $m_{\oplus}$ – массы планеты и Земли, m_1 и m_2 – массы их спутников, a_1 и a_2 – большие полуоси орбит спутников (природных или искусственных) планеты и Земли.

Поскольку обычно массы спутников гораздо меньше массы планет (например, массы Земли и её спутника – Луны), если взять вместо m_2 массу спутника Земли, то можно написать: $m_{\text{пл}} \gg m_1$, $m_{\oplus} \gg m_2$. Тогда показанная выше формула (без учёта m_1 и m_2) будет выглядеть так:

$$\frac{m_{\text{пл}}}{m_{\oplus}} = \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^3 \cdot \left(\frac{T_{\oplus}}{T_{\text{пл}}} \right)^2$$

Здесь $T_{\oplus}$, $T_{\text{пл}}$, a_1 и a_2 , соответственно, параметры периодов и больших полуосей орбит спутников планеты Земля.

Массу Солнца также несложно будет вычислить по формуле:

$$\frac{T_{\oplus}^2}{T_{\text{и.с.}}^2} \cdot \frac{M_{\odot} + m_{\oplus}}{m_{\oplus} + m_{\text{и.с.}}} = \frac{a_{\oplus}^3}{a_{\text{и.с.}}^3}$$

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

Здесь $M_{\odot}$ и $m_{\oplus}$ – массы Солнца и Земли, $T_{\oplus}$ и $a_{\oplus}$ – период вращения Земли вокруг Солнца и большая полуось орбиты; $T_{\text{и.с.}}$ и $a_{\text{и.с.}}$ – период и большая полуось орбиты искусственного спутника Земли.

Вопросы и задания

1. Какая замкнутая кривая называется эллипсом?
2. Расскажите о первом и втором законах Кеплера.
3. Какая связь существует между периодом планеты и большой полуосью её орбиты по III закону Кеплера?

4. Запишите и объясните математическое выражение III закона Кеплера. Как на основании этого закона высчитываются массы тел Солнечной системы?
5. Как по величинам массы Земли определяется масса Солнца?

ТЕМА 10. § 27. Задача двух тел. Космические скорости

Ньютон доказал, что под действием закона всемирного тяготения планеты вращаются вокруг Солнца согласно законам Кеплера. Ньютон уточнил и обобщил первый закон Кеплера, доказал, что в определенных условиях под действием тяготения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений – окружности, параболе или гиперболе, а не только по эллипсу как отметил Кеплер.

В частности, Ньютон подчеркнул, что тело идеальной сферической формы, масса которого равна массе Земли, брошенное по горизонтальному направлению с определенной начальной скоростью (рис. 33), под воздействием поля тяготения Земли может выйти на круговую орбиту с величиной, равной радиусу Земли. При этом величина его начальной скорости зависит от радиуса и массы Земли и определяется по формуле:

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}}$$

где G – гравитационная постоянная, она равна $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Нм}^2}{\text{кг}^2}$, радиус Земли $R_{\oplus} = 6370$ км, масса Земли $M_{\oplus} = 5,97 \cdot 10^{24}$ кг и начальная скорость будет равна $7,91 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, что называется *первой космической скоростью* для Земли. Это значит, что ракета, поднимающаяся горизонтально с первой космической скоростью с поверхности тела идеальной сферической формы, без атмосферы, с массой, равной массе Земли, может выйти на круговую орбиту вокруг него. Так как существует атмосфера Земли, тело, находившееся на высоте не менее чем 150 км от Зем-

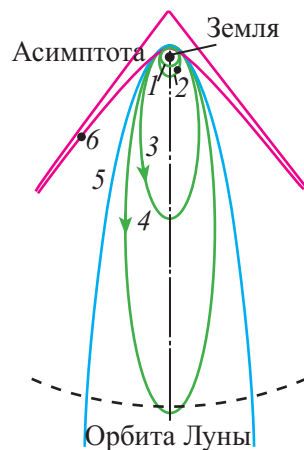


Рис. 33. Траектория движения тел в поле тяготения Земли.

ли и скорость которого равна $v = \sqrt{\frac{GM}{R_{\oplus} + h}}$ и направлена по касательной относительно поверхности Земли, становится искусственным спутником Земли, движущимся по круговой орбите над Землёй (рис. 33-1).

Если начальная скорость искусственного спутника направлена горизонтально и при этом больше первой космической скорости, то его орбита представляет собой эллипс (2, 3, 4 на рис. 33). Другими словами, при достижении скорости равной $v_0 = \sqrt{\frac{2GM}{R_{\oplus}}}$, искусственный спутник начинает двигаться вокруг Земли по траектории параболы (рис. 33-5). Значение такой скорости равно $11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, т.е. $(7,91 \times 1,41) \frac{\text{км}}{\text{с}}$, и она называется *второй космической скоростью*.

При превышении начальной скорости $11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$, искусственный спутник начинает двигаться по отношению к Земле по *траектории гиперболы* (рис. 33, 6). Такой искусственный спутник движется в бесконечности от Земли, его траектория приближается к асимптоте гиперболы. Его траекторию можно будет оценить как прямолинейную.

Здесь речь идет о двух телах (Земля и её спутник,двигающийся вокруг неё по геоцентрической траектории), ускорение искусственного спутника, получаемое под действием притяжения других планет солнечной системы, и даже притяжение Солнца оказывается сравнительно менее существенным, чем ускорение, получаемое под влиянием Земли. При этом гравитационное поле однородного тела идеальной сферической формы, расположенное в фокусе траектории тела,двигающегося в поле тяготения называется *центральной полем тяготения* и имеет ряд особых свойств. Считается, что небесное тело притягивает так, будто вся его масса сосредоточена в его центре.

Вопросы и задания

1. Как выглядят траектории тела, движущегося в поле тяготения?
2. По каким формулам определяются первая и вторая космическая скорость тела,двигающегося в поле тяготения?
3. Поле какого тела принято в качестве центрального поля тяготения?

III РАЗДЕЛ. АСТРОФИЗИКА И МЕТОДЫ ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТЕМА 11. § 28. Исследование электромагнитного излучения небесных тел – основа всеволновой астрономии

Всё, что известно о физических свойствах небесных тел, было получено путем изучения соответствующих электромагнитных излучений оптического и других диапазонов, исходящих от них. Небесные тела в зависимости от своего физического состояния излучают электромагнитные волны различной длины. Исходящие из них лучи, с одной стороны, не излучаются беспрерывно, а испускаются отдельными квантами, в виде мельчайших частиц, обладающих энергией. Видимые лучи, имеющие энергию 2–3 эВ, занимают малую область лучей, применяемых в астрофизике. С другой стороны, они отмечаются как электромагнитные волны. В вакууме электромагнитные волны всегда распространяются с одинаковой для всех видов излучения скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Распространение лучей в качестве волны проявляется в их интерференции и дифракции, поэтому их можно охарактеризовать, как и любую волну, частотой (ν) и длиной (λ), между которыми существует зависимость:

$$\nu\lambda = c,$$

где c – скорость света.

С помощью специального прибора можно разделить электромагнитные колебания на спектры различных по своим длинам волн. При прохождении луча света через прозрачную треугольную призму происходит разложение света на такие составляющие, и на ней отражаются лучи, расположенные в определенной последовательности. Цвет этих лучей определяется длинами их волн. Цвет излучения изменяется по мере уменьшения его длины волны следующим образом: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Человеческий глаз воспринимает лучи спектра электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 0,4 мкм до 0,7 мкм (от фиолетового до красного цвета). Эти лучи – так называемые оптические лучи – являются одним из видов электромагнитного излучения, все они вместе составляют шкалу электромагнитных волн. Самые короткие из этих волн в этой шкале называются *гамма лучами*, самые длинные – *радиоволнами*.

Известно, что атмосфера Земли прозрачна для видимых электромагнитных (оптических) лучей и частично видимых ультрафиолетовых, инфракрасных лучей, а также для лучей в диапазоне длин волн от нескольких миллиметров до 10–20 метров. Все остальные электромагнитные волны поглощаются различными слоями атмосферы Земли и не доходят до поверхности Земли.

До изобретения фотографии только глаза наблюдателя являлись единственным натуральным средством, фиксирующим излучение светила. Как только начали применять фотографический метод, стало возможным фиксировать с помощью специальных фотографических и фотоэлектрических устройств часть излучений ультрафиолетового и инфракрасного диапазона, поглощаемых атмосферой Земли.

Благодаря развитию радиотехники в 30–40 годы прошлого века были открыты источники космических радиоизлучений. В результате развивался раздел астрономии – радиоастрономия, которая служит расширению наших знаний о космосе.

Во второй половине XX века «рождение» космонавтики привело к запуску искусственных спутников на орбиту Земли. С помощью устройств, установленных на них, были найдены объекты, излучающие короткие волны (*рентгеновское излучение и гамма-излучение*). В связи с этим в последние десятилетия стало возможным изучение многих мощных источников излучения, найденных с помощью специальных *рентгеновских и гамма телескопов*, установленных на космических станциях.

Началось системное изучение небесных объектов в рентген и гамма диапазонах, как и в далёких ультрафиолетовых и инфракрасных диапазонах астрофизики. В результате на сегодняшний день астрономия превратилась во *всеволновую астрономию*.

§ 29. Оптические телескопы

Наиболее важный астрономический инструмент — телескоп. Телескоп увеличивает видимый угол небесных светил и показывает их в несколько раз более четко. По этой причине при наблюдении звёздного неба в телескоп можно увидеть множество слабо светящихся звёзд, а также такие детали на поверхности близких к Земле небесных тел (Солнца, планет и Луны), которые не видны невооруженным глазом,

Объектив – одна из основных частей телескопа, используемая для сбора лучистой энергии и получения изображения наблюдаемого объекта. Объектив представляет собой линзу или систему линз, зеркало или систему зеркал, обращенную к объекту (рис. 34, 35). Полученное изображение наблюдаемого объекта может рассматриваться через *окуляр* непосредственно, или проецироваться на приемник излучения – фотопластинку или фотопреобразователь. В современных телескопах изображение проецируется на цифровой фотопреобразователь (ПЗС).

Если объектив телескопа состоит из линзы или системы линз, то такой телескоп называется *рефрактором*. Путь лучей света в рефракторе показан на рис. 34. Телескоп с зеркальным объективом называется *рефлектором*. Путь лучей света от наблюдаемого объекта в рефлекторах различных конструкций показан на рис. 35.

Можно следующим образом охарактеризовать выполняемые с помощью телескопа задачи:

1. Регистрация поступающего изображения на фотографической пластинке или фотопреобразователе, спектрографе и т. д.
2. Получение изображений наблюдаемого светила или другого небесного тела в фокальной плоскости объектива
3. Получение отдельных изображений объектов, которые из-за малых взаимных расстояний не различаются невооруженным глазом как отдельные.

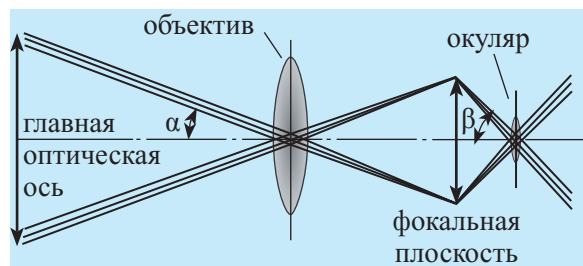


Рис. 34. Схема линзового телескопа (рефрактора). Ход лучей.

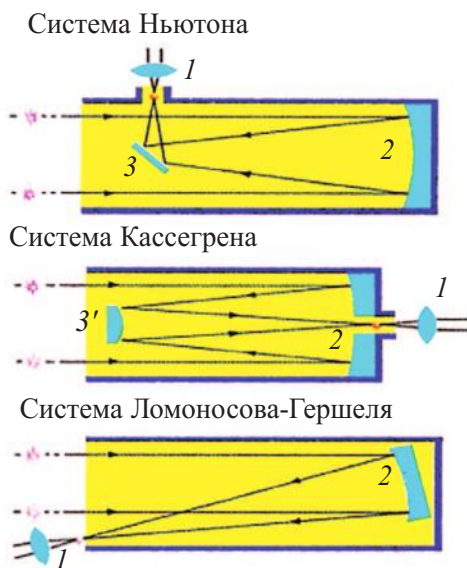


Рис. 35. Схемы зеркальных телескопов (рефлекторов): 1 – окуляр; 2 – объектив; 3 – плоское зеркало; 3' – выпуклое зеркало.

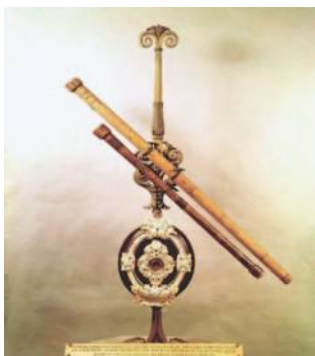


Рис. 36. Первый телескоп-рефрактор, сконструированный Галилеем.

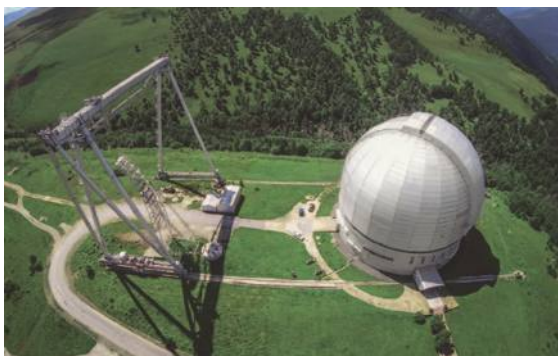


Рис. 37. Башня установленного на Северном Кавказе телескопа-рефлектора с диаметром зеркала 6 м.

Рассмотрим теперь принцип действия простого рефрактора. В таком телескопе лучи, исходящие от наблюдаемого объекта, собираются в фокусе объектива и дают изображение тела 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 расстоянию $F \left(\frac{D}{F} \right)^2$. Видимое увеличение телескопа определяется отношением фокусных расстояний объектива и окуляра $\frac{F}{f} = \frac{\beta}{\alpha}$.

Если изображение фиксируется на фотопластинке или фотопреобразователе, не нужен окуляр, фотопластинка или диафрагма электрофотометра установлены в фокальной плоскости телескопа.

Первый рефрактор был сконструирован Галилеем в 1610 г. (рис. 36). Первый рефлектор сконструировал в 1648 г. великий английский учёный Исаак Ньютон.



Рис. 38. Процесс шлифовки зеркала телескопа диаметром 8 метров.

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

§ 30. Основные параметры телескопов **

Основные параметры, которые определяют характеристики телескопа, это диаметр его объектива D и фокусное расстояние объектива F . Поток света, собираемого объективом определяется по формуле:

$$F = ES = E\pi R^2$$

где E – освещенность объектива, S – площадь его поверхности, R – его радиус.

Еще один параметр, характеризующий телескоп, называется *относительным отверстием* или *силой света* и определяется формулой: $A = \frac{D}{F}$. Освещённость изображения неточечного объекта, созданного объективом, определяется по формуле:

$$E_o = k \left(\frac{D}{F} \right)^2 = kA^2$$

и будет пропорциональна квадрату относительного отверстия. Однако увеличению относительного отверстия телескопа препятствует возникновение aberrации вне главной оптической оси.

Поэтому в рефлекторах относительное отверстие можно сделать до 0,33, а в зеркально-линзовых телескопах – до 1. Ещё одним из основных параметров визуальных телескопов является *увеличение* телескопа, которое определяется как:

$$k = \frac{F}{f} = \frac{\beta}{\alpha},$$

где F – фокусное расстояние объектива телескопа, а f – фокусное расстояние окуляра телескопа, α – угловой размер объекта при наблюдении его

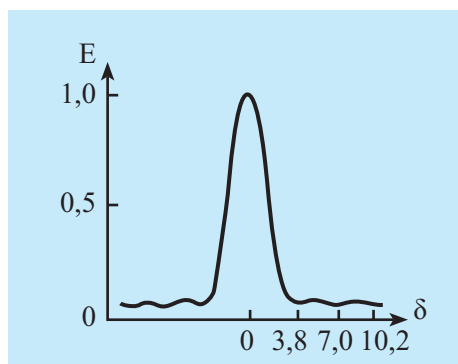
непосредственно глазом, β – угол, под которым наблюдается изображение, даваемое телескопом (рис. 34). Таким образом, увеличивая фокусное расстояние объектива или уменьшая фокусное расстояние окуляра, можно достичь больших увеличений. Но это не значит, что с помощью телескопа можно достичь любого увеличения. Дело в том, что чем больше увеличение телескопа, тем меньше его поле зрения и тем больше искажение изображений объектов. Например, в телескопе, увеличивающем в 30 раз, Луна, диаметр которой $32'$, будет полностью видна, а при увеличении более 300 раз Луна вообще не будет помещаться в поле зрения окуляра, то есть будет виден лишь её кусочек (с мелкими деталями, конечно). Поэтому для достижения максимально полезного увеличения используется окуляр, фокусное расстояние которого ограничено определенным значением.

Максимально полезное увеличение обычного телескопа равно удвоенному значению диаметра его объектива в миллиметрах. Еще одним из важных параметров, характеризующих телескоп, является его угловая разрешающая способность, которая определяет качество изображения. Кажется, что чем больше увеличивает телескоп, тем ярче можно будет увидеть мельчайшие детали наблюдаемого объекта, а на самом деле при прохождении света через слой атмосферы в фокальной плоскости телескопа образуется круглый диск, окруженный несколькими дифракционными кольцами уменьшающейся яркости (рис. 39: a – контур изображения; b – изображение объекта). Угловой диаметр этого круглого диска определяется формулой

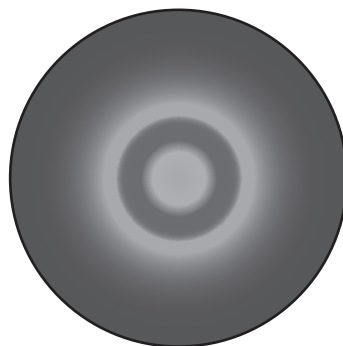
$$\delta = \frac{\lambda}{D},$$

в радианах; где D – диаметр объекта; λ – длина волн света. Если в телескопе роль фиксации излучения (приемника) выполняют глаза, то для определения его разрешающей способности вместо λ возьмём длину волны излучения, соответствующей максимальному значению спектральной чувствительности глаза ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$). Если излучение фиксируется фотографическим или фотоэлектрическим путем, то вместо λ используется соответственно длина волн излучения, соответствующего максимальному значению спектральной чувствительности фотографической эмульсии или фотоусиливающего катода.

Нужно отметить, что величина δ , определенная по вышеуказанной формуле, называется *теоретической разрешающей способностью*, в дей-



а)



б)

Рис. 39. Распределение яркости в телескопическом изображении точечного источника.

ствительности разрешающую способность телескопа определяет уровень сотрясения колебаний изображения, образующихся от возмущения слоёв атмосферы Земли, по направлению лучей, идущих от объекта. Уровень сотрясения зависит от астроклиматических условий местности, величины вышки и конструкции телескопа, также от других факторов.

Если эти величины (λ и D) определяются в сантиметрах, то δ выражается в радианах. 1 радиан $\sim 0,2'' \cdot 10^6$ секунда дуги.

§ 31. Радиотелескопы

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.

Антенны радиотелескопов от обычных радиоантенн отличаются высокой разрешающей способностью. Поэтому они могут различать даже небольшие

небесные источники радиоизлучений. Разрешающая способность антенны определяется отношением длины волны λ к диаметру зеркала телескопа D . Длина радиоволны в миллионы раз больше длины волны оптического пучка.

Самым большим телескопом в Европе считается телескоп с антенной переменного профиля РАТАН-600 установленный на Северном Кавказе.

Также в настоящее время используется система радиоантенн, расположенных на большом расстоянии друг от друга, чьи показания сводятся в специальном устройстве обработки информации, называемом *радиоинтерферометр*. Расположенные на большом расстоянии друг от друга (например, на разных полюсах Земли), такие радиоантенны могут одновременно собирать информацию об одном и том же объекте.

В настоящее время на Земле одновременно работает целый ряд высокочувствительных радиотелескопов с диаметрами параболических антенн 65 м (Австралия), 76 м (Великобритания), 300 м (США) и 600 м (Россия). На *рис. 40* изображён самый мощный в мире радиотелескоп, установленный в США на острове Пуэрто-Рико.

В Узбекистане в Зааминском районе Джизакской области у подножия горы Суффа сооружается радиотелескоп с диаметром 70 м (*рис. 41*). Этот инструмент позволит изучать даже небольшие детали космических объектов.



Рис. 40. Самый мощный в мире радиотелескоп находится в Пуэрто-Рико, США.



Рис. 41. Радиотелескоп «Суффа» у подножия Зааминских гор в Джизакской области.

§ 32. «Главный телескоп» обсерватории Улугбека

Обсерватория Улугбека. В изучение небесных тел большой вклад внесли и наши соотечественники. Один из них – внук Амира Темура Мирзо Улугбек (1394–1449). В середине XV столетия Улугбек пригласил в Самарканд известных астрономов Кази-заде Руми, Джамшида аль-Каши, чтобы узнать их мнение о планируемой им постройке астрономической обсерватории с самым большим инструментом для наблюдений. Учёные идею Мирзо Улугбека поддержали, и в 1420 году в Самарканде начали сооружать инструмент с радиусом 40,2 м для астрономических наблюдений на возвышенности Кухак (рис. 42). С помощью этого инструмента были определены и уточнены координаты более чем тысячи звёзд, изучались движения Солнца, Луны и планет, определены координаты множества городов Мавераннахра. В дуге 1° составил примерно 70,2 см, обеспечивая измерения с точностью до $10''$ дуги, по длине – 11,7 мм, длина дуги – почти 50 м. Начало дуги лежало на глубине 11 м, а верхняя часть секстанта возвышалась над Землей почти на 30 м. Этот уникальный астрономический инструмент в результате войн был разрушен, 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. Внешний вид башни постро-



Мирзо Улугбек.

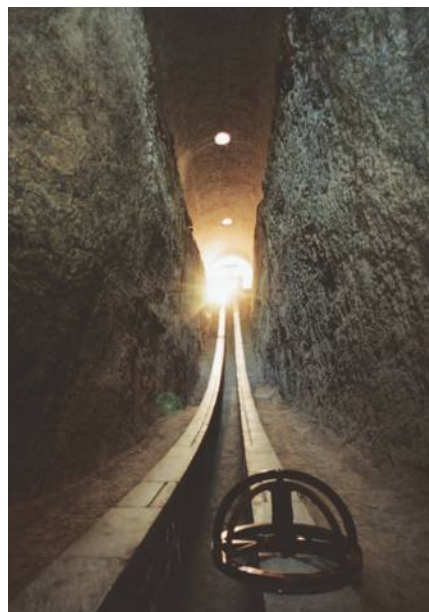


Рис. 42. Подземная часть обсерватории Улугбека.

енного в Самарканде «телескопа» до пор не определен и является предметом дискуссий среди ученых.

Обсерватория Улугбека была в средние века крупнейшей на Востоке и прославилась своими точными измерениями и впечатляющими размерами. В обсерватории Самарканда помимо Улугбека работали выдающиеся астрономы Джамшид аль-Каши, Кази-заде Руми, Муйиниддин аль-Каши, Али Кушчи. Научное наследие великих учёных той школы сохранено в знаменитом труде «Зидж».

Вопросы и задания

1. Каким образом телескоп увеличивает и приближает небесные объекты?
2. Какие характеризующие величины телескопов вы знаете?
3. Как называется основной инструмент обсерватории Улугбека?
4. Что вы знаете об основных научных трудах, выполненных в обсерватории Улугбека?

ТЕМА 12.

§ 33. Законы излучения. Изучение физических свойств небесных тел спектральными методами

Излучение многих небесных светил является источником физических данных о них. Изучением их спектра излучения можно определить количественный состав источника светил, их температуру, магнитное поле, скорость движения в направлении луча зрения (лучевая скорость) и другие их физические характеристики. Такой метод основан на явлении дисперсии света и называется спектральным анализом. В частности, энергия излучения, исходящего из поверхности нагретого тела, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Энергию, излучаемую 1 м² поверхности, можно вычислить согласно закону Стефана Больцмана $\varepsilon = \sigma T^4$, где σ – универсальная константа, она равна $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$, T – абсолютная температура тела.

Лучи света распространяются в виде электромагнитных волн. Волна определенной частоты воспринимается человеческим глазом как цвет, при этом каждому цвету соответствует волна определенной длины. В спектре лучей света видимые длины волн располагаются по уменьшению их длины волн от 0,7 мкм до 0,4 мкм от красного до фиолетового цвета. Не видимые

простым глазом ультрафиолетовые лучи, которые находятся в этом спектре после фиолетовых лучей, фиксируются в фотопластинках, чувствительных к этим лучам. Лучи еще короче их, исходящие вне атмосферы Земли, – специальными телескопами, установленными на космических станциях. В настоящее время с помощью специальных устройств можно наблюдать инфракрасные и радиолучи, находящиеся за красными лучами в спектре. Поскольку атмосфера солнца и звезды покрыты раскалёнными газами и парами, при прохождении через атмосферы звёзд излучение непрерывного спектра поглощается их атомами и принимает вид спектра поглощения, пересечённого тёмными линиями или полосами. Поэтому спектры Солнца и звёзд являются спектрами поглощения (рис. 43).

Лучевая скорость небесного тела по направлению линии наблюдения в отношении земли определяется путём спектрального анализа. Если источник света приближается к земле, длина волн линий его спектра уменьшается в сторону коротких волн спектра, если удаляется – длина волн увеличивается, т.е. линии в спектре источника смещаются в сторону длинных волн (в красную сторону).

Такое явление можно описать следующей формулой:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right) \text{ или } v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c ,$$

Здесь v – лучевая скорость источника, λ_0 – длина волн лучи, исходящего от неподвижного источника; λ – длина волн движимого источника и c – скорость света.

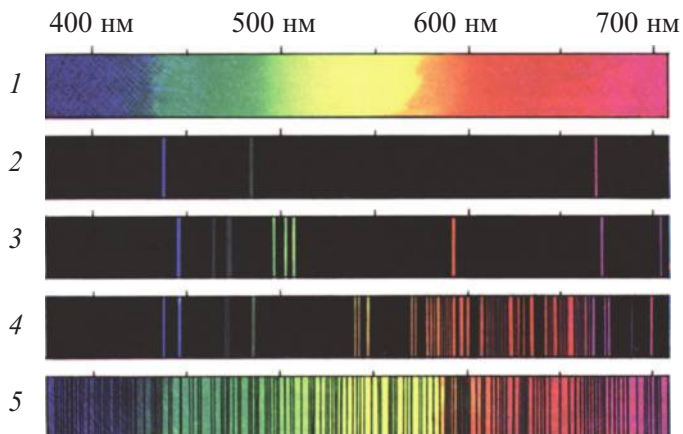


Рис. 43. Совмещенный (1), сравнительный (2) спектры светила и линейный (3) спектр Солнца.

По спектру также можно определить температуру светила. Если тело накаляется до красного цвета, то красный участок его спектра будет ярче, чем остальные его части. По мере дальнейшего нагревания яркая часть его спектра смещается в сторону его жёлтой, зелёной, потом голубой части, т.е. с увеличением температуры максимум излучения тела смещается в коротковолновую область спектра. Зависимость длины волны излучения с максимальной интенсивностью λ_{max} от абсолютной температуры T выражает закон смещения Вина:

$$\lambda_{\text{max}} T = b$$

где $b = 0,29$ см/град.

Если атомы излучаемой плазмы находятся в магнитном поле Солнечного пятна, наблюдается расщепление на части отдельных спектральных линий (особенно в ядре солнечного пятна). Это явление называется *эффектом Зеемана*. По эффекту Зеемана, в зависимости от расположения напряжения магнитного поля наблюдаемого пятна по отношению к линии наблюдения вектора, спектральная линия расщепляется на два или три подуровня. При этом напряжение магнитного поля H пропорционально разнице длин волн крайних компонентов образованных спектральных линий – $\Delta\lambda$ и определяется по следующей формуле:

$$H = k \Delta\lambda_{\text{H}},$$

где k – коэффициент пропорциональности, который зависит от магнитной чувствительности спектральной линии.

Вопросы и задания

1. В каком интервале находятся оптические лучи в шкале электромагнитных волн?
2. Какие области занимают в шкале видимые и невидимые лучи?
3. В каких длинах волн шкалы изучаются электромагнитные волны светил оптической астрономии в настоящее время?
4. Как определяется температура светила на основании длины волн максимальной интенсивности излучения?
5. Как определяется напряжение магнитного поля источника спектра?

ГЛАВА IV. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА НЕБЕСНЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

ТЕМА 13.

§ 34. Солнце – ближайшая к нам звезда.

Общие сведения о Солнце

Если Солнце погаснет, то не пройдет и минуты, как на Земле воцарится тьма. Луна и планеты светят отраженным солнечным светом, и поэтому их сразу же станет не видно. Землю будет освещать только слабый свет звёзд. Всю поверхность Земли заключит в свои «объятия» космический холод. Не пройдет и недели, как тропики окажутся погребенными под снегом, остановятся реки, моря и океаны постепенно замерзнут на всю глубину, прекратится ветер. Всё вокруг погрузится в крошечную тьму и 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 звёзд, 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 звёзд. 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 1,391 млн км, что в 110 раз больше диаметра Земли. Иными словами, в объем, занимаемый Солнцем, поместилось бы более 1 млн 300 тысяч планет с объёмом, равным объёму Земли. Масса Солнца в 330 тыс. раз больше массы Земли. На рисунке 44 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 15 млн градусов в его ядре.

Энергия, излучаемая Солнцем в 1 секунду равна $4 \cdot 10^{26}$ Дж, что равно энергии, освобождающейся при сжигании 12 000 триллионов тонн угля. Из-

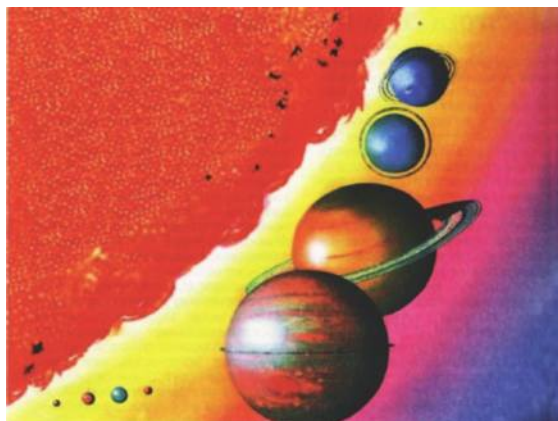


Рис. 44. Величина планет по сравнению с Солнцем.

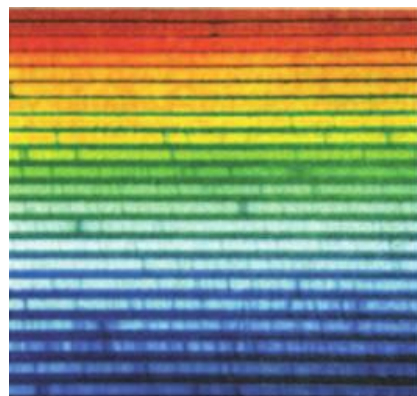


Рис. 45. Солнечный спектр.
Вверху: разделённый на части;
Внизу: показано соответствие
химическим элементам.

лучаемая на Землю энергия составляет всего одну двухмиллиардную часть всей 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. 45). Солнце, как и другие небесные тела, вращается вокруг своей оси, но дифференциально (из-за его газообразности) с периодом вращения, по экватору равным 25,4 суток, по полюсам – $28 \div 29$ суток.

Солнечная постоянная и солнечная светимость. Солнечная постоянная – это количество солнечной энергии, падающее за 1 мин на площадку в 1 см^2 , расположенную перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной ат-

мосферы. Изучая это излучение, ученые установили, что её величина равна приблизительно $2 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}}$. В международных единицах $1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

В связи с этим полную мощность излучения Солнца, то есть его светимость можно определить по формуле $L_0 = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Если умножить эту величину на площадь сферы с радиусом в 1 а.е. ($1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$), получим полное количество энергии, излучаемой Солнцем по всем направлениям в единицу времени.

Вопросы и задания

1. К каким небесным телам относится Солнце?
2. Сравните размеры Солнца и Земли.
3. Каков спектр фотосферы Солнца?
4. Из каких элементов и веществ состоит Солнце?
5. Что такое солнечная постоянная?

§ 35. Фотосфера Солнца и её строение. Пятна Солнца

Основная часть атмосферы Солнца, в которой образуется видимое излучение, называется *фотосферой* (рис. 46). 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), окружённых темными проме-

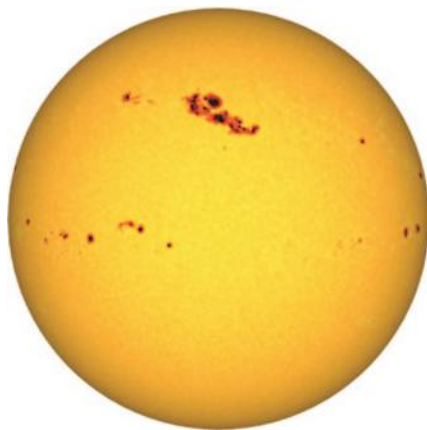


Рис. 46. Фотосфера Солнца
(видимы пятна).

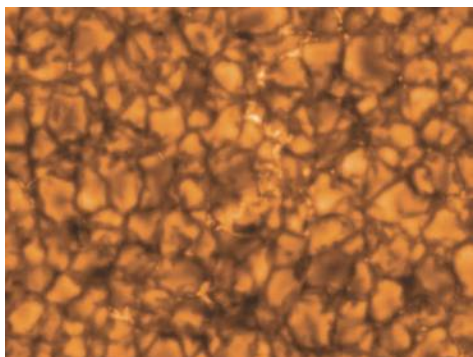
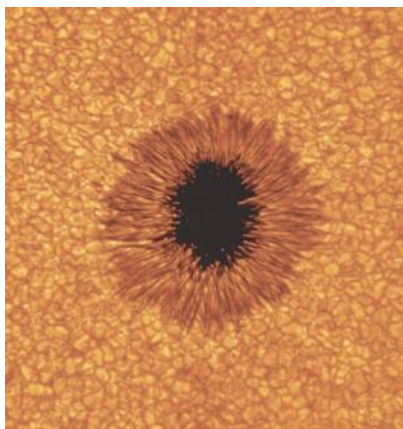


Рис. 47. Структура поверхности Солнца – грануляция.

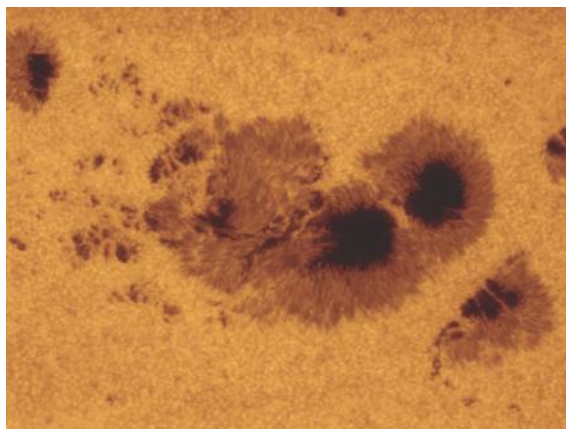
жутками, создает впечатление ячеистой структуры, *грануляции*, напоминающей пчелиные соты. В последние годы точные фотографии грануляции получены с помощью телескопов. Удалось получить много новых сведений о яркости гранул, их спектрах, времени их «жизни», что позволяет понять их физическую природу. В частности, грануляция – свидетельство о происходящей под фотосферой конвекции, перемешивании масс газа. Средние размеры гранул составляют 500 км, но встречаются гранулы размерами от 200

до 700 800 км (рис. 47). В фотосфере кроме гранул наблюдаются и более яркие, образующие как бы цепочку структурные образования. Они называются солнечными *факелами*, возникают преимущественно в окрестности солнечных пятен.

*Солнечные пятна – островки магнетизма**. В фотосфере наблюдаются объекты, природа которых с физической точки зрения не до конца исследована. Это солнечные пятна (рис. 48). Пятна имеют различную величину – от нескольких тысяч километров до нескольких сотен тысяч километров. Гали-



а)



б)

Рис. 48. Солнечные пятна: а) пятно правильной формы; б) группа пятен.

лей, который в 1610 г. наблюдал их в свой телескоп, был первым астрономом, который понял, что пятна – области на фотосфере.

За более чем 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 солнечных пятнах сосредоточены сильные магнитные поля. Солнечные пятна редко наблюдаются в виде отдельных пятен (*рис. 48, а*), чаще в виде групп (*рис. 48, б*). В группах наблюдаются два крупных пятна с противоположной полярностью и примыкающие к ним пятна помельче. Температура пятен в среднем на 1500° – 2500° ниже температуры фотосферы, поэтому на её фоне они кажутся тёмными образованиями.

Жизнь солнечного пятна может продолжаться от нескольких дней до одного-двух месяцев. Но пятен с такой долгой продолжительностью очень немного, чаще они исчезают гораздо раньше. Солнечные пятна локализуются, как правило, на широте от $\pm 5^{\circ}$ до $\pm 40^{\circ}$ гелиографической широты.

Одной из загадок физики Солнца является периодичность изменения количества солнечных пятен. Изучив и систематизировав материалы более чем 100-летних наблюдений за солнечными пятнами, швейцарский астроном Рудольф Вольф вычислил периодичность изменения количества пятен, равную 11,1 года. Солнечные пятна – проявление наиболее активных процессов в атмосфере Солнца, непосредственно связанных с другими проявлениями этой активности, поэтому период в 11,1 года называется *периодом солнечной активности*.

Вопросы и задания

1. Что называется фотосферой Солнца?
2. Какие объекты фотосферы можно наблюдать в условиях хорошей видимости?
3. Как выглядит гранулированная структура ?
4. Расскажите об истории открытия пятен Солнца?
5. Почему на фотосфере пятна видятся тёмными?
6. Каковы магнитные свойства групп и отдельных пятен Солнца?
7. Каков средний период изменения количества пятен Солнца?

ТЕМА 14. § 36. Хромосфера и корона Солнца

Протуберанцы – «языки пламени». Часть атмосферы Солнца, лежащая непосредственно над фотосферой, называется *хромосферой* – «цветовой сферой» (от греч. *хрома* – цвет). Она простирается до высоты 14000 км. Один из самых мощных процессов, наблюдаемых на Солнце – протуберанцы (рис. 49). Для наблюдателя эти объекты выглядят как языки пламени. Спектры протуберанцев дают возможность определить в них давление газа, температуру и скорость движения газов.

В 1920 году французский учёный Я. Петит предложил метод наблюдения: снимать протуберанцы кинокамерой (со скоростью 16 кадров в секунду) в лучах спектральных линий Ca^+ или H , что позволило, в частности, фиксировать на плёнке быстро протекающую эволюцию протуберанцев. Поэтому во многих обсерваториях (в частности, в Ташкентской обсерватории) хромосферу изучают именно на этих линиях спектра $\text{H}\alpha$ с использованием специальных монохроматических фильтров, устанавливаемых на телескопах.

В лучах на этой красной водородной линии с длиной волны $6562\text{\AA}$ в проекции на солнечный диск были получены изображения протуберанцев в виде длинных изогнутых волокон. 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. 49. Один из гигантских объектов хромосферы – протуберанец.

В образовании и эволюции протуберанцев велика роль магнитного поля Солнца, поскольку активные протуберанцы наблюдаются на тех же участках, что и солнечные пятна. Ввиду сложности экспериментов изучение магнитного поля Солнца в полном объёме было начато только в 60-х годах XX века.

Протуберанцы по сравнению с окружающей их хромосферой являются более плотными облаками плазмы (темпера-

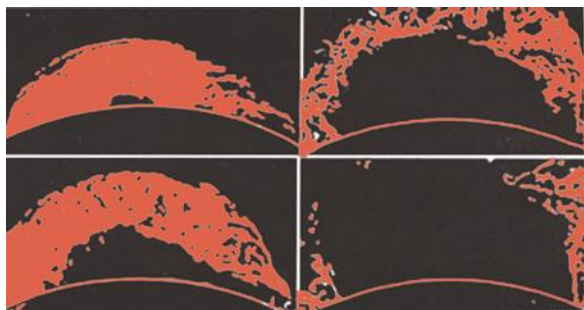


Рис. 50. Стадии развития активного протуберанца, связанного с солнечным пятном.

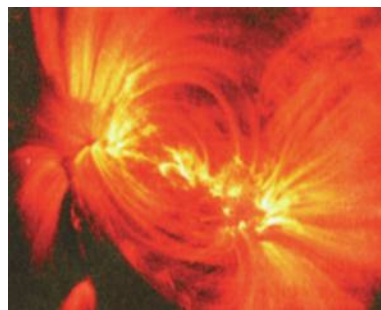


Рис. 51. Самые мощные объекты хромосферы – солнечные вспышки.

тура – $5000\text{--}10000^\circ\text{C}$, плотность – $10^{10}\text{--}10^{12}$ частиц/см³), окутаны в сто раз более горячей солнечной короной. На снимках протуберанцы похожи на холмы, стоги сена, петли и воронки. В зависимости от активности, классифицируются как спокойные, активные, эруптивные (вспыхивающие). Активные и эруптивные протуберанцы связаны с солнечными пятнами (*рис. 50*).

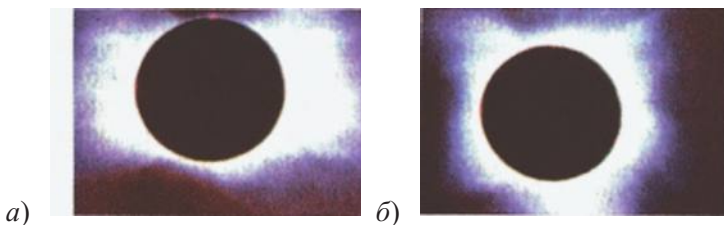
Хромосферные вспышки. Один из самых мощных процессов, наблюдаемых на Солнце – хромосферные вспышки (*рис. 51*). Энергия, выделяемая длящейся несколько минут вспышкой, составляет от 100 триллионов до 1000 квадриллионов киловатт в час ($10^{14}\text{--}10^{18}$ кВт). Иначе говоря, энергия, выделяющаяся в результате одной вспышки, равна 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.

Исследование спектра газа в области вспышки показывает, что заряженные частицы движутся со скоростью 500–1000 км/с. Этот поток ионизированных частиц 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.

Солнечная корона. С глубокой древности люди наблюдали во время полного солнечного затмения явление, когда диск Луны полностью заслоняет солнечный диск, вокруг Солнца возникает красивое серебристое свечение, распространяющееся на область размерами 1–2 солнечных радиуса (*рис. 52*).

Рис. 52. Солнечная корона в период:
а) максимума солнечной активности; б) минимума солнечной активности.



Общий вид короны обусловлен уровнем активности Солнца. В период появления наибольшего числа пятен на Солнце, т. е. в период его максимальной активности, корона окружает солнечный диск, отходя от него на наибольшее расстояние в областях наибольшей активности (рис. 52, а). В период минимальной активности Солнца корона уходит на значительное расстояние от диска только в плоскости солнечного экватора (рис. 52, 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 Солнца в радиодиапазоне приходится на солнечную корону.

§ 37. Источник энергии Солнца *

Из универсальных законов природы известно, что энергия сохраняется: она не исчезает никуда и не возникает ниоткуда. Естественно, возникает вопрос: что является источником энергии светящихся на ночном небе звёзд и Солнца? Возраст Солнца – около 4,8 миллиардов лет. Один из основных вопросов астрономии на протяжении веков – за счёт чего происходит пополнение энергии Солнца, излучающего свет в течение столь продолжительного времени и какие физические процессы восполняют потери энергии звёзд? Ответы на эти вопросы порождали множество гипотез. Но большинство из них оказались несостоятельными. Наконец, в 1938–1939 гг. астрофизики А. Эддингтон, К. Вейцеккер и Г. Бете доказали, что источником энергии звёзд являются ядерные реакции, происходящие в недрах звёзд.

Известно, что сила притяжения протонов и нейтронов, образующих атомное ядро, (ядерная сила) очень велика и, следовательно, энергия соединения тоже велика. 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. Это явление называется *ядерной реакцией*. Однако условие для возникновения ядерных реакций состоит в том, что добавленная частица должна оказаться на расстоянии действия ядерных сил. Иными словами, дополнительный протон или нейтрон должен сближаться с ядром атома с очень высокой скоростью (т. е. с высокой энергией).

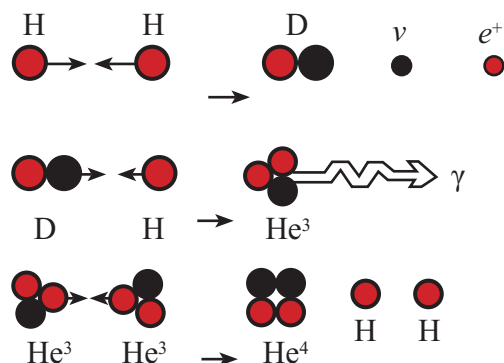
Теоретические исследования показали, что температура в недрах звёзд (в частности, Солнца) достигает нескольких миллионов градусов, так что отдельные атомы движутся с огромной скоростью, что обеспечивает условие для возникновения *термоядерной реакции*. Нейтрон при таких высоких температурах распадается на протон, электрон и нейтрино, не участвуя более в ядерной реакции.

Реакция образования из четырех атомов водорода одного атома гелия, непрерывно происходящая в недрах, 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: $4,03252 - 4,00389 = 0,02863$ и называется *дефектом массы*. Дефект массы эквивалентен выделяемой при образовании одного атома гелия энергии связи, 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 $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света, m – дефект массы. Расчеты показывают, что сумма энергии, выделяющейся в каждую секунду в центре Солнца, составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт, т. е. каждую секунду происходит восполнение энергии, затраченной Солнцем на излучение.

Рис. 53. 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).



Известны две реакции образования ядер гелия. Одна из них протон-протонная (рис. 53), происходящая в центре Солнца, вторая – углеродно-азотная, происходящая в основном в центрах звёзд с высокотемпературной поверхностью.

§ 38. Солнечная активность и её 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 объёме, в изучении взаимосвязи солнечной активности с указанными событиями достигнуты значительные успехи.

Как понимать существование такой тесной органической связи между находящимися друг от друга на расстоянии 150 млн км двумя небесными телами (Солнцем и его спутником Землёй)? Что может служить основной причиной подобной зависимости на таком огромном расстоянии?

Солнце – источник жизни на Земле, и солнечные лучи дарят Земле свет и тепло. Всё это было известно с древних времён. Однако в последние годы было установлено, что электромагнитные волны в коротковолновом диапазоне излучаются Солнцем также с достаточной интенсивностью. Это ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи. И солнечная активность является определяющей для их интенсивности. Солнечные вспышки и эруптивные протуберанцы добавляют к этим излучениям потоки элементарных частиц

высоких энергий. «Солнечный ветер» изменяет интенсивность этих потоков в соответствии с фазами солнечной активности.

Интенсивность потоков исходящих от Солнца частиц и солнечной радиации связана с изменением солнечной активности и происходят в одно и то же время с изменением числа солнечных пятен. На *рис. 54* 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 результате изменения солнечной активности отражаются и на развитии многих событий на Земле. В первую очередь на степень её уменьшения или увеличения реагируют верхние слои атмосферы, в частно-

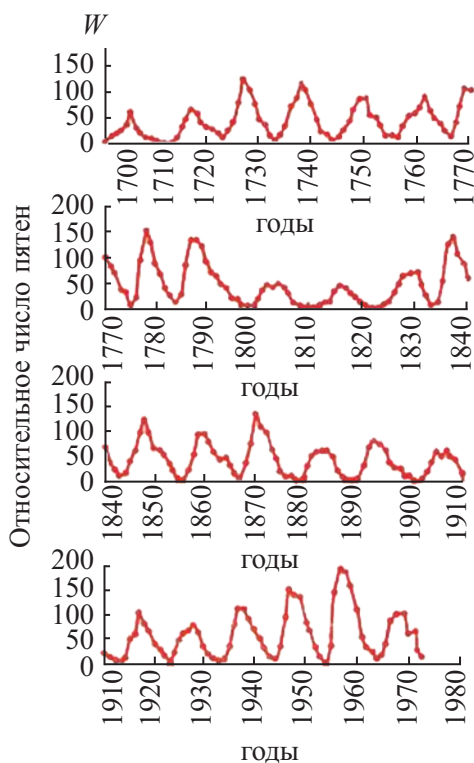


Рис. 54. График изменения солнечной активности (в зависимости от числа пятен).



Рис. 55. Связь эпидемических фаз заболеваемости холерой (а) и дифтерией (б) с фазами солнечной активности (кружочками выделены годы максимума солнечной активности).

сти, солнечная радиация порождает ионизацию ионосферы. В свою очередь это меняет её 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.

В изучение связей между солнечной активностью и эпидемическими заболеваниями внес большой вклад профессор А.Л. Чижевский (Россия). Изучая широко распространённые 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. 55).

Р.П. Богачёва 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. Много можно сказать и о влиянии солнечной активности на изменение климата Земли, биологии растений и другие процессы, поскольку давно доказана связь солнечной активности с ними.

Вопросы и задания

1. Какой слой атмосферы Солнца называется хромосферой?
2. Существует ли связь между протуберанцами и солнечной активностью?
3. Как вы представляете себе мощность хромосферных вспышек?
4. В каких слоях атмосферы обычно происходит радиоизлучение Солнца?
5. В чём источник энергии солнца?
6. В изменении количества каких солнечных объектов отмечается солнечная активность?
7. В каких явлениях в атмосфере Земли находит свое отражение солнечная активность и на больных с какими заболеваниями это сказывается отрицательно?

Меркурий. Среди восьми больших планет Солнечной системы ближайшая к Солнцу – планета Меркурий, которую в древности арабы называли Уторуд. 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 57,91 млн км. Диаметр Меркурия 4879 км, сила тяжести на его поверхности в 2,6 раза меньше земной. Иными словами, человек, весящий на Земле 80 кг, будет весить на Меркурии всего 30 кг. Меркурий обращается по своей орбите вокруг Солнца со скоростью 48 км/с, совершая полный оборот вокруг Солнца за 87,97 суток (меркурианский год).

Средняя дневная температура Меркурия +345 градусов, (в точке, где Солнце находится в зените, достигает +480 градусов по шкале Цельсия), ночью температура опускается до – 180 градусов.

Межпланетная станция в 1974 г. на расстоянии 47,981 тыс. км от планеты сделала 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. 56 и 57).

Плотность вещества, покрывающего поверхность Меркурия 3,0–3,3 г/см³, средняя плотность планеты 5,44 г/см³. Возможно планета имеет железное



Рис. 56. Поверхность Меркурия (съемка с «Маринер 10»).



Рис. 57. Рельеф поверхности Меркурия.

ядро или, по крайней мере, силикатное ядро, пребывающее под действием высокого давления в металлизированном состоянии.

Спутников Меркурий не имеет.

Венера. Планета, названная в честь богини любви римской мифологии, находится от Солнца на среднем расстоянии 108,81 млн километров. Венера (узбекское название Зухро) 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. Её движение на фоне неподвижных звёзд 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, её диаметр составляет 12104 км.

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

Исследование Венеры с помощью космических аппаратов, начатое 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 её орбиты, поэтому на Венере не наблюдается смены времен года. Кроме того, в результате радиолокационных измерений удалось установить, что Венера поворачивается вокруг своей оси за 243,16 суток и вращается, в отличие от других планет, с востока на запад, т. е. Солнце на Венере восходит с запада.

Сложение двух движений планеты – вокруг оси и вокруг Солнца – приводит к тому, что солнечные сутки на Венере длятся 117 земных суток.

Важные данные были получены с помощью межпланетных станций «Венера-14» и «Венера-15». Спускаемый аппарат с «Венеры-14» совершил посадку на поверхность планеты и отправил на Землю фотографии с поверхности Венеры (рис. 58).



Рис. 58. Снимок поверхности Венеры, сделанные с космического аппарата «Венера 14».

В 1978 г. в направлении Венеры были запущены четыре космических аппарата. Два из них, «Венера-11» и «Венера-12», были советскими, а «Пионер – Венера-1» и «Пионер – Венера-2» – американскими.

Научная аппаратура, размещенная на спускаемых аппаратах «Пионер – Венера», определила, что атмосферное давление на поверхности планеты оказалось неожиданно высоким – 90 атм. 97% атмосферы состоит из карбоната ангидрида, 1% водяные пары, а кислород – всего 1,5%. Температура на поверхности +470 °С. Столь высокая температура объясняется тем, что в атмосфере планеты много карбоната ангидрида.

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 скорость сильно снижается и составляет 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 бегим. Её именем назван один из кратеров планеты.

§ 40. Земля и её естественный спутник Луна. Марс

Земля. По степени удаленности от Солнца Земля находится на третьем месте в системе планет. Земля очень красива, на рисунке 59 приведена фотография Земли, сделанная с поверхности Луны. Экваториальный радиус Земли – 6378 км. Обращаясь вокруг Солнца, Земля движется по орбите со ско-



Рис. 59. Снимок Земли, сделанный с поверхности Луны.

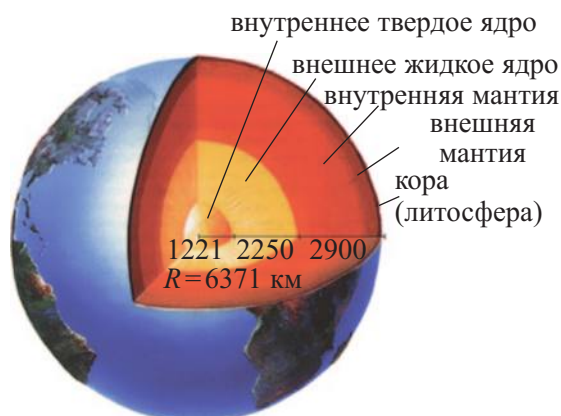


Рис. 60. Внутреннее строение Земли.

ростью 30 км/с, совершая полный оборот за 365,24 дней. Наклон оси Земли к плоскости орбиты равен $66,5^\circ$, что является причиной смены времен года. Суточное вращение Земли вокруг оси происходит за 23 часа 56 минут 4 секунды (звёздные сутки). Принятая повсеместно продолжительность солнечных суток установлена в 24 ч.

Средняя плотность Земли – $5,51 \text{ г/см}^3$, масса приблизительно равна $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$. Атмосфера Земли, простираясь на тысячи километров, имеет массу 5 тысяч 160 триллионов 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, который поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, защищая тем самым поверхность Земли от его губительного воздействия. Примерно 21% атмосферы приходится на кислород, 78% – на азот. Оставшаяся часть – инертные газы: аргон, карбонат ангидрид и водяные пары.

Гидросфера Земли. Земля – единственная планета, обладающая гидросферой, которая состоит из океанов, морей и других источников воды и занимает 71,5% поверхности Земли. Если принять среднюю высоту суши над уровнем моря за 875 м, то средняя глубина океана составит 3800 м.

На глубине 3450 находится ядро. Оно делится на две части: внутреннее твёрдое ядро радиусом 1221 км и жидкое внешнее ядро радиусом 2250 км с мантией в 2900 км (рис. 60).

Твердый нижний слой литосферы доходит до 40 км, верхняя часть этого слоя называется корой литосферы, нижняя – верхняя часть мантии. Температура быстро повышается при приближении к центру Земли, достигая у нижней границы мантии $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура в центре Земли до $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Земля является гигантским магнитом, о чём свидетельствует стрелка компаса, указывающая направление магнитных силовых линий. На *рис. 61* показана структура магнитосферы Земли.

Интересно, что геомагнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Координаты Северного геомагнитного полюса: широта – $78^{\circ}5'$ северной широты, долгота -290° восточной долготы. Магнитная ось расположена под углом $11,5^{\circ}$ к земной оси. Напряжённость магнитного поля возрастает от $0,25\text{--}0,35$ до $0,6\text{--}0,7$ эрстед.

Луна – естественный спутник Земли. Самое близкое к Земле небесное тело – это Луна, её естественный спутник (*рис. 62*). Луна обращается вокруг Земли так же, как все планеты вокруг Солнца, по эллипсу. В момент самого близкого расположения к Земле (в перигее) она находится от Земли на расстоянии 363 400 км, в апогее – 405400. Диаметр Луны 3476 км, её объём составляет 0,02 объёма Земли. Масса Луны в 81 раз меньше земной. Притяжение Луны в 6 раз меньше, чем у Земли. Ускорение свободного падения на Луне $1,63\text{ м/с}^2$. Средняя плотность вещества Луны $3,3\text{ г/см}^3$, т. е. меньше земной в 1,5 раза. Днём на экваторе Луны температура $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, в полночь $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 61. Структура магнитосферы Земли.



Рис. 62. Луна – естественный спутник Земли.

Звёзды на небе Луны, видимая корона Солнца и невидимая заря – все эти явления объясняются отсутствием на Луне атмосферы. С восхода Солнца до полудня пройдет почти 7 дней 9 часов.

Один из прекрасных видов на лунном небе – вид планеты Земля (рис. 59). Земля видится красивым голубым шаром, в 4 раза большим по размерам, чем Луна на небе Земли. 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.

На Луне есть низменности, возвышенности, горы (рис. 63). Впервые все эти объекты увидел Галилео Галилей, сконструировавший в 1610 г. свой телескоп.

Самые высокие горы на поверхности Луны – это Альпы, Апеннины и Кавказ. Высота некоторых гор достигает 9 км. На Луне также много кольцеобразных гор.

В июле 1969 г. на Луну совершил посадку спускаемый аппарат космического корабля «Аполлон-11». Американские космонавты Н. Армстронг и Э. Олдрин – первые люди, ступившие на поверхность Луны. Они совершали длительные прогулки по Луне и привезли на Землю образцы камней, грунта,

кристаллических пород. В 60–70-х годах XX века «Аполлоны» доставили на Луну в общей сложности 12 астронавтов, которые получили ценные сведения о лунном рельефе и физической природе Луны.

Для науки ценность изучения Луны определяется ещё и тем, что на Луне нет атмосферы. Маленький телескоп, доставленный на Луну, в сравнении с большим телескопом, установленным на Земле, даёт возможность получения во много более раз качественных научных материалов. Отсутствие атмосферы на Луне даёт возможность для изучения космических источников ультрафиолето-

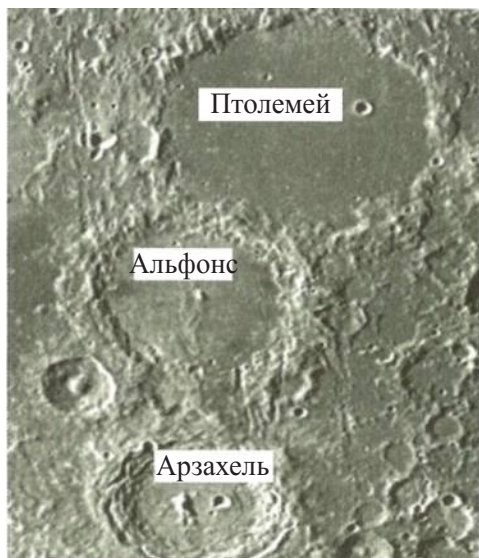


Рис. 63. Кратеры и «моря» Луны.



Рис. 64. Прогулка экипажа космического аппарата «Аполлон» по поверхности Луны.

вого, рентгеновского и гамма-волнового излучения. На *рис. 65* показан проект лунной станции

Марс. Планета, названная в честь бога войны Марса, четвёртая из планет земной группы. Её орбита пролегает вне орбиты Земли. Среднее расстояние от Солнца – 227,94 млн км.

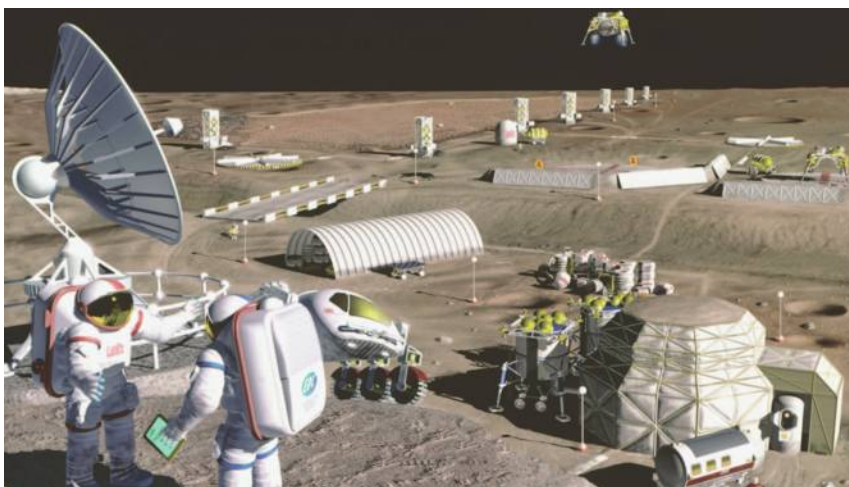


Рис. 65. Проект обитаемой научной станции на поверхности Луны.

Марс – относительно небольшая планета. Диаметр Марса – 6779 км, масса – $6,39 \cdot 10^{23}$ кг (0,107 массы Земли). Средняя плотность – $3,94 \text{ г/см}^3$, ускорение свободного падения – $3,72 \text{ м/с}^2$.

Планета Марс по своим физическим свойствам подобна Земле. Сутки на Марсе незначительно отличаются от земных: 24 часа 39,5 минут. На Марсе, как и на Земле, наблюдается смена времён года, так как ось вращения планеты наклонена под углом $65^\circ 12'$ к плоскости её орбиты, почти таким же как и у Земли. Однако год на Марсе длится 686,98 земных суток (669 марсианских). Осенью на широте 350° в полдень температура по Цельсию -20° , вечером -40° , ночью -70° . Зимой на широте 40° температура не повышается выше -50° , на широте 60° – выше -80° , 90° С. Минимальная температура на поверхности Марса не опускается ниже -125° С на полюсах.

Атмосфера Марса очень разрежена, среднее давление на поверхности равно 6,1 миллибар (1 бар – примерно 1 атмосфера). Атмосфера на 95 % состоит из карбоната ангидрида, 2,5 % азота, 1,52 % аргона, и всего 0,2 % кислорода и 0,1% водяного пара. Специальными исследованиями установлено, что «полярные шапки» – это замёрзшая углекислота с примесью небольшого количества водяного льда.

На поверхности Марса в области от 20° до 55° с. ш. находится равнина Эллада, почти лишённая кратеров, изобилующая низинами и протянувшаяся

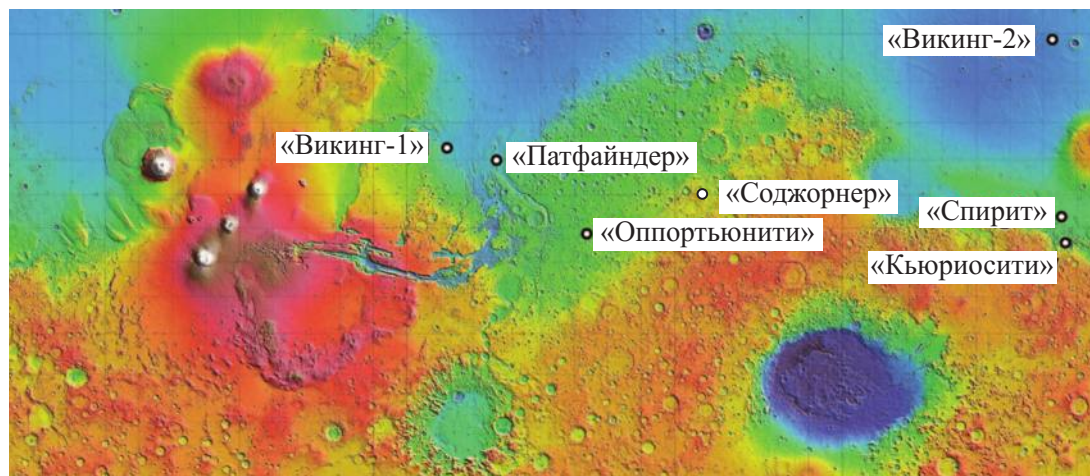


Рис. 66. Карта марсианских низменностей.
(На карте отмечены места посадки на них космических аппаратов).

ся на 2000 км. В южном полушарии имеется другая большая равнина Аргир (рис. 66). На северо-западе от Аргира расположена равнина Тарсис, на которой много вулканов. За ней в северном полушарии расположены знаменитые равнины Амазония и Утопия. От 50° до 70° параллели простирается большая пустыня, которая ограничена кольцом гор, окружающим Северный полюс.

Одно из чудес планеты Марс – её горы. В районе Тарсис имеются четыре высокие горы конической формы. Эти горы возникли в результате вулканической деятельности. Диаметр кратера на вершине самой южной горы Арзия – 130 км. Олимп, высочайшая из гор, в несколько раз выше вулканов Земли. Диаметр его основания – 600 км, высота – 27 км.

Еще одна особенность Марса – это образования, похожие на огромные трещины. На 20° к востоку от горы Арзия виден один из таких разломов, протянувшийся на 400 км. Ширина его местами достигает 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. 67). 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. В 1976 году космический аппарат «Викинг-1»,



Рис. 67. Русло реки Ниргал на Марсе.



Рис. 68. Снимок поверхности Марса, сделанный КА «Викинг-1» (США).



Рис. 69. Спутник Марса Фобос (размеры 18×22 км).

совершивший посадку на одну из марсианских равнин Утопия, отправил на землю изображения окружающей его местности. На снимках видны большие валуны и песчаные барханы (*рис. 68*). Причиной их появления являются марсианские бури, бушующие на Марсе. На снимках видно, как со дна кратеров и из трещин на поверхности поднимается туман. Это подтверждает гипотезу о наличии на Марсе воды (в виде льда). Были определены условия, позволяющие сделать вывод о возможности жизни (микроорганизмов) на Марсе.

У Марса есть два естественных спутника – Фобос (Страх) и Деймос (Ужас). Размеры Фобоса по двум взаимно перпендикулярным направлениям – 18 и 22 км (*рис. 69*), а Деймоса – 10 и 16 км. Фобос находится на расстоянии в 6000 км от Марса, период его обращения – 7 часов 3 минуты. Деймос удален на 20 000 км, его период обращения – 30 часов 18 минут.

Вопросы и задания

1. Что вам известно о размерах Меркурия?
2. Что вы знаете об атмосфере Венеры, её физических условиях (давлении, температуре) и составе?
3. Дайте общие сведения о нашей планете Земля. Какие внутренние слои составляют планету?
4. Что вы знаете о рельефе Луны?
5. Назовите черты сходства у Марса и Земли.
6. Можно ли считать наблюдаемые на Марсе каньоны настоящими руслами рек?

Юпитер. Самая большая из планет Солнечной системы загадочностью своей природы и внутреннего строения всегда привлекала к себе внимание астрономов. Средний радиус Юпитера в 11 раз больше радиуса Земли. Эта гигантская планета обращается вокруг Солнца на расстоянии примерно 778 млн км. Скорость обращения планеты вокруг Солнца 13 км/с, один оборот вокруг Солнца она совершает за 12 лет.

В отличие от планет земной группы, экваториальная часть Юпитера совершает один оборот вокруг оси за 9 часов 50 минут, быстрее, чем на широтах севернее и южнее экватора. Масса Юпитера в 318 раз больше массы Земли. Сила притяжения Юпитера по этой же причине в 2,5 раза больше силы земного притяжения. На Юпитере есть объекты, до сих пор остающиеся загадкой. Это полосы шириной в несколько тысяч километров, которые параллельны экватору планеты (рис. 70). К прочим загадочным особенностям планеты относится и открытое в 1878 году Большое Красное Пятно. Это огромное овальное образование длиной в 30 000 км, а шириной в 13 000 км. Интересно, что Большое Красное Пятно, участвуя в суточном



Рис. 70. Общий вид Юпитера.

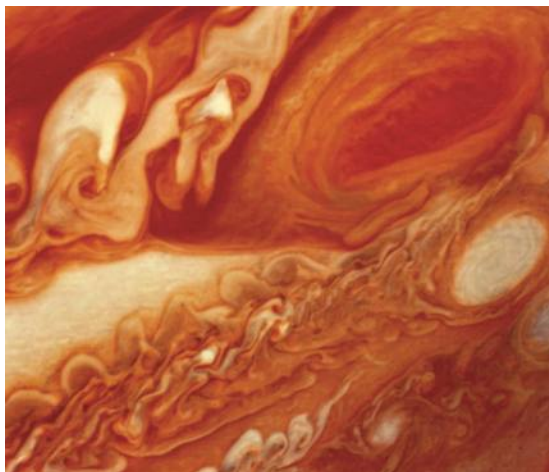


Рис. 71. Наблюдаемое на поверхности Юпитера Большое Красное Пятно.

вращении планеты, меняет к тому же своё положение, сдвигаясь на несколько градусов в разных направлениях.

Атмосфера Юпитера состоит из водорода, гелия, метана и аммиака. Значительную часть атмосферы составляют водород (90%) и гелий (9%).

Наличие водяных паров в атмосфере гигантской планеты стало большой неожиданностью: учёные предполагали, что при температуре -130°C и ниже вода должна была превратиться в лёд.

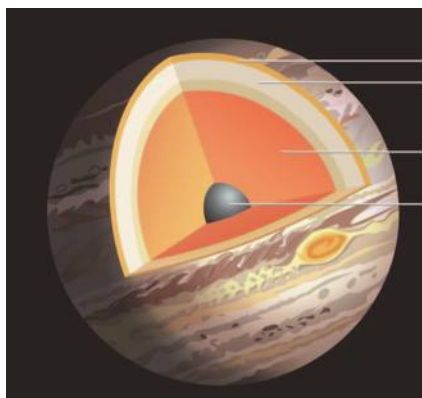
Гигантская планета обладает магнитным полем, захватывающим положительно и отрицательно заряженные частицы солнечного ветра и имеющим сложную структуру. В итоге это привело к появлению сильных поясов радиации, как у Земли.

Юпитер расположен на расстоянии 5 а. е. от Солнца и поэтому получает от Солнца в 27 раз меньшее количество энергии, чем Земля. Несмотря на это, вся поверхность планеты излучает энергию, главным образом в радио- и инфракрасном диапазонах, в 2,5 раза большую, чем получает от Солнца. На основании последних данных о планете была построена математическая модель её внутреннего строения. Согласно этой модели высота атмосферы планеты $\approx 10^4$ км, ниже этой границы находится масса в виде жидкой фазы, в центре планеты – ядро, состоящее из тяжёлых элементов. На поверхности планеты атмосферное давление достигает нескольких десятков тысяч атмосфер, а температура $15\,000\text{--}25\,000^{\circ}\text{C}$ (рис. 72).

Юпитер вместе со своими спутниками образует семейство планет. Число его спутников, включая небольшие, превышает 60. Самые большие спутники этого семейства в 1610 г. обнаружил Г. Галилей (рис. 73).

В марте 1979 года на расстоянии 278 тысяч км от Юпитера прошла автоматическая станция США «Вояджер-1», затем и «Вояджер-2», они внесли большой вклад в изучении Юпитера и его спутников (рис. 74). На снимках, сделанных «Вояджерами», видно большое, растянувшееся на 30 000 км полярное сияние планеты и вспышки в атмосфере, подобные молниям. Помимо этого, на высоте 57 000 км от его поверхности обнаружено кольцо шириной 8700 км и толщиной не более 30 км, похожее на кольца Сатурна.

Автоматическая станция прошла вблизи Ио, спутника Юпитера, на расстоянии 19 тыс. км и обнаружила на его поверхности извержение вулкана



Атмосфера
Жидкий водород
Жидкий металличе-
ский водород
Ядро



Рис. 72. Внутреннее строение Юпитера.

Рис. 73. Размеры Галилеевых спутников в сравнении.

(высотой 160 км), гористые образования, растянувшиеся на несколько сотен километров, и пропасти. Десятки обнаруженных на поверхности Каллисто, другого спутника, ярких пятен можно предположительно считать кратерами. Один из кратеров Каллисто окружен концентрическими кольцами гор, расстояние между которыми в отдельных местах достигает 1600 км.

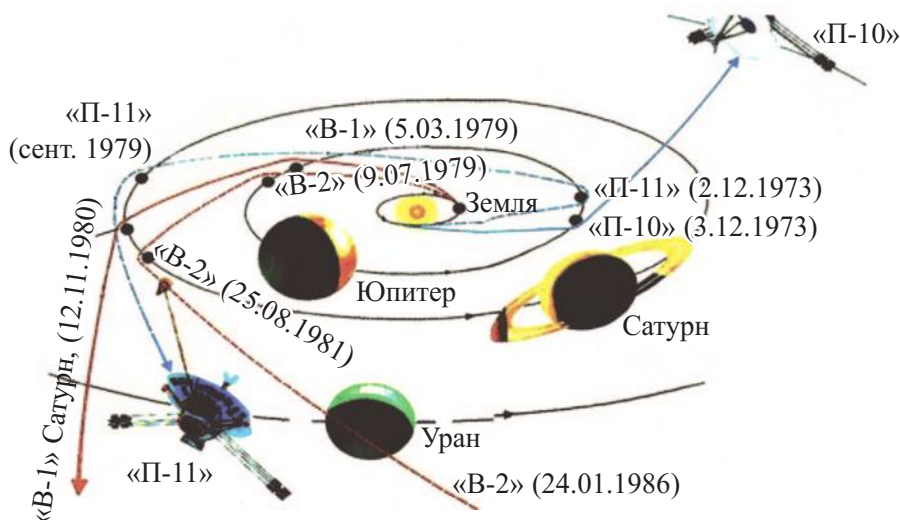


Рис. 74. Траектории аппаратов «Пионер-10», «Пионер-11», «П-10», «П-11» и «Вояджер-1», «Вояджер-2» («В-1», «В-2»).

Сатурн. Сатурн уступает по величине только Юпитеру, его диаметр 120 800 км. Среднее расстояние от Солнца – 9,5 а. е., то есть Сатурн находится от Солнца на расстоянии 1 427 млн км. Планета движется по своей орбите со скоростью 9,6 км/с, обращаясь вокруг Солнца с периодом в 29 лет, 5 месяцев, 16 дней. Так же, как и у Юпитера, скорость вращения Сатурна вокруг своей оси различна на разных широтах планеты.

Экваториальная плоскость планеты составляет с плоскостью её орбиты угол $26^{\circ}45'$. У Сатурна имеется кольцо шириной 60 000 км и толщиной от 10 до 15 км. Наличием кольца Сатурн по внешнему виду резко отличается от других планет (рис. 75).

Осенью 1980 года вблизи Сатурна прошла американская станция «Вояджер 1». Снимки, сделанные камерами этой станции, показали, что имеются десятки, даже сотни отдельных колец Сатурна и что на их плоскости вокруг Сатурна обращаются достигающие 80 км в диаметре небольшие естественные спутники.

Наблюдения показали, что температура на поверхности планеты -180°C .

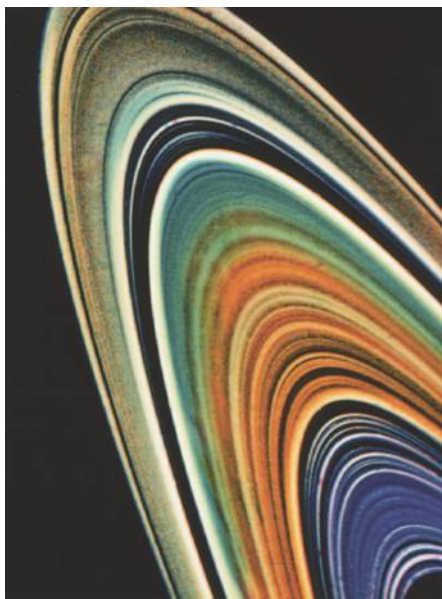


Рис. 75. Кольца Сатурна.

В атмосфере планеты, 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 .

Состав элементов планеты не отличается от состава Юпитера и состоит на 93% из водорода и на 6% из гелия. Атмосфера Сатурна простирается на 1000 км, ниже её находится слой водородно-гелиевой смеси.

На глубине, равной половине радиуса планеты, температура достигает 1000°C , давление около 3 млн атмосфер. На глубине 0,7–0,8 планетного радиуса водород находится в металлической фазе. Ниже этого слоя расположено силикатно-металлическое ядро, масса которого равна примерно девяти массам Земли (рис. 76).

Титан, самый большой спутник Сатурна (атмосфера которого состоит в основном из азота и метана), находится на втором месте по величине после спутника Юпитера Ганимеда (рис. 77), диаметр которого – 5151 км. Было доказано, что в атмосфере Титана имеется много водорода. «Вояджер-1» в 1980 году обнаружил шесть новых спутников Сатурна. В настоящее время известно более 60 спутников.

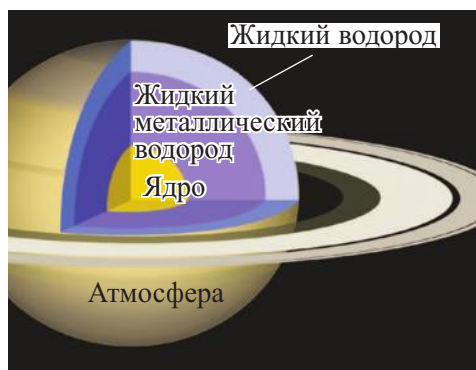


Рис. 76. Внутреннее строение Сатурна.

Уран. Планета Уран была открыта музыкантом, а впоследствии знаменитым астрономом В. Гершелем в 1781 г. Диаметр Урана – 50724 км, масса в 14,59 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.

На небосводе Урана Солнце видно под углом в 2'. Измерения оболочки Урана с помощью радиоволн показало, что его средняя температура составляет –200 °С.

Уран, состоящий в основном из водорода и гелия, содержит также метан. В соответствии с полученными сведениями его внутреннее строение ученые представляют так, как показано на рис. 78.

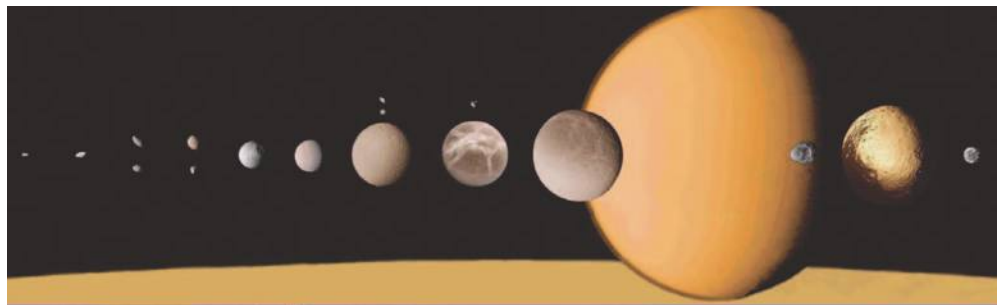


Рис. 77. Спутники Сатурна (самый большой – Титан).

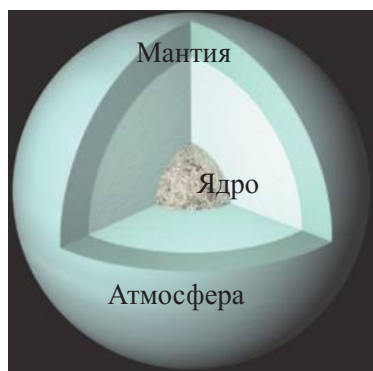


Рис. 78. Внутреннее строение Урана.

Известен 21 спутник планеты. Два самых больших из них открыты Гершелем и названы Титания и Оберон. Эти имена были использованы В. Шекспиром в комедии «Сон в летнюю ночь», они стали известными и популярными. С тех пор все обнаруженные спутники Урана также носят имена персонажей пьес Шекспира.

Нептун. В 1820 г. парижский астроном А. Бювар составил очень точные таблицы движения Юпитера, Сатурна и Урана. Но спустя 10 лет Уран отклонился от ранее вычисленного положения на несколько десятков секунд дуги. Было высказано предположение, что причиной

таких отклонений является притяжение неизвестной планеты.

За разрешение этой достаточно трудной математической задачи взялись независимо друг от друга двое учёных – французский математик У. Лаверье и молодой английский астроном Дж. Адамс. Завершив в 1846 г. свои вычисления, Лаверье направил в Берлинскую обсерваторию, известную своими точными звёздными картами, сообщение о том, где, по его мнению, находится новая планета, и попросил проверить. 23 сентября 1846 г., немецкий

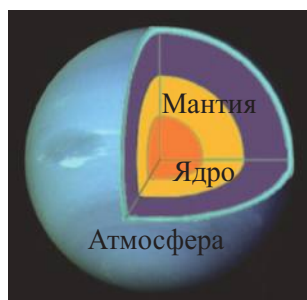


Рис. 79. До настоящего времени внутреннее строение Нептуна предположительно такое.



Рис. 80. Спутники Нептуна (самый большой спутник – Тритон).

астроном профессор Галле обнаружил новую планету всего в 1° от указанного Леверье места. Планете было присвоено имя римского бога морей и океанов Нептуна.

Нептун немного меньше, чем Уран, его диаметр – 49 224 км. Плотность – $1,6 \text{ г/см}^3$, расстояние от Солнца – 30,1 а. е. Масса планеты в 17,2 раза больше массы Земли. Период обращения вокруг Солнца – 164 года 280 дней. Один оборот вокруг своей оси Нептун совершает за 15,6 ч.

Спектроскопические наблюдения, сделанные с помощью «Вояджеров» 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. 79*).

В 1846 г. астроном Лассел обнаружил большой спутник Сатурна, назвав его Тритоном (*рис. 80*). Тритон расположен на расстоянии примерно 383 000 км от Нептуна, вращение происходит по обратному орбитальному движению. Этот спутник окружён достаточно плотной атмосферой. В 1949 году Койпер обнаружил ещё один спутник Нептуна и назвал его Нереидой. Его диаметр всего 300 км. Обнаружено более 10 спутников планеты.

Экзопланеты. Сегодня чем глубже изучается космос, тем чаще у людей возникает вопрос: «Одни ли мы во Вселенной?» Но до сих пор нет убедительного ответа на этот вопрос. Изучая планеты Солнечной системы, ни на одной из них следов жизнедеятельности не нашли. Поэтому есть основания считать, что наша цивилизация, т.е. планета с разумными существами, единственная в Солнечной системе.

Однако астрономам давно известно, что Солнце не единственная звезда во Вселенной и что таких звёзд – бесчисленное множество. Вокруг некоторых из миллиардов звёзд могут вращаться такие же спутники, как наша Земля. С большой вероятностью на некоторых из них будут условия, благоприятные для возникновения и развития разумной жизни. Такие планеты, вращающиеся вокруг других звёзд, находящихся за пределами нашей Солнечной системы называются *экзопланетами* (с латинского «экзо» – внешний) планет.

Первая планета была открыта ещё в 1995 году благодаря созданному астрономами Женевской обсерватории М.Майором и Д.Квелосом сверхточному спектрометру, который мог определить незначительные смещения

линий спектра звёзд (примерно 13 м/сек). С 1994 года они изучали лучевые скорости 142 звёзд нашей Галактики и в спектре 51 звезды созвездия Пегаса из-за влияния его спутника обнаружили «колебания» с периодом 4,23 суток.

С помощью таких исследований до конца XX столетия было обнаружено более 20 экзопланет. Отправленный в космос в марте 2002 года космический аппарат «Кеплер» до настоящего момента обнаружил более 1000 экзопланет вокруг соседних звёзд. Самые большие экзопланеты похожи на Юпитер (их массы в пределах от 0,19 до 13 масс Юпитера) и состоят, в основном из водорода и гелия. Их называют «Юпитерами». В Солнечной системе такие планеты Юпитер и Сатурн. Намного меньше по массе «Юпитеров» экзопланеты «Нептун», массы которых от 7 до 60 масс Земли. В их составе были обнаружены вода, аммиак, углекислый газ и скалистые породы. По многим характеристикам они похожи на планеты Солнечной системы Уран и Нептун.

Самые маленькие экзопланеты «Земли» (массой меньше, чем 7 масс Земли) состоят из силикатов металлов и других твёрдых частиц – являются представителями планет земного типа. В Солнечной системе планеты такого типа – Земля, Венера, Марс и Меркурий.

До апреля 2018 года количество обнаруженных экзопланет составило более 3750.

Вопросы и задания

1. Из каких газов состоит атмосфера Юпитера?
2. Какие астрономические станции исследовали Юпитер?
3. Из чего состоят кольца Сатурна?
4. Какие автоматические станции изучали Сатурн? Сколько естественных спутников обращается вокруг планеты?
5. Что вы знаете о Титане, самом большом спутнике Сатурна?
6. Что вы знаете о внутреннем строении Урана?

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 $n = \infty, 0, 1, 2, 3, 4, \dots$.

В таблице 2 большие полуоси орбит планет, найденные с помощью этой формулы, сравниваются с их действительными значениями.

Таблица 2

№	Планета	n	Большая полуось орбиты планеты, найденная по формуле Тициуса (*) (а.е.)	Среднее расстояние планеты до Солнца
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-Бодде. В результате предположения Кеплера о возможности существования неизвестной планеты между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии 2,8 а.е. от Солнца побудило многих астрономов заняться её поисками.

В 1801 г. итальянский астроном Джузеппе Пиацци открыл планету, находившуюся в созвездии Тельца на расстоянии примерно 3 а.е. от Солнца. Эта планета получила название Церера. До 1807 года на таком же расстоянии от Солнца астрономы определили местоположение ещё трёх планет – Паллады, Юноны и Весты. Их назвали астероидами (по гречески – «звездopodobными»). К 1890 году их количество дошло до 36. Вначале малым планетам присваивались имена героев и богов римского пантеона богов. С 45-й по счёту планеты им стали давать женские имена, затем им стали присваивать имена, образованные от названий разделов наук – Философия, Геометрия, Юстиция, и населённых пунктов. Во время Второй мировой войны работавший на Китабской международной широтной станции сотрудник Крымской обсерватории профессор Г. Неуймин одной из открытых им планет (№ 1351) в честь нашей республики дал имя «Узбекистания».

Массы астероидов – от $2,38 \cdot 10^{19}$ кг (Веста, которая меньше массы Земли в 25 раз) до 10^{12} кг (Гермес).

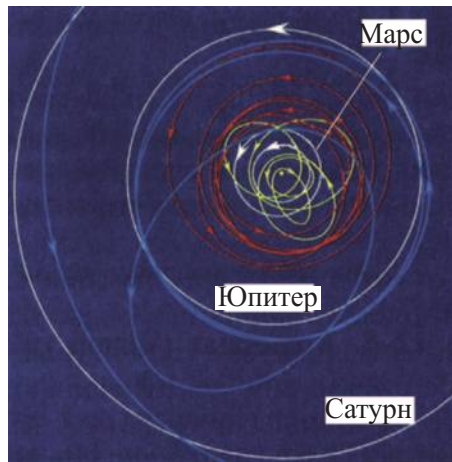


Рис. 81. Орбиты группы малых планет.

Средняя плотность от 2 г/см³ (каменные астероиды), до 7–8 г/см³ (железно-никелевые). На рис. 81 показано взаимное расположение вокруг Солнца орбит группы астероидов.

Астероиды Икар, Гермес, Эрос и Адонис периодически приближаются к Земле. При этом их расстояния до Земли меняются от 1 млн км до 23 млн км.

Но не следует волноваться по поводу приближения астероидов к Земле. Вычислением орбит этих астероидов занимается большая группа астрономов, поэтому об опасности столкновения Земли с приближающимся астероидом будет известно

заранее. Учеными разработаны мероприятия, которые помогут избежать подобного столкновения.

Плутон и другие планеты-карлики. В 1880 году английский астроном Форбс после долгого изучения движения Нептуна предположил, что за ним может находиться ещё одна планета. В начале XX века поиском неизвестной планеты занялся астроном Ловелл. В 1930 году в предсказанном Ловеллом месте астроном К.Томбо нашел планету, названную Плутоном.

В конце XX века за орбитой Плутона был открыт пояс астероидов, который называли «поясом Койпера», поскольку ещё в 1951 году американский астроном Джерард Койпер предполагал его существование. Учёные считают, что этот пояс, расположенный на расстоянии 35–50 а. е. от гигантских планет, состоит из астероидов и комет.

В 1992 году в поясе Койпера определили местонахождение первого объекта – 1992 QB1 (Альбион) диаметром около 280 км. В мае месяце 2000 года количество транснептуновых объектов достигло 300. Эти небесные тела обращаются вокруг Солнца в прямом направлении, как большие планеты (рис. 82, а). Их сложно назвать астероидами или кометами, поскольку диаметр этих небесных тел достаточно велик и составляет 80–100 км. По результатам последних исследований, в этом поясе количество объектов размером более 100 км в диаметре может быть более 70 000.

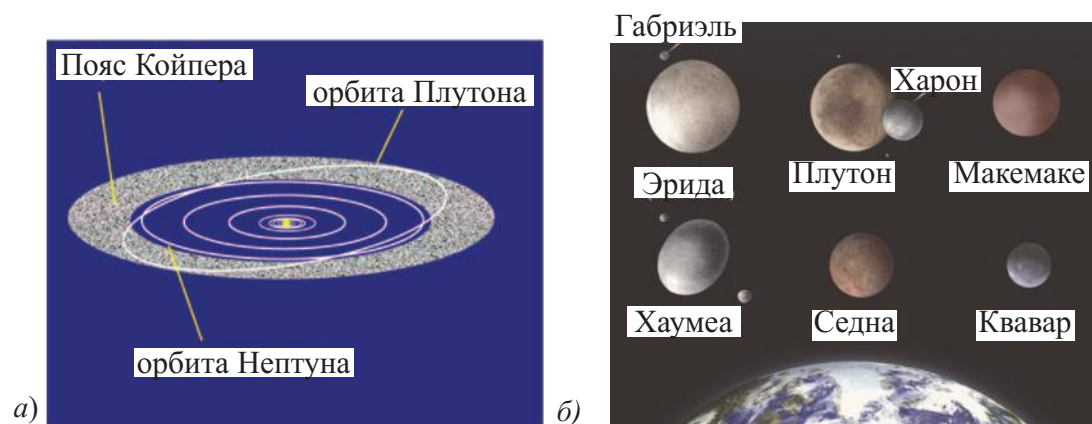


Рис. 82. а) Пояс Койпера; б) Транснептуновые объекты.

В 2003 году астроном Калифорнийского института технологии М.Браун открыл транснептуновый объект 2003 UB313 «Хена», ранее было известно под названием Зена (Ксена), названный впоследствии Эридой. Размеры этого небесного тела были больше, чем у Плутона. После этого у астрономов мира возник вопрос: «Будет ли этот объект считаться планетой?». Для ответа на него Международным астрономическим союзом (МАС) была создана специальная рабочая группа под руководством профессора О. Джинджерикса. По рекомендации этой группы на XXVI Ассамблее МАС для различения планет и карликовых планет была разработана особая классификация:

1. *Планета* – вращающееся вокруг Солнца небесное тело. Достаточно большое и массивное тело в форме шара. Таких планет 8: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

2. *Карликовые планеты* – это небесные тела, которые вращаются по орбите вокруг Солнца и имеют достаточную массу для того, чтобы под воздействием сил гравитации поддерживать близкую к сферической форму, не являются спутниками планет и не могут, в отличие от планет, расчистить район своей орбиты от других объектов. МАС официально признаны 5 карликовых планет: крупнейший астероид Церера и транснептуновые объекты Плутон, Эрида, Макемаке, Хаумеа и др. (рис. 82, б).

Вопросы и задания

1. Какие параметры планетных орбит вычисляются по правилу Тициуса?
2. Между орбитами каких планет могут находиться орбиты астероидов (маленькие планеты)?
3. Какие астероиды (маленькие планеты) периодически приближаются к Земле?
4. Как МАС классифицирует карликовые планеты?

ТЕМА 18. § 43. Кометы («хвостатые звёзды»)

Слово «комета» в переводе с греческого означает «длинноволосая». Кометы называют и «хвостатыми звёздами» по тому виду, который они принимают, когда проходят вблизи Солнца (рис. 83). Когда комета очень далека

от Солнца (соответственно, от Земли), она видится в виде небольшого туманного пятнышка с уплотнением в центре, ядром, в котором сосредоточена её масса. Но когда она приближается к Солнцу, её яркость возрастает, ядро окутывает кома – разреженное облако газов.

В 1577 г. знаменитый Т. Браге выяснил, что кометы являются небесными телами, движущимися на фоне звёзд. До тех пор люди считали кометы явлениями атмосферы Земли.

Спустя некоторое время, в начале XVII в. И. Кеплер и Г. Галилей высказали предположение, что «хвостатые звёзды» пересекают Солнечную систему по прямой и никогда больше не возвращаются.

Ученик Ньютона Эдмунд Галлей вычислил орбиты 24 комет, наблюдавшихся с 1337 по 1698 годы. 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 1581 г. Апиан, в 1607 г. Кеплер и Лонгомонтан, а в 1682 г. непосредственно я сам, является одной и той же кометой, не покидает меня. Элементы всех трёх орбит этих комет совпадают, поэтому я полагаю, что она вернётся в 1758 году. Если это произойдёт, то не останется сомнений в том, что и другие кометы периодически возвращаются к Солнцу».

Учёный не ошибался. Комета, о которой говорил Галлей, прошла 12 марта 1759 г. через перигелий. Таким образом, сбылось предсказание Галлея. Это, в свою очередь, подтвердило справедливость ньютоновской теории тяготения. Комета, которая оказалась частью Солнечной системы, получила имя в честь её первого исследователя Галлея.

Ядро кометы состоит из замороженных газов и частичек пыли, камней и металлов. Замороженные газы – это аммиак, метан, двуокись углерода, циан и азот. При приближении кометы к Солнцу начинается бурное испарение



Рис. 83. Вид «хвостатой звезды» – кометы.

этих газов и образуется окутывающее ядро облако газов – кома. Сила, действующая на кому – давление Солнечного излучения и солнечного «ветра», которые формируют огромный хвост кометы протяженностью в миллионы километров, направленный в сторону от Солнца.

Составляющие хвост кометы газы и пыль достаточно разрежены, их частицы отражают солнечный свет, совпадающий со спектром Солнца. В его спектре заметны ионизированный азот, карбонат ангидрид.

Основная масса кометы сосредоточена в её ядре, но даже у самых больших комет масса ядра не больше одной миллионной части массы Земли. Плотность кометы составляет всего 10^{-12} – 10^{-13} г/см³. Диаметр головной части кометы от 1 000 км (у тусклых комет) и, в зависимости удалённости от Солнца, до 2 000 км (у ярких комет), хвостовая часть до 150 000 км. Много новой информации о строении комет было получено в 1986 году в момент очередного прохождения кометы Галлея вблизи Солнца с автоматических станций «Джотто» (Великобритания), «Планета» (Япония), «Вега» (СССР).

До 1950 года было зарегистрировано более 1500 комет, из них более 400 до изобретения телескопов, остальные были открыты с помощью телескопов. На *рис. 84* показаны орбиты группы комет Солнечной системы.

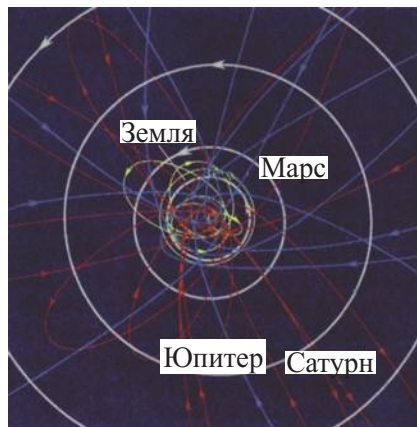


Рис. 84. Орбиты группы комет вокруг Солнца.

Где «рождаются» кометы? Голландский астроном Й.Оорт выдвинул гипотезу, согласно которой источником возникновения планет является гигантское облако кометных ядер, которое окутывает Солнечную систему. Это облако стало называться облаком Оорта. Такое облако простирается на расстояние в 1 парсек. Расчёты показывают, что орбиты ядер комет, движущихся на таком далёком расстоянии, вследствие звёздных возмущений изменяются, и в конечном итоге могут стать спутниками Солнца.

Ядра комет с такой длительной периодичностью имеют очень низкую температуру, и поэтому, не теряя составляющих ядро газов,

они в течение миллиардов лет остаются неизменными. Изучая их, можно узнать о начальных этапах эволюции Солнечной системы. Иногда под действием Солнца и планет перигелий орбит комет снижается, и они могут остаться на орбитах вблизи Солнца. Вычисления показывают, что некоторые из них могут навсегда покинуть Солнечную систему, двигаясь по параболическим траекториям.

§ 44. Метеоры («падающие звёзды») и метеориты

Кто не видел на небе красивые светящиеся следы падающих звёзд? Но, наверное, не каждый знает, что к звёздам 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, под воздействием её притяжения, они входят в её атмосферу со скоростью от 10 км/с до 70–80 км/с. Болиды – частицы, в виде огненных шаров 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 «летающими звёздами» или *метеорами*, зависит от их величины.

Естественно возникает вопрос о том, 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. Русский астроном С.В. Орлов провёл такие вычисления для кометы Галлея. Оказалось: после того, как она совершит 330 оборотов вокруг Солнца, т. е. через 25 000 лет, комета лишится всего запаса газов своего ядра.

Причиной исчезновения кометы может стать и механическое разрушение. Наблюдалось разрушение многих комет, проходящих вблизи Солнца. Например, в 1846 году комета Биэла распалась на две части, проходя около Солнца. В очередной раз комету Биэла наблюдали в 1857 году, при этом расстояние между двумя её частями составляло 2 млн километров. После этого, несмотря на все старания, наблюдать комету никому не удалось. Но в 1872 году, в момент, когда по предварительным расчётам комета должна была в

очередной раз приблизиться к Земле, вместо кометы наблюдался интенсивный «метеорный дождь» (рис. 85).

В 1950 г. астроном Д.А. 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 можно будет наблюдать в плоскости орбиты кометы как поток метеоров. Разрушившиеся кометы превращаются в будущем в «метеорные дожди». Это подтверждается наукой. 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 метеорного потока Ориониды (от названия созвездия Орион, в которых лежит его радиант, т. е. точка, откуда как бы исходят метеоры). На рис. 86 изображён красивый метеорный поток Драконида, ежегодно наблюдаемый 8–12 декабря.



Рис. 85. «Метеорный дождь».



Рис. 86. «Метеорный дождь» Драконида, проецирующийся на созвездие Дракона.

Метеориты. Иногда блуждающие в космосе осколки небесных тел под действием земного притяжения меняют свою орбиту и проходят через земную атмосферу в виде ярких огненных шаров, летящих по небосводу и падающих на Землю (рис. 87). Их называют *метеоритами*.

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 Ванавара. При падении произошёл взрыв, вызвавший сильное сотрясение Земли, зарегистрированное всеми сейсмическими станциями мира. Метеорит получил название *Тунгусского метеорита*.

Как показывают расчеты, на Землю ежегодно падает более 500 метеоритов. Поскольку 70% поверхности Земли покрыто водой, большинство из них исчезает без следа, падая в океаны и моря (около 350 метеоритов), остальные, падающие на сушу, не всегда падают на обитаемые территории, поэтому видят их немногие.

Падение метеоритов наблюдалось с древних времён; камень, найденный на месте падения, объявлялся священным. Метеорит, упавший на территорию одного из германских княжеств в 1514 г., был помещён в расположен-



Рис. 87. Болид – след, оставленный в атмосфере Земли падающим метеоритом.



Рис. 88. Воронка, оставленная метеоритом в пустыне штата Аризона.

ной поблизости церкви и даже окутан цепями, чтобы предотвратить его возвращение на небо. С тех пор эта церковь стала местом паломничества.

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.

Падение метеоритов, движущихся со скоростью свыше 4 км/с, в несколько раз превышает энергию обычного взрывчатого вещества той же массы. Часть энергии метеорита, падающего с такой скоростью, идёт на то, чтобы испарить его, а оставшаяся часть идёт 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. 88).

Вопросы и задания

1. Являются ли звёздами «хвостатые звёзды»?
2. Кем и как была открыта первая периодическая комета?
3. Почему хвосты комет направлены в противоположную от Солнца сторону?
4. Из чего состоят ядра комет, их хвосты?
5. Что вы знаете о комете Галлея?
6. Какая связь существует между «летающими звёздами» и распавшимися кометами?
7. Что такое болиды и что означает их появление?
8. Из чего образован метеорит?
9. Что вы знаете о кратере метеорита в штате Аризона (США)? Расскажите о Тунгусском метеорите.

В XVIII веке И. Кант считал, что Солнечная система образована мелкими холодными частицами, а П.-С. Лаплас считал, что она возникла из-за сжатия вращающейся газовой туманности с большой массой.

Согласно данным последних лет, Солнечная система по ряду причин не могла быть образована ни одним из этих способов. Тем не менее, теории Канта и Лапласа о рождении Солнечной системы, их идеи о другом (газопылевом) строении материи Солнечной системы, явились важной поддержкой материалистического объяснения развития Вселенной.

В 40-х годах прошлого века космогоническими представлениями стал заниматься известный русский учёный О.Шмидт. По его мнению, протопланетное облако создано из захваченной Солнцем пылевой туманности. Если захват был не централизованным, тогда эта туманность начинает вращаться, и импульс её вращательного момента очень велик (рис. 89, а).

Гипотеза Шмидта заключается в том, что миллиарды лет назад Солнце было окружено гигантским облаком, которое состояло из частичек холодной пыли и замёрзшего газа. Все они обращались вокруг Солнца. Находясь в постоянном движении, сталкиваясь, взаимно притягивая друг друга, они как бы слипались, образуя сгустки. Постепенно газопылевое облако сплющивалось, а сгустки стали дви-

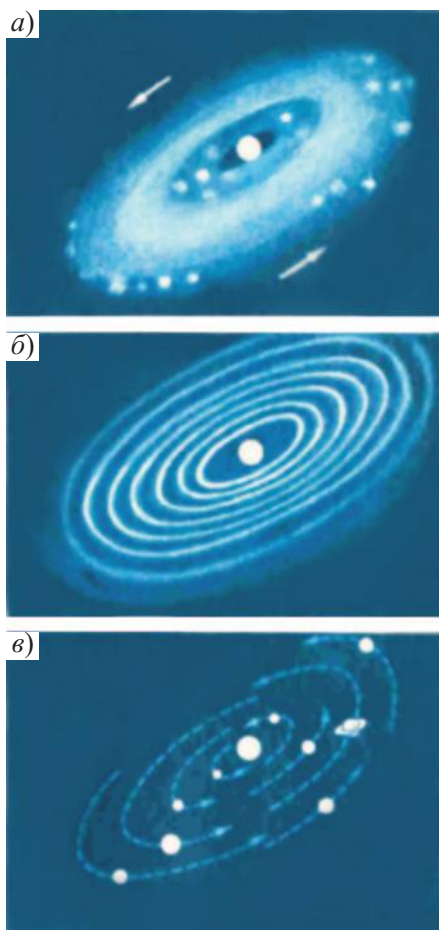


Рис. 89. Образование Солнечной системы.

гаться по круговым орбитам. Со временем из этих сгустков и образовались планеты нашей Солнечной системы. Менее ясно происхождение газо-пылевого облака, когда-то окружавшего Солнце. О. Шмидт и многие другие ученые считают, что Солнце могло захватить своим притяжением часть такого облака, из которого оно ранее само возникло в результате сгущения.

Они считают, что свечение Солнца возникло вследствие разогревания окружающих его газов и пыли. Вследствие дифференциации химического состава протопланет, формирующихся по модели Земли, тяжёлые элементы, сгущаясь, формируют ядро, а легкие, поднимаясь, создают их мантию и кору. Образовавшиеся лёгкие элементы (водород и гелий), будучи отброшенными на огромное расстояние от Солнца, сформировали планеты-гиганты. Это видно из сформировавших планеты гиганты тугоплавких веществ и «льда» воды, метана и аммиака. Планеты земного типа сформировались из тяжёлых химических элементов с малыми примесями лёгких, относительно небольших размеров и находятся близко к Солнцу (*рис. 89, б*).

По мнению учёного, мелкие частицы газо-пылевого облака, сталкиваясь друг с другом, образовывали сгущения. Сталкиваясь друг с другом и увеличиваясь в размерах, притягивая к себе вещества между орбитами, сгущения постепенно образовали планеты с устойчивыми орбитами. Его гипотезы объясняют и ряд других закономерностей Солнечной системы (*рис. 89, в*).

Для того, чтобы из новых веществ под воздействием гравитации образовались планеты, требуется очень много времени. Например, планете Земля, для образования её нынешней величины, по приблизительным подсчётам, потребовалось не менее 100 млн лет.

В космогонии гипотеза получает подтверждение на примере Солнечной системы: по закону притяжения расстояние между планетами увеличивается по мере удаления от Солнца.

Тела с большой массой и величиной, попадая на относительно холодные планеты, например Землю, ударяясь, раскаляли её. В процессе формирования земной мантии большую роль сыграл и другой физический процесс – выделение тепла при распаде радиоактивных элементов. Такой нагрев привел к вулканическим процессам, возникновению океанов и первичной атмосферы и тем самым к формированию земной оболочки. Первичные

атмосферы Венеры и Земли были схожими, но в процессе эволюции сильно изменились. Например, исследования показывают, что обогащение кислородом атмосферы привело к развитию жизни на Земле. Но академик В.Г. Фесенков считал, что с большой вероятностью и центральный сгусток, образовавший Солнце, также возник из вращающегося газопылевого облака, и на начальном этапе формирования отбросил относительно разреженные вещества в свою экваториальную плоскость. По его мнению, эти вещества уплотнили окружающее Солнце облако, что позволило образоваться планетам. По расчётам этой теории, Солнце, уменьшаясь и остывая со временем, пришло к своему современному состоянию.

Вопросы и задания

1. Что явилось важным в гипотезах Канта и Лапласа об образовании Солнечной системы?
2. На какие расчёты опирается занявшая свое место в науке гипотеза О. Шмидта об образовании Солнечной системы?
3. Как по гипотезе академика И. Фесенкова объясняется образование планет вокруг Солнца?

V РАЗДЕЛ. ЗВЁЗДЫ

ТЕМА 20.

§ 46. Годичный параллакс и определение расстояний до звёзд

Измерение расстояний до ближайших к Земле звёзд основано на знании их параллактических смещений. Смещаясь вместе с Землей по её орбите радиусом примерно 150 млн километров, наблюдатель обнаружит, что определённая выбранная им звезда описывает на небесной сфере, на фоне далёких звёзд, 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 звёздой на фоне более

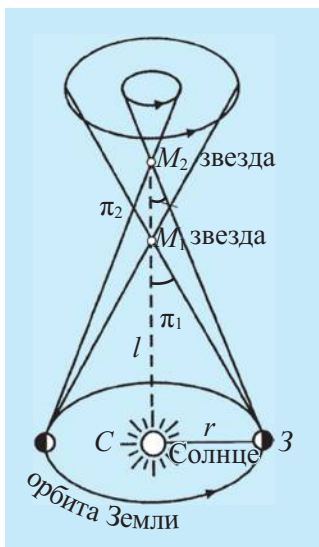


Рис. 90. Годичный звездный параллакс.

отдаленных звёзд в течение года (круг или эллипс), имеет разное значение в зависимости от расстояния звёзды и называется *параллактическим смещением*. Измерение величины этой дуги даёт возможность определить угол π , под которым воображаемому наблюдателю, находящемуся в центре светила, виден радиус земной орбиты, перпендикулярный к лучу зрения (на рис. 90: π_1 и π_2 для звёзд M_1 и M_2). Этот угол π называется *годовым параллаксом* светила и даёт возможность определить расстояние от Земли до светила. Действительно, из прямоугольного треугольника CZM_1 :

$$\sin \pi = \frac{r}{l} \text{ или в целом, } l = \frac{r}{\sin \pi},$$

где r – радиус земной орбиты, l – расстояние светила до Солнца, π – годичный параллакс в секундах. Так как годовые параллаксы звёзд очень малы

(не более 1), то измеряя расстояния в а.е., находим ($r=1$ а.е. = $\frac{1}{206265}$ пк):

$$l = \frac{r}{\pi \cdot \sin 1''} = \frac{1 \cdot 206265}{\pi}.$$

Если расстояния измеряются в *парсеках*, то

$$l = \frac{1}{\pi}.$$

Впервые с помощью подобных вычислений в 1886 году было определено расстояние до Веги (альфа созвездия Лиры), вычисленное основателем Пулковской обсерватории В.Я. Струве. Этот метод позволяет вычислить расстояния до относительно близких звёзд ($\pi \geq 0,01''$), т.е. для расстояний ~ 100 пк для более удалённых звёзд расстояния измеряются по формуле:

$$\lg r = \frac{m-M}{5} + 1 \text{ (пк)},$$

где m и M – видимая и абсолютная звёздная величина.

§ 47. Определение размеров и физических параметров звёзд *

1. Так как звёзды очень удалены от Земли, то даже в самые большие телескопы они видны в виде светящихся точек. Только для некоторых звёзд можно определить их угловые размеры с помощью специальных звёздных интерферометров. Если известны видимый угловой диаметр (d'') и расстояние (l) до звезды, то линейный диаметр (D) звезды можно найти по формуле:

$$D = l \cdot \sin d''.$$

2. Однако для определения размеров большинства звёзд, которые видны в виде точек, используются другие методы. Известно, что если представить звезду в виде абсолютно черного тела, то полная мощность её излучения будет определяться по формуле: $L_* = S_* \cdot \sigma \cdot T_*^4$, где $\sigma \cdot T_*^4$ – единица поверхности входящей энергии излучения. Здесь σ – постоянная Стефана-Больцмана $5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт ($\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$); S_* – площадь поверхности звезды. T_* – температура поверхности звезды, откуда получаем $S_* = 4\pi \cdot R_*^2$. 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 удаётся определить светимость L_* и температуру T_* звезды с помощью других методов, то для её радиуса в единицах радиуса Солнца ($R_\odot = 1$) приходим к формуле (логарифмируя обе стороны уравнения):

$$\lg R_* = \frac{1}{2} \lg \frac{L_*}{L_\odot} - 2 \lg \frac{T_\odot}{T_*}.$$

Например, связь между линейным радиусом Солнца ($R_\odot$) и его угловым радиусом ($\rho_\odot = 16'$) выражается формулой:

$$\text{tg} \rho_\odot = \frac{R_\odot}{\Delta},$$

где $\Delta = 1,5 \cdot 10^{11}$ м – расстояние от Земли до Солнца. Тогда радиус Солнца:

$$R_\odot = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \text{tg} 16' \approx 7 \cdot 10^8 \text{ м, или примерно } 700\,000 \text{ км.}$$



Рис. 91. Гигантские звезды в сравнении с Солнцем (а) и карликовые звёзды в сравнении с Землей (б).

Среди гигантов и сверхгигантов встречаются звёзды, диаметр которых в тысячи раз больше диаметра Солнца. Например, у звезды VV созвездия Цефея радиус в 6 000 раз больше радиуса Солнца. У Сириуса радиус вдвое больше радиуса Солнца, т. е. 1 400 000 км. Напротив, радиусы некоторых звёзд меньше радиуса Солнца в несколько десятков раз, т. е. примерно равны радиусам планет. Так как большинство этих звёзд имеют белый цвет, то они называются белыми карликами. На рис. 91 приведены условные изображения красных гигантов и белых карликов для сравнения с размерами Солнца и Земли.

§ 48. Цвет и температура звёзд

1. Человек, который внимательно смотрит на звёздное небо, легко заметит разницу в цвете звёзд. В частности, Солнце представляется жёлтой по цвету звездой, значит, температура его поверхности около 6000 К. Температура звёзд темно-красного цвета – 2500–3000 К, тёмно-жёлтых – 3500–4000 К. белых – около 17000–18000 К. Самые горячие звёзды нашего неба – голубые звёзды, их температура – 25000–50000 К.

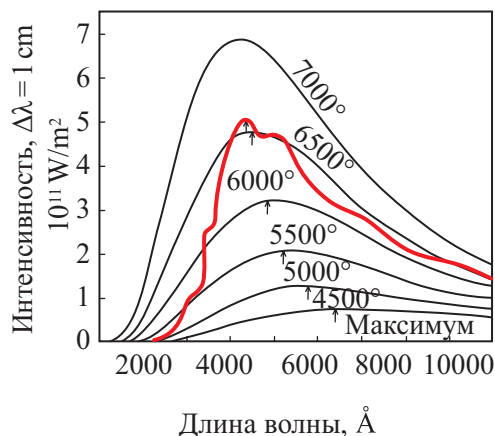
Существует несколько способов определения температуры поверхности звёзд. Согласно одному из них температуру определяют по распределению

Рис. 92. Распределение энергии в спектрах звезд (выделенная линия соответствует спектру Солнца).

энергии излучения в спектре звезды. При этом по длине волны, соответствующей максимуму энергии излучения, по закону смещения Вина находят (рис. 92):

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 0,29 \text{ град} \cdot \text{см.}$$

2. Кроме того, по цветовым показателям (color index – CI), рассчитанным по формуле $m_{\text{pg}} - m_{\text{pv}} = CI$ разниц величин звёзд, определённых с помощью специальных цветовых фильтров фотографическим или фотовизуальным способом, астрономы определяют и температуру звёзд. По мере приближения цвета звёзды к голубому её температура повышается. Определяемая этими методами температура звезды относится только к её поверхности. Температуру внутри звезды находят, используя сведения о спектре звезды, её массе, плотности и давлении внутри звезды с помощью трудоемких вычислений. Определяемая таким образом температура внутренних частей звезды находится в пределах от нескольких миллионов до десятков миллионов градусов (в самом центре). Температура в центре Солнца достигает 15 млн градусов. Температура в центре голубых звёзд достигает 100 млн градусов.



Вопросы и задания

1. Покажите на чертеже угол годичного параллакса для какой-либо определённой звезды.
2. Как определяется расстояние в парсеках до звезды по углу её годичного параллакса?
3. Как на основе спектрального параллакса определяют расстояние до звезды?
4. Какая связь между светимостью и радиусом звезды?
5. Какие методы существуют для определения температуры звезды?

Видимые звёздные величины не дают возможности сравнивать светимость звёзд. На самом деле две звезды, имеющие одну и ту же светимость, но лежащие на различных расстояниях, не могут иметь одну и ту же видимую звёздную величину. Для того, чтобы решить эту задачу, астрономы условно помещают все звёзды на одно и то же расстояние от Земли (или Солнца), после определения их звёздных величин можно сравнить их действительную светимость. В качестве такого стандартного расстояния астрономы выбирают расстояние 10 парсек. Звёздная величина звезды, помещённой на расстояние 10 парсек, называется её *абсолютной звёздной величиной* и обозначается M . Стандартное расстояние в 10 парсек равно $2 \cdot 10^6$ астрономических единиц. Интенсивность Солнца на расстоянии в 10 парсек, отличается от интенсивности его на расстоянии 1 а. е., уменьшаясь в $\frac{1}{(2 \cdot 10^6)^2}$ раза, то есть в $4 \cdot 10^{12}$. Приняв во внимание, что уменьшение интенсивности в 100 раз соответствует увеличению видимой звёздной величины в 5 звёздных величин, мы понимаем, что уменьшение интенсивности в $4 \cdot 10^{12}$ приведёт к увеличению звёздной величины в 31,5 раз.

Тогда видимая величина Солнца, «приведённого» на расстояние в 10 пк будет $-26,7 + 31,5 = +4,8$. Она будет равна $M_{\odot} = +4,8$.

Видимая звёздная величина ближайшей яркой звезды созвездия Центавра (Проксимы) $m=0$, удалённость от Солнца 1,3 пк. Если её доставить на расстояние в 10 пк, её интенсивность уменьшится в $\left(\frac{10}{1,3}\right)^2 = 8^2 = 64$ раза. Это приведёт к увеличению звезды в 4,5 раза. Значит, её абсолютная звёздная величина будет $M_{\pi} = 0 + 4,5 = +4,5$. Как видно из этого, если известна видимая звёздная величина m звезды и расстояние r до нее (в пк), то можно подсчитать её абсолютную звёздную величину. Для этого астрономы вывели специальную расчётную формулу:

$$M = m + 5 - 5 \lg r;$$

где r — расстояние до звезды в парсеках.

Если известны абсолютные звёздные величины Солнца и определённой звезды ($M_{\odot}$ и M_*), то:

$$\lg\left(\frac{L_*}{L_{\odot}}\right) = 0,4(M_{\odot} - M_*).$$

В результате изучения светимости звёзд было установлено, что их светимость находится в пределах от 0,0001 до нескольких десятков тысяч светимости Солнца.

Особое место среди ярких звёзд занимают звёзды, называемые гигантами и сверхгигантами. Основная часть гигантов имеет низкую температуру поверхности ($3,4 \cdot 10^3$ К) и, в соответствии с их цветом, они называются *красными гигантами*. Таковы, например, Альдебаран (самая яркая звезда созвездия Тельца), Арктур (самая яркая звезда созвездия Волопаса) и другие подобные им звёзды.

Сверхгиганты, светимость которых в десятки тысяч раз превосходит светимость Солнца, имеют разный цвет: есть голубые сверхгиганты, как Ригель (по-арабски «Риж аль-жавзо» – «Нога богатыря» – бета Ориона), красные сверхгиганты, как Антарес (самая яркая звезда созвездия Скорпиона) и Бетельгейзе (по-арабски «Ибт аль-жавзо» – «Правое плечо богатыря», самая яркая звезда созвездия Ориона).

Спектры звёзд с различными светимостями также отличаются друг от друга. Поэтому, зная спектры звёзд, можно определить их светимость и абсолютную звёздную величину. Такой метод определения расстояний до звёзд называется *методом спектрального параллакса*.

Метод спектрального параллакса отличается от тригонометрических методов тем, что он может быть использован для определения расстояний до любых звёзд, спектр которых можно определить.

§ 50. Спектры и спектральные классы звёзд

Важные сведения, относящиеся к звёздам, можно получить при изучении их спектров. Спектры звёзд являются линейчатыми спектрами поглощения, которые образуются в результате накладывания линии поглощения атомов, ионов и молекул на яркий непрерывный спектр звезды.

Спектры звёзд 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 звёзд, температуры которых близки друг другу, различаются незначительно. Атомы водорода и гелия составляют основную долю всей массы звезды, определяя тем самым её спектр. Степень интенсивности линий этих элементов в спектре звезды зависит от физического состояния её атмосферы, которое во многом определяется её температурой. Звёздные спектры условно распределены в семь спектральных классов:

О-В-А-F-G-K-M. Спектры каждого класса в свою очередь делятся на подклассы, число которых доходит до 10. Например, спектральный класс А делится на подклассы А0, А1, А2 (например, Солнце по своему спектру относится к классу G2).

Последовательность классов отражает прежде всего различия в температуре и цвете звёзд. Если в спектрах относительно холодных красных звёзд в большом количестве встречаются спектральные линии нейтральных атомов и даже молекулярных соединений, то в спектрах горячих голубых звёзд наиболее интенсивны линии ионизированных атомов.

Класс О. Непрерывный спектр звёзд 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 звёзд этого класса достигает 25 000–50 000 °С.

Класс В. Наиболее интенсивны линии нейтрального гелия. Голубоватого цвета звезды этого класса имеют температуру около 17 000 °С.

Класс А. Наиболее интенсивны в спектрах этого класса линии поглощения водорода, линии ионизированного Са. Цвет звёзд белый, температура около 11 000 °С.

Класс F. Линии водорода становятся слабее, более интенсивны линии ионизованного кальция. Много железа, титана и других подобных элементов. Цвет звезды желтоватый, температура около 7000 °С.

Класс G. В спектре звезды (например, Солнца) интенсивно и широко представлены линии нейтральных и частично ионизованных атомов каль-

ция, линии водорода слабее (интенсивность их снижена). Цвет желтый, температура около 6000 °С.

Класс К. Наблюдаются линии поглощения металлов и линии молекулярных соединений. Цвет красноватый, температура около 3500 °С.

Класс М. В спектре звезд этого класса линии металлов слабее, интенсивны спектральные ленты молекул (особенно оксида титана). Цвет красный, температура 2500 °С.

Различия в спектрах звёзд объясняются физическими свойствами, химическим составом и, самое главное, различными температурами их атмосфер. С ростом температуры звёзд молекулы их атмосфер распадаются на атомы. При ещё более высоких температурах атомы тоже распадаются, теряют электроны и превращаются в ионы. Всё это легко понять, судя по анализу спектральных классов звёзд.

§ 51 . Диаграмма спектр-светимость

Связь между спектральными классами звёзд и их температурой была установлена в результате наблюдений. Точно также в результате наблюдений была установлена связь между светимостью звёзд и их абсолютной звёздной величиной. В результате ученые задумались над тем, существует ли связь между видом спектра и светимостью звёзд. 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 звёзд, а на оси ординат – их абсолютные звёздные величины, то звёзды 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 звёзд (в единицах светимости Солнца, т. е. $L_{\odot}=1$) (рис. 93).

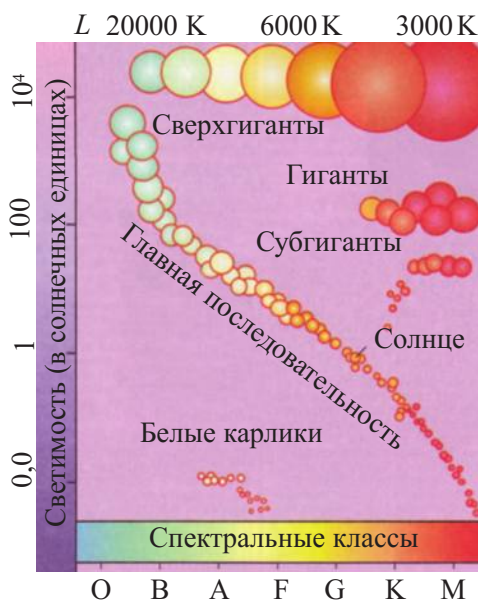


Рис. 93. Диаграмма
«Спектр-светимость».

Диаграмма Герцшпрунга-Рессела, на которой звёзды разбиты на группы в соответствии с их физической природой, дает возможность установить связи между их температурами, светимостями, спектральными классами и абсолютными звёздными величинами. Эта диаграмма играет важнейшую роль в изучении физики звёзд.

Основная часть звёзд расположена на этой диаграмме вдоль кривой, называемой главной последовательностью. В её верхней части расположены звёзды высокой светимости, принадлежащие к начальным спектральным классам. По мере движения вдоль диаграммы вниз и вправо светимость расположенных на ней звёзд (а, значит, и их температуры) убывает, а сами звёзды относятся к следующему спектральному классу.

Выше главной последовательности на диаграмме расположены звёзды с относительно низкой температурой, но очень большими диаметрами. Они обладают высокими светимостями и являются *сверхгигантами* (абсолютная звёздная величина -4^m , -5^m) и *гигантами* (абсолютная звёздная величина 0^m). В нижней части диаграммы расположена группа звёзд, главным образом, спектрального класса А и с относительно низкими светимостями, которые называются *карликами*.

Вопросы и задания

1. Что называется абсолютной звёздной величиной?
2. Запишите формулу, отражающую взаимосвязь абсолютной и видимой звёздной величины.
3. Что вы знаете о спектральных классах звёзд?
4. Как спектральные классы звёзд связаны с их температурой и цветом?

5. Какие физические параметры звёзд связывает диаграмма спектр-светимость?
6. По каким особенностям отличаются звёзды главной последовательности от гигантов и карликов?
7. Какая связь существует между абсолютной звёздной величиной и светимостью звёзд?

ТЕМА 22. § 52. Физические двойные звёзды и их типы

На первый взгляд звёзды на небосводе кажутся одинокими, но среди них динамически связанными могут оказаться и две звезды, и более двух звёзд: тройные, четверные и прочие кратные звёзды. Обычно у звёзд, вращающихся вокруг общего центра массы, орбиты лежат на одной плоскости и периоды бывают одинаковыми. Но всё же большинство таких звёзд являются двойными. Тем не менее, визуально близкие звёзды могут быть никак не связаны между собой, они лишь случайно могут оказаться расположенными в одном направлении. Такие звёзды называются *оптически двойными*.

Визуально-двойные звёзды. Если физические двойные звёзды достаточно разделены, так что их можно наблюдать в телескоп на расстоянии друг от друга, как за двумя раздельными звёздами, то их называют *визуально-двойными звёздами*.

Если компоненты звёздной системы расположены так близко друг к другу, что не видны по отдельности, то их двойственность может быть обнаружена либо фотометрически (по изменению блеска звезды), либо спектральными методами. Такие звёзды называются *затменно-двойными, или спектрально-двойными звёздами*.

Как пример визуально-двойной звезды можно привести звезду ξ 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 звёзд можно назвать визуально-двойной. Они удалены друг от друга на $11'$. В обыкновенный полевой бинокль можно увидеть много двойных звёзд (*рис. 94*). На *рис. 95* приведена орбита представителя визуально-двойной звезды ξ Большой Медведицы и её спутника.



Рис. 94. Двойные звёзды, наблюдаемые в известных созвездиях (даны звёздные величины и дуговые расстояния между звёздами).

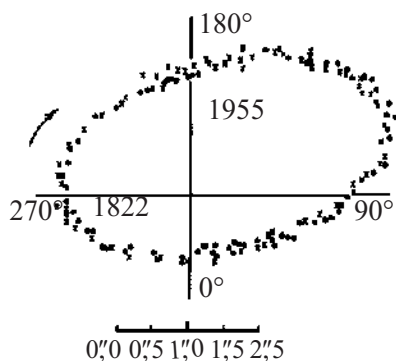


Рис. 95. Орбита визуально-двойной звезды (ξ Большой Медведицы).

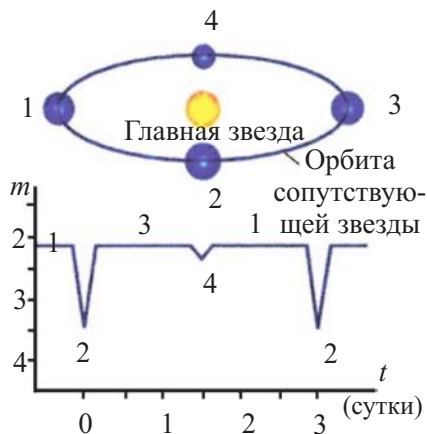


Рис. 96. Затменно-двойная звезда (Алголь – β Персея).

Типичный представитель затменно-двойной звезды – звезда Алголь (β Персея), что в переводе означает «Глаз дьявола». Плоскости орбит звёзд этой системы лежат по лучу зрения, и когда они обращаются вокруг общего центра масс, то попеременно затмевают одна другую. В результате можно заметить, что её блеск меняется с периодом ~ 3 суток, что свидетельствует о том, что она является затменно-двойной звездой (рис. 96).

Наконец, спектрально-двойные звёзды, имея каждая свой собственный спектр, будут иметь спектр, образованный в резуль-

тате наложения спектров компонент, что приведет к раздвоению некоторых спектральных линий. В спектре двойной звезды будет периодически наблюдаться смещение раздвоенных спектральных линий относительно друг друга в соответствии с периодом обращения пары.

§ 53. Вычисление массы звёзд **

Одна из наиболее важных характерных для звезды величин – это её масса. Параметры, относящиеся к звезде, в той или иной степени связаны с её массой. В отличие от задач по определению других параметров звёзд, задача определения массы звезды является одной из самых сложных. Если у звезды есть спутник, по гравитационному влиянию на него звезды вычислить её массу можно, следуя третьему уточненному закону Кеплера.

Для двойных звёзд удаётся определить их массы по периодам обращения и соотношения к основной звезде большой полуоси орбиты A спутника этой звезды:

$$\frac{T^2(M_o + m_c)}{A^3} = \frac{4\pi^2}{G} = 5,9 \cdot 10^{11} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^3}.$$

Тогда совокупность масс:

$$M_o + m_c = 5,9 \cdot 10^{11} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^3} \cdot \frac{A^3}{T^2},$$

Здесь M_o , m_c – соответственно, массы основной звезды и её спутника; A – большая полуось орбиты спутника, найденной по отношению к основной звезде; T – период двойных звёзд; G – характеризует гравитационную постоянную (здесь T – в секундах, A – в метрах, M – в кг).

Чтобы определить массу каждой звезды, входящей в двойную систему, надо вычислить их движение относительно окружающих звёзд и вычислить их расстояния от общего центра масс:

$$\frac{M_o}{m_c} = \frac{a_c}{a_o},$$

где M_o , m_c – соответственно, массы основной звезды и её спутника, a_o , a_c – большие полуоси их орбит.

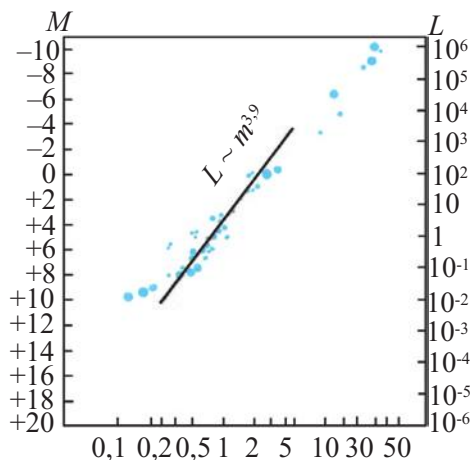


Рис. 97. Зависимость между светимостью и массой звёзд.

Массы двойных звёзд, вычисленные этим методом, составляют от 0,1 до 100 масс Солнца. Звёзды с массой в пределах 10–50 $M_{\odot}$ относительно редки.

Массу одиночных звёзд вычислить невозможно, но эмпирическим путём определена зависимость между массой и светимостью отдельных групп звёзд, занимающая отдельное место в диаграмме спектр-светимость (рис. 97). На основании зависимости между светимостью и массой определена масса многих звёзд с известной светимостью. Эмпирическим путём определена связь болометрической светимости L_6 (энергия полного из-

лучения звезды) и массы M , по выражению $L_6 = M_*^{3.9}$. В верхней части главной последовательности располагаются самые массивные звёзды, по мере снижения массы звёзд уменьшаются.

Вопросы и задания

1. Какие типы физических двойных звёзд существуют?
2. Какие звёзды называются визуально-двойными? Затменно-двойными?
В чём причина периодичности блеска затменно-двойных звёзд?
3. Как определяется двойственность спектрально-двойной звезды?
4. На основании какого закона определяются массы двойных звезд?
5. Какая зависимость между светимостью и массой некоторых звёзд была найдена эмпирическим путём?
6. В каких пределах единиц массы Солнца изменяются массы звёзд?

Физическими переменными звёздами называются звёзды, которые меняют свою светимость в отличие от затменно-двойных звёзд. Это изменение происходит в результате физических процессов, происходящих в недрах звёзд. Физические переменные звезды по характеру изменения их блеска делятся на пульсирующие и эруптивные звёзды.

Пульсирующие переменные звезды. Цефеиды. Звёзды, у которых кривая блеска имеет особую форму и изменение видимой звёздной величины происходит с периодичностью от нескольких суток до нескольких десятков суток, называются *цефеидами* – по имени типичного представителя этого типа переменных звёзд – звезды δ Цефея (рис. 98).

Светимость цефеид находится в пределах 2-6 звёздных величин. В максимуме светимости звезда принадлежит к спектральному классу F, в минимальном – к спектральному классу G. Такое изменение светимости звезды пропорционально изменению её температуры в среднем на 1500 градусов. Линии поглощения, наблюдаемые в спектрах цефеид, в зависимости от фазы изменения сдвигаются соответственно в красную или фиолетовую области спектра. Такой сдвиг спектральных линий цефеид соответствует минимуму светимости при максимальном сдвиге в красную область спектра, максимуму светимости при максимальном сдвиге в фиолетовую область спектра. Между периодами и светимостью цефеид существует связь, увеличение светимости отражается на увеличении их периода. Таким образом, расстояния до звёздных систем, где есть пульсирующие цефеиды определяются по их светимости.

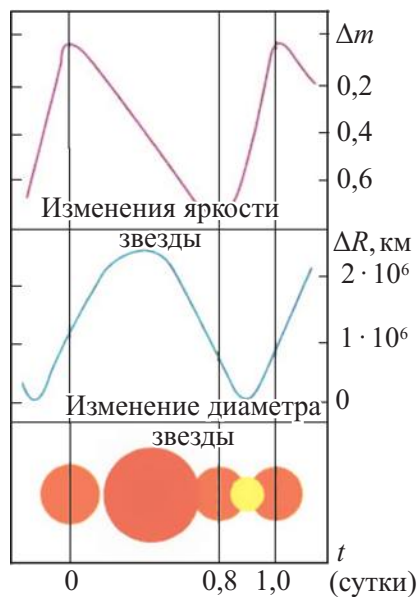


Рис. 98. Кривые яркости (Δm) и изменения радиуса (ΔR) цефеид (звезд типа δ Цефея).

Поскольку цефеиды относятся к гигантским и сверхгигантским звёздам классов F и G, их можно наблюдать и за пределами нашей галактики.

Эруптивные переменные звёзды. Эруптивными звёздами называются звёзды с относительно меньшей светимостью (в основном карлики), изменение их блеска происходит в виде повторяющейся время от времени вспышки. Эти вспышки объясняются выбросами плазмы (эрупции) звёзд, поэтому они называются *эруптивными переменными звёздами*. Некоторые эруптивные звёзды называются новыми.

Новые звёзды. Новые звёзды – это эруптивные переменные звезды, название «новые» является условным и отражает только определённую стадию переменности звёзд. Звёзды этого типа, на самом деле существующие уже давно, но не видимые из-за их тусклости, отличается то, что на определённом этапе своей эволюции они внезапно вспыхивают, увеличивая свой блеск до 10–13 звёздных величин, становясь видимыми невооружённым глазом. В среднем их абсолютная звёздная величина в максимуме достигает 8,5 и звёзды этого типа в максимуме вспышки становятся похожими на сверхгиганты типа A–F.

Изучение таких звёзд до и после вспышки приводит к выводу, что это двойные звёзды. Причиной взрыва новой звезды является, возможно, обмен вещества между компонентами тесной двойной системы звёзд. Предполагается, что одна из звёзд – большая, с меньшей плотностью, другая – карликовая, с большой плотностью. Если вещество с основной, большой звезды попадёт на поверхность её спутника – карликовой звезды, обладающей большой плотностью и силой притяжения, то возможно возникновение *термоядерной реакции*.

В период вспышки новой звезды выделяется количество энергии в 10^{38} – 10^{39} Дж, равносильное суммарному излучению Солнца за несколько десятков тысяч лет.

При этом общая структура звезды не меняется, так как выброс вещества звезды – результат отрыва от неё 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 звёздами.

На сегодняшний день известно около 300 вспышек новых звёзд, около 150 из них наблюдались в нашей Галактике, а около 100 – в соседней туманности Андромеды.

Сверхновые звёзды – это эруптивные переменные звёзды. Они считаются гигантскими массивными звёздами. Их светимость резко увеличивается в результате вспышки. За несколько дней светимость возрастает в десятки миллионов раз. В максимуме яркость такой звезды достигает яркости всей галактики, где она находится или даже превосходит её в 3–4 раза. В максимуме яркости её абсолютная звёздная величина достигает -18^m , -19^m . Максимум своей яркости сверхновая звезда достигает за 2–3 недели, а затем в течение нескольких месяцев её яркость уменьшается в 25–30 раз. Во время вспышки сверхновой выделяется количество энергии, составляющее 10^{41} – 10^{42} Дж.

В некоторых галактиках сверхновые звёзды наблюдаются 1–2 раза за 100 лет. Из истории астрономии известно, что в нашей Галактике удалось наблюдать несколько вспышек сверхновых звёзд. Особенно сильной была вспышка сверхновой в созвездии Тельца, которую в 1054 году наблюдали китайские и японские астрономы. Через несколько дней после взрыва эту звезду, которая была ярче Венеры, можно было наблюдать даже днем. Во время вспышки такие звёзды теряют количество вещества от 0,1 до 1,0 М, извергая его в межзвёздное 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. 99). Вспышку другой сверхновой звезды в созвездии Касси-



Рис. 99. Крабовидная туманность в созвездии Тельца – остаток взрыва сверхновой звезды в 1054 г.

опеи наблюдал в 1572 г. Тихо Браге. В 1604 году вспышку сверхновой звезды в созвездии Змееносца наблюдал И. Кеплер.

Центральная часть звезды, взрыв которой можно было наблюдать в виде вспышки сверхновой, резко сжимается после взрыва (в науке это называется коллапсом) и превращается в объект с очень большой плотностью. Плотность её вещества достигает плотности атомного ядра (10^{14} г/см³). При такой плотности в результате слияния протонов и электронов атомы ядра превращаются в нейтроны, а самая центральная часть звезды – в так называемую нейтронную звезду.

Вопросы и задания

1. Какие звёзды называются физическими переменными звёздами?
2. Какие из пульсирующих звёзд называют цефеидами?
3. Какая связь существует между периодичностью и светимостью цефеид?
4. Что вы знаете о механизме вспышек новых звёзд?
5. Что происходит с массой сверхновых звёзд при вспышке?
6. В какое небесное тело превращается сверхновая звезда после вспышки?

ТЕМА 24. § 55. Эволюция звёзд. Нейтронные звёзды и «чёрные дыры» *

По мнению многих астрономов, звёзды (и галактики) образовались в процессе сжатия (конденсации) и вращения газового облака, имеющего очень большую массу. Представим, что холодное газо-пылевое облако по определённым причинам сжимается. Из-за силы всемирного тяготения газовое облако начинает принимать форму шара. В результате сжатия плотность и температура облака растёт, и в будущем оно становится протозвёздой (начальная стадия образования звезды). Температура оболочки повышается, и протозвезда начинает светиться в ультракрасном диапазоне. Когда в центре протозвёзды температура достигает примерно 10^7 °С, там начинается реакция термоядерного синтеза. Начиная с этого момента вследствие пришедших к равновесию внутренних сил давления газа и сил притяжения внешних

частей звезды процесс сжатия звезды останавливается. Чем больше масса звезды, тем выше температура, при которой возникает баланс. Поэтому и светимость звёзд с большей массой будет больше.

Когда в центре звезды водород начинает «ровно гореть», сжатие звезды переходит в этап стационарного состояния. В таком виде звёзды занимают свое место в главной последовательности диаграммы спектр-светимость. Время, в течение которого звёзды находятся в главной последовательности, связано с их массой. Крупные звёзды с большой мощностью излучения, быстро проходя свой эволюционный период, находятся в стационарном периоде всего несколько миллионов лет, звёзды с массой, подобной Солнцу, проходят такой период не менее 10^{10} лет.

После превращения водорода в гелий в центре звезды образуется гелиевое ядро. Теперь преобразование водорода в гелий идет не в центральной части звезды, а в оболочке ядра. В это время иссякает источник энергии гелиевого ядра, оно снова начинает сжиматься и вследствие этого раскаляется. Когда температура ядра достигает $15 \cdot 10^6$ °К, гелий преобразуется в углерод. В результате величина и светимость звезды возрастает, и она медленно превращается в гигантскую или сверхгигантскую звезду. Мы знаем, что в диаграмме спектр-светимость такие звёзды занимают особое место.

Звёзды, похожие на Солнце (массой не более 1,2 массы Солнца), медленно расширяясь, в конечном итоге покидают своё ядро. Таким образом, последний этап жизни звезды, как и вся её эволюция, зависит от её массы. В конечном итоге звезда теряет основную часть энергии и, охлаждаясь, начинает сжиматься. В результате красная впащающаяся гигантская звезда превращается в горячий белый карлик. Звёздный мир богат такими белыми карликами. Из этого видно, что множество звёзд после превращения в белых карликов постепенно остывает и гаснет.

Но когда масса звезды и давление газа в ядре достигают определённой величины, вследствие гравитационных сил начинается процесс сжатия. Происходит так называемый коллапс (катастрофическое сжатие). Если масса звезды достигает примерно 2–3 массы Солнца, коллапса ей не избежать.

Если «нейтронный газ», образованный в результате сжатия звезды, превратившейся в нейтронную, сможет сопротивляться силам гравитации, сжатие прекратится. Нейтронная звезда или «чёрная дыра» образуется не сама



Звезда
Белый
карлик

Нейтрон-
ная звезда

Нейтрон-
ная звезда
или чёрная
дыра

Рис. 100. Эволюция звёзд по их массе.

по себе, а вследствие дальнейшего сжатия остаточных масс звезды и обязательно «пережитого» ядерного взрыва (в виде сверхновой). Из-за такого взрыва вещество переходит в состояние нейтронов, тогда её называют нейтронной (рис. 100).

Если масса звезды немного больше массы Солнца, тогда давление «нейтронного газа» не сможет сопротивляться силе гравитации, и звезда продолжит сжиматься. Когда радиус сжимающейся звезды достигнет $\frac{2GM}{c^2}$ (тогда величина скорости c для этой звезды достигает

порядка скорости света (т.е. второй космической скорости). Другими словами, ничто, даже квант излучения не сможет покинуть звезду, поэтому звезда станет невидимой. С теоретической точки зрения такая звезда может существовать, гипотетически звезда такого «вида» будет называться *черной дырой*, а радиус будет называться *гравитационным*.

Так её называли потому, что сила её гравитации препятствует какому-либо её излучению.

Если «чёрная дыра» будет одной из двойных звёзд, то она станет постоянно «всасывать» вещество нормальной звезды. Образованное в этих условиях мощное рентгеновское излучение регистрируется в рентгеновском диапазоне специальным рентгеновским телескопом, напоминая при этом, что основная звезда – это «черная дыра».

Вопросы и задания

1. Из каких звёзд образуются «белые карлики»?
2. Какие звёзды в процессе своей эволюции превращаются в нейтронные звёзды?
3. В звезду с каким радиусом превращаются «чёрные дыры» на завершающем этапе своей эволюции?
4. Остатками какого вида звёзд считаются «чёрные дыры»?

VI РАЗДЕЛ. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КОСМОСА

ТЕМА 25. § 56. Строение нашей Галактики, её состав и вращение

Если безоблачной темной ночью посмотреть на небо, то можно увидеть протянувшуюся через весь небосвод светлую «полосу», название которой нам знакомо с детства – Млечный Путь.

Рассматривая Млечный путь в обычный полевой бинокль или маленький телескоп, можно увидеть, что он состоит из звёзд, расположенных близко друг к другу.

Часть этой огромной системы звёзд, куда входит Солнце как обычная звезда, мы называем нашей Галактикой (*рис. 101*). Если рассматривать Галактику сбоку, она имеет вид двояковыпуклой линзы. Диаметр Галактики в этой её части немного меньше 100 000 световых лет, её толщина равна 7000 световых лет. Расстояние от Солнечной системы до центра Галактики, равно $\frac{2}{3}$ радиуса солнечной системы (33000 св.л.) (*рис. 102*). Если посмотреть на диск Галактики в направлении, перпендикулярном его плоскости, то можно обнаружить расходящиеся от её центра спиральные рукава Галактики, рас-



Рис. 101. Млечный путь – «пояс» нашей Галактики.

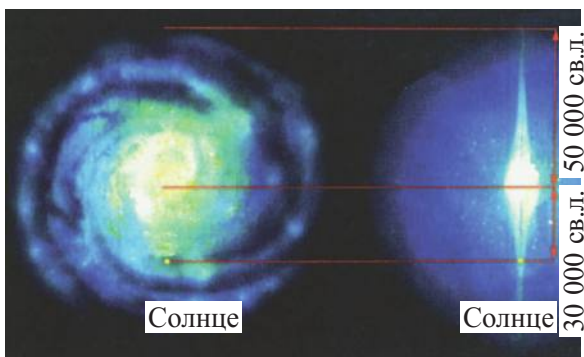


Рис. 102. Вид нашей Галактики – сверху и сбоку.



Рис. 103. Спиральные «рукава» нашей Галактики (вид сверху).

положенные вдоль её плоскости и напоминающие по своему внешнему виду ходовое колесо маятниковых часов (рис. 103). Если смотреть на центральное ядро Галактики со стороны Солнечной системы, то можно заметить, что оно проецируется на созвездие Стрельца.

Согласно расчётам, в Галактике около 200 миллиардов звёзд. Помимо звёзд в неё входят кратные звёзды (системы из нескольких звёзд, обращающихся вокруг общего центра масс под действием гравитационных сил), группы звёзд и звёзд-

ные скопления, межзвёздные газопылевые облака и туманности, молекулярные облака, космические лучи и т. д. Все звёзды, как и Солнце со своими планетами, обращаются вокруг ядра Галактики. Плоскость Млечного Пути и плоскость небесного экватора образуют угол в 62° . При этом скорости движения звёзд уменьшаются по мере удаления от ядра Галактики. Скорость вращения Солнца и ближайших к нему звёзд составляет 240 км/с, период обращения – около 200 миллионов лет.

§ 57. Шаровые и рассеянные звёздные скопления **

В Галактике имеются не только одиночные звёзды, но и динамически зависимые пары звёзд, кратные звёзды и, наконец, скопления, состоящие из сотен и тысяч звёзд. Группы, содержащие от 10 до нескольких тысяч звёзд, связанных между собой динамическими зависимостями, называются *звёздными скоплениями*. По внешнему виду различают *рассеянные* и *шаровые звёздные скопления*.

Рассеянные звёздные скопления. Расположенные от нас на одинаковом расстоянии и связанные между собой гравитационными силами звёздные скопления называются рассеянными скоплениями.

В Галактике имеется около 800 рассеянных звёздных скоплений с диаметрами от 1,5 пк до 20 пк. К хорошо известным рассеянными скоплениям



Рис. 104. Рассеянное скопление звёзд Плеяды.



Рис. 105. Шаровое скопление звезд М-13, содержащее более 20000 звезд.

относятся скопления Плеяды и Гиады в созвездии Тельца. Плеяды находятся на расстоянии 130 пк от Солнца (рис. 104), Гиады – на расстоянии около 40 пк.

Шаровые звёздные скопления. Огромное количество звёзд объединяется в группы, образуя скопления сферической формы, которые называют шаровыми звёздными скоплениями. Шаровые скопления отличаются от рассеянных скоплений 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 свидетельствует о том, что рассеянные и шаровые скопления возникли в различных условиях.

Шаровые скопления выделяются на фоне звёзд благодаря большому количеству входящих в них звёзд и своей сферической форме. Они имеют средний радиус около 40 пк. В нашей Галактике насчитывается около 100 таких скоплений. В отличие от рассеянных скоплений, концентрация шаровых скоплений сильно увеличивается к центру нашей Галактики. Типичный представитель этого класса – шаровое скопление М-13, расположенное в созвездии Геркулеса. В нём содержится около 20 000 звёзд. Оно расположено на расстоянии 24 000 световых лет от Солнца (рис. 105).

Рассматривая фотографические снимки звёздного неба, можно заметить неравномерность распределения звёзд. Главная причина того, что некоторые звёзды кажутся значительно менее яркими, – большое количество в этих областях неба космической пыли, поглощающей свет звёзд. Межзвёздное поглощение света открыл намного более 100 лет тому назад известный астроном В.Я. Струве.

Замечательными примерами пылевых туманностей являются тёмные туманности: «Угольный мешок», который проецируется на созвездие Южного Креста, и «Конская голова», видимая на фоне созвездия Ориона (рис. 106).

Темная туманность «Угольный мешок» располагается от нас на расстоянии около 150 пк, её размеры около 8 пк, угловой радиус больше 3° , она расположена вблизи Млечного Пути. При наблюдении в телескоп в её видимых границах можно увидеть слабые звёзды, которых в 3 раза меньше, чем в соседних областях с такой же площадью. Из этого следует, что «Угольный мешок», поглощая излучение расположенных за ним звёзд, уменьшает его интенсивность примерно в 3 раза, что соответствует ослаблению света, выраженному в звёздных величинах $\Delta m = 1,2^m$. Множество таких тёмных туманностей образует в Галактике широкую тёмную полосу, которая начинается в созвездии Лебедя и проходит через созвездия Орла, Змеи, Стрельца и

Скорпиона. Скрывая от наблюдателя свет звёзд в этой области Галактики, она образует большую развилку Млечного Пути. Особенно густой является эта тёмная 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 на созвездии Ориона, растянувшуюся более чем на 6 пк (рис. 107). Можно наблюдать



Рис. 106. Знаменитая пылевая туманность «Конская голова».



Рис. 107. Газовая туманность Орион в созвездии Ориона.



Рис. 108. Газовая туманность Розетка в созвездии Единорога.

такие же газовые туманности: Омега, Лагуна и Трёхраздельная в созвездии *Стрельца*, *Северная Америка* и *Пеликан* – в созвездии *Лебедя*, туманность *Розетка* – в созвездии *Единорога* и многие другие (рис. 108). Таких объектов Галактике насчитывается около 400. В спектре этих туманностей выделяются линии водорода H_α и H_β , дважды ионизованные линии кислорода (OIII) линии азота и других элементов, объединённый спектр виден на тусклом фоне. Сильное ультрафиолетовое излучение таких звёзд, поглощаясь атомами газа близлежащей туманности, ионизирует их.

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 излучают несколько квантов видимых лучей. Этот процесс называется *флуоресценцией*. В итоге температура туманности устанавливается на определённом уровне порядка 10^4 °С, что подтверждается и наблюдениями теплового радиоизлучения туманности.

Вопросы и задания

1. Какой угол составляют плоскость Млечного пути и плоскость небесного экватора?
2. Сколько примерно шаровых скоплений звёзд в нашей Галактике?
3. В какой части Галактики расположена Солнечная система?

4. Что вы знаете о размерах и составе шаровых скоплений звёзд?
5. Чем отличаются рассеянные звёздные скопления от шаровых?
6. Чем отличаются диффузные газовые туманности от пылевых туманностей?
7. Что является причиной свечения диффузных туманностей?

ТЕМА 27.

§ 59. Внешние галактики.

Классы и спектры галактик

В 20-е годы прошлого века появилась возможность определения расстояния до туманностей и стало известно, что некоторые из них – это галактики, состоящие из миллионов звёзд, лежащих вне нашей Галактики.

Одна из гигантских внешних галактик, известная как *туманность Андромеды*, расположена в созвездии *Андромеды* и видна в темную безлунную ночь даже невооруженным глазом в виде светлого туманного пятнышка (рис. 109). Данная галактика расположена от нас на расстоянии 2 млн световых лет.

Галактики широко распространены в космосе. Другая подобная галактика известна под названием М-51. Расстояние до нее – 1,8 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) звёзд. Гигантские галактики могут иметь радиус до 50 тысяч пк, самые маленькие – до нескольких сотен парсеков.

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 (иррациональные – Irr)*.

Эллиптические галактики (E) – это галактики, внешним видом напоминающие эллипсоид или шар. Характерное свойство этих галактик – равномерное уменьшение яркости по мере удаления от центра к краю. Внутри этих галактик не наблюдается никаких структурных элементов.



Рис. 109. Туманность Андромеды (М-31), расположенная в созвездии Андромеды.



Рис. 110. Спиральная галактика, ветви которой выходят из перемычки.

Спиральные галактики (S) чрезвычайно широко распространены во Вселенной, по крайней мере половина наблюдаемых 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. У галактик второго типа, обозначаемых SB, спиральные ветви начинаются от концов продолговатой структуры перемычки, пересекающей ядро по диаметру (рис. 110).

Промежуточные между спиральными и эллиптическими галактиками – это линзообразные галактики (SO).

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 относятся и так называемые *пекулярные галактики* (особые), которые по внешнему виду нельзя отнести ни к одному из рассмотренных типов.

Внешний вид галактики связан с её возрастом, эволюция галактик соответствует ступеням, изображенным на рис. 111.

Спектры галактик. Внегалактические туманности обладают спектрами, напоминающими спектры звёзд, чаще спектральных классов A, F и G. Ино-

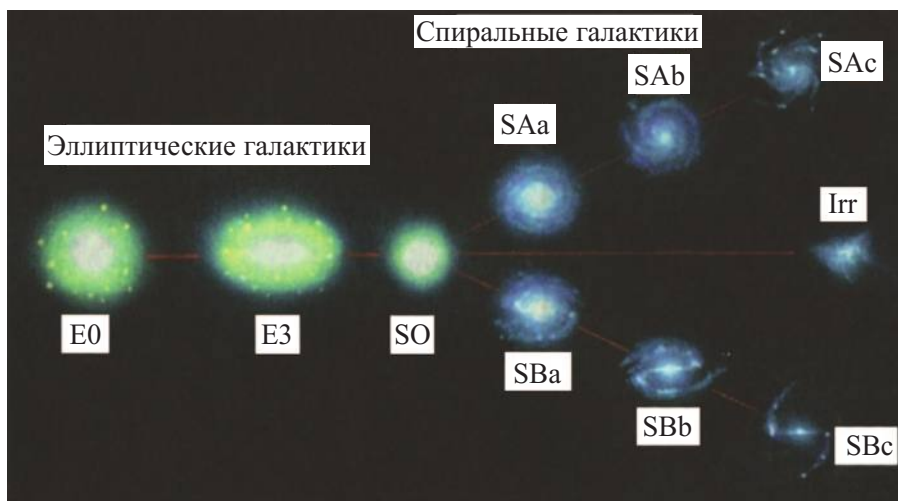


Рис. 111. Эволюция галактик.

гда на их спектры накладываются эмиссионные линии, это означает, что внегалактические туманности состоят из звёзд и диффузной материи.

Спектры неправильных галактик относятся к классам А и F, спиральных – к классам F и G, а эллиптических – к классам G и F.

Принадлежность спиральных и неправильных галактик к ранним спектральным классам означает, что в их составе имеется много молодых и горячих звёзд, тогда как эллиптические галактики состоят из старых звёзд поздних спектральных классов. По цвету галактик можно судить о спектральных классах, к которым принадлежит большинство звёзд галактики. Цвета галактик и их частей определяют теми же методами, что и для звёзд. Чтобы определить расстояние до галактики (r), сначала определяют светимость хорошо изученных цефеид, входящих в состав этой галактики по соотношению период-светимость, затем на основании звёздных величин можно найти модуль расстояния $m - M$ по формуле

$$\lg r = 0,2(m - M) + 1.$$

Расстояние до очень далёких галактик определяют по величине красного смещения в их спектре. Красное смещение (z) обычно измеряется относительным изменением длины волны спектральных линий:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z .$$

Если H – постоянная Хаббла ($70 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$), скорость света (c), расстояние до галактики можно определить по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c = H \cdot r .$$

§ 60. Радиогалактики и квазары *

Радиогалактики. Радиоизлучение, большее или меньшее, – свойство практически всех галактик. У большинства из них радиоизлучение составляет небольшую часть свечения. Есть галактики, мощность радиоизлучения которых сравнима с мощностью их излучения в оптическом диапазоне или даже в тысячи, миллионы раз сильнее. Такие галактики называются *радиогалактиками*. Одна из таких мощных радиогалактик связана с источником радиоизлучения в созвездии Лебедя, называемым Лебедь А. Определяемое по красному смещению ($z=0,057$) расстояние до нее равно примерно 200 Мпк. Она создана из 2 ярких компонентов, удалённых друг от друга на расстояние 80 кпк. Радиогалактика Центавр А удалена от нашей Галактики на расстояние примерно 4 Мпк. Радиоизлучение радиогалактик не является тепловым. Возможно, это объясняется резким торможением релятивистских (двигающихся со скоростью, близкой к скорости света) электронов в их магнитных полях.

Квазары. Очень мощными источниками радиоизлучения являются квазары, которые находятся вне пределов нашей Галактики. Первый квазар был обнаружен в 1963 г. в созвездии Дева. Это был расположенный ближе всех к Земле (~ 630 млн Мпк) подобный объект, похожий на звезду 13-й звёздной величины. Его обозначили как 3С273 (номер в Третьем Кембриджском каталоге). Мощность его излучения во всех диапазонах – 10^{46} – 10^{47} эрг/с.

В течение длительного времени не удавалось проанализировать их спектры. И только по красному смещению удалось определить, что в спектре квазаров наблюдаются линии водорода. По закону Хаббла удалось определить расстояние до них. Оказалось, что они удалены от нашей Галактики на

расстояние в миллиарды световых лет. В настоящее время исследовано несколько сотен квазаров, расстояние до большинства из них более 10 миллиардов световых лет.

Вызывающая изумление мощность излучения квазаров – их светимость – соответствует 10^{39} – 10^{40} Вт. Эта светимость превосходит в сотни миллиардов раз светимость звёздных систем – галактик. Поэтому квазары считаются самыми загадочными космическими объектами. Распределением энергии в спектре, а иногда изменением оптического и радиодиапазона квазары напоминают активное ядро галактик. По интенсивности и широте (скорость до 3000 км/с) эмиссионных линий в спектрах квазаров они похожи и на ядро галактики Сейферта. По предположениям учёных, 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.

Вопросы и задания

1. Какая внешняя галактика была открыта первой?
2. Как определяется расстояние до внешних галактик?
3. Какие классы внешних галактик вы знаете?
4. Связаны ли спектры галактик с их классами?
5. Какие галактики называются радиогалактиками?
6. В каких диапазонах излучают большую мощность квазары?

ТЕМА 28. § 61. Расширение Вселенной. Закон Хаббла *

Рассматривая небо с Земли, наблюдая красное смещение галактик с разных сторон, не стоит торопиться с выводом о том, что наша Галактика расположена в центре космоса. Гипотетический наблюдатель, находясь на определённой внешней галактике и рассматривая небо, тоже наблюдал бы красное смещение внешних галактик.

Если предположить, что в древности картина расширения галактик была такой же, можно вычислить, когда начался этот процесс. Ученые считают, что расширение Вселенной началось 15–20 миллиардов лет назад. Инте-

ресно, что еще в 1922–1924 году известный русский учёный А.А.Фридман, основываясь на общей теории относительности Эйнштейна обнаружил, что модель космоса не стационарна, то есть не постоянна, а может расширяться и сжиматься. Через некоторое время учёные нашли этому доказательства. Правильно интерпретируя этот процесс, можно понять его важность. Свободный от различных теологических и идеалистических взглядов научно-материалистический подход к исследованиям природы расширения космоса показал, что расширение может быть следствием «большого взрыва».

Возникает вопрос: можно ли сегодня экспериментально подтвердить гипотезу «большого взрыва»? В 1965 году в этой сфере было сделано большое открытие. Известно, что космическое пространство в древности, когда ещё не было ни звёзд, ни галактик, ни туманностей, было богато электромагнитными волнами, которые считаются «послами» периода развития. Эти волны называются *реликтовым (остаточным) излучением*. Не секрет, что в вышеупомянутом расширении участвуют не только галактические системы, *но и реликтовое излучение*. Американские астрономы, которые начали изучать след реликтового излучения, достаточно быстро его обнаружили.

Интересно, что до этого учёными-астрофизиками уже было теоретически доказано существование таких волн. Предположение о существовании таких волн и затем нахождение их в космическом пространстве – доказательство знаний о мире и его законах. Материя, наблюдаемая в процессе расширения Метагалактик (видимой части Вселенной), все виды изменения качества – всё происходит в рамках закона сохранения, и для объяснения процессов нет необходимости ссылаться на чудесные силы. Открытие эволюции метagalактики считается великим достижением человеческой мысли. Это достижение, демонстрируя способность человеческого разума проникать в близкие недра и в далёкую древность Вселенной, развенчивает миф об ограниченности познания человеком окружающего мира. Современные представления о Вселенной основываются не только на естественных науках, но и на логических и философских наблюдениях за его эволюцией.

Линейная связь найденного эмпирическим путем логарифма красного смещения и видимых звёздных величин галактик – m и $\lg v_r$ отношение $\lg v_r = \lg \left(c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)$, по $v_r = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = Hr$ видна связь между галактическим рассто-

янием и удалением, где v_r – лучевая скорость, c – скорость света, $\Delta\lambda$ – красное смещение, H – постоянная Хаббла, r – расстояние до внешней галактики.

Вопросы и задания

1. Какая часть Вселенной называется Метагалактикой?
2. Какой процесс во Вселенной называется красным смещением?
3. В чём заключалась идея А. Фридмана и А. Эйнштейна о модели Вселенной?
4. Что вы понимаете под выражением «реликтовое излучение»? Для какой модели Вселенной оно стала основой?
5. Связь между какими параметрами, касающимися расширения Вселенной отражена в законах Хаббла?

ТЕМА 29. § 62. Распределение галактик в пространстве **

Изучение распределения галактик в пространстве подобно изучению распределения звёзд в галактике. Обозначим через N_m количество галактик на определённом участке небесной сферы (размером около 1 квадратного



Рис. 112. Внешние галактики, наблюдаемые на относительно небольшой площади небесной сферы (несколько кв. градусов).

градуса) и видимой звёздной величиной не больше m . В 1934 году Э. Хаббл, анализируя фотографии 1283-го участка неба, сделанные с помощью рефлектора с диаметром зеркала 2,5 м, насчитал на площади в один квадратный градус 131 галактику со звёздной величиной, не больше 20 звёздных величин. Вся небесная сфера, площадь которой составляет 41253 квадратных градусов, будет, в таком случае, содержать $5,4 \cdot 10^6$ галактик. В самый мощный телескоп можно наблюдать объекты до 24-й звёздной величины, что соответствует количеству галактик в 1,4 миллиарда (*рис. 112*).

Наша Галактика, Туманность Андромеды (М-31), галактика созвездия Треугольник (М-33), Большое и Малое Магеллановы облака и еще несколько (всего примерно около 35) образуют *местную группу галактик*.

Известно примерно 4000 местных групп такого вида. Их средние размеры около 8 Мпк. Одно из крупных галактических скоплений проецируется на созвездие Волосы Вероники. В этом скоплении около 40 000 близких галактик, находится оно от нас на расстоянии 70 Мпс, угловой диаметр 12° . Ближайшая к нашей местной системе группа галактик находится в созвездии Девы на расстоянии 12 Мпк. В ней 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 (в том числе и нашу местную группу галактик). Диаметр таких сверхгалактик достигает 40 Мпк. На сегодняшний день в результате наблюдений с помощью сверхмощных телескопов удалось обнаружить до 50 подобных сверхгалактик. Видимая часть Вселенной, состоящая из сверхгалактик, называется *метагалактикой*.

Вопросы и задания

1. Что вы знаете о нашей Галактике?
2. Какие ещё галактики входят в состав нашей местной Галактики?
3. Какой системой галактик считаются сверхгалактики?
4. Какая часть Вселенной называется метагалактикой?

ЧАСТЬ II

ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОНАВТИКИ **

ТЕМА 30.

§ 63. Предмет космонавтики и её связь с другими науками

Слово «космонавтика» образовано от двух греческих слов — «*космос*» (строй, порядок, мир, Вселенная) и «*наутике*» (мореплавание, искусство кораблевождения). Космонавтика направлена на изучение космического пространства и объектов вне Земли с помощью ракет и космических аппаратов (КА). В основе космонавтики лежит наука, объединяющая научно-технические исследования и использование космического пространства с помощью космических полетов и ракетной техники. Космические аппараты – это не только средство передвижения, но и новейшее оборудование для исследования космоса.

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 использовали достижения технических наук. Математические расчеты того, как достичь космическим аппаратам определенного небесного объекта, или их движения по определенной траектории осуществляются научно-техническими работниками 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 полётов космических аппаратов в околоземном и межпланетном пространстве.

Не выяснив предварительно плотность земной атмосферы, температуры, магнитосферы и радиационных поясов, ни один спутник не выводит в околоземное пространство. Без знаний о физической природе Луны нельзя было бы отправить на нее космические аппараты.

Космонавтика вносит большой вклад в развитии астрономии. Космические аппараты и станции позволили исследовать небесные тела и их системы в оптических и невидимых взгляду лучах (ультрафиолетовых, инф-

ра красных, рентгеновских и радиолучах), и за последние десятилетия значительно обогатили наши знания относительно их природы.

При разработке конструкций космических аппаратов, при их управлении учёные и инженеры-техники *опираются на законы физики*. Для выполнения задач при создании мощных двигателей ракет, ракетной техники выполняются фундаментальные исследования.

Космонавтика тесно связана и с *химией*. В частности, высокие требования предъявляются к устойчивости материалов, используемых в космической технике, структуре ракеты, к составу горючих средств. Необходимы устойчивые к высокой температуре, особо прочные материалы. В технологии получения топлива для ракет огромную роль играют результаты химических исследований.

Исследования в космонавтике нельзя проводить без знания *математики*. При создании конструкций КА 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 расчётов.

В последние годы ученые запланировали и осуществили несколько *биологических* экспериментов в космонавтике. Было проведено множество экспериментов в различных космических условиях (невесомости, вакууме, повышенной радиации и др.) и определено их влияние на человеческий организм.

Отцом космонавтики, основателем её как науки признан К.Э.Циолковский. Он первым вычислил формулу скорости движения ракеты. Рассчитав движение ракеты, он определил возможность достижения ракетой космической скорости, вычислил, что с этой скоростью ракета сможет преодолеть притяжение Земли и выйти на орбиту искусственного спутника, даже достичь Луны и совершать межпланетные полёты.

В 20–30 годах XX века группа учёных начала проектирование и испытание ракетного двигателя. В 1921 году в бывшем СССР по предложению Н.И. Тихомирова начала работу лаборатория по разработке ракет на бездымном порохе. В последующие годы эта лаборатория была расширена, и с 1928 года стала называться Газодинамической лабораторией (ГДЛ). Здесь одни-

ми из первых исследователей были Б.С. Петропавловский, Г.Э. Лангемак, В.Г. Глушко и др.

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

Первую ракету на жидком топливе «ГИРД-09» запустили 17 августа 1933 года в подмосковной деревне Нахабино. В 1957 году завершились сложные работы по строительству пилотируемой ракеты. Эту работу выполнили главный конструктор С.П. Королёв и основатель современной теории космонавтики М.В. Келдыш.

В результате этих работ 4 октября 1957 года с космодрома Байконур был запущен первый искусственный спутник Земли.

С 1959 года Луна – естественный спутник Земли – стала целью космических аппаратов. В 1969 году американские космонавты совершили посадку на Луну на КА «Аполлон 11», исполнив многовековую мечту человечества. С 1960-х годов межпланетные автоматические станции (МАС) бывшего СССР стали активно изучать планеты земного типа (сначала Венеру, Марс, затем и Меркурий). В 1972–73 годах по программе «Большой тур» в США началось изучение планет-гигантов с помощью МАС. Запущенный в 1977 году МАС «Вояджер-2» достиг Нептуна в 1989 году.

Космонавтика на службе человечества. Деятельность человечества по освоению космоса создаёт много возможностей для изучения геологических богатств, природы и климата нашей планеты Земля. Человечество, увидев Землю из космоса, осознало, насколько наша планета мала, уникальна и красива. Вместе с тем стало видно, какую угрозу для человечества представляют экологические, энергетические и демографические проблемы.

В частности, проекты космических сооружений с целью использования энергии Солнца для предотвращения энергетической катастрофы на Земле, «освоение» зоны вокруг Земли для предотвращения демографической катастрофы – задачи космонавтики.

Помимо этого, наблюдение из космоса за состоянием биологической сферы Земли, за природными ресурсами, территориями лесов и сельских хозяйств и определение участков для геолого-разведочных работ также считаются важнейшими задачами космонавтики. В настоящий момент космонавтика планирует вынести за пределы планеты увеличивающееся количество перерабатываемых вредных и радиоактивных отходов. Также в ближайшие десятилетия планируется строительство в космосе крупных энергетических сооружений, размещение комплексов для производства сырьевых ресурсов.

Превращение ближайшего космоса в территорию, служащую человечеству, экологизация космоса для спасения человечества от возможного глобального экологического кризиса – одна из важнейших задач космонавтики.

Помимо этого, в настоящее время на орбитальных станциях, в условиях вакуума, проводится множество опытов по выращиванию редких кристаллов, получению сплавов чистых металлов, новых сплавов высокого качества и чистых лекарственных препаратов.

В космонавтике планируются крупные проекты по использованию ресурсов Луны и некоторых астероидов. Учёные всего мира обсуждают проекты лунных станций, где смогли бы жить и работать люди.

Готовятся проекты создания крупных энергетических сооружений в околоземном пространстве, например, «фабрики Солнца» преследующие важную гуманитарную цель – спасение человечества от энергетической катастрофы.

Вопросы и задания

1. Что изучает космонавтика?
2. Что вы знаете о связи космонавтики с другими науками – физикой, техникой, астрономией?
3. Расскажите об ученых, внесших свой вклад в развитие космонавтики, и их деятельности.
4. Расскажите о деятельности организаторов ГДЛ и ГИРД.
5. Когда на орбиту был запущен первый искусственный спутник?
6. Какое место в развитии нашей цивилизации занимает космонавтика?

Законы ракетного движения составляют основу теории космического полёта. Космонавтика работает с различными ракетными двигательными системами, основанными на использовании различных видов энергии. Во всех случаях ракетный двигатель выбрасывает определённую массу (называемую «рабочим телом») из ракеты наружу. На выбрасываемую массу со стороны ракеты действует определённая сила (рис. 113). Согласно основному закону механики о равенстве действия и противодействия, такая же сила действует со стороны массы на ракету. Эта сила, приводящая ракету в движение, называется *силой тяги*.

Сила тяги пропорциональна количеству выбрасываемого «рабочего тела» в единицу времени и скорости выбрасываемой массы:

$$F = q \omega, \quad (1)$$

где q – количество массы, расходуемая в единицу времени (кг/с) (секундный расход массы), ω – скорость отбрасываемой массы по отношению к ракете (в м/с), F – сила тяги (выражается в Ньютонах).

а)



б)

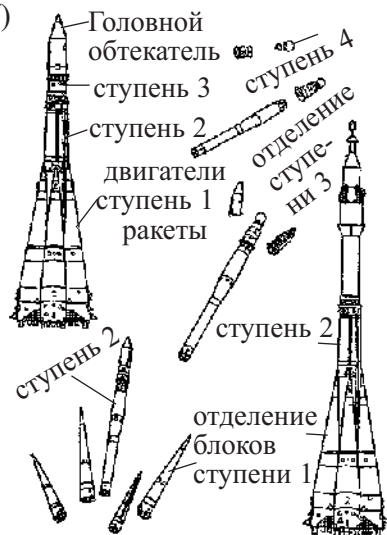


Рис. 113. а) внешний вид космического корабля, б) космический корабль в полёте.

Преобразуем формулу (1), разделив и умножив её правую часть на ускорение свободного падения на поверхности Земли $g=9,8 \text{ м/с}^2$:

$$F = \omega q = \frac{\omega}{g} \cdot gq \quad \text{или} \quad F = I_{\text{уд}} gq, \quad (2)$$

где выражение $I_{\text{уд}} = \frac{\omega}{g}$ называется удельным импульсом, его величины измеряются в $\frac{\text{м/с}}{\text{м/с}^2}$, т.е. в секундах (с), gq – *весовой секундный расход*, измеряемый в $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, сила F определяется в кг/с. Удельный импульс – это количество килограммов (кг/с) тяги, возникающей при расходе одного килограмма (кг/с) веса рабочего тела в секунду. Удельный импульс измеряют в $\frac{\text{кг}}{\text{кг/с}}$, т.е., в секундах. Говоря иначе, $I_{\text{уд}}$ удельный импульс, несмотря на измерение в других величинах, будет пропорционален скорости рабочего тела ω , поскольку скорость ω отличается от $I_{\text{уд}}$ неизменным коэффициентом $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – $\omega = g \cdot I_{\text{уд}}$.

Остановимся на отдельных технических величинах ракет.

Известно, что на ракету, помимо силы тяги, действуют еще и другие силы – силы притяжения Земли и других небесных тел, сопротивление атмосферы, световое давление и т.д. Но нас сейчас интересует ускорение от силы тяги – a_p или реактивное ускорение. Согласно второму закону механики,

$$a_p = \frac{F}{m}, \quad (3)$$

где F – величина силы тяги, m – масса ракеты или космического аппарата в некоторый момент времени, которая по мере расхода рабочего тела, уменьшается, a_{p0} *реактивное ускорение*. Поэтому, основной характеристикой ракеты является начальное реактивное ускорение, сообщаемое силой тяги (m_0) в момент начала движения:

$$a_{p0} = \frac{F}{m_0}, \quad (4)$$

где m_0 – начальная масса ракеты. Начальное реактивное ускорение ракеты – это то ускорение, которое возникло бы, если бы на ракету не действовали бы

никакие силы, кроме силы тяги, если бы она, по выражению К.Э. Циолковского, была бы в «свободном» пространстве.

Если мы запустим двигатель ракеты, помещённой в свободное пространство, двигатель создаст тягу, ракета получит определённое ускорение и начнёт двигаться по прямой линии.

Скорость ракеты к моменту, когда её начальная масса m_0 уменьшится до массы m_k можно определить по формуле Циолковского:

$$v = \omega \ln \frac{m_0}{m_k} = 2,30259 \omega \lg \frac{m_0}{m_k}, \quad (5)$$

где ω – скорость истечения топливных средств, и она считается неизменной. Скорость, найденная по формуле Циолковского, характеризует энергетические ресурсы ракеты и называется *идеальной характеризующей скоростью*. Поэтому можно (5) записать так:

$$\frac{m_0}{m_k} = e^{\frac{v}{\omega}}, \quad (6)$$

Здесь $e=2,71828$ составляет основание натуральных логарифмов. Идеальная скоростью v связана с ω – скоростью истечения топливных средств и $z = \frac{m_0}{m_k}$, называемым *числом Циолковского*.

Вопросы и задания

1. С чем связана сила тяги ракеты?
2. Что такое удельный импульс?
3. Какой величиной, характеризующей силу тяги ракеты, считается удельный импульс?
4. Какие характеристики движения ракеты можно определить с помощью формулы Циолковского?
5. Какая скорость ракеты называется идеальной?
6. Что называется числом Циолковского?

Судя по формуле Циолковского, основной характеризующей величиной ракеты является соотношение её начальной и конечной массы. До достижения ракетой необходимой скорости всю начальную массу ракеты можно разделить на 2 части: 1) масса рабочего тела, 2) конечная масса $m_{\text{кон}}$ (рис.

114). Указанное в предыдущем параграфе число Циолковского $\frac{m_0}{m_k}$ вместе с числом скорости истечения ракетного топлива из сопел ω , помогает определить v , скорость, достижимую ракетой.

«Сухая» масса ракеты состоит из массы конструкции $m_{\text{кон}}$ и полезной массы $m_{\text{п}}$. В массу конструкции, помимо массы самой конструкции, входит масса всех её агрегатов, двигательных систем, систем управления и систем связи и навигации. В полезную массу входит масса научной аппаратуры, радиотелеметрических систем, частей, выносящих аппарат на орбиту и систем жизнеобеспечения экипажа. Отношение суммарной массы конструкции и рабочего тела к массе конструкции называется *конструктивной характеристикой* и обозначается s :

$$s = \frac{m_0 - m_{\text{п}}}{m_{\text{к}} - m_{\text{п}}}.$$

Для любой ракеты $z < s$, и даже если суметь разместить максимум рабочего тела в минимальной по массе конструкции ракете, то остается один путь увеличения скорости ракеты – увеличение числа z посредством уменьшения полезной нагрузки $m_{\text{п}}$. При полном отказе от полезной нагрузки, когда $m_{\text{п}} = 0$, тогда $s = z$. Безусловно, при проектировании конструкции ракеты учитывается масса полезной нагрузки.



Рис. 114. Структурная схема ракеты.

Величина $p = \frac{m_0}{m_n}$ называется *относительной начальной массой*. Обратной ей величина $\frac{1}{p}$ называется *относительной полезной нагрузкой* или *коэффициентом* полезной нагрузки. Подставляя значение (1), получаем соотношение между s , z и p , затем значение z и p .

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

1. Одной из самых важных природных сил, действующих на КА во время его полета, является *сила всемирного тяготения*. Сила притяжения между материальными телами подчиняется закону всемирного тяготения, открытому еще Ньютоном. Как известно, его математическое выражение:

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

где F – сила притяжения между материальными телами, m_1 и m_2 – их масса, r – расстояние между телами, коэффициент пропорциональности. G берётся как гравитационная постоянная и при обозначении массы в килограммах (кг), расстояния в метрах (м), силы в Ньютонах (Н), её значение выражается как $6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.

2. Другой силой, действующей на КА во время его полёта, является *сила сопротивления атмосферы*. Чем ниже (относительно поверхности Земли) происходит полёт, тем больше сила сопротивления атмосферы, т.к. с уменьшением высоты увеличивается плотность атмосферы. Такая сила называется *аэродинамической*.

3. На движущийся в межпланетном пространстве КА действует еще одна заметная сила – *сила давления солнечного излучения*. Если при небольшой массе КА у него в ощутимой степени большая поверхность, то при длительных полетах давление солнечного излучения будет довольно большим, и его обязательно следует учитывать.

4. Другие силы, оказывающие слабое влияние на КА в космическом пространстве, называются *электрическими* и *магнитными*, они не оказывают влияние на движение КА по прямой линии, оказывая влияние только на вращательные движения КА вокруг собственного центра тяжести.

Невесомость. Нетрудно понять, что все точки тела, свободно движущегося в космическом пространстве по определенной круговой орбите, передвигаются с одинаковой скоростью. Космический аппарат состоит из различных отдельных частей, и если считать, что на КА оказывает влияние только сила притяжения центрального космического тела, то скорость всех его частей (деталей) останется одинаковой, а в случае изменения изменится у всех частей одинаково, потому что гравитационное ускорение не зависит от массы движущегося тела:

$$a_r = \frac{GM_{\oplus}}{r^2},$$

где $M_{\oplus}$ – масса тела, притягивающего детали КА (не деталей!), r – отдаленность КА от центрального тела (можно считать, что она одинакова для всех деталей КА). Исходя из этого, идентичными являются и траектории деталей КА, этим обеспечивается нерасхождение деталей в космосе. Следовательно, между отдельными деталями КА не возникает давление, то есть исчезает их вес относительно друг друга. Космонавт не давит на кресло, в котором сидит, подвешенная лампа не натягивает шнур, отпущенный карандаш висит в невесомости, не опускаясь на стол и т.д., потому что у них одинаковые скорость и ускорение. В кабине корабля исчезает смысл названий «пол», «потолок». На движение предметов внутри корабля не может влиять сила притяжения Земли.

Возникновение других внешних сил (сила сопротивления внешней среды, сила реакции опоры и другие) приводит к исчезновению невесомости и возникновению веса.

Вопросы и задания

1. Из каких частей состоит ракета?
2. Что вы знаете о конструктивных характеристиках ракеты?
3. Какие касающиеся ракеты массы характеризуют m_n , m_0 , m_k ?
4. Какие силы воздействуют на КА во время полёта?
5. При каких условиях при свободном полёте в КА возникает невесомость?

Рассмотрим траекторию искусственного спутника Земли (ИС), движущегося в поле Земли (считая его полем притяжения). В данном случае ускорение, сообщаемое Солнцем ИС, приблизительно равно ускорению, сообщаемому Солнцем Земле (ввиду того, что они находятся на примерно одинаковом расстоянии от Солнца). Поэтому можно считать, что ИС движется только под воздействием Земли. В этом случае возмущающее ускорение, сообщаемое спутнику Солнцем, не берется во внимание, так как оно равно разнице между ускорением, сообщаемым Солнцем Земле и ускорением, сообщаемым Солнцем спутнику, и очень невелико по сравнению с ускорением, сообщаемым ИС Землей.

Именно поэтому при приближительных расчетах принято считать, что КА движется только под воздействием Земли, т.е. движение изучается в пределах двух тел. Это сильно упрощает расчет орбиты ИС. Рассмотрим небесное тело как однородный материальный шар или же как состоящее из однородных, одинаковых по толщине, вложенных друг в друга сферических слоев. В этом случае полная масса тела, словно сконцентрировавшись в его центре (в виде точки), имеет силу тяготения. Подобное поле тяготения называется *Центральным полем тяготения* (ЦПТ).

В «Задаче о двух телах» (§ 27) мы говорили о ЦПТ и остановились на свойствах данного поля, отличающих его от обычного поля тяготения. Напомним, что в случае, когда движущееся в свободном поле тяготения тело с радиусом R , находится на достаточно большом расстоянии r от тела M , создающего поле тяготения (т.е. $r \gg R$), любое поле тяготения будет действовать на тело как ЦПТ. Исходя из закона сохранения энергии, скорость v_r тела (с массой m), движущегося в поле тяготения на расстоянии r от центрального тела (с массой M), связана с его начальной v_0 скоростью. В небесной механике это выражение называется интегралом энергии:

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

где $K=GM$ гравитационный параметр тела, обозначающего центральное поле, для Земли $K_\oplus = 3,99 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$, для Солнца $K_\odot = 1,33 \cdot 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$, для Луны $4,9 \cdot 10^3 \text{ км}^3/\text{с}^2$.

Он уместен и тогда, когда для ЦПТ $r \approx R$. Далее мы ознакомимся с траекториями движения тела, двигающегося в ЦПТ.

Траектории движения КА на центральном поле (в нашем случае поле Земли) можно разделить на четыре группы:

1. *Прямолинейные траектории.* Если начальная скорость тела, находящегося на определенной высоте, равна нулю, то под действием притяжения небесного тела, создающего центральное поле, тело начинает прямолинейное движение по направлению к его центру. Если тело запущено с большой начальной скоростью и его начальная скорость направлена точно к центру или в прямо противоположном направлении (радиальная скорость), то движение тела также будет прямолинейным. Во всех остальных случаях прямолинейное движение невозможно.

2. Движение по эллиптической траектории. Если начальная скорость КА не является радиальной и он запущен из точки Р по горизонтальной линии, траектория его движения искривится под действием притяжения центрального тела. Путь его всегда будет лежать на плоскости, проходящей через вектор начальной скорости и центр Земли. Если начальная скорость КА для Земли больше первой космической скорости, но меньше второй, его траектория называется эллиптической (рис. 116). Если при этом эллиптическая орбита не пересекает поверхности притягивающего небесного тела, КА превращается в искусственный спутник этого тела, а центр небесного тела – в один из фокусов эллипса.

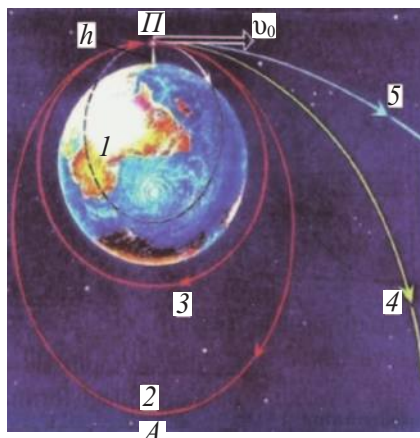


Рис. 115. Движение тела по эллиптической траектории в центральном поле тяготения.

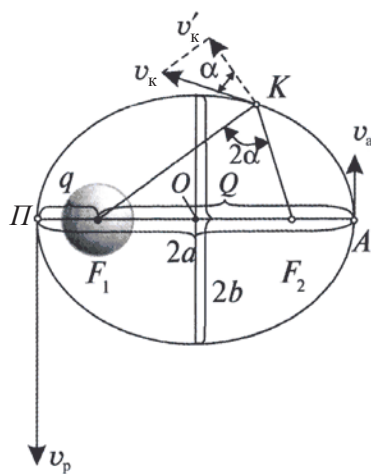


Рис. 116. Траектория тела в центральном поле тяготения (в качестве примера приведены траектории КА в поле тяготения Земли).

Фокусами эллипса называются такие точки, сумма расстояний от которых до любой точки эллипса есть постоянная величина. Ось, проходящая по обоим фокусам эллипса, называется его *большой осью*. Половина *большой оси* называется *большой полуосью*, она обозначается буквой a и характеризует среднюю отдаленность спутника от небесного тела. Здесь скорость v спутника, находящегося на точке K эллипса, связана с его отдаленностью r_k от центра тяготения и большой полуосью эллипса и выражается следующей формулой, являющейся новой интерпретацией интеграла энергии:

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

В этой формуле K характеризует гравитационный параметр Земли. По закону Кеплера период T обращения движущегося по эллиптической траектории в ЦПТ тела связан с большой полуосью эллипса:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \text{ или } T = \frac{2\pi}{\sqrt{K}} a^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

Ближайшая и наиболее удаленная от центрального тела точки эллипса (рис. 115, точки P и A) называются соответственно *перигентром* и *апоцентром*. Если притягивающим телом является Земля, то эти точки называются *перигеем* и *апогеем*, если Солнце – *перигелием* и *афелием*. Скорость (v_p) КА на перигее является максимальной, скорость (v_a) на апогее – минимальной. Из закона сохранения момента количества движения следует, что эти скорости связаны друг с другом следующим образом:

$$m_0 \cdot v_p \cdot r_p = m_0 \cdot v_a \cdot r_a \text{ или } v_p \cdot r_p = v_a \cdot r_a, \quad (4)$$

где r_p и r_a – отдаленность точек перигея и апогея от центра Земли.

Если с поверхности центрального тела (например Земли) из точки P на высоте h (рис. 115) будет запущен КА с начальной горизонтальной скоростью, точка P в зависимости от величины начальной скорости становится перигеем или апогеем орбиты (рис. 115, орбиты 1 и 2). При определенной скорости он движется по кругу (рис. 115, орбита 3), если радиус круговой орбиты r , то

$$v_{кр}^2 = \frac{K_{\oplus}}{r} \text{ или } v_{кр} = \sqrt{\frac{K_{\oplus}}{r}} \quad (5)$$

зная, что $K_{\oplus}$ – гравитационный параметр Земли, легко найти скорость, обеспечивающую круговую орбиту, находящуюся на расстоянии r от Земли. Если здесь $R_{\oplus}$ – равно радиусу Земли, данное выражение в отношении Земли:

$$v_I = \sqrt{\frac{K_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \quad (6)$$

обозначает *первую космическую скорость* и равно 7,91 км/с.

3. *Движение по параболической траектории.* Эллиптическая орбита, апогей которой «лежит» в бесконечности не может быть эллипсом (рис. 115, орбита 4). Тогда КА бесконечно удаляется от притягивающего центра, и движется по кривой линии, стремящейся к бесконечности – параболе. По мере удаления от центра притяжения его скорость уменьшается. Исходя из формулы вычисления скорости движения по эллиптической траектории (1), учитывая, что в бесконечности $\alpha \rightarrow \infty$, находим величину начальной скорости v_0 , обеспечивающей параболическую орбиту на первоначальном r_0 расстоянии, где:

$$v_0^2 = \frac{2K}{r_0} \quad \text{или} \quad v_0 = \sqrt{\frac{2K}{r_0}} \quad (7)$$

Вычисленная таким образом скорость называется *параболической* или *освобожденной*, потому что, достигнув такой скорости, КА, двигаясь по параболе, не вернется к центру притяжения, иначе говоря, освободится.

Если $r = R_{\oplus}$ – радиусу Земли, то получается

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2K_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \quad (8)$$

Эта скорость называется *второй космической скоростью*. Относительно Земли её величина равна 11,186 км/с.

Сравнивая первую и вторую космические скорости, мы находим, что

$$v_{II} = v_{осв} = v_I \cdot \sqrt{2} \quad \text{или} \quad v_{осв} = 1,414 v_I.$$

Если, воспользовавшись данными уравнениями, написать интеграл энергии, скорость в поле притяжения на расстоянии r от центрального тела получается:

$$v_r^2 = v_0^2 - v_{осв}^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \quad (9)$$

Если $r \rightarrow \infty$, то получается $v_r^2 = v_0^2 - v_{осв}^2$. Из этого следует, что в бесконечности $v=0$, потому что $v_0 = v_{осн}$, для выхода на параболическую орбиту должно быть $v_0 = v_{II}$.

4. *Гиперболические траектории.* Если КА достигнет скорости, превышающей параболическую скорость, он и в этом случае будет двигаться по кривой линии, стремящейся к бесконечности и «достигнет бесконечности», однако его траектория будет представлять гиперболу (рис. 115, орбита 5). В этом случае скорость КА в бесконечности не будет равна нулю. Хотя по мере удаления от центра притяжения его скорость будет непрерывно падать, при условии, что $r \rightarrow \infty$, она не сможет стать меньше величины скорости v_∞ , которую можно вычислить по формуле (9):

$$v_\infty^2 = v_0^2 - v_{\text{осв}}^2 \quad (10)$$

Скорость v_∞ называют остаточной скоростью (или гиперболическим избытком скорости). Вдали от центра притяжения гиперболическая траектория почти не отличается от прямых линий, называемых *асимптотами гиперболы*. Именно поэтому при больших расстояниях гиперболическую траекторию можно считать прямолинейной. Представленные выше два уравнения уместны как для параболических, так и для гиперболических траекторий. Движение КА в поле притяжения называют *кеплеровским движением* в честь немецкого ученого И. Кеплера, первым открывшего эллиптическую форму движения планет и закономерности их движения.

Вопросы и задания

1. Связана ли траектория движения тела в центральном поле тяготения с его начальной скоростью?
2. Какие зависимости физических величин выражает формула интеграла энергии?
3. Как определяется период тела, которое движется по эллиптической траектории?
4. Какие скорости называются первой и второй космическими скоростями?
5. Какова разница между скоростью в бесконечности КА, двигающихся по параболической и гиперболической траекториям?

ТЕМА 34.

§ 68. Сфера действия и приближенный расчёт траекторий КА

Для реальных космических тел кеплеровские орбиты КА в точности никогда не осуществимы. Дело в том, что центральное небесное тело не имеет точной сферической симметрии и, следовательно, его поле не является цент-

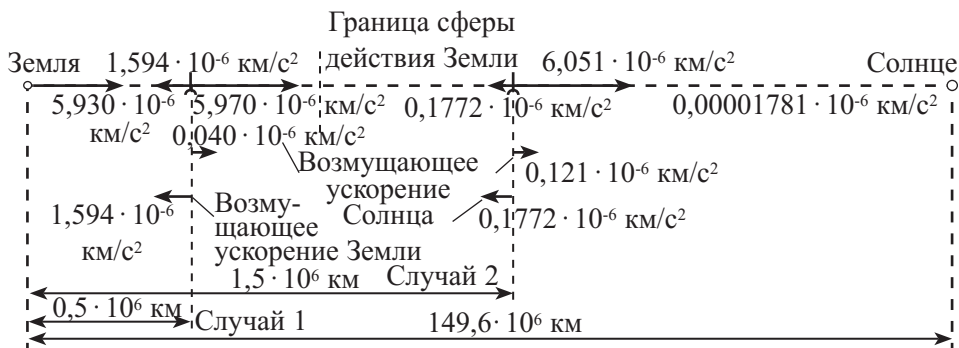


Рис. 117. Оценка сферы действия притяжения Земли относительно Солнца.

ральным. При изучении движения тела следует учитывать влияние внешних космических тел и других факторов. Однако кеплеровское движение настолько простое и так хорошо изучено, что от него нельзя отказываться. Именно поэтому кеплеровская орбита рассматривается как опорная орбита при расчетах траектории тела, при расчетах также берутся во внимание отклонения, происходящие в других положениях. Так уточняется траектория движения тела.

Произведем расчет для двух случаев гравитационного отклонения, которое оказывают на движущийся вокруг Земли КА другие космические тела. Возмущающим внешним космическим телом является Солнце (рис. 117).

Случай 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 движется на расстоянии $500\,000 \text{ км}$ от Земли по прямой линии, соединяющей Землю и Солнце, при этом расстояние от Солнца будет $149\,100\,000 \text{ км}$ (рис. 117). Тогда ускорение, сообщаемое КА Землей, составит $1,594 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2$, а сообщаемое Солнцем – $5,970 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2$.

1. Если нас интересует геоцентрическое движение, то возмущающим ускорением является разница между ускорением, сообщаемых Солнцем КА, $(5,970 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2)$ и ускорением, сообщаемым Земле $(5,930 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2)$, т.е. $(5,970 \cdot 10^{-6} - 5,930 \cdot 10^{-6}) \text{ км/с}^2 = 0,040 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2$, что составляет всего лишь 2,5% ускорения, сообщаемого Землей.

2. Если же нас интересует гелиоцентрическое движение КА на таком же расстоянии, то при этом разница между ускорениями, сообщаемыми Землей космическому аппарату $(1,594 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2)$ и Солнцу $(0,00001781 \cdot 10^{-6} \text{ км/с}^2)$,

является возмущающим ускорением для ускорения, сообщаемого КА Солнцем ($5,97 \cdot 10^{-6}$ км/с) и составляет 26,7% ускорения, сообщаемого КА центральным телом – Солнцем ($1,594 \cdot 10^{-6}$ км/с²). Значит, при *гелиоцентрическом движении* влияние возмущающего ускорения Земли является очень ощутимым. Следовательно, можно сделать вывод, что в первом случае КА движется вокруг Земли в геоцентрическом движении.

Случай 2. Теперь рассмотрим ситуацию, когда КА находится на линии Земля – Солнце, в 1 500 000 км от Земли и 148 100 000 км от Солнца.

1. Сначала выясним, каким будет возмущающее ускорение Солнца, когда КА вращается вокруг Земли по геоцентрической траектории. Как показано на *рис. 117*, в этом случае ускорение, получаемое КА под влиянием Земли, составляет $0,1772 \cdot 10^{-6}$ км/с². Ускорение, получаемое КА под влиянием Солнца, составляет $6,051 \cdot 10^{-6}$ км/с². Исходя из ускорения, получаемого Землей от Солнца ($5,930 \cdot 10^{-6}$ км/с²), выясняем, что возмущающее ускорение Солнца равно $6,051 \cdot 10^{-6} - 5,930 \cdot 10^{-6}$ км/с² = $0,121 \cdot 10^{-6}$ км/с² и составляет 68,3 % от ускорения, сообщаемого КА Землей ($0,1772 \cdot 10^{-6}$ км/с²).

2. Теперь вычислим, какое возмущающее ускорение Земля сообщает КА, когда тот вращается вокруг Солнца по *гелиоцентрической траектории*. Оно равно разнице между ускорением, сообщаемым Землей КА $0,1772 \cdot 10^{-6}$ км/с² и ускорением, сообщаемым Землей Солнцу ($0,00001781 \cdot 10^{-6}$ км/с²), и составляет примерно $0,1772 \cdot 10^{-6}$ км/с². Если сравнить его с ускорением, сообщаемым КА Солнцем ($6,051 \cdot 10^{-6}$ км/с²), возмущающее ускорение, сообщаемое КА Землей, равно $0,1772 \cdot 10^{-6}$ км/с² и составляет всего 3% от ускорения, сообщаемого КА Солнцем ($6,051 \cdot 10^{-6}$ км/с²), являющимся причиной движения КА по гелиоцентрической траектории. Следовательно, правильно будет сказать, что на таком расстоянии КА движется не вокруг Земли по геоцентрической траектории, а вокруг Солнца по гелиоцентрической траектории (в силу незначительности возмущающего ускорения, сообщаемого Землей).

Если произвести расчет подобных траекторий и для всех космических точек, не находящихся на прямой линии Земля – Солнце (здесь берется разница между векторами ускорений, сообщаемых КА Землей и Солнцем), в случае 1 каждая точка будет показывать предпочтительность движения КА вокруг Земли по геоцентрической траектории, в случае 2 предпочтительнее считать, что, находясь в любых других точках космоса, КА движется по гелиоцентрической траектории, т.е. движется вокруг точки, центром которой является Солнце, по кеплеровской траектории. Как показывает математический анализ

данных точек, границы данной области близки к околоземной сфере, в связи с этим в космодинамике сферу действия Земли принято считать точной сферой. Радиус сферы действия Земли по отношению к Солнцу – 925 000 км, радиус сферы действия Луны по отношению к Земле – 66 000 км, радиус сферы действия Солнца в отношении центра галактики равен 9×10^{12} км ≈ 1 с.г.

Если тела находятся друг от друга на расстоянии a , радиус сферы действия тела, имеющего массу m , на находящегося недалеко от тела, имеющего массу M ($m \ll M$), определяется по формуле: $\rho = a \left(\frac{m}{M} \right)^{\frac{2}{5}}$.

Когда КА пересекает границу сферы действия тела, он переходит из одного центрального гравитационного поля в другое. Движения космического аппарата в отдельно взятом гравитационном поле составляют в отношении данных полей отдельные кеплеровские орбиты (одно из конических сечений). Траектория движения космического аппарата на границе сферы действия «склеивается» по определенным правилам. В этом заключается приближенный метод расчета траекторий КА, который иногда называют методом сопряженных конических сечений.

ТЕМА 35.

§ 69. Орбитальные элементы искусственных спутников Земли

Движения искусственного спутника Земли (ИС), движущегося в околоземном пространстве, называются околоземными полетами. С точки зрения космической механики околоземное пространство – область, ограниченная сферой действия Земли. Движение тела в этом пространстве можно рассматривать как наблюдающееся только в гравитационном поле Земли. На *рис. 118* изображена орбита ИС Земли, вращающегося в Земном пространстве, точки Π и A данной орбиты соответствуют точкам перигея и апогея ИС.



Рис. 118. Элементы орбиты искусственных спутников.

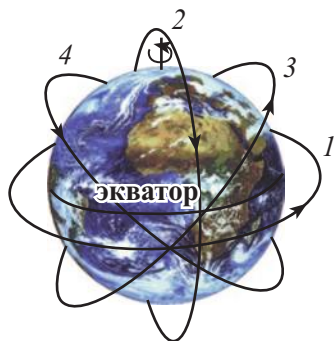


Рис. 119. Экваториальные (1), полярные (2), прямые (3) и обратные (4) спутники.

Как видно из рисунка, плоскость орбиты ИС Земли пересекается с плоскостью экватора Земли по прямой линии, называемой *узловой линией*.

В этом случае восходящий узел является точкой пересечения ИС экватора Земли от южного полушария к северному, а при заходящем узле – наоборот. Из этого следует, что ИС пролетает над теми территориями Земного шара, где плоскость орбиты ИС, его географическая широта, его плоскость не превышают угол i , т.е. наклон орбиты ИС в отношении плоскости Земного экватора. Если высота ИС довольно большая, его можно наблюдать и в районах, где $\varphi > i$.

У ИС есть следующие орбитальные элементы: 1) i – наклон орбиты ИС в отношении плоскости Земного экватора, когда $i = 90^\circ$, спутник называется *полярным* (рис. 119, орбита 2), если же $i = 0^\circ$, спутник называется *экваториальным* (рис. 119, орбита 1). Если направление движения ИС совпадает с направлением вращения Земли, спутник называется *прямым* (рис. 119, орбита 3), в противном случае спутник называется *обратным* (рис. 119, орбита 4, когда $i > 90^\circ$ – спутники движутся в обратном от направления вращения Земли направлении); 2) h_a – высота апогея ИС; 3) h_n – высота его перигея; 4) T – период вращения ИС; 5) a – большая полуось орбиты ИС; 6) e – эксцентриситет орбиты ИС; 7) Ω – угловое расстояние восходящего узла (по экваториальной плоскости) от точки весеннего равноденствия, что характеризует протяжённость Ω . ИС, обращающиеся вокруг планеты со скоростью равной скорости вращения Земли вокруг оси, называются *геостационарными спутниками*.

§ 70. Орбитальная эволюция ИС в атмосфере Земли

Сила сопротивления земной атмосферы, действующая на движение ИС, вычисляется по формуле:

$$F_{\text{соп}} = cS \frac{\rho v_{\text{отн}}^2}{2},$$

где c – безразмерный коэффициент сопротивления, для верхних слоёв атмосферы его значение колеблется от 2,0 до 2,5, S – максимальная поперечная

площадь ИС Земли относительно направления его движения, $v_{\text{отн}}$ – скорость спутника относительно внешней среды.

Возмущающее ускорение, возникающее под воздействием сопротивления атмосферы, обратно пропорционально массе спутника и прямо пропорционально его площади в поперечнике. Следовательно, на полупустой спутник сопротивление атмосферы действует очень сильно. Именно вследствие этого фактора выведенная на нижнюю орбиту, отделённая от спутника и освобождённая от топлива последняя ступень транспортной ракеты «ощущает» сопротивление атмосферы сильнее, нежели контейнер с плотно размещенной аппаратурой, что обеспечивает быстрое её отставание.

Возмущающее ускорение силы сопротивления, влияющее на движение спутника, на высоте 200 км составляет $2,2 \cdot 10^{-4}$ м/с², на высоте 400 км – $3,1 \cdot 10^{-6}$ м/с², на высоте 800 км – всего $2,6 \cdot 10^{-8}$ м/с². При полёте на высоте 100 км такое ускорение ощутимо возрастает и составляет уже 30 м/с².

Из-за быстрого повышения плотности атмосферы на высоте ниже 110 – 120 км ИС не сможет завершить очередной виток. В этом случае его траектория похожа на спираль пружины ручных часов, и при каждом прохождении перигея ИС резко теряет скорость (рис. 120).

Внимательное изучение процесса торможения движения спутника внутри атмосферы позволяет вычислить плотность верхних слоёв атмосферы, что приводит к ценным практическим и теоретическим выводам.

Любые изменения орбиты ИС (ускорение, торможение, повороты), сделанные с определённой целью, называются *орбитальными маневрами*. В космонавтике зачастую приходится менять орбиту спутника с помощью таких многоимпульсных маневров. В следующем параграфе мы ознакомимся с несколькими подобными случаями.

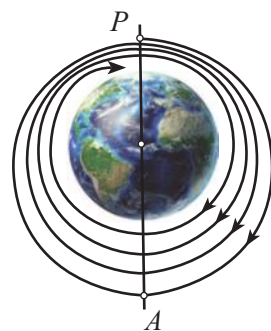


Рис. 120. Падение спутника в атмосфере Земли. Орбиты падения спутника.

Вопросы и задания

1. Какие орбитальные элементы ИС вы знаете?
2. Какие орбиты ИС называются прямыми и обратными, полярными и экваториальными?
3. Как определяется сопротивление атмосферы движению ИС?
4. Какие ИС называются геостационарными?

Метод 1. Изменение плоскости орбиты ИС под определенным углом требует больших затрат энергии. Например, необходимо повернуть орбиту ИС, движущегося со скоростью v по круговой орбите, под углом α , не меняя его скорость. Необходимый для маневра импульс скорости Δv , исходя из равнобедренного треугольника (рис. 121), состоящего из соединения векторов скоростей (где v_0 – начальная скорость маневра, $v_{\text{ит}}$ – итоговая, после поворота орбитальной плоскости под углом α ; Δv – требуемая скорость), вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta v}{2} = v_0 \sin \frac{\alpha}{2}, \quad \Delta v = 2 v_0 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Если в точке M необходимо повернуть орбитальную плоскость под углом 90° , то, учитывая, что $\Delta v_0 = 2v_0 \sin 45^\circ$

$$\Delta v = \sqrt{2 \cdot v_0} \quad (2)$$

Из этого следует, что скорость, необходимая для изменения орбиты спутника на 90° , очень велика – равна второй космической скорости, и такое изменение орбиты сопровождается большими затратами энергии.

Метод 2. Если необходимый поворот плоскости орбиты спутника под большим углом выполнить другим способом, так называемым «переходом через бесконечность», процесс будет идти с большой экономией ракетного топлива. Дело в том, что, если вывести спутник из околоземной круговой

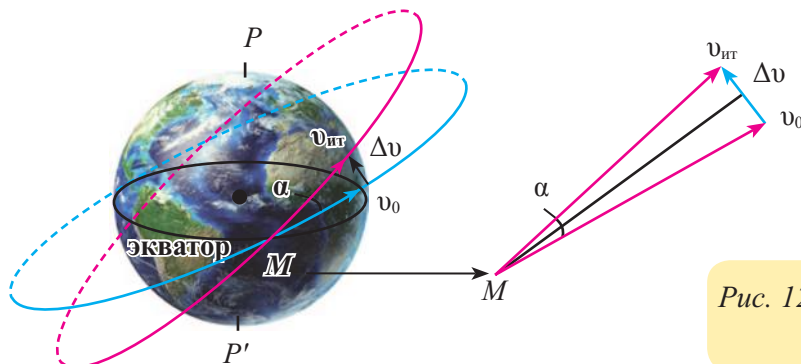


Рис. 121. Изменение орбиты ИС на угол α .

орбиты на траекторию, близкую к параболической орбите, ввиду того, что его скорость в бесконечности близка к нулю, его скорость (Δv), необходимая для поворота его плоскости под углом, необходимым при переходе через бесконечность, исходя из формулы, тоже стремится к нулю. В этом случае полный импульс скоростей $\Delta v'$, необходимый для поворота плоскости орбиты спутника в бесконечности под углом α , будет состоять из совокупности следующих составляющих скоростей:

$$\Delta v' = (\sqrt{2}v_0 - v_0) + \Delta v + (\sqrt{2}v_0 - v_0), \quad (3)$$

где первая скобка – импульс скорости, необходимой для вывода спутника на параболическую орбиту, вторая Δv – импульс скорости, необходимой для поворота скорости в бесконечности под углом α (здесь из-за того, что $v_0 \approx 0$, Δv тоже стремится к нулю) и, наконец, третья скобка характеризует импульс, необходимый для уменьшения параболической скорости спутника до первоначальной скорости v_0 после того, как спутник вернется из бесконечности.

Без сомнения, если учесть, что скорость, необходимая для поворота орбиты спутника под небольшим углом, исходя из (1), равна $2v_0 \sin \frac{\alpha}{2}$, при повороте плоскости орбиты спутника под углом α , можно будет выяснить, до какой величины угла его предпочтительнее поворачивать на месте, нежели поворачивать его «через бесконечность». Для этого, сравнив значения (2) и (3), мы находим величину сопредельного угла α :

$$(\sqrt{2}v_0 - v_0) + \Delta v + (\sqrt{2}v_0 - v_0) = 2v_0 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Из-за того, что Δv в бесконечности стремится к нулю, выходит

$$2v_0(\sqrt{2} - 1) = 2v_0 \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (5)$$

Здесь становится ясно, что $\alpha = 48^\circ 54'$ (6)

Таким образом, выясняется, что в этом случае импульсы скоростей, необходимые для поворота орбиты под углом α , равны для обоих случаев, при повороте орбиты под большим углом экономичнее поворачивать её «через бесконечность», и наоборот, если необходимо повернуть орбиту под углом меньше $48^\circ 54'$, энергетически выгоднее повернуть её на месте (т.е. с помощью формулы (2)).

§ 72. Спуск искусственного спутника с орбиты

Самым простым орбитальным манёвром считается спуск космического аппарата с орбиты на Землю. Тректорию спуска можно *разделить на три участка* (рис. 122, I, II, III).

Первый участок – траектория снижения. Сход спутника с орбиты, выполняется под небольшим углом, от точки схода с орбиты до точки входа в плотные слои атмосферы. Верхней границей атмосферы считается высота примерно в 100 км.

Второй участок. Прохождение через плотные слои атмосферы начинается на высоте 100 км. Здесь спускаемый аппарат испытывает воздействие больших аэродинамических сил, в несколько раз превышающих силу тяжести. На этом участке из-за сильного трения об атмосферу КА сильно нагревается. Это создаёт большую опасность в смысле перегрузок как для экипажа, так и для корпуса КА.

Третий участок. Траектория КА сильно изгибается к центру Земли, и сила сопротивления становится равной проекции силы тяжести на направление движения, обеспечивая равномерный спуск аппарата. Для плавного спуска (с наименьшим импульсом) точка входа КА в плотные слои атмосферы должна находиться на противоположной точке схода с орбиты, и эта дуга снижения охватывает 180° . Обычно траектория несколько иная, под более крутым углом, но угол входа не превышает 5° . При этом оптимальный тормозной импульс с величиной 150–200 м/с должен иметь и трансверсальную, и радиальную составляющую. В момент прохождения через плот-

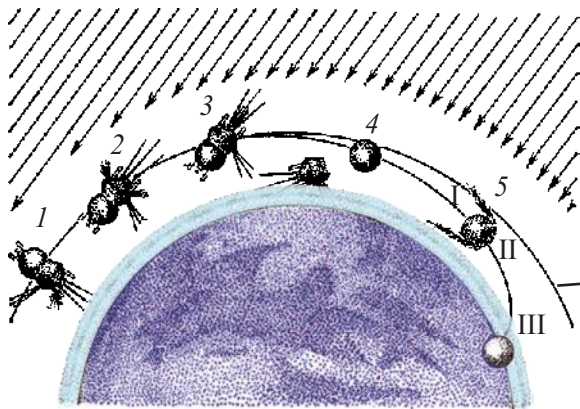


Рис. 122. Процесс спуска ИС с орбиты. 1–3 – тормозной импульс, 4 – сход с окружности, 5 – аэродинамическое торможение и приземление на парашюте.

ные слои атмосферы аэродинамическое торможение уменьшает скорость спускаемого аппарата от первой космической до 150–250 м/с.

Метод, используемый при посадке, учитывает участие подъёмной силы. С её помощью нагрузка уменьшается, и аппарат сохраняет аэродинамические качества. Если при посадке используется только сила сопротивления, а подъёмная сила полностью отсутствует, такой метод называется *баллистическим методом*. При этом вследствие перегрузок обшивка аппарата сильно перегревается, что создает определённую опасность для жизни экипажа.

Аэродинамическим качеством называется отношение величины подъёмной силы к величине силы сопротивления. Обе величины пропорциональны плотности воздуха и квадрату скорости и выражаются формулой:

$$F_{\text{соп}} = c_x \cdot S \frac{\rho v_{\text{под}}^2}{2}, F_{\text{под}} = c_y \cdot S \frac{\rho v_{\text{под}}^2}{2}$$

Здесь – c_x и c_y – коэффициенты сопротивления и подъёмной силы, S – площадь спускаемого аппарата, $v_{\text{отн}}$ – скорость спутника относительно внешней среды. Тогда коэффициент k характеризующий аэродинамическое качество спуска определяется по формуле:

$$k = F_{\text{под}} / F_{\text{соп}} = c_y / c_x.$$

Если $c_y = 0$, то спуск называется *баллистическим*, без аэродинамического качества. При аэродинамическом спуске коэффициент перегрузки уменьшается до 3–4, при баллистическом спуске он составляет 8–10. В частности, спуск автоматических станций «Союз» осуществлялся с помощью раскрывающейся на высоте 9,5 км парашютной системы. На высоте 1 м над Землёй срабатывает ракетный двигатель твердого топлива, и скорость приземления снижается до 3–4 м/с, осуществляется мягкая посадка.

Вопросы и задания

1. Что такое орбитальные манёвры?
2. Как выполняется местное изменение орбиты ИС?
3. В каком случае будет выгодным изменение орбиты ИС через бесконечность?
4. Как выполняется сход ИС с орбиты для спуска с орбиты?
5. Как уменьшается скорость движения ИС на втором участке спуска?
6. Как на третьем этапе спуска осуществляется посадка спутника на Землю?

ТЕМА 37. § 73. Запуск космических аппаратов на Луну

Для того чтобы запустить КА на Луну, предварительно его надо вывести на лежащую в плоскости орбиты Луны (на высоте не менее 200 км) околоземную орбиту (рис. 123). Как упоминалось, в космонавтике среди переходных орбит (в нашем случае – траектория перехода с околоземной орбиты на орбиту Луны) меньшие энергозатраты происходят при полетах по полуэллиптической траектории.

Произведем расчет подобной траектории полета на Луну. Для этого сначала уточним, с какой скоростью должен двигаться КА на переходной околоземной орбите, находящейся на высоте 200 км, причем гравитационный параметр Земли $K = 4 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$, радиус намеченной орбиты $r = R_{\oplus} + 200 \text{ км} = (6370 + 200) \text{ км} = 6570 \text{ км}$. Скорость КА на такой орбите вытекает из следующего выражения:

$$v_1 = \sqrt{\frac{K_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}} = 7,789 \text{ км/с} \approx 7,79 \text{ км/с}.$$

Если вычислить большую полуось, считающуюся переходной траекторией полуэллиптической орбиты, причем орбитальная скорость Луны $v_{\text{л}} = 1,018 \text{ км/с}$, средний радиус r орбиты Луны 384 400 км, то получается:

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

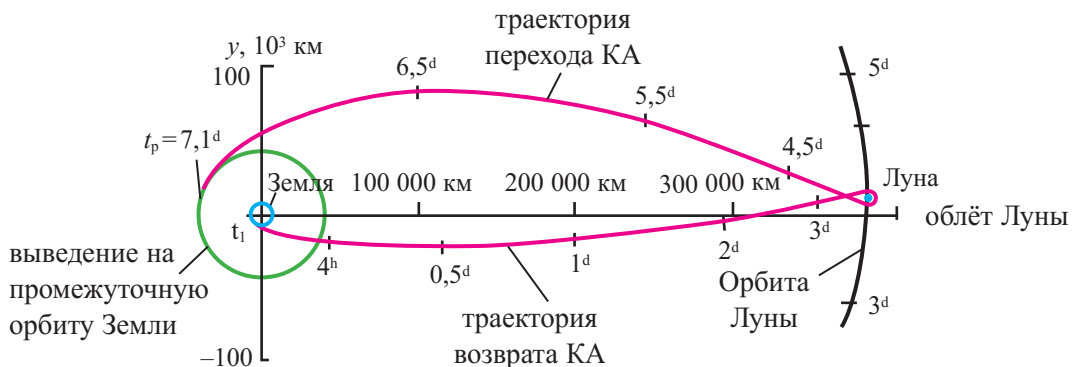


Рис. 123. Траектория полета КА на Луну (и обратно).

Определим, каким должно быть приращение скорости КА на перигее переходной – гомановской траектории с учетом энергии интеграла. Получается:

$$v_{\pi} = \sqrt{K_{\oplus} \left(\frac{2}{R_{\oplus} + h} - \frac{1}{a} \right)}; v_{\pi} = 10,923 \text{ км/с.}$$

Если КА должен перелететь на Луну непосредственно с поверхности Земли по полуэллиптической орбите, начальная скорость ракеты должна быть 11,09 км/с. Следовательно, для перехода КА из околоземной переходной орбиты на гомановскую орбиту, приращение скорости должно быть $\Delta v = (10,9 - 7,789) \text{ км/с} = 3,134 \text{ км/с}$.

Скорость у апогея гомановской траектории вычисляется по следующей формуле:

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

Из этого следует, что в случае, когда КА достигает какой-нибудь точки орбиты Луны одновременно с Луной, скорость КА в отношении Луны (скорость входа в сферу действия Луны) равна

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

Скорость ИС (831 м/с), вошедшего в сферу действия Луны ($r = 66\,000 \text{ км}$), на таком расстоянии от Луны вычисляется по следующей формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2K_{\zeta}}{R_{\zeta} + 66000}}$$

Ввиду того, что параболическая (свободная) скорость ИС относительно Луны больше 383 м/с, внутри сферы действия Луны ИС движется по гиперболической траектории относительно Луны. При приближении к Луне внутри этой сферы под её влиянием скорость увеличивается. Движущийся с такой скоростью ИС в зависимости от направления скорости при входе в сферу может врезаться в Луну (при скорости не меньше 2,5 км/с) или же, обогнув Луну, может выйти из сферы её действия со скоростью, равной скорости входа в неё. Если появится необходимость превращения КА в спутник Луны, при скорости 1,6–1,8 км/с на небольшом расстоянии от Луны ($h \approx 50 \text{ м}$), то, запустив бортовой двигатель, через торможение можно задержать КА на вращательной или эллиптической орбите.

Теперь остановимся на промежутке времени, необходимом для достижения Луны. Этот промежуток равен половине периода полного обращения КА по гомановской (эллиптической) орбите, соприкасающейся с орбитой Луны (рис. 123). Этот период, исходя из закона Кеплера, равен:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K_{\oplus}}} a^{3/2}$$

или же, если исходить из значений $K_{\oplus}$ и π :

$$T = \frac{a\sqrt{a}}{6028,92} \text{ мин} = 9 \text{ сут } 22 \text{ ч } 56 \text{ мин.}$$

В этом случае вследствие того, что время полета t равно половине периода T : $t = \frac{T}{2} = 4 \text{ сут } 23 \text{ ч } 28 \text{ мин.}$

ТЕМА 38.

§ 74. Траектории полетов к планетам.

Движение внутри сферы действия Земли

Вычисление траектории запуска КА к планетам – довольно сложная задача. Но если основываться на том, что они движутся вокруг Солнца в определенной плоскости и по круговым орбитам, решение задачи упрощается. Эллиптические орбиты всех движущихся вокруг Солнца крупных планет очень близки к кругу. Плоскости их орбит находятся под очень маленьким углом по отношению к плоскости орбиты Земли (т.е. плоскости эклиптики), поэтому наше предположение близко к истине, и в расчетах не будет значительных ошибок.

Если указывать среднюю отдаленность планет от Солнца в километрах, а их скорость в км/ч, гравитационный параметр Солнца равен $K_{\odot} = GM_{\odot} = 1,327 \cdot 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$, если же указывать среднюю отдаленность планет от Солнца в астрономических единицах (а.е.), гравитационный параметр Солнца равен $K_{\odot} = 887,153 \text{ (км}^2 \cdot \text{а.е.)}/\text{с}^2$.

Изучение пассивных траекторий полетов к планетам можно подразделить на 3 части: 1) первые сто километров высоты: от точки старта при запуске двигателей до сферы действия Земли; 2) от границы сферы действия Земли до сферы действия планеты-цели; 3) движение на границе сферы действия планеты-цели. Это означает, что в первой части КА движется только под влиянием Земли, во второй – под влиянием силы притяжения Солнца, в

третьей части КА движется только под влиянием планеты-цели (т.е. во всех участках движения КА задача сводится к решению задачи двух тел). Если значения радиус-вектора r планеты и большой полуоси её орбиты ввести в следующую формулу интеграла энергии:

$$V = \sqrt{K_{\odot} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}, \quad (1)$$

окажется, что если КА движется по гелиоцентрической орбите, вычисление его гелиоцентрической энергии в любой точке полуэллиптической переходной траектории производится по нижеследующей формуле. В этом случае в любой точке (с радиус-вектором r) эллипса гелиоцентрическая скорость КА вычисляется по следующей формуле:

$$V = 29,785 \sqrt{\frac{2}{r} - \frac{1}{a}}, \quad (2)$$

здесь r и a выражены в астрономических единицах.

Движение внутри сферы действия Земли. На чертежах *а* и *б* рис. 124 изображены траектория гелиоцентрического движения Земли, а также траектории геоцентрического и гелиоцентрического движения КА. На этом рисунке изображено также геоцентрическое движение КА внутри сферы действия Земли (изображено в виде круга вокруг Земли) рис. 124, схема 1: изображено направление выхода КА из сферы действия Земли, произошедшего после того как КА, двигаясь внутри сферы действия Земли, достиг её границ. Именно за это время Земля выходит из точки E_0 своей орбиты и достигает точки E_1 . Геоцентрическая скорость КА при выходе из сферы действия Земли обозначается как $v_{\text{вых}}$, гелиоцентрическая скорость обозначается как $V_{\text{вых}}$.

Связь этих скоростей с орбитальной (гелиоцентрической) скоростью Земли

$$\vec{V}_{\text{вых}} = \vec{V}_{\oplus} + \vec{v}_{\text{вых}} \quad (3)$$

очевидна, судя по треугольнику скоростей на рисунке. Здесь КА сходит с передней стороны сферы действия Земли и опережает её (рис. 124, схема *а*).

На схеме *б* рис. 124 изображено, как КА, стартовав с Земли, долетает до сферы её действия. Земля доходит из точки E_0 своей орбиты до точки E_1 , КА покидает сферу действия с обратной стороны и отходит от Земли. Если на верхней схеме КА стартовал, нацелившись на внешнюю планету, то на ниж-

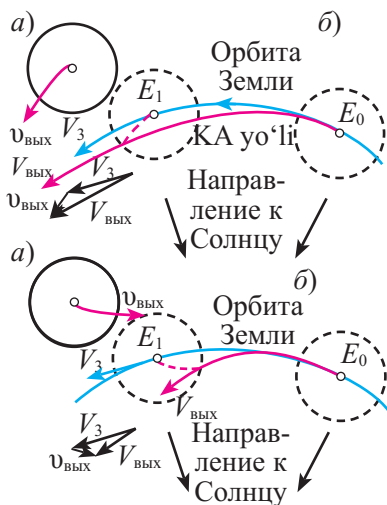


Рис. 124. Движение КА в сфере притяжения Земли: а и б (вверху) – полёт на внешние планеты; а и б (внизу) – схемы полётов на внутренние планеты; а) геоцентрическая, б) гелиоцентрическая траектории.

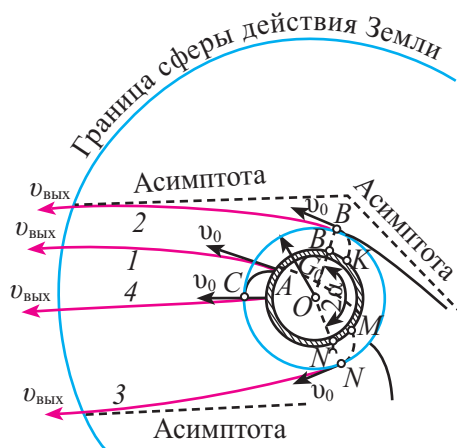


Рис. 125. Возможные траектории для полёта КА на планеты на границе сферы действия Земли (1, 2, 3 – гиперболическая траектория, 4 – траектория по прямой линии).

ней схеме он взлетел, нацелившись на одну из внутренних планет (Меркурий, Венера). И в этих случаях достигнутая скорость КА наглядно видна из треугольника скоростей:

$$\vec{V}_{\text{вых}} = \vec{V}_{\oplus} - \vec{v}_{\text{вых}} \quad (4)$$

По мере удаления КА от Земли его скорость уменьшается. Скорость КА $v_{\text{вых}}$ на момент подхода к границе сферы действия Земли относительно начальной скорости (v_0) вычисляется с помощью формулы интеграла энергии следующим образом:

$$v_{\text{вых}}^2 = v_0^2 - \frac{2K_{\oplus}}{r_0} \left(1 - \frac{r_0}{r_{\text{сдЗ}}} \right) \quad (5)$$

или

$$v_{\text{вых}}^2 = v_0^2 - v_{\text{пар}}^2 \left(1 - \frac{r_0}{r_{\text{сдЗ}}} \right), \quad (5')$$

здесь: $r_0 = R_{\oplus}$ радиус Земли; $r_{\text{сдЗ}}$ – радиус сферы действия Земли.

В связи с тем, что $r_{сд3} \gg R_{\otimes}$, данное выше выражение можно изложить следующим образом:

$$v_{\text{вых}}^2 = v_0^2 - v_{\text{пар}}^2 \quad \text{или} \quad v_{\text{вых}}^2 = v_0^2 - \frac{2K_{\otimes}}{R_{\otimes}}. \quad (6)$$

Из этой формулы следует: в связи с тем, что в сфере действия Земли $v_0 > v_{\text{пар}}$, (так как ракета не сможет покинуть Землю, если не будет $v_0 > v_{\text{пар}}$) траектория КА внутри сферы действия берется как гиперболическая. В данном случае для направляющегося к планете-цели КА не такважно, из какой точки он покинет сферу действия, но важно, в каком направлении и с какой скоростью он это сделает.

Данная схема (рис. 125) наглядно показывает, что при полетах к планетам существует бесконечно огромное количество подобных гиперболических траекторий с определённым направлением и точной скоростью. Кроме этого на схеме показано, что при полетах на планеты существует единственная траектория в виде прямой линии, остальные являются гиперболическими по отношению к Земле траекториями.

Вопросы и задания

1. На какие части делится при изучении пассивная траектория полета на планеты?
2. Нарисуйте чертёж различия геоцентрической и гелиоцентрической траектории полёта ИС в сфере влияния Земли.
3. Большей или меньшей считается скорость межпланетного КА в сфере влияния Земли по отношению ко второй космической скорости?
4. По какой кривой осуществляется гелиоцентрическая траектория полёта на внешние планеты?

ТЕМА 39. § 75. Полеты по гомановским орбитам

Представим, что орбиты планет похожи на круг, а плоскость этих орбит совпадает с плоскостью эклиптики. Траектория, по которой межпланетная автоматическая станция достигает намеченной планеты, называется *переходной орбитой*. Данные орбиты называются гомановскими или полуэллиптическими. При точных параметрах начальной скорости эти орбиты являются наиболее экономичными по энергозатратам, т.к. при запуске КА к внешним

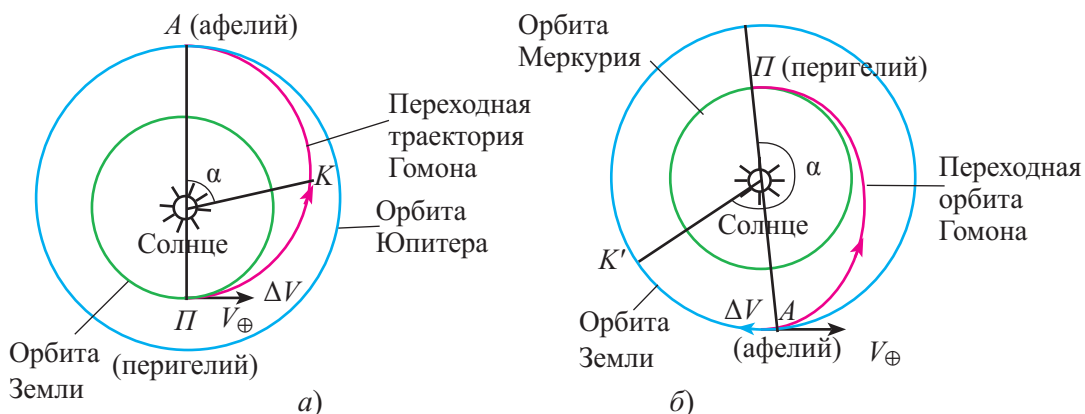


Рис. 126. Полет по гомановской траектории: а) к внешним планетам; б) к внутренним орбитам.

планетам афелий переходной полуэллиптической орбиты соприкасается с орбитой внешней планеты (рис. 126, а), а при полетах к внутренним планетам перигелий переходной полуэллиптической орбиты соприкасается с орбитой внутренней планеты (рис. 126, б).

Если при полете к внешним планетам импульс приращения скорости, заданный в точке P орбиты Земли, имеет то же направление, что и движение Земли, и при этом на выходе гелиоцентрическая скорость КА – $V_{\text{вых}} > V_{\oplus}$, значит КА направлен на одну из внешних планет. Если же заданный в точке P орбиты Земли импульс приращения скорости направлен в противоположную от скорости Земли сторону, значит КА направлен на одну из внутренних планет, и его гелиоцентрическая скорость меньше скорости Земли. Скорость полета КА при выходе из сферы действия Земли, необходимая для перелета к определенной внешней планете, связана с начальной $v_{\text{вых}}$ от поверхности Земли скоростью $R_{\oplus} \ll r_{\text{сд}}$ Исходя из этого, значение v_0 , вытекающее из формулы

$$v_0^2 = \sqrt{v_{\text{вых}}^2 + v_{\text{осв}}^2}, \quad (1)$$

обеспечивает КА движение по гелиоцентрической переходной орбите, соприкасающейся с орбитами Земли и намеченных планет.

Такие орбиты называются *гомановскими* или *полуэллиптическими орбитами*. Как видно из чертежа, геоцентрическая и гелиоцентрическая скорости выхода из сферы действия Земли по гомановским орбитам $v_{\text{вых}}$ и $V_{\text{вых}}$

имеют одинаковые направления и находятся друг с другом в следующих отношениях:

$$\text{для внешних планет} \quad v_{\text{вых}} = V_{\text{вых}} - V_{\oplus}; \quad (2)$$

$$\text{для внутренних планет} \quad v_{\text{вых}} = V_{\oplus} - V_{\text{вых}}; \quad (3)$$

или же в общем порядке в виде вектора

$$\vec{v}_{\text{вых}} = \vec{V}_{\text{вых}} - \vec{V}_{\oplus}. \quad (4)$$

В данном уравнении значение скорости $V_{\text{вых}}$ по интегралу энергии можно определить по данной формуле:

$$V_{\text{вых}} = \sqrt{K_{\odot} \left(\frac{2}{R_{\oplus \text{ орб}}} - \frac{1}{a} \right)} \quad (5)$$

В данном случае: $K_{\odot}$ – гравитационный параметр Солнца; a – это *большая полуось* гомановской орбиты (полуэллиптической орбиты). Вычисляется она по данной формуле где, исходя из уравнения

$$a = \frac{R_{\oplus \text{ орб}} + R_{\text{пл. орб}}}{2}. \quad (6)$$

Вписывая значение a в (5), в отношении $V_{\text{вых}}$ мы выходим на следующее

$$\text{уравнение} \quad V_{\text{вых}} = \sqrt{\frac{2K_{\odot}}{R_{\oplus \text{ орб}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{пл. орб}}}{R_{\oplus \text{ орб}}(R_{\oplus \text{ орб}} + R_{\text{пл. орб}})}}, \quad (7)$$

здесь исходя из уравнения

$$\sqrt{2K_{\odot} / R_{\oplus \text{ орб.}}} = \sqrt{2}V_{\oplus} = 42,122 \text{ км/с} \quad (8)$$

Если радиусы орбит планет указывать в астрономических измерениях, $V_{\text{вых}}$ равно:

$$V_{\text{вых}} = 42,122 \sqrt{\frac{R_{\text{пл. орб}}}{1 + R_{\text{пл. орб}}}} \quad (9)$$

Если же мы захотим вычислить время полета по гомановской орбите, то нетрудно понять, что при наполнении эллипсами полуэллиптической орбиты оно будет равно половине периода вращения КА по данному эллипсу. Следовательно:

$$t_{\text{гом}} = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\sqrt{K_{\odot}}} \sqrt{\left(\frac{R_{\oplus \text{ орб}} + R_{\text{пл. орб}}}{2} \right)^3}. \quad (10)$$

Если расстояние указывать как а. е., а время исчислять космическими годами, для одного полного периода вращения Земли вокруг Солнца можно будет использовать выражение:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K_{\odot}}} \sqrt{a^3} \quad (11)$$

и выяснить, что

$$1 = \frac{2\pi}{\sqrt{K_{\odot}}} \cdot \sqrt{1^3} \quad \text{или} \quad \sqrt{K_{\odot}} = 2\pi \quad (12)$$

Исходя из этого, время полета к определенной планете по гомановской орбите определяется по следующей формуле:

$$t_{\text{гом}} = \frac{\sqrt{2}}{8} \sqrt{(1 + R_{\text{пл.орб}})^3} = 0,177 \sqrt{(1 + R_{\text{пл.орб}})^3} \quad (13)$$

Данное время будет выражено в космических годах. Если мы будем указывать $R_{\text{пл.орб}}$ как а. е., а космические годы в солнечных сутках (1 з.г. = 365,256236 средних солнечных суток), время полета будет равно:

$$t_{\text{гом}} = 64,569 \sqrt{(1 + R_{\text{пл.орб}})^3} \text{ суткам.} \quad (14)$$

Для гомановских орбит угол удаленности P от точки A равен 180° . Угол, под которым во время старта ракеты проходят линии от Солнца к Земле и намеченной планете называется *углом конфигурации* ψ , данный угол определяется следующим образом:

$$\psi = 180^\circ - \alpha. \quad (15)$$

Здесь α – дуга, которую должна пройти намеченная планета до того как она встретится с КА в точке A собственной орбиты. Внешняя планета, движущаяся с суточной угловой скоростью $\omega_{\text{пл}}$, проходит данную дугу за $t_{\text{гом}}$ время, т.е. $\alpha = \omega \cdot t_{\text{гом}}$. Найденная исходя из этого дуга внешней планеты будет равна дуге $\widetilde{KA}$, изображенной на *рис. 126, а*. Во время старта при полете к внутренней планете данная планета находится на точке K' собственной орбиты, а угол α больше 180° , по этой причине ψ становится отрицательным. Угол ψ и время, прошедшее между моментом нахождения внутренней планеты во время начальной конфигурации (т.е. во время старта) t_0 до момента когда планета «догнала» Землю и оказалась на линии Земля – Солнце (т.е. нижнего соединения) или же время τ , прошедшее, пока Земля «догнала»

внешнюю планету и оказалась на линии Солнце-планета (т.е. в противоположной стороне) вычисляется по следующей формуле:

$$\tau = \frac{\Psi}{\omega_{\oplus} - \omega_{\text{пл}}}, \quad (16)$$

Здесь $\omega_{\oplus}$ и $\omega_{\text{пл}}$ – суточные угловые скорости Земли и планеты. Для любой планеты период возвращения момента первоначальной конфигурации равен её синодическому периоду и вычисляется по следующей формуле:

$$P_{\text{син}} = P_{\text{пл}} \cdot P_{\oplus} / |P_{\text{пл}} - P_{\oplus}| \quad (17)$$

ТЕМА 40.

§ 76. Движение космического аппарата в сфере действия планеты-цели

Для вычисления траектории полета КА внутри сферы действия планеты-цели при достижении КА данной планеты сперва нужно вычислить гелиоцентрическую скорость ($V_{\text{вх}}$) вхождения движущегося по гомановской траектории КА в сферу действия этой планеты. Для этого в качестве гелиоцентрической скорости вхождения в сферу действия планеты берется скорость приближения КА к планете-цели. Для внешних планет (Марс, Юпитер, Сатурн и другие) скорость приближения КА меньше орбитальной скорости данных планет, для внутренних планет (Меркурий, Венера) скорость приближения КА больше скорости планет. Именно поэтому КА входит в сферу действия внешних планет с передней стороны, а в сферу действия внутренних планет – с обратной. Так как сферы действия планет слишком малы по сравнению с масштабами переходных орбит, можно рассматривать скорость вхождения КА в сферу действия планеты ($V_{\text{вх}}$), как лежащую на одной прямой линии с направлением орбитальной скорости планеты. Понятно, что в этом случае между планетоцентрической входной скоростью $v_{\text{вх}}$, гелиоцентрической входной скоростью $V_{\text{вх}}$ и орбитальной скоростью планеты-цели $V_{\text{пл}}$ существует следующая связь. Здесь для внешних планет:

$$v_{\text{вх}} = V_{\text{пл}} - V_{\text{вх}}, \quad (1)$$

а для внутренних планет (здесь скорости $v_{\text{вх}}$, $V_{\text{вх}}$ и $V_{\text{пл}}$ параллельны друг другу)

$$v_{\text{вх}} = V_{\text{вх}} - V_{\text{пл}} \quad (2)$$

В целом для данных величин подходит следующая векторная связь:

$$\vec{v}_{\text{вх}} = \vec{V}_{\text{вх}} - \vec{V}_{\text{пл}}. \quad (3)$$

Планетоцентрическая входная скорость $v_{\text{вх}}$ больше параболической скорости для этой планеты, поэтому, если, опускаясь в направлении планеты, КА не встретит её, через определенное время он покинет эту сферу планеты со скоростью, равной скорости вхождения в сферу действия. В космонавтике расстояние между продолжением вектора скорости пересечения КА границы действия планеты и прямой линией, проведенной от центра планеты параллельно данному вектору, называется *знаковым расстоянием* $d_{\text{зн}}$. В зависимости от того, больше его величина или меньше, чем $r_{\text{эф}}$ – эффективный радиус, относительная продолжительность траектории КА относительно планеты внутри сферы действия вычисляется по следующей формуле:

$$r_{\text{эф}}^2 = R_{\text{пл}} \left(\frac{2K_{\text{пл}}}{v_{\text{вх}}^2} + R_{\text{пл}} \right) \quad (4)$$

Если она окажется меньше эффективного радиуса, КА обязательно ударится о планету. Если же окажется больше чем $r_{\text{эф}}$, КА, уменьшая скорость, будет тормозить до тех пор пока не подойдет близко к поверхности планеты, это высота h относительно поверхности планеты. Скорость КА будет уменьшена до значения, выводимого по формуле:

$$v = K_{\text{пл}} / R_{\text{пл}} + h \quad (5)$$

При соблюдении этих условий КА превращается в ИС планеты-цели и при необходимости спускается на поверхность планеты.

Вопросы и задания

1. Как определяется стартовая скорость КА при достижении сферы влияния при полёте с Земли на внешнюю планету?
2. Как определяются величины гелиоцентрической скорости КА при выходе из сферы влияния Земли и гелиоцентрической скорости КА при входе в сферу влияния предполагаемой планеты?
3. Больше или меньше второй космической скорости будет стартовая скорость КА, осуществляющего полёт с Земли на планеты?

Астрономические константы

Экваториальный радиус Земли	6378,16 км
Полярный радиус Земли	6356,78 км
Средний радиус Земли	6371,03 км
Продолжительность звёздных суток	23 ^h 56 ^m 4 ^s ,091 среднего солнечного времени
Средняя продолжительность солнечных суток	24 ^h 03 ^m 56 ^s ,555 звёздного времени
Продолжительность года (в среднем)	Тропический год 365 ^d ,2422 = 365 ^d 5 ^h 48 ^m 46 ^s
	Звёздный год 365 ^d ,2564 = 365 ^d 6 ^h 9 ^m 10 ^s
Продолжительность месяца (средняя)	Синодический месяц 29 ^d ,5306 = 29 ^d 12 ^h 44 ^m 3 ^s
	Звёздный месяц 27 ^d ,3217 = 27 ^d 7 ^h 43 ^m 12 ^s
	Месяц дракона 27 ^d ,2122 = 27 ^d 5 ^h 5 ^m 36 ^s

Сведения о Солнце

Солнечный параллакс	8,794"
Среднее расстояние от Земли до Солнца	149 600 000 км
Диаметр	$D_{\odot} = 109,12 D_{\oplus} = 1391016$ км
Площадь поверхности	$S_{\odot} = 11930 S_{\oplus} = 608,7 \cdot 10^{10}$ км ²
Объем	$V_{\odot} = 1303800 V_{\oplus} = 1,412 \cdot 10^{33}$ см ³ = = $1,4 \cdot 10^{18}$ км ³
Масса	$M_{\odot} = 332958 M_{\oplus} = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Средняя плотность	$\rho_{\odot} = 0,255 \rho_{\oplus} = 1,410$ г/см ³
Ускорение свободного падения	$\Gamma_{\odot} = 2,738 \cdot 10^4$ см/с ²
Параболическая (критическая) скорость	$v_{\text{пар}} = 617,7$ км/с
Синодический период вращения точки экватора Солнца	$T_{\text{син}} = 27^d,275$
Наклон экватора Солнца к эклиптике	7° 15' 00"
Среднее значение солнечной постоянной	$W = 1,388 \cdot 10^6$ эрг/с см ²
Энергия общего излучения, выделяемого в единицу времени	$3,88 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Апекс движения Солнца	$\alpha = 18^h00^m$, $\delta = +30^\circ$
Скорость обращения Солнца вокруг центра Галактики	240 км/с

Период обращения Солнца вокруг центра Галактики	$T=200$ млн лет
Самый большой видимый угловой диаметр Солнца	$32'35'',78$
Самый маленький видимый угловой диаметр Солнца	$31'31'',34$

Сведения о Земле

Масса	$6 \cdot 10^{24}$
Экваториальный радиус	6378,160 км
Угловая скорость вращения Земли	$15'',041 \text{ с}^{-1}$
Линейная скорость точки экватора	465,119 м/с
Линейная скорость точки на широте φ	$465,119 \cos \varphi$ м/с
Наибольшая скорость (в перигелии)	30,27 км/с
Наименьшая скорость (в афелии)	29,27 км/с
Ускорение Земли к Солнцу	$0,59 \text{ см/с}^2$
Ускорение свободного падения на Земле	$980,665 \text{ см/с}^2$
Период обращения оси Земли вокруг оси эклиптики (с учётом прецессии)	25725 лет
Координаты Северного геомагнитного полюса	$\varphi = 78^\circ \text{ с.ш.}, 6; \lambda = 70^\circ, 1 \text{ з.д.}$
Напряжённость поля на геомагнитных полюсах	0,63 Эрстед

Сведения о Луне

Средний суточный горизонтальный параллакс	$57'2'',61$
Среднее расстояние от Луны до Земли	384467 км
Наибольший видимый угловой диаметр	$33'32''$
Наименьший видимый угловой диаметр	$29'20''$
Диаметр	$3476 \text{ км} = 0,27234 d_{\oplus}$
Объём	$2195,3 \cdot 10^7 \text{ км}^3 = 0,020266 V_{\oplus}$
Поверхность	$3,791 \cdot 10^7 \text{ км}^2 = 0,0743 C_{\oplus}$
Масса	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг} = 0,012300 m_{\oplus}$
Средняя плотность	$3,350 \text{ г/см}^3 = 0,607 \rho_{\oplus}$

Ускорение свободного падения	1,623 м/с ²
Критическая скорость (2 космическая скорость)	2,38 км/с
Средний наклон лунной орбиты к эклиптике (угол наклона изменяется от 6°31' до 6°51')	6°40',7
Часть поверхности Луны, не видимая с Земли	0,410
Средняя видимая угловая скорость	12°,15
Средняя скорость движения по орбите	1,023 км/с
Ускорение Луны к Земле	0,272 см/с ²
Сидерический период, равный периоду вращения Луны	27,32 суток
Синодический период	29,53 суток
Температура на Луне в полдень	+120 °С
Температура на Луне в полночь	–150 °С

Сведения о планетах

Планеты	Экваториальный радиус (км)	Среднее расстояние до Солнца (млн км)	Масса		Период обращения вокруг своей оси	Критическая скорость (км/с)	Период обращения вокруг Солнца	Орбитальная скорость (км/с)
			$m_{\oplus}$	10^{24} кг				
Меркурий	2439	57,91	0,055	0,330	58d,65	4,3	87 ^d ,97	48,0
Венера	6052	108,81	0,816	4,872	243d,16	10,4	224 ^d ,7	35,0
Земля	6378	149,60	1,000	6	23 ^h 56 ^m 04 ^s	11,2	365 ^d ,26	30,0
Марс	3396	227,94	0,107	0,639	24 ^h 37 ^m 23 ^s	5,0	686 ^d ,98	24,1
Юпитер	71492	778,5	317,84	1900	9 ^h 50 ^m	59,5	4332 ^d ,59	13,1
Сатурн	60268	1427	95,17	568	10 ^h 14 ^m	36,2	107759 ^d ,21	9,6
Уран	25559	2875,03	14,59	87	–17 ^h 42 ^m	21,3	30685 ^d	6,8
Нептун	24764	4554,4	17,25	103	15 ^h 57 ^m	23,5	60188 ^d	5,5

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕМА 1. § 1. Что изучает астрономия? История её развития и связь с другими науками	3

ЧАСТЬ I

I РАЗДЕЛ. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

ТЕМА 2. § 2. Суточное видимое движение светил. Созвездия	6
§ 3. Доказательства вращения Земли вокруг своей оси *. Маятник Фуко	7
§ 4. Небесная сфера, её основные точки, круги и линии	8
§ 5. Видимое годичное движение Солнца. Эклиптика	10
ТЕМА 3. § 6. Небесные координаты	11
§ 7. Звёздные карты	13
§ 8. Видимые звёздные величины *	14
ТЕМА 4. § 9. Связь между высотой Полюса мира и географической широтой места наблюдения	15
§ 10. Видимое суточное вращение небесной сферы на различных географических широтах	16
§ 11. Кульминация светил и высота кульминации	19
§ 12. Приближенное определение широты места наблюдений с помощью астрономических наблюдений **	20
ТЕМА 5. § 13. Основы измерения времени *	21
§ 14. Календари	23
ТЕМА 6. § 15. Видимое движение, фазы и периоды Луны	25
§ 16. Мусульманские солнечный и лунный календари хиджры *	27
§ 17. Солнечные и лунные затмения	29

II РАЗДЕЛ. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ДВИЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

ТЕМА 7. § 18. Строение солнечной системы	31
§ 19. Масштабы и состав Солнечной системы	34
§ 20. Конфигурации планет и условия их видимости *	35
§ 21. Периоды движения планет вокруг Солнца *	37
ТЕМА 8. § 22. Суточный и суточно-горизонтальный параллакс. Определение расстояний до небесных тел Солнечной системы	38
§ 23. Определение радиусов небесных тел Солнечной системы **	39

ТЕМА 9. § 24. Единицы расстояния в астрономии	41
§ 25. Законы Кеплера	41
§ 26. Определение масс небесных тел *	43
ТЕМА 10. § 27. Задача двух тел. Космические скорости	45

III РАЗДЕЛ. АСТРОФИЗИКА И МЕТОДЫ ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТЕМА 11. § 28. Исследование электромагнитного излучения небесных тел – основа всеволновой астрономии	47
§ 29. Оптические телескопы	48
§ 30. Основные параметры телескопов **	51
§ 31. Радиотелескопы.....	53
§ 32. «Главный телескоп» обсерватории Улугбека	55
ТЕМА 12. § 33. Законы излучения. Изучение физических свойств небесных тел спектральными методами	56

ГЛАВА IV. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА НЕБЕСНЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

ТЕМА 13. § 34. Солнце – ближайшая к нам звезда. Общие сведения о Солнце ...	59
§ 35. Фотосфера Солнца и её строение. Пятна Солнца	61
ТЕМА 14. § 36. Хромосфера и корона Солнца.....	64
§ 37. Источник энергии Солнца *	66
§ 38. Солнечная активность и её влияние на Землю *	68
ТЕМА 15. § 39. Планеты земного типа. Меркурий и Венера	71
§ 40. Земля и её естественный спутник Луна. Марс	73
ТЕМА 16. § 41. Планеты-гиганты, их спутники и кольца.....	81
ТЕМА 17. § 42. Астероиды и планеты	89
ТЕМА 18. § 43. Кометы («хвостатые звёзды»).....	92
§ 44. Метеоры («падающие звёзды») и метеориты	95
ТЕМА 19. § 45. Современные взгляды на происхождение Солнечной системы ...	99

V РАЗДЕЛ. ЗВЁЗДЫ

ТЕМА 20. § 46. Годи́чный параллакс и определение расстояний до звёзд	101
§ 47. Определение расстояний и физических параметров звёзд *	103
§ 48. Цвет и температура звёзд.....	104
ТЕМА 21. § 49. Абсолютная звёздная величина и её связь со светимостью звезды *	106
§ 50. Спектры и спектральные классы звёзд.....	107

§ 51 . Диаграмма спектр-светимость	109
ТЕМА 22. § 52. Физические двойные звёзды и их виды.....	111
§ 53. Вычисление масс звёзд **	113
ТЕМА 23. § 54. Физические переменные звёзды, цефеиды, новые и сверхновые звёзды	115
ТЕМА 24. § 55. Эволюция звёзд. Нейтронные звёзды и «чёрные дыры» *	118

VI РАЗДЕЛ. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КОСМОСА

ТЕМА 25. § 56. Строение нашей галактики, её состав и вращение.....	121
§ 57. Шаровые и рассеянные звёздные скопления **	122
ТЕМА 26. § 58. Диффузные и пылевые туманности	124
ТЕМА 27. § 59. Внешние галактики. Классы и спектры галактик.....	126
§ 60. Радиогалактики и квазары *	129
ТЕМА 28. § 61. Расширение Вселенной. Закон Хаббла *	130
ТЕМА 29. § 62. Распределение галактик в пространстве **	132

ЧАСТЬ II

ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОНАВТИКИ **

ТЕМА 30. § 63. Предмет космонавтики и связь её с другими науками	134
ТЕМА 31. § 64. Законы ракетного движения. Сила тяги ракеты.....	138
ТЕМА 32. § 65. Структура и конструктивные характеристики ракеты	141
§ 66. Силы, действующие на космический аппарат во время полета	142
ТЕМА 33. § 67. Орбиты тела, движущегося в центральном поле притяжения ...	144
ТЕМА 34. § 68. Сфера действия и приближенный расчет траекторий КА	148
ТЕМА 35. § 69. Орбитальные элементы искусственных спутников Земли	151
§ 70. Орбитальная эволюция ИС в атмосфере Земли	152
ТЕМА 36. § 71. Орбитальные маневры. Изменение плоскости орбиты искусственного спутника	154
§ 72. Спуск искусственного спутника с орбиты	156
ТЕМА 37. § 73. Запуск космических аппаратов на Луну	158
ТЕМА 38. § 74. Траектории полетов к планетам. Движение внутри сферы действия Земли	160
ТЕМА 39. § 75. Полеты по гомановским орбитам	163
ТЕМА 40. § 76. Движение космического аппарата в сфере действия планеты-цели	167
Приложение	169

Учебное издание

Мамадазимов Мамадмуса

АСТРОНОМИЯ

(Rus tilida)

*O‘rta ta’lim muassasalarining 11-sinfi va o‘rta maxsus,
kasb-hunar ta’limi muassasalarining o‘quvchilari uchun darslik*
1-nashri

ООО «DAVR NASHRIYOTI»

100011, г. Ташкент, ул. А. Навои, 30

Переводчик	Хамидова Ф.М.
Редакторы	Запаров Р.Э., Шерданов Ч.Т.
Художественный дизайн	Беляцкая Е.В.
Корректор	Хамидова Ф.М.
Верстка	Беляцкая Е.В.
Набор	Халикова Ш.Р.

Издательская лицензия АИ № 308

Подписано в печать 02.08.2018. Формат 70×90%.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 12,87. Изд. л. 13,2.
Тираж 53 504. Заказ № 18-270.

Отпечатано в типографии ИПТД “Ўзбекистан”.
100011, г. Ташкент, ул. А. Навои, 30.

Сведения о состоянии учебника выданного в аренду

№	Фамилия, имя ученика	Учебный год	Состояние учебника при получении	Подпись классного руководителя	Состояние учебника при сдаче	Подпись классного руководителя
1						
2						
3						
4						
5						

При сдаче учебника классный руководитель оценивает его состояние по показателям, заполняя таблицу:

Новое	Состояние учебника, полученного в первый раз
Хорошее	Обложка в хорошем состоянии, переплёт целый. Все страницы в наличии, не порваны и не исписаны
Удовлетворительное	Обложка немного повреждена, переплёт книги нарушен, уголки страниц загнуты, некоторые страницы исписаны. Оторванные страницы заново приклеены.
Плохое	Обложка исписана и порвана, переплёт отсутствует. Многие страницы порваны, некоторые отсутствуют. Учебник не подлежит восстановлению.