И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалёв

Астрономия

Учебник
для 11 класса учреждений общего среднего образования
с русским языком обучения

Утверждено Министерством образования
Республики Беларусь

Минск
«Адукацыя і выхаванне»
2015

УДК 52(075.3=161.1)
ББК 22.6я721
Г16

Рецензент: учитель физики и астрономии высшей категории государственного учреждения образования «Гимназия № 39 г. Минска» *В. И. Коваленко*

Галузо, И. В.

Г16 Астрономия : учеб. для 11-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / И. В. Галузо, В. А. Голубев, А. А. Шимбалёв. — Минск : Адукацыя і выхаванне, 2015. — 224 с. : ил.

ISBN 978-985-471-763-0.

Настоящее издание (предыдущее вышло в 2009 г. в издательстве «Народная асвета») полностью пересмотрено и уточнено в соответствии с новыми открытиями и достижениями астрономии. В него добавлены задачи для проверки знаний учащихся (в конце каждого параграфа), приведены таблицы со справочными данными, касающимися основных разделов учебника.

УДК 52(075.3=161.1)
ББК 22.6я721

ISBN 978-985-471-763-0

© Галузо И. В., Голубев В. А., Шимбалёв А. А., 2003
© Галузо И. В., Голубев В. А., Шимбалёв А. А., 2015, с изменениями
© Оформление. РУП «Издательство “Адукацыя і выхаванне”», 2015

Предисловие

Астрономия — это древнейшая наука, которая изучает объекты и явления, наблюдаемые во Вселенной. Тайны неба призывают человеческий разум к размышлению и исследованию физического мира. Этот безграничный и постоянно меняющийся мир мы называем Вселенной. Понятие «Вселенная» включает в себя и Землю с планетами Солнечной системы, и Солнце, и другие звёзды, галактики, и среду, в которой они находятся. Наша планета Земля, а значит, и мы вместе с ней являемся частью этой Вселенной.

Люди всегда стремились понять природу наблюдаемых объектов и явлений, поэтому строили картину окружающего их мира в соответствии с теми данными, которыми располагали. Постепенно появлялись новые факты и теории, открывалась возможность проверки этих идей через наблюдения и измерения с использованием достижений смежных с астрономией наук (особенно физики), благодаря чему картина взглядов на мир уточнялась и изменялась.

В наше время астрономия использует всё более совершенную наблюдательную технику. Современные приёмники излучения передают информацию непосредственно в компьютеры.

Наблюдения ведутся в различных диапазонах электромагнитного излучения: радиодиапазоне, инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-лучах. Открыты новые объекты (пульсары, коричневые карлики), выявлены неожиданные свойства у многих уже известных тел, созданы условия для прямого исследования ряда объектов Солнечной системы и т. д. И чем больше астрономы соприкасаются с неизвестным и открывают новое, тем больше появляется вопросов, требующих разрешения. Современная астрономия изучает весьма далёкие космические объекты, и вместе с тем она не оторвана от Земли. Для человечества важно исследовать активность Солнца и его влияние на земные процессы, ответить на ряд вопросов: есть ли жизнь на других планетах, как космические факторы влияют на существование жизни на Земле и др.

Профессиональных астрономов в мире значительно меньше, чем физиков, химиков, биологов, математиков и представителей других наук, но зато во все времена было много любителей, активно наблюдающих звёзды и планеты. Первоначальное знакомство с астрономией в школе поможет получить необходимые сведения и представления об этой древней, но вечно юной и развивающейся науке.

раздел I

введение

§ 1. Предмет астрономии

1. Что изучает астрономия. Люди издавна пытались разгадать тайну окружающего мира, определить своё место в мировом порядке Вселенной. Человек пристально наблюдал за восходами и заходами Солнца, за порядком смены фаз Луны, за движением планет среди звёзд. Люди пытались понять закономерность небесных явлений и разгадать их смысл. Из этих размышлений через мифологию и философию постепенно рождалось естественно-научное знание.

Астрономия (греч. *a□stron* — звезда, светило, *no□mos* — закон) — фун- даментальная наука, изучающая строение, движение, происхождение и развитие небесных тел, их систем и всей Вселенной в целом.

Астрономия как наука — важный вид человеческой деятельности, дающий систему знаний о закономерностях в развитии природы. Цель астрономии — изучить происхождение, строение и эволюцию Вселенной.

Важными задачами астрономии являются объяснение и прогнозирование астрономических явлений, таких, как солнечные и лунные затмения, появление периодических комет, прохождение вблизи Земли астероидов, крупных метеорных тел или ядер комет. Астрономия занимается изучением физических процессов, происходящих в недрах планет, на поверхности и в их атмосферах, чтобы лучше понять строение и эволюцию нашей планеты. Восемь больших планет (среди них Земля), карликовые планеты, их спутники, астероиды, метеорные тела, кометы, межпланетная пыль и полевые формы материи вместе с Солнцем составляют гравитационно-связанную Солнечную систему. Исследование движения небесных тел позволяет выяснить вопросы устойчивости Солнечной системы, вероятности столкновения Земли с астероидами и ядрами комет. Не теряет актуальности открытие новых объектов Солнечной

системы и изучение их движения. Важно знание процессов, происходящих на Солнце, и прогнозирование их дальнейшего развития, так как от этого зависит существование всего живого на Земле. Изучение эволюции других звёзд и сравнение их с Солнцем помогают познать этапы развития нашего Светила.

Исследование нашей звёздной Галактики и других галактик позволяет определить её тип, эволюцию, место, занимаемое в ней Солнечной системой, вероятность близкого прохождения от Солнца других звёзд или прохождения Солнца через межзвёздные облака газа и пыли.

Итак, астрономия изучает строение и эволюцию Вселенной. Под термином «Вселенная» понимается вся наблюдаемая область пространства, включающая в себя доступные для изучения небесные тела и их системы.

2. возникновение астрономии. Астрономия возникла в глубокой древности. Известно, что ещё первобытные люди наблюдали звёздное небо и затем на стенах пещер рисовали то, что видели. Наблюдение звёздного неба формировало самого человека как мыслящее существо. По мере развития человеческого общества, с возникновением земледелия появилась потребность в счёте времени, создании календаря. Подмеченные закономерности в движении небесных светил, изменении вида Луны позволили древнему человеку найти и определить единицы счёта времени (сутки, месяц, год) и создать календарь, пронизывающий всю культурную и хозяйственную жизнь общества. Так, в Древнем Египте по появлению на предутреннем небе ярчайшей звезды Сириус жрецы предсказывали периоды весенних разливов Нила, определявших сроки земледельческих работ (рис. 1). В Аравии, где из-за дневной жары многие работы переносились на ночное время, существенную роль играло наблюдение фаз Луны.

Рисунок 1 — Наблюдение предутреннего восхода Сириуса в Древнем Египте

В странах, где было развито мореплавание, в особенности до изобретения компаса, особое внимание уделялось способам ориентирования по звёздам.

В самых ранних письменных документах (3—2-е тыс. до н. э.) древнейших цивилизаций Египта, Вавилона, Китая, Индии и Америки имеются следы астрономической деятельности. В различных местах Земли находят сооружения из

Рисунок 2 — Стоунхендж — древняя астрономическая наблюдательная площадка

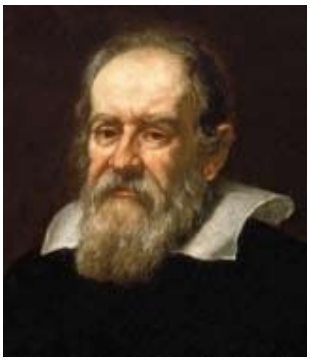
каменных глыб и обработанных столбов, ориентированные на астрономически значимые направления. Эти направления совпадают, например, с точками восхода Солнца в дни равноденствий и солнцестояний, что позволяет считать их древними астрономическими наблюдательными площадками. Подобные каменные солнечно-лунные указатели найдены в Южной Англии — Стоунхендж (рис. 2), в России на Южном Урале — Аркаим — и других местах.

3. разделы астрономии. Как и любая другая наука, астрономия включает ряд разделов, тесно связанных между собой. Они отличаются друг от друга предметом исследования, а также методами и средствами познания.

Рассмотрим возникновение и развитие разделов астрономии в историческом аспекте. Правильное научное представление о Земле как небесном теле появилось в Древней Греции. Александрийский астроном Эратосфен в 240 г. до н. э. весьма точно определил по наблюдениям Солнца размеры земного шара. Развивающиеся торговля и мореплавание нуждались в разработке методов ориентации, определении географического положения наблюдателя, точном измерении времени исходя из астрономических наблюдений. Решением этих задач стала заниматься **практическая астрономия**.

Николай Коперник (1473—1543)

Гелиоцентрическая система мира Николая Коперника, изложенная в труде «Об обращениях небесных сфер» (1543), дала ключ к познанию Вселенной. Однако веками укоренившееся мнение о неподвижной Земле как центре Вселенной долго не уступало места новому учению. Окончательно утвердил теорию Коперника, получив бесспорные доказательства её истинности, итальянский физик, механик и астроном Галилео Галилей. Астрономические открытия Галилея были сделаны с помощью простейшего телескопа. На Луне учёный увидел горы и кратеры, открыл четыре спутника Юпитера. Обнаружен-



Галилео Галилей (1564—1642)

Иоганн Кеплер (1571—1630)

Исаак Ньютон (1643—1727)

ная им смена фаз Венеры свидетельствовала о том, что эта планета обращается вокруг Солнца, а не вокруг Земли.

Современник Галилея Иоганн Кеплер (будучи ассистентом великого астронома Тихо Браге) получил доступ к высоким по точности результатам наблюдений планет, проводившихся в течение более чем 20 лет. Особое внимание Кеплера привлёк Марс, в движении которого обнаружились значительные отступления от прежних теорий. После длительных вычислений учёному удалось найти три закона движения планет, которые сыграли важную роль в развитии представлений об устройстве Солнечной системы. Раздел астрономии, изучающий движение небесных тел, получил название **небесной механики**. Небесная механика позволила объяснить и предварительно вычислить с очень высокой точностью почти все движения, наблюдаемые как в Солнечной системе, так и в Галактике.

В астрономических наблюдениях использовались всё более совершенные телескопы. Зрительная труба Галилея была усовершенствована Кеплером, а затем Христианом Гюйгенсом. Исаак Ньютон изобрёл новый вид телескопа — телескоп-рефлектор. С помощью модернизированных оптических приборов были сделаны новые открытия, причём относящиеся не только к телам Солнечной системы, но и к миру слабых и далеких звёзд. В 1655 г. Х. Гюйгенс разглядел кольца Сатурна и открыл его спутник Титан. В 1761 г. М. В. Ломоносов открыл атмосферу у Венеры и провёл исследование комет. Принимая за эталон Землю, учёные сравнивали её с другими планетами и спутниками. Так зарождалась **сравнительная планетология**.

Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765)

Огромные и всё увеличивающиеся возможности изучения физической природы и химического состава звёзд предоставило открытие спектрального анализа (1859—1862). Детальные исследования тёмных линий в спектре Солнца, выполненные немецким учёным Йозефом Фраунгофером, стали первым шагом в получении спектральной информации о небесных телах. Быстрое развитие лабораторной спектроскопии и теории спектров атомов и ионов на основе квантовой механики привело к развитию физики звёзд и в первую очередь физики звёздных атмосфер.

В 60-е гг. XIX в. спектральный анализ становится основным методом в изучении физической природы небесных тел. Раздел астрономии, изучающий физические явления и химические процессы, происходящие в небесных телах, их системах и в космическом пространстве, называется **астрофизикой**.

Дальнейшее развитие астрономии связано с усовершенствованием техники наблюдений. Большие успехи достигнуты в создании новых типов приёмников излучения. Фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи, ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью) повысили точность и чувствительность фотометрических наблюдений и ещё более расширили спектральный диапазон регистрируемых излучений. Стал доступным для наблюдений мир далёких галактик, находящихся на расстоянии миллиардов световых лет. Возникли новые направления астрономии: звёздная астрономия, космология и космогония.

Временем зарождения **звёздной астрономии** принято считать 1837—1839 гг., когда независимо в России, Германии и Англии были получены первые результаты в определении расстояний до звёзд. Звёздная астрономия изучает закономерности в пространственном распределении и движении звёзд в нашей звёздной системе — Галактике, исследует свойства и распределение других звёздных систем.

Космология — раздел астрономии, изучающий происхождение, строение и эволюцию Вселенной как единого целого. Выводы космологии основываются на законах физики и данных наблюдательной астрономии, а также на всей системе знаний определённой эпохи. Интенсивно этот раздел астрономии стал развиваться в первой половине XX в. после разработки общей теории относительности Альбертом Эйнштейном.

Космогония — раздел астрономии, изучающий происхождение и развитие небесных тел и их систем. Поскольку все небесные тела возникают и развиваются, идеи об их эволюции тесно связаны с представлениями о природе этих тел вообще. При исследовании звёзд и галактик используются результаты наблюдений многих сходных объектов, возникающих в разное время и находящихся на разных стадиях развития. В современной космогонии широко применяются законы физики и химии.

Космогонические гипотезы XVIII—XIX вв. касались главным образом происхождения Солнечной системы. Затем развитие физики и астрофизики позволило приступить к серьёзному изучению происхождения и развития звёзд. В 60-х гг. XX в. началось исследование происхождения и развития галактик, природа которых была выяснена только в 20-х гг. XX в.

4. Астрономические наблюдения. Основным способом исследования небесных объектов и явлений служат астрономические наблюдения. **Астрономические наблюдения** — это целенаправленная и активная регистрация информации о процессах и явлениях, происходящих во Вселенной. Такие наблюдения выступают основным источником знаний на эмпирическом уровне.

На протяжении тысячелетий астрономы изучали положение небесных объектов на звёздном небе и их взаимное перемещение с течением времени. Точные измерения положений звёзд, планет и других небесных тел дают материал для определения расстояний до них и их размеров, а также для изучения законов их движения. Результатами угломерных измерений пользуются в практической астрономии, небесной механике, звёздной астрономии.

Для проведения астрономических наблюдений и их обработки во многих странах созданы специальные научно-исследовательские учреждения — **астрономические обсерватории**.

Для выполнения астрономических наблюдений и обработки полученных данных в современных обсерваториях используют наблюдательные инструменты (телескопы), светоприёмную и анализирующую аппаратуру, вспомогательные приборы для наблюдений, электронно-вычислительную технику и др. (рис. 3).

Рисунок 3 — Самый большой оптический телескоп в России: Большой Телескоп Альт-Азимутальный (БТА)

Рисунок 4 — 100-метровый радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк (США)

Оптические телескопы служат для собирания света исследуемых небесных тел и получения их изображения. Телескоп увеличивает угол зрения, под которым видны небесные тела, и собирает во много раз больше света, приходящего от светила, чем невооружённый глаз наблюдателя. Благодаря этому в телескоп можно рассматривать невидимые с Земли детали поверхности ближайших небесных тел, а также множество слабых звёзд.

После Второй мировой войны начала бурно развиваться радиофизика. Усовершенствованные приёмники, антенны и оставшиеся после войны радиолокаторы могли принимать радиоизлучение Солнца и далёких космических объектов. Так возникла **радиоастрономия** — одна из ветвей астрофизики. Внедрение радионаблюдений в астрономию (рис. 4) обогатило её множеством выдающихся открытий.

Новым импульсом в развитии астрономических наблюдений явился выход космических аппаратов и человека в космос. Научные приборы и телескопы, установленные на космических аппаратах, позволили исследовать ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение Солнца, других звёзд и галактик. Эти наблюдения за пределами земной атмосферы, поглощающей коротковолновое излучение, необычайно расширили объём информации о физической природе небесных тел и их систем.

5. Значение астрономии. Во все времена астрономия оказывала большое влияние на практическую деятельность человека, но главное её значение заключалось и заключается в формировании научного мировоззрения. Это можно проследить, рассматривая развитие отдельных разделов астрономии. Методы ориентировки, разрабатываемые практической астрономи- ей, применяются в мореплавании, авиации и космонавтике. Требования к точности определения координат небесных объектов (звёзд, квазаров, пульсаров) значительно возросли в связи с тем, что по ним ориентируются космические автоматические аппараты, скорости которых и покоряемые расстояния несоизмеримы с земными. В связи с освоением тел Солнечной системы возникает необходимость составления подробных карт Луны, Марса, Венеры.

Работа службы времени также связана с астрономией. В задачи данной службы входят определение, хранение и передача сигналов точного времени, что не потеряло актуальности и сейчас. Атомные часы, точность хода которых достигает 10^{-13} с, позволяют изучать годовые и вековые изменения вращения Земли, а значит, вносить поправки в единицы измерения времени.

По мере освоения космического пространства увеличивается число задач, решать которые призвана небесная механика. Одна из них — изучение отклонений орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ) от расчётных. Изменение высоты полёта ИСЗ над земной поверхностью зависит от средней плотности залегающих пород, что указывает на районы поиска нефти, газа или железной руды.

Исследование атмосфер тел Солнечной системы помогает лучше познать законы динамики атмосферы Земли, точнее построить её модель, а следовательно, увереннее предсказывать погоду. Практический интерес имеют для метеорологов, к примеру, вопросы образования сернистых облаков на Венере, вызывающих «парниковый эффект», или вопросы глобальных марсианских пылевых бурь, охлаждающих поверхность этой планеты.

Развитие астрофизики стимулирует разработку новейших технологий. Так, исследование источников энергии Солнца и других звёзд подсказало идею создания управляемых термоядерных реакторов. В процессе изучения солнечных протуберанцев родилась идея теплоизоляции сверхгорячей плазмы магнитным полем, создания магнитогидродинамических генераторов. Результаты наблюдений Службы Солнца — международной координирующей сети по регистрации активности Солнца — используются в метеорологии, космонавтике, медицине и других отраслях человеческой деятельности (рис. 5).

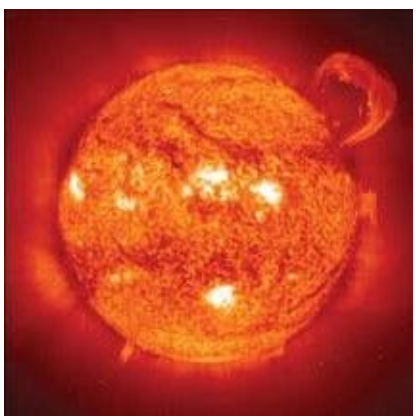


Рисунок 5 — Активное Солнце. Фотография, сделанная спутником SOHO

Наша Земля не изолирована в пространстве, на неё воздействуют частицы и поля, идущие от Солнца и других звёзд. Многие звёзды в конце своей эволюции взрываются (так называемые Сверхновые), выделяя огромное количество энергии

в течение нескольких секунд. Так, типичная вспышка сверхновой звезды на расстоянии 60 световых лет способна уменьшить озоновый слой нашей планеты в 20 раз, что, в свою очередь, приведёт к возрастанию в миллион раз потока ультрафиолетового излучения, достигающего Земли.

Звёздная астрономия изучает частоту, пространственное распределение и типы звёзд, приводящих к космическим катастрофам.

Земля — это уникальная планета, где развилась человеческая цивилизация, и если природа Земли уникальна, то и огромна ответственность людей за её сохранение.

Главные выводы

1. Астрономия — фундаментальная наука, изучающая физические тела, явления и процессы, происходящие во Вселенной.

2. Астрономия состоит из ряда разделов, например, небесная механика, сравнительная планетология, астрофизика, космология и др.

3. Основной способ исследования небесных объектов — астрономические наблюдения, выполняемые с помощью современных наземных и космических телескопов.

4. Основное назначение астрономии — формирование научного мировоззрения людей.

Контрольные вопросы и задания

1. Что изучает астрономия? Перечислите важнейшие особенности астрономии.

2. Как возникла наука астрономия? Охарактеризуйте основные периоды её развития.

3. Какие объекты и их системы изучает астрономия? Перечислите их в порядке увеличения размеров.

4. Из каких разделов состоит астрономия? Кратко охарактеризуйте каждый из них.

5. Что такое телескоп и для чего он предназначен?

6. Каково значение астрономии для практической деятельности человечества?

раздел II

основы ПрАКтиЧесКой Астрономии

§ 2. Звёздное небо

1. созвездия и яркие звёзды. На небе в безоблачную ночь сияют мириады звёзд, и, кажется, невозможно разобраться в этой величественной звёздной картине. Вспоминаются вдохновенные строки русского учёного и поэта М. В. Ломоносова:

Открылась бездна звёзд полна,
Звездам числа нет, бездне — дна.

Древние наблюдатели видели на звёздном небе отдельные сочетания ярких звёзд и мысленно объединяли их в различные фигуры. Чтобы было легче ориентироваться на звёздном небе, группам звёзд, или созвездиям, люди присваивали названия животных, птиц, различных предметов. Некоторые фигуры древнегреческие астрономы связали с мифическими героями. В труде «Альмагест» («Великое математическое построение астрономии в XIII книгах», II в. н. э.) греческий астроном Клавдий Птолемей упоминает 48 созвездий. Это Большая Медведица и Малая Медведица, Дракон, Лебедь, Орёл, Телец, Весы и др.

Наиболее заметные созвездия у многих народов получили свои названия. Так, древним славянам Большая Медведица представлялась в виде Лося или Оленя. Часто ковш Большой Медведицы сравнивался с повозкой, отсюда и названия этого созвездия: Воз, Телега, Колесница.

Ещё в III в. до н. э. древнегреческие астрономы свели названия созвездий в единую систему, связанную с греческой мифологией. Эти названия впоследствии заимствовала европейская наука. Поэтому все созвездия,

содержащие яркие звёзды и видимые в средних широтах Северного полушария Земли, получили имена героев древнегреческих мифов и легенд (например, созвездия Цефея, Андромеды, Пегаса, Персея). Их изображения можно найти на старинных звёздных картах: Большая Медведица и Малая Медведица, небесный охотник Орион, голова звёздного быка — Тельца и др. (рис. 6). А, к примеру, созвездие Кассиопеи, названное в честь мифической царицы (рис. 7), белорусам представлялось в виде двух косцов, косящих траву (рис. 8). На современных астрономических картах нет рисунков мифических образов созвездий, но сохранены их древние названия. Менее яркие созвездия были названы европейскими астрономами в XVI—XVIII вв. Все созвездия Южного полушария (невидимые в Европе) получили названия в эпоху Великих географических открытий, когда европейцы начали осваивать Новый свет.

Однако с течением времени сложилась непростая ситуация — в разных странах использовались различные карты созвездий. Возникла необходимость унифицировать разделение звёздного неба.

Окончательное число и границы созвездий были определены на ассамблеях Международного астрономического союза в 1922 и 1928 гг. Вся сферическая поверхность звёздного неба была условно разделена на 88 созвездий.

Рисунок 6 — Фрагмент атласа А. Целлариуса с изображением созвездий

Рисунок 7 — Созвездие Кассиопеи. Гравюра из атласа Яна Гевелия

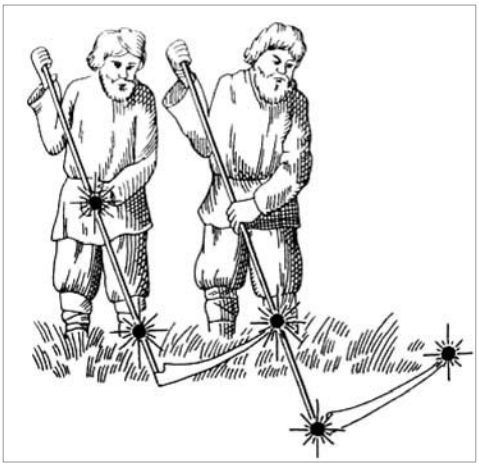


Рисунок 8 — Созвездие Кассиопеи в представлении белорусов

В настоящее время под **созвездием** понимается участок звёздного неба с характерной наблюдаемой группировкой звёзд. Эти площадки-созвездия носят названия либо древнегреческих созвездий, которые находились (или находятся) в современных границах, либо названия, присвоенные европейскими астрономами. Для облегчения запоминания и поиска созвездий в учебниках по астрономии и астрономических атласах яркие звёзды, составляющие созвездия, соединены условными линиями в узнаваемые на небе фигуры. Созвездия, звёзды которых образуют легко выделяемую на звёздном фоне конфигурацию, или те, которые содержат яркие звёзды, относятся к главным созвездиям (рис. 9).

Над горизонтом на ясном звёздном небе невооружённым глазом можно увидеть около 3000 звёзд. Они различаются по своему блеску: одни заметны сразу, другие едва различимы. Поэтому ещё во II веке до н. э. Гиппарх, один из основоположников астрономии, ввёл условную **шкалу звёздных величин**. Самые яркие звёзды были отнесены к 1-й величине, следующие по блеску (слабее примерно в 2,5 раза) считаются звёздами 2-й звёздной величины, а самые слабые, видимые только в безлунную ночь, — звёздами 6-й величины.

Многим ярким звёздам древнегреческие и арабские астрономы дали названия: Вега, Сириус, Капелла, Альтаир, Ригель, Альдебаран и др. В дальнейшем яркие звёзды в созвездиях стали обозначать буквами греческого алфавита, как правило, по мере убывания их блеска. С 1603 г.

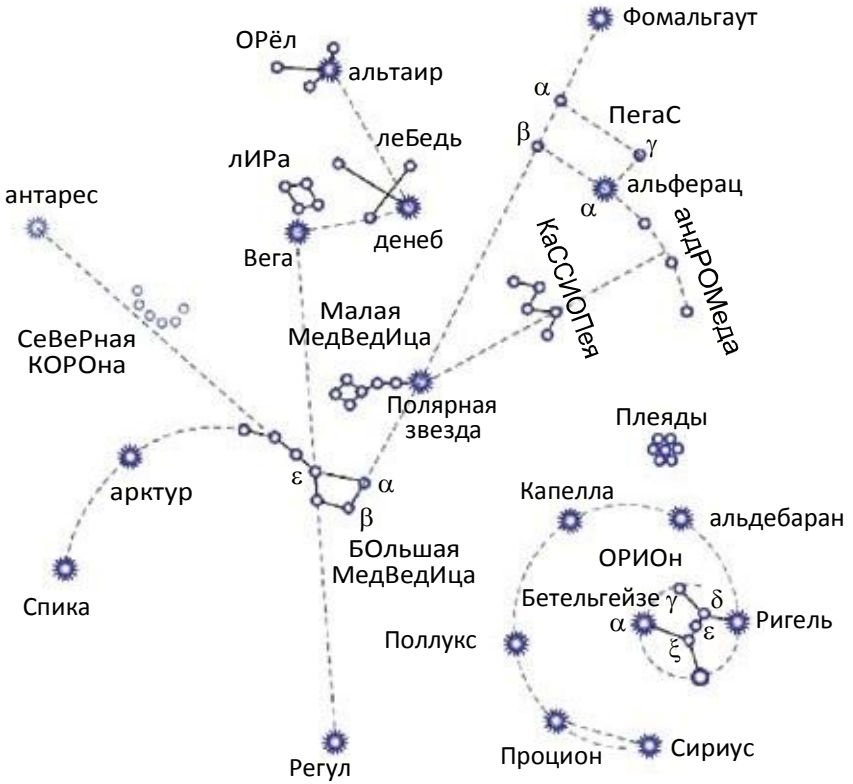


Рисунок 9 — Схема взаимного расположения главных созвездий и ярких звёзд, видимых в средних географических широтах

действует предложенная немецким астрономом Иоганном Байером система обозначений звёзд. В системе Байера название звезды состоит из двух частей: из названия созвездия, которому принадлежит звезда, и буквы греческого алфавита. При этом первая буква греческого алфавита α соответствует самой яркой звезде в созвездии, β — второй по блеску звезде и т. д. Например, Регул — α Льва — это самая яркая звезда в созвездии Льва, Денебола — β Льва — вторая по блеску звезда в этом созвездии.

По мере развития науки и в связи с изобретением телескопов количество исследуемых звёзд всё увеличивалось. Для их обозначения уже не хватало букв греческого алфавита. И тогда звёзды начали обозначать латинскими буквами. Когда же закончились и они, звёзды стали обозначать цифрами (например, 61 Лебедь).

2. видимое суточное движение звёзд. При наблюдении звёздного неба на протяжении одного-двух часов мы убеждаемся в том, что оно вращается как единое целое таким образом, что с одной стороны звёзды поднимаются, а с другой — опускаются. Для нас, жителей Северного полушария, звёзды поднимаются с восточной части горизонта и смещаются вправо. Далее они достигают наивысшего положения в южной части неба и затем опускаются в западной части горизонта. В течение суток звёздное небо со всеми находящимися на нём светилами совершает один оборот. Таким образом, *видимое суточное вращение звёздного неба происходит с востока на запад, если стоять лицом к югу*, т. е. по часовой стрелке.

Рисунок 10 — Суточные дуги светил в полярной области неба

В северной части неба можно отыскать Полярную звезду. Кажется, что всё небо вращается вокруг неё (рис. 10). На самом же деле вокруг своей оси вращается Земля с запада на восток, а весь небосвод вращается в обратном направлении с востока на запад. Полярная звезда для данной местности остаётся почти неподвижной и на одной и той же высоте над горизонтом. Очевидно, что **суточное движение звёзд** (светил) — наблюдаемое кажущееся явление вращения небесного свода — отражает действительное вращение земного шара вокруг оси.

3. основные точки, линии и плоскости небесной сферы. Нам кажется, что все звёзды расположены на некоторой сферической поверхности неба и одинаково удалены от наблюдателя. На самом деле они находятся от нас на различных расстояниях. Поэтому воображаемую поверхность небосвода стали называть небесной сферой.

Небесная сфера — это воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой в зависимости от решаемой задачи совмещается с той или иной точкой пространства. Центр небесной сферы может быть выбран в месте наблюдения (глаз наблюдателя), в центре Земли или Солнца и т. д. Понятием небесной сферы пользуются для угловых измерений, для изучения взаимного расположения и движения космических объектов на небе.

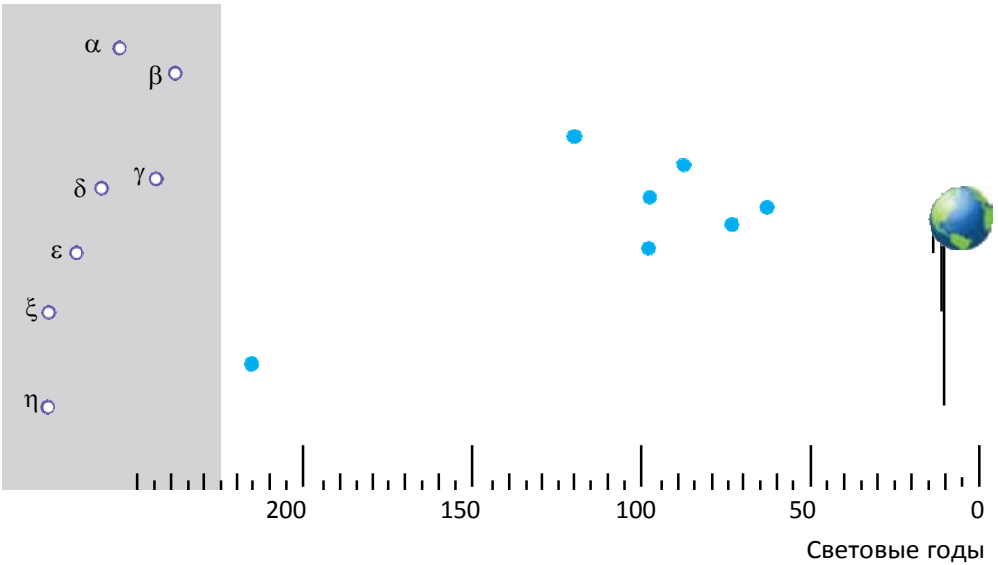


Рисунок 11 — Схема проецирования звёзд в созвездии Большой Медведицы на небесной сфере

На поверхность небесной сферы проецируются видимые положения всех светил, а для удобства измерений строят на ней ряд точек и линий. Например, некоторые из звёзд «ковша» Большой Медведицы находятся далеко одна от другой, но для земного наблюдателя они проецируются на один и тот же участок небесной сферы (рис. 11).

Прямая, проходящая через центр небесной сферы (рис. 12) и совпадающая с направлением нити отвеса в месте наблюдения, называется **отвесной** или **вертикальной линией**. Она пересекает небесную сферу в точках **зенита** (верхняя точка пересечения отвесной линии с небесной сферой) и **надира** (точка небесной сферы, противоположная зениту). Плоскость, проходящая через центр небесной сферы и перпендикулярная отвесной линии, называется **плоскостью истинного** или **математического горизонта**.

Большой круг небесной сферы, проходящий через зенит, светило и надир, называется **кругом высоты**, **вертикальным кругом** или просто **вертикалом светила**.

Ось мира — прямая, проходящая через центр небесной сферы параллельно оси вращения Земли, пересекающая небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках.

Точка пересечения оси мира с небесной сферой, вблизи которой находится Полярная звезда, называется **Северным полюсом мира**, противоположная точка — **Южным полюсом мира**. Полярная звезда отстоит от Северного полюса мира на угловом расстоянии около 1° (точнее 44′).

Большой круг, проходящий через центр небесной сферы и перпендикулярный оси мира, называют **небесным экватором**. Он делит небесную сферу на две части: **Северное полушарие** с вершиной в Северном полюсе мира и **Южное** — с вершиной в Южном полюсе мира.

Круг склонения светила — большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и светило.

Суточная параллель — малый круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира.

Большой круг небесной сферы, проходящий через точки зенита, надира и полюсы мира, называется **небесным меридианом**. Небесный меридиан пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках. Точка пересечения истинного горизонта и небесного меридиана, ближайшая к Северному полюсу мира, называется **точкой севера**. Точка пересечения истинного горизонта и небесного меридиана, ближайшая к Южному полюсу мира, называется **точкой юга**. Линия, соединяющая точки севера и юга, называется **полуденной линией**. Она лежит на плоскости истинного горизонта. По направлению полуденной линии падают тени от предметов в полдень.

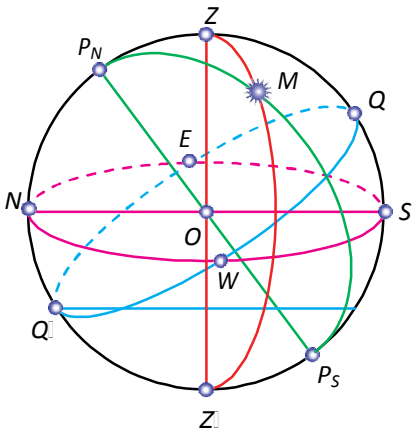


Рисунок 12 — Небесная сфера: *O* — центр небесной сферы (местонахождение наблюдателя); P_N — Северный полюс мира; P_S — Южный полюс мира; P_NP_S — ось мира; *Z* — зенит; *Z*′ — надир; *E* — восток; *W* — запад; *N* — север; *S* — юг; *Q* — верхняя точка небесного экватора; *Q*′ — нижняя точка небесного экватора; *ZZ*′ — вертикальная линия; P_NMP_S — круг склонения; *NS* — полуденная линия; *M* — светило на небесной сфере

С небесным экватором истинный горизонт также пересекается в двух диаметрально противоположных точках — **точке востока** и **точке запада**. Для наблюдателя, стоящего в центре небесной сферы лицом

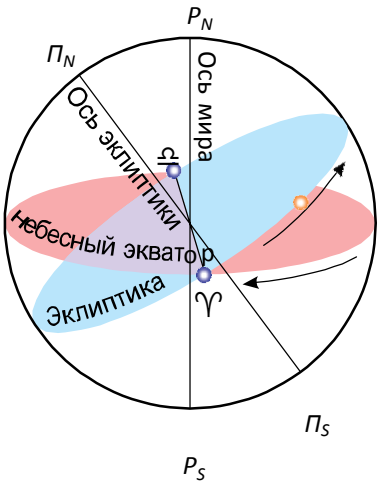


Рисунок 13 — Эклиптика

к точке севера, точка востока будет расположена справа, а точка запада — слева. Помня это правило, легко ориентироваться на местности.

Видимый годовой путь Солнца среди звёзд называется **эклиптикой**. В плоскости эклиптики лежит путь Земли вокруг Солнца, т. е. её орбита. Она наклонена к небесному экватору под углом 23° 27′ и пересекает его в точках весеннего (♈, около 21 марта) и осеннего (♎, около 23 сентября) равноденствия (рис. 13).

Главные выводы

1. Созвездие — участок неба с характерной наблюдаемой группировкой звёзд и других постоянно находящихся в нём астрономических объектов, выделенный для удобства ориентировки и наблюдения звёзд.

2. Шкала звёздных величин, предложенная Гиппархом, позволяет различать звёзды по своему блеску.

3. Наблюдаемое суточное движение звёзд является отражением действительного вращения Земли вокруг своей оси.

4. Небесная сфера — воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в выбранной точке пространства.

5. Видимый годовой путь Солнца среди звёзд называется эклиптикой.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под созвездием?

2. Каким образом созвездия получили свои названия? Приведите примеры названий созвездий.

3. По какому принципу строится шкала звёздных величин гиппарха? Что понимают под звёздной величиной?

4. В чём заключается сущность системы классификации звёзд по Байеру?

5. Опишите видимое суточное движение звёзд. По какой причине происходит наблюдаемое явление суточного движения звёзд?

6. Что понимают под небесной сферой? дайте определения основным точкам, линиям и плоскостям небесной сферы.

§ 3. небесные координаты

1. системы координат. Положение светил определяется по отношению к точкам и кругам небесной сферы (см. рис. 12). Для этого введены небесные координаты, подобные географическим координатам на поверхности Земли.

В астрономии применяется несколько систем координат. Отличаются они друг от друга тем, что строятся по отношению к разным кругам небесной сферы. Небесные координаты отсчитываются дугами больших кругов или центральными углами, охватывающими эти дуги.

Небесные координаты — центральные углы или дуги больших кругов небесной сферы, с помощью которых определяют положение светил по отношению к основным кругам и точкам небесной сферы.

Горизонтальная система координат. При астрономических наблюдениях удобно определять положение светил по отношению к горизонту. Горизонтальная система координат использует в качестве основного круга истинный горизонт. В этой системе координатами являются **высота** *(h)* и **азимут** *(A)*.

Высота светила — угловое расстояние светила *M* от истинного горизонта, измеренное вдоль вертикального круга (рис. 14). Высота определяется в градусах, минутах и секундах. Она отсчитывается в пределах от 0 до +90° к зениту, если светило находится в видимой части небесной сферы, и от 0 до –90° к надиру, если светило находится под горизонтом.

Для измерения азимутов за начало отсчёта принимается точка юга. **Азимут светила** — угловое расстояние, измеренное вдоль истинного горизонта, от точки юга до точки пересечения горизонта с вертикальным кругом, проходящим через светило *M* (см. рис. 14). Азимут отсчитывается к западу от точки юга в пределах от 0 до 360°.

Горизонтальная система координат используется при топографической съёмке, в навигации. Вследствие суточного вращения небесной сферы высота и азимут светила со временем изменяются. Следовательно,

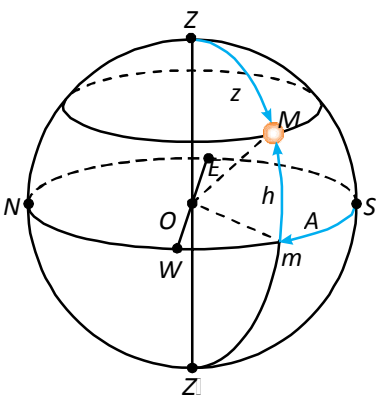


Рисунок 14 — Горизонтальная система координат: *h* — высота светила *M* над горизонтом; *z* — зенитное расстояние; *A* — азимут

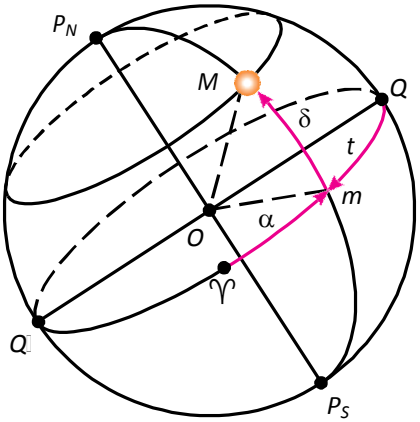


Рисунок 15 — Экваториальная система небесных координат:
δ — склонение светила *M*;
α — прямое восхождение;
***t* — часовой угол**

горизонтальные координаты имеют определённое значение только для известного момента времени.

Угловое расстояние от зенита до светила, измеренное вдоль вертикального круга, называется **зенитным расстоянием** *(z)*. Оно отсчитывается в пределах от 0 до +180° к надиру. Высота и зенитное расстояние связаны соотношением: $z + h = 90°$.

Экваториальная система координат. Для построения звёздных карт и составления звёздных каталогов за основной круг небесной сферы удобно принять круг небесного экватора (рис. 15). Небесные координаты, в системе которых основным кругом является небесный экватор, называются экваториальной системой координат. В этой системе координатами служат склонение (δ) и прямое восхождение (α).

Склонение светила — угловое расстояние светила *M* от небесного экватора, измеренное вдоль круга склонения. Склонение отсчитывается в пределах от 0 до +90° к Северному полюсу мира и от 0 до –90° к Южному полюсу мира.

За начальную точку отсчёта на небесном экваторе принимается точка весеннего равноденствия ♈, где Солнце бывает около 21 марта.

Прямое восхождение светила — угловое расстояние, измеренное вдоль небесного экватора, от точки весеннего равноденствия до точки пересечения небесного экватора с кругом склонения светила. Прямое восхождение отсчитывается в сторону, противоположную суточному вращению небесной сферы, в пределах от 0 до 360° в градусной мере или от 0 до 24 ч в часовой мере.

Для некоторых астрономических задач (связанных с измерением времени) вместо прямого восхождения (α) вводится часовой угол *(t)* (см. рис. 15). **Часовой угол** — это угловое расстояние, измеренное вдоль небесного экватора, от верхней точки небесного экватора до круга склонения светила. Отсчитывается часовой угол по направлению видимого суточного вращения небесной сферы, т. е. к западу, в пределах от 0 до 24 ч в часовой мере.

Координаты звёзд (α, δ) в экваториальной системе координат не связаны с суточным движением небесной сферы и изменяются очень медленно. Поэтому они применяются для составления звёздных карт и каталогов. **Звёздные карты** представляют собой проекции небесной сферы на плоскость с нанесёнными на неё объектами в определённой системе координат. Набор звёздных карт смежных участков неба, покрывающих всё небо или некоторую его часть, называется **звёздным атласом**. В специальных списках звёзд, называемых **звёздными каталогами**, указываются координаты их места на небесной сфере, звёздная величина и другие параметры. Например, каталог Hubble Guide Star Catalog (GSC) содержит почти 19 млн объектов.

2. лунно-солнечная прецессия. Ось вращения Земли наклонена к плоскости орбиты под углом 66°33′. Под воздействием притяжения Луны и Солнца из-за неоднородности распределения плотности массы внутри Земли ось описывает конус. Так как направление оси Земли изменяет- ся, то перпендикулярная ей плоскость экватора также будет смещаться, что приводит к перемещению точки весеннего равноденствия. Это явле-ние называется **лунно-солнечной прецессией**. Точка весеннего равноден- ствия перемещается навстречу видимому годичному движению Солнца на 50,3″ в год или на 1° в 71,6 года, совершая полный оборот по эклип- тике за 25 770 лет. Полюса мира также перемещаются среди звёзд. В настоящее время Северный полюс мира находится возле Полярной звезды, а через 10 тыс. лет он переместится к Веге (α Лиры).

3. высота полюса мира над горизонтом. Мы уже знаем, что Полярная звезда, находящаяся вблизи Северного полюса мира, остаётся почти на одной высоте над горизонтом на данной широте при суточном вращении звёздного неба. При перемещении наблюдателя с севера на юг, где географическая широта меньше, Полярная звезда опускается к горизонту, т. е. существует зависимость между высотой полюса мира и географической широтой места наблюдения.

На рисунке 16 земной шар и небесная сфера изображены в сечении плоскостью небесного меридиана места наблюдения.

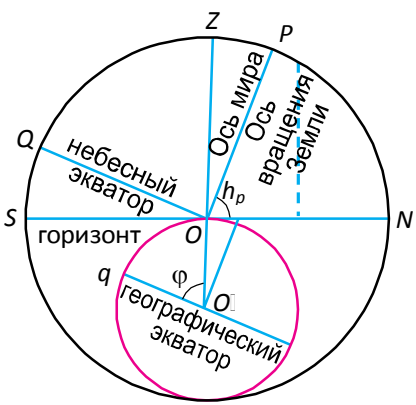


Рисунок 16 — Высота полюса мира над горизонтом

Наблюдатель из точки O видит полюс мира на высоте $\angle NOP = h_P$. Направление оси мира OP параллельно земной оси. Угол при центре Земли $\angle OO_1q$ соответствует географической широте места наблюдения φ. Так как радиус Земли в точке наблюдения перпендикулярен плоскости истинного горизонта, а ось мира перпендикулярна плоскости географического экватора, то $\angle NOP$ и $\angle OO_1q$ равны между собой как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Таким образом, *угловая высо- та полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения*:

$$h_P = \varphi. \qquad (1)$$

С другой стороны, из рисунка 16 следует, что $\angle QOZ$ определяет собой величину склонения зенита δ_Z. Поэтому можно записать, что

$$\varphi = \delta_Z, \text{ или } \varphi = h_P = \delta_Z. \qquad (2)$$

Равенство (2) характеризует зависимость между географической широтой места наблюдения и соответствующими горизонтальной и экваториальной координатами светила.

По мере перемещения наблюдателя к Северному полюсу Земли Северный полюс мира поднимается над горизонтом. На полюсе Земли полюс мира будет находиться в зените. Звёзды здесь движутся по кругам, параллельным горизонту, который совпадает с небесным экватором. Становится неопределённым небесный меридиан, теряют смысл точки севера, юга, востока и запада.

На средних географических широтах ось мира и небесный экватор наклонены к горизонту, суточные пути звёзд также наклонены к горизонту. Поэтому наблюдаются **восходящие** и **заходящие** звёзды.

Под **восходом** понимается явление пересечения светилом восточной части горизонта, а под **заходом** — западной части горизонта. В средних широтах, например на территории Республики Беларусь, наблюдаются звёзды северных околополярных созвездий, которые никогда не опускаются под горизонт. Они называются **незаходящими**. Звёзды, расположенные около Южного полюса мира, у нас никогда не восходят. Их называют **невосходящими**.

На экваторе Земли ось мира совпадает с полуденной линией, а полюсы мира — с точками севера и юга. Небесный экватор проходит через точки востока, запада, точки зенита и надира. Суточные пути всех

звёзд перпендикулярны горизонту, и каждая из них половину суток находится над горизонтом.

Главные выводы

1. Для определения положений небесных тел на небесной сфере используется система координат, аналогичная географической. На небесной сфере возможны только угловые измерения.

2. Угловая высота полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения.

3. Восход и заход светила — явления пересечения светилом горизонта.

4. Звёздные карты — проекции небесной сферы на плоскость с нанесёнными на неё объектами в определённой системе координат, а их набор — звёздные атласы.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие системы небесных координат вам известны? В чём заключается принципиальная разница между различными системами небесных координат?

2. дайте описание горизонтальной и экваториальной систем координат. Какие координаты используются в этих системах?

3. Почему в астрономии используют различные системы координат?

4. Определите высоту полюса мира над горизонтом в вашем населённом пункте.

5. Какие звёзды называют восходящими и заходящими, невосходящими и незаходящими?

6. Определите склонения звёзд, доступных наблюдению на широте вашего населённого пункта.

§ 4. определение географической широты

1. Кульминация светил. При суточном вращении вокруг оси мира светила два раза за сутки пересекают небесный меридиан. Явление прохождения светилом небесного меридиана называется **кульминацией**.

Различают верхнюю и нижнюю кульминации. В **верхней кульминации** светило при суточном движении находится в наивысшей точке над горизонтом, ближайшей к зениту. **Нижняя кульминация** происходит

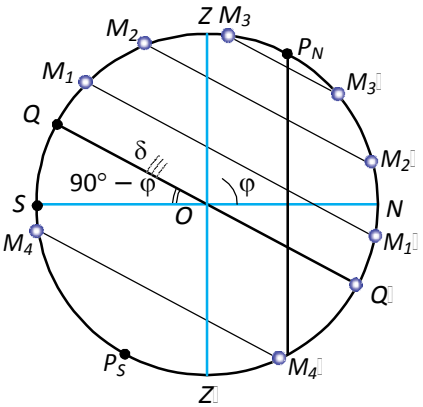


Рисунок 17 — Кульминация светил

через половину суток после верхней кульминации.

Точка пересечения суточной параллели светила с восточной частью истинного горизонта называется **точкой восхода светила**, а точка пересечения с западной частью истинного горизонта — **точкой захода светила**.

Для Солнца и Луны, имеющих заметные видимые размеры, восходом (или заходом) считается момент появления (или исчезновения) на горизонте верхней точки краядиска.

Незаходящие звёзды (рис. 17) видны в верхней (M_2, M_3) и нижней (M_2', M_3') кульминациях. У восходящих и заходящих звёзд нижняя кульминация (M_1') проходит под горизонтом. У невосходящих звёзд обе кульминации M_4 и M_4' невидимы, т. е. происходят под горизонтом.

Найдём высоты звёзд в верхней и нижней кульминациях.

Так как кульминация светил происходит при пересечении небесного меридиана, то плоскость рисунка 17 совпадает с плоскостью небесного меридиана. Суточные пути звёзд изображаются отрезками, параллельными небесному экватору QQ'. Пусть звезда находится в верхней кульминации M_1. Высота полюса мира равна географической широте φ. Как видно из рисунка, $\angle SOQ$ равен 90° – φ и представляет собой наклон небесного экватора к плоскости горизонта. Дуга SM_1 (или $\angle SOM_1$) — это высота светила над горизонтом. Эта дуга состоит из сумм двух дуг: $SM_1 = SQ + QM_1$. Как видно из рисунка, дуга SQ равна 90° – φ, а ду- га QM_1 определяется величиной склонения звезды δ. Получим формулу для определения высоты звезды в её верхней кульминации:

$$h_B = (90° - \varphi) + \delta. \qquad (1)$$

Для незаходящей звезды нижняя кульминация M_2' измеряется дугой NM_2' или соответствующим центральным углом ($\angle NOM_2'$). Указанный угол, как видно из рисунка, равен разности δ — склонения светила и ве- личины (90° – φ) — наклона небесного экватора к плоскости горизонта. Значит, высота звезды в нижней кульминации равна:

$$h_H = \delta - (90° - \varphi). \quad (2)$$

Если обе кульминации незаходящей звезды находятся по одну сторону от зенита (например, M_3 и M_3'), то её верхняя кульминация определяется из соотношения: $h_B = 180° - [(90° - \varphi) + \delta]$, или после упрощения:

$$h_B = 90° + \varphi - \delta. \quad (3)$$

Соотношения (1—3) связывают географическую широту с высотой и склонением звёзд во время их кульминации. Отметим, что на рисунке 17 азимуты звёзд в верхней кульминации M_1 и M_2 равны 0°, а азимуты звёзд в нижней кульминации M_1' и M_2' равны 180°. Азимуты звезды M_3 в верхней и нижней кульминациях равны 180°.

2. определение географической широты по астрономическим наблюдениям. При составлении географических и топографических карт, прокладке дорог и магистралей, разведке залежей полезных ископаемых и в ряде других случаев необходимо знать географические координаты местности. Эту задачу можно решить с помощью астрономических наблюдений. Рассмотрим простейшие способы.

Первый способ. Определить географическую широту можно из наблюдения Полярной звезды. Если считать, что Полярная звезда указывает Северный полюс мира, то приближенно высота Полярной звезды над горизонтом даёт нам географическую широту места наблюдения. Если измерить высоту Полярной звезды в верхней и нижней кульминациях, то получим более точное значение широты места наблюдения:

$$\varphi = \frac{h_H}{2} \quad (4)$$

Это равенство получаем из равенств (2) и (3). Формула (4) пригодна для всех незаходящих звёзд, у которых верхняя и нижняя кульминации находятся по одну сторону от зенита.

Второй способ. Определить географическую широту можно из наблюдения верхней кульминации звёзд. Из равенств (1) и (3) получим, что

$$\varphi = \delta \pm (90° - h_B). \quad (5)$$

Знак «+» ставится, если звезда кульминирует к югу от зенита, а знак «–» — при кульминации звезды к северу от зенита.

Главные выводы

1. Кульминация — это явление прохождения светила через небесный меридиан.

2. Географическую широту можно определить по наблюдениям как Полярной звезды, так и верхней кульминации звёзд.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое кульминация светила?

2. Какие точки называются точками восхода и захода светила?

3. найдите интервал склонений звёзд, которые на данной широте: а) никогда не восходят; б) никогда не заходят; в) могут восходить и заходить.

4. Как изменяются при суточном движении светила его высота, прямое восхождение, склонение?

5. Определите географическую широту места наблюдения, если звезда Вега проходит через точку зенита.

6. Как приближенно определить географическую широту места, наблюдая за Полярной звездой?

§ 5. измерение времени. определение географической долготы

1. измерение времени. Вся наша жизнь связана со временем и регулируется периодической сменой дня и ночи, а также времён года. На этих природных повторяющихся явлениях базируются основные единицы измерения времени — сутки, месяц, год. Широко используемая единица для измерения времени — сутки — связана с периодом вращения Земли вокруг своей оси.

Момент верхней кульминации центра Солнца называется **истинным полднем**, момент нижней кульминации — **истинной полночью**. Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями центра Солнца называется **истинными солнечными сутками**. Время, прошедшее от момента нижней кульминации центра солнечного диска до любого другого его положения на одном и том же географическом меридиане, называется **истинным солнечным временем** ($T_{\odot}$).

Необходимо отметить, что истинные солнечные сутки периодически меняют свою продолжительность. Это вызывается двумя причинами: во-первых, наклоном плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора, во-вторых, эллиптической формой орбиты Земли. Когда Земля находится на участке эллипса, расположенном ближе к Солнцу (на рис. 18 это положение показано слева), то она движется быстрее. Через полгода Земля окажется в противоположной части эллипса и будет перемещаться по орбите медленнее. Неравномерное движение Земли по своей орбите вызывает неравномерное видимое перемещение Солнца по небесной сфере, т. е. в разное время года Солнце перемещается с различной скоростью. Поэтому продолжительность истинных солнечных суток постоянно меняется и пользоваться ими в качестве единицы измерения времени неудобно. По этой причине в повседневной жизни используются не истинные, а средние солнечные сутки, продолжительность которых принята постоянной. Устанавливаются они по движению **среднего экваториального Солнца** — воображаемой точки, которая движется равномерно по небесному экватору и в точках весеннего и осеннего равноденствия совпадает с центром истинного Солнца. Верхнюю кульминацию среднего экваториального Солнца называют **средним полднем**, а промежуток времени между двумя последовательными средними полднями — **средними солнечными сутками**. Продолжительность их всегда одинакова. Средние солнечные сутки делят на 24 часа. Каждый час среднего солнечного времени в свою очередь делится на 60 минут, а каждая минута — на 60 секунд. За начало средних солнечных суток принимается **средняя полночь**, т. е. момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца. Время, протёкшее от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого его положения на одном и том же географическом меридиане, называется **средним солнечным временем** ($T_{ср}$).

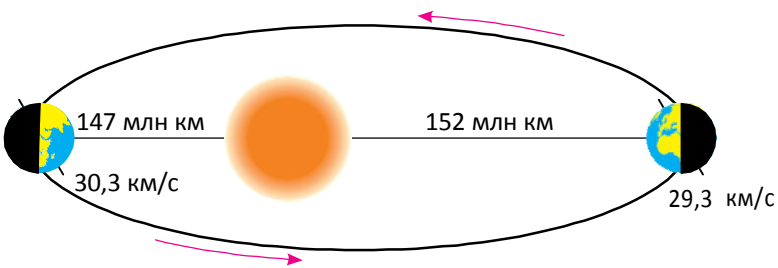


Рисунок 18 — Причины изменения длительности истинных солнечных суток

Разность между средним солнечным временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется **уравнением времени**. Оно обозначается греческой буквой η. Можно записать следующее равенство:

$$\eta = T_{ср} - T_{\odot}.$$

Величина уравнения времени η обычно приводится в астрономических календарях. Приблизительно её можно найти по графику (рис. 19), из которого видно, что четыре раза в год уравнение времени η равно нулю. Это происходит примерно 14 апреля, 14 июня, 2 сентября и 24 декабря. Уравнение времени η принимает наибольшие численные значения около 14 февраля (η = +14 мин) и 3 ноября (η = –16 мин).

Различают также **звёздные сутки** (около 23 ч 56 мин 4 с). Звёздные сутки равны промежутку времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями точки весеннего равноденствия. Момент верхней кульминации этой точки, принимаемый за начало звёздных суток, считается 0 часов звёздного времени. Время, протёкшее от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до любого другого её положения на одном и том же географическом меридиане, называется **звёздным временем**.

2. определение географической долготы. Измерение времени солнечными сутками связано с географическим меридианом. Время, измеренное на данном меридиане, называется **местным временем данного меридиана**, и оно одинаково для всех пунктов, находящихся на нём. Кульминация любой точки небесной сферы происходит в разное время

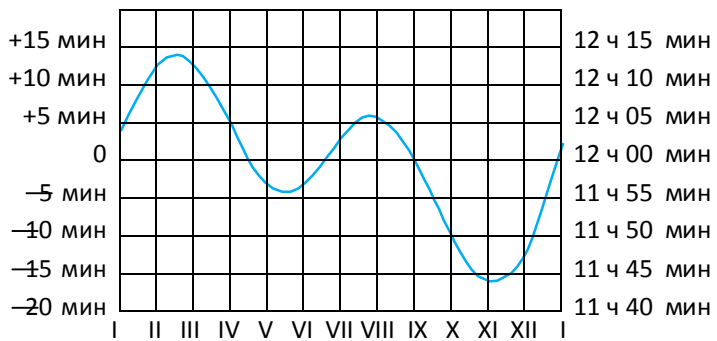


Рисунок 19 — График уравнения времени

на разных меридианах земного шара. Причём, чем восточнее земной меридиан, тем раньше в пунктах, лежащих на нём, происходит кульминация или начинаются сутки. Так как Земля за каждый час поворачивается на 15°, то разность времени двух пунктов в один час соответствует и разности долгот в 15° (в часовой мере 1 час). Отсюда можно сделать вывод: разность местного времени двух пунктов на Земле численно равна разности значений долготы, выраженных в часовой мере. Для пунктов земной поверхности, расположенных на географических долготах λ_1 и λ_2, получим:

$$T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (1)$$

За начальный (нулевой) меридиан для отсчёта географической долготы принят меридиан, проходящий через Гринвичскую обсерваторию близ Лондона. Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называется **всемирным временем**. Все сигналы точного времени соответствуют минутам и секундам всемирного времени. В астрономических календарях и ежегодниках моменты большинства явлений указываются по всемирному времени. Моменты этих явлений по местному времени какого-либо пункта легко определить, зная долготу этого пункта от Гринвича.

Если в данный момент на Гринвичском меридиане всемирное время будет T_0, то в местности с географической долготой λ будет T_λ. Следовательно, формула (1) при $\lambda_0 = 0$ примет вид:

$$\lambda = T_\lambda - T_0. \quad (2)$$

Данная формула позволяет находить географическую долготу по всемирному времени (T_0) и местному времени (T_λ), которое определяется из астрономических наблюдений.

С другой стороны, зная долготу места наблюдения (λ) и всемирное время (T_0), можно определить местное время (T_λ):

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

Различие между местным временем даже не очень далеко расположенных друг от друга населённых пунктов создаёт неудобства в повседневной жизни. Так, например, местное время в Бресте и Витебске отличается на 26 мин. Жители этих городов, приезжая друг к другу в гости, должны были бы постоянно переводить стрелки часов. Отсюда возникла

необходимость введения **поясной системы** счёта времени. Согласно этой системе, весь земной шар разделён на 24 часовых пояса, каждый из которых простирается по долготе на 15° (или 1 ч). Часовой пояс Гринвичского меридиана считается нулевым. Остальным поясам в направлении от нулевого на восток присвоены номера от 1 до 23. В пределах одного пояса во всех пунктах в каждый момент поясное время одинаково. В соседних поясах оно отличается ровно на один час. Границы поясов в малонаселённых местах, на морях и океанах проходят по меридианам, отстоящим на 7,5° к востоку и западу от центрального меридиана данного часового пояса. В остальных районах границы поясов для большего удобства проведены по государственным и административным границам, горным хребтам, рекам и другим естественным рубежам.

Зная всемирное время (T_0) и номер пояса данного места (n), можно найти поясное время:

$$T_n = T_0 + n. \qquad (3)$$

Исключив из формул (1) и (3) T_0, получим соотношение, позволяющее определять географическую долготу по поясному времени (T_n) и времени для местности с географической долготой λ (T_λ):

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda. \qquad (4)$$

В целях экономии и рационального распределения электроэнергии в течение суток на летний период в некоторых странах весной стрелки часов переводят на час вперёд — вводят **летнее время**, а осенью снова на час назад.

Существует граница, открывающая новую дату и день недели. Международная **линия перемены дат** проходит через Берингов пролив между островами Тихого океана от Северного полюса до Южного полюса (меридиан 180°).

Более надёжным и удобным временем считается **атомное время**, которое было введено Международным комитетом мер и весов в 1964 г. За эталон приняты атомные (квантовые) часы. По таким часам секунда — это промежуток времени, за который проходит 9 192 631 770 колебаний электромагнитной волны, излучаемой атомом цезия. С 1 января 1972 г. все страны земного шара ведут счёт времени по атомным часам.

Атомное время очень удобно для исследования Земли, потому что с его помощью можно изучать неравномерности во вращении нашей планеты. Ошибка хода атомных часов невелика — примерно 1 с за 50 тыс. лет.

3. Календарь. **Календарь** — это система счёта длительных промежутков времени, в основе которой лежат периодические астрономические явления: вращение Земли вокруг оси, изменение лунных фаз, обращение Земли вокруг Солнца. Любая календарная система опирается на три основные единицы измерения времени, а именно: средние солнечные сутки, синодический (или лунный) месяц и тропический (или солнечный) год.

Рисунок 20 — Антикитерский механизм

Синодический месяц — это промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны. Он равен 29,5306 суток. **Тропический год** — промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Он равен 365,2422 суток. Из-за медленного движения точки весеннего равноденствия навстречу Солнцу, вызванного прецессией, Солнце оказывается в той же точке неба относительно звёзд через промежуток времени на 20 мин 28 с больший, чем тропический год. Он называется **звёздным годом** и содержит 365,2564 средних солнечных суток.

Синодический месяц и тропический год не содержат целого числа средних солнечных суток, поэтому невозможно подобрать такое целое число тропических лет, в которых содержалось бы целое число синодических месяцев и целое число средних солнечных суток. Стремление согласовать между собой сутки, месяц и год привело к тому, что в разные эпохи у различных народов было создано много видов календарей, которые можно условно разделить на три типа: лунные, лунно-солнечные и солнечные. На рисунке 20 показано механическое приспособление, созданное древнегреческими астрономами во II в. до н. э. для расчёта движения Луны, Солнца и планет в календарных целях.

В **лунном календаре** год делится на 12 месяцев, содержащих попеременно 30 или 29 суток. Всего в лунном календаре 354 или 355 средних солнечных суток, т. е. он короче солнечного года примерно на 10 суток. Этот календарь получил широкое распространение в странах Ближнего Востока и принят в современном исламском мире. Из-за того что лунный год имеет меньше дней, чем тропический, у мусульман начало года постоянно перемещается по сезонам и выпадает то на весну, то на лето, то на зиму, то на осень.

Лунно-солнечные календари наиболее сложные. В них сумма некоторого количества лунных месяцев приблизительно соответствует продолжительности тропического года. В основе этих календарей лежит соотношение: 19 солнечных лет равны 235 лунным месяцам (с ошибкой около 2 ч). Год делится на 12 месяцев, каждый из которых начинается с новолуния. В настоящее время такая система сохранилась в еврейском календаре. Он содержит 12 или 13 месяцев в году. Продолжительность некоторых месяцев каждый год меняется, начало года всегда приходится на осень, но не совпадает с одной и той же датой григорианского календаря.

Римляне первоначально исчисляли время лунными годами. Новый год начинался 1 марта. До сих пор некоторые месяцы современного календаря называются в соответствии с этой традицией: сентябрь — «седьмой», декабрь — «десятый» и т. д. Впоследствии первый день года был перенесён римлянами на 1 января, так как с 153 г. до н. э. в этот день вступали в должность консулы (рис. 21).

Одним из первых **солнечных календарей** считается египетский, созданный в 4-м тыс. до н. э. По этому календарю год состоял из 12 месяцев по 30 дней в каждом, а в конце года добавлялось ещё 5 празднич-

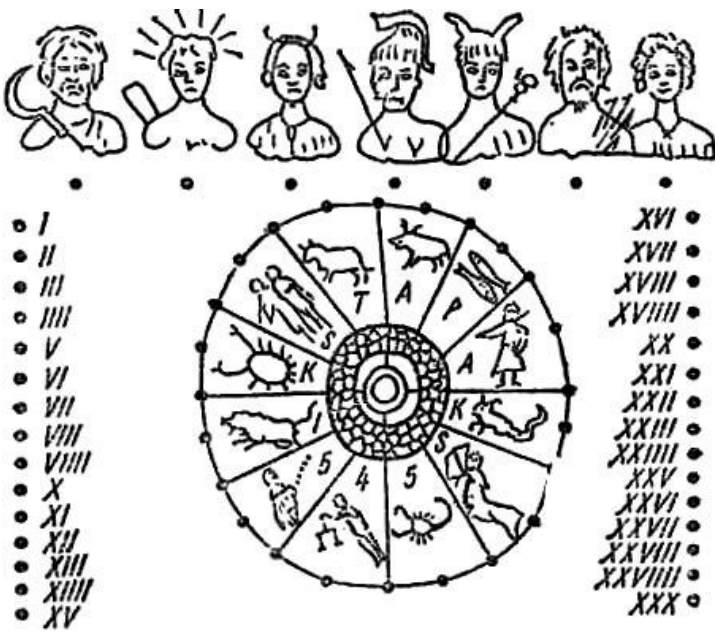


Рисунок 21 — Древний римский календарь

ных дней. Современный календарь берёт начало от солнечного римского календаря, появившегося в результате реформы Юлия Цезаря (отсюда его название — **юлианский**), проведённой 1 января 45 г. до н. э. Средняя продолжительность года, согласно этому календарю, была равна 365,25 суток, что соответствовало известной в то время длине тропического года. Для удобства три года подряд считали по 365 дней, а на четвёртый (високосный) добавляли лишние сутки — 366 дней. Год состоял из 12 месяцев: нечётные месяцы — 31 день, чётные — 30 дней; только февраль простого, невисокосного, года содержал 28 дней.

Вследствие того что продолжительность юлианского года длиннее тропического на 11 мин 15 с, за 128 лет накапливалась ошибка в целые сутки, а за 400 лет — около трёх суток. С течением времени календарь запаздывал всё больше и больше. Поэтому в конце XVI в. весеннее равноденствие наступало не 21, а 11 марта. Ошибка была исправлена в 1582 г., когда глава католической церкви папа Григорий XIII создал специальную комиссию по реформе календаря, передвинувшую счёт дней на 10 суток вперёд и вернувшую весеннее равноденствие на 21 марта. Исправленный календарь получил название **григорианского календаря** или **календаря нового стиля**. В честь его введения была отчеканена памятная медаль (рис. 22). Систему счёта времени по юлианскому календарю сейчас называют **старым стилем**.

Високосный год в григорианском календаре — каждый четвёртый, за исключением годов с целым числом столетий (например, 1700, 1800). Такой год считается високосным только тогда, когда число сотен делится на 4 без остатка.

Рисунок 22 — Медаль, выпущенная в память о введении григорианского календаря

В России этот календарь был введён со среды 31 января 1918 г. Следующий день уже был 14 февраля, так как к тому времени календарная разница между новым и старым стилем достигла 13 дней. Это различие в 13 суток будет сохраняться до 15 февраля 2100 г. по старому стилю, или до 28 февраля 2100 г. по новому стилю. После этой даты оно увеличится на одни сутки и станет равным 14 суткам.

Григорианский календарный год длиннее солнечного года на 26 с. Лишние сутки накопятся только в L в. н. э., потому что разница в один день набегает за 3280 лет.

Необходимо отметить, что и григорианский календарь не лишён недостатков: неодинаковая продолжительность месяцев, неравные кварталы, несогласованность чисел месяцев с днями недели.

Много вопросов вызывают и привычные названия месяцев. Так, июль назван в память о римском императоре Юлии Цезаре, август — в честь римского императора Октавиана Августа. Остальные месяцы календаря получили свои названия по-разному: например, январь — в честь римского бога Януса, февраль — в честь ежегодных языческих обрядов очищения, март — по имени бога Марса, май — богини Майи, июнь — богини Юноны. Названия «сентябрь», «октябрь», «ноябрь», «декабрь» переводятся с латинского языка соответственно как «седьмой», «восьмой», «девятый», «десятый» и в настоящее время не соответствуют этой нумерации.

Кроме счёта месяцев в годах, следует вести счёт и самим годам. Для этой цели издревле использовались эры, т. е. длительные промежутки счёта лет. **Эрой** называется исходный пункт каждого летоисчисления. У разных народов эры были разные и связывались с какими-либо знаменательными событиями или с годами правления царей и императоров.

В Риме использовалась эра от основания Рима (753 г. до н. э.) и счёт годов от назначения консулов. В средневековой Европе была распространена эра Диоклетиана, считавшаяся от восшествия на престол императора Диоклетиана (29 августа 284 г. н. э.). Она применялась до XV в.

В Древней Греции применялась эра Олимпиад (начало 776 г. до н. э.). Олимпиады проводились раз в четыре года.

Иудеи отсчитывают начало эры от сотворения мира — от 3761 г. до н. э.

Христиане использовали эру от сотворения мира, принимая начало в 5508 г. до н. э. Эру от Рождества Христова рассчитал папский архивариус Дионисий Малый в 525 г. Он приравнял 248 г. эры Диоклетиана к 532 г. от рождения Христа. Эра от Рождества Христова, или новая эра

(**наша эра**), частично начала применяться с X в., а повсеместно в католических странах — лишь с XV в. В России она была введена в 1700 г. указом Петра I, согласно которому после 31 декабря 7208 г. от сотворения мира наступило 1 января 1700 г.

Мусульмане всего мира используют свою эру, которая называется хиджра и ведёт счёт лет от даты переселения пророка Мухаммеда из Мекки в Медину, что произошло в сентябре 622 г. н. э.

Главные выводы

1. Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями центра солнечного диска на одном и том же географическом меридиане называется истинными солнечными сутками.

2. Из-за неравномерности истинных солнечных суток в повседневной жизни используются средние солнечные сутки, продолжительность которых постоянна.

3. Звёздные сутки — промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же географическом меридиане.

4. Географическая долгота данной местности определяется разностью между местным и всемирным временем.

5. Календарь — это система счёта длительных промежутков времени, в основе которой лежат периодические астрономические явления. Мы живём по григорианскому календарю.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются истинные солнечные сутки от средних солнечных суток?
2. Что называют звёздными сутками?
3. Что понимают под уравнением времени?
4. Что понимают под всемирным временем?
5. В 8 ч 00 мин гринвичского времени определили из наблюдений Солнца 10 ч 13 мин среднего солнечного времени. Какова географическая долгота места наблюдения?
6. найдите разницу в среднем солнечном времени для городов гродно и Могилёв.
7. Что понимают под линией перемены дат? где она проходит?
8. назовите календарные системы. на каких принципах они строятся?
9. В чём состоит отличие григорианского календаря от юлианского?
10. Почему нельзя создать абсолютно точный календарь?

раздел III

движение небесных тел

§ 6. Гелиоцентрическая система Коперника

1. видимое движение планет. В древности невооружённым глазом наблюдались 5 ярких светил, постоянно перемещающихся относительно неподвижных звёзд созвездий. Древние греки назвали эти светила **планетами** (греч. *planetes* означает блуждающий) и дали им собственные имена: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн.

Планеты всегда располагаются на небе недалеко от эклиптики, но в отличие от Солнца и Луны время от времени меняют направление своего движения. Они перемещаются между звёздами в основном с запада на восток (как Солнце и Луна), совершая **прямое движение**. Однако в определённое время движение планеты замедляется, и она начинает двигаться с востока на запад, совершая **попятное движение**. Затем возобновля-

Рисунок 23 — Видимое петлеобразное движение Марса. Составная фотография, полученная в течение нескольких месяцев

ется прямое движение. Исходя из этого, видимый путь каждой планеты на небосводе — сложная линия с петлями. Эта траектория к тому же меняется от цикла к циклу, в течение которого планета возвращается примерно на одно и то же место среди звёзд (рис. 23).

2. система мира Птолемея. Наиболее ранними из известных попыток построения системы мира принадлежат древним грекам — Анаксимандру, Эмпедоклу, Евдоксу и др.

Во II в. н. э. Клавдий Птолемей, используя наблюдения и идеи своих предшественников, а также собственные, разработал **геоцентрическую систему мира**, позволявшую вычислять положения планет относительно звёзд на будущее время и предсказывать наступление солнечных и лунных затмений. Птолемей создал модель, используя общепринятую в античности идею, что все светила движутся вокруг неподвижной Земли, которая является центром мироздания и имеет шарообразную форму. Для объяснения сложного петлеобразного движения планет Птолемей ввёл комбинацию двух равномерных круговых движений: движение самой планеты по малой окружности (эпицикл) и обращение центра этой окружности вокруг Земли (деферент). При комбинации двух круговых движений получалась эпициклоида, по которой двигалась планета (Р), — рисунок 24.

По мере накопления наблюдений о движениях планет теория Птолемея всё больше усложнялась (вводились дополнительные круги с различными радиусами, наклонами, скоростями и т. п.), что вскоре сделало её слишком громоздкой и неудобной.

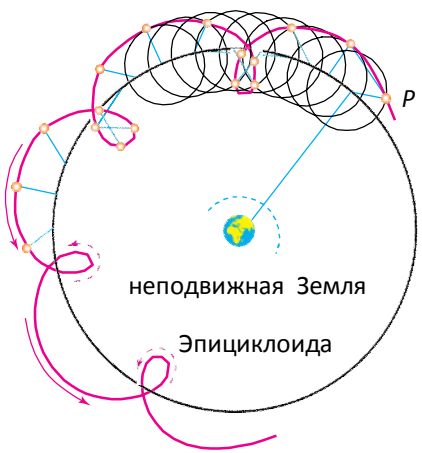


Рисунок 24 — Траектория планеты по модели Птолемея

3. система мира Коперника. В XVI в. польский учёный Николай Коперник, отбросив догматическое представление о неподвижности Земли, поставил её в число рядовых планет. Коперник указал, что Земля, занимая третье место от Солнца, так же, как и другие планеты, движется в пространстве вокруг Солнца и одновременно вращается вокруг своей оси. **Гелиоцентрическая система** Коперника очень просто объясняла петлеобразное движение планет. На рисунке 25 показано движение Марса

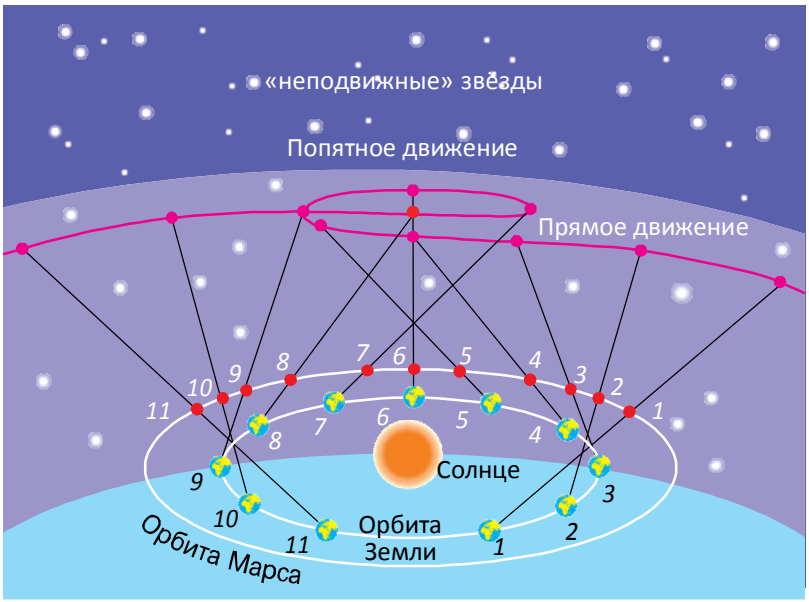


Рисунок 25 — Объяснение петлеобразного движения планет исходя из учения Коперника

на небесной сфере, наблюдаемое с Земли. Одинаковыми цифрами отмечены положения Марса, Земли и точек траектории Марса на небосводе в одни и те же моменты времени.

Геоцентрическая система Птолемея не позволяла измерить расстояние до планет. Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность рассчитать пропорции Солнечной системы, пользуясь радиусом земной орбиты как астрономической единицей длины.

Главный научный труд Коперника «Об обращениях небесных сфер», на написание шести книг которого было потрачено более 20 лет, был опубликован в 1543 г., незадолго до смерти учёного. Революционность труда Коперника состоит в том, что в нём новый взгляд на строение Солнечной системы неразрывно связан с вопросом о положении Земли во Вселенной. Простота и стройность системы строения мира, изложенной Коперником, быстро нашла сторонников. Учение Коперника освободило науку от устаревших и схоластических традиций, тормозивших её развитие. Однако сам великий астроном оставался в плену некоторых предубеждений. Например, Коперник так и не смог отказаться от представления, что планеты движутся равномерно по круговым орби-

там. Поэтому его модель Вселенной также содержала множество сфер — эпициклов и деферентов.

Великий итальянский учёный Галилео Галилей подтвердил учение Коперника своими открытиями, сделанными при помощи телескопа.

Иоганн Кеплер развил учение Коперника, открыв законы движения планет, и доказал на основе фактов, что планеты движутся по эллипсам и неравномерно.

Исаак Ньютон опубликовал в 1687 г. открытый им закон всемирного тяготения, который позволил выразить теорию движения планет в виде формул и отказаться навсегда от громоздких геометрических построений.

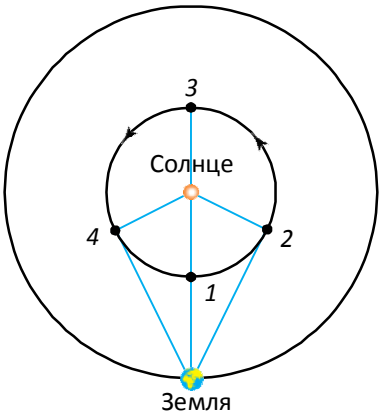


Рисунок 26 — Схема конфигураций нижних планет: *1* — нижнее соединение; *2* — наибольшая западная элонгация; *3* — верхнее соединение; *4* — наибольшая восточная элонгация

4. Конфигурации и условия видимости планет. Под **конфигурациями** планет понимают характерные взаимные расположения планет, Земли и Солнца. Конфигурации различны для **нижних** планет (орбиты которых находятся к Солнцу ближе, чем орбита Земли) и **верхних** планет (орбиты которых расположены за орбитой Земли).

Для нижних планет выделяют **соединения** и **элонгации** (видимое угловое расстояние планеты от Солнца) (рис. 26).

В нижнем соединении планета ближе всего к Земле, а в верхнем — дальше всего от неё. При элонгациях угол между направлениями с Земли на Солнце и на нижнюю планету, не превышая какой-то определённой величины, остаётся острым. Из-за эллиптичности планетных орбит наибольшие элонгации не имеют постоянного значения. У Венеры они заключены в пределах от 45 до 48°, а у Меркурия — от 18 до 28°. Обе планеты не отходят далеко от Солнца и поэтому ночью не видны. Продолжительность их утренней или вечерней видимости не превышает четырёх часов для Венеры и полутора часов для Меркурия. Меркурий иногда совсем не виден, так как восходит и заходит в светлое время суток.

Различают восточную и западную элонгации. В восточной элонгации планета наблюдается вечером после захода Солнца, а в западной — утром перед восходом Солнца.

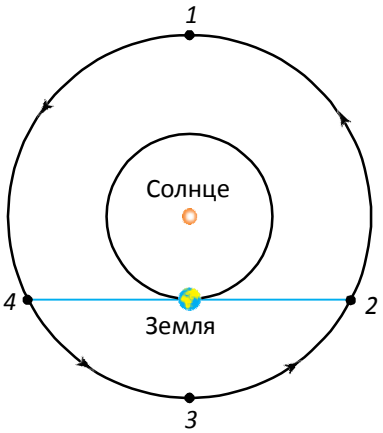


Рисунок 27 — Схема конфигураций верхних планет:
***1* — соединение;**
***2* — западная квадратура;**
***3* — противостояние;**
***4* — восточная квадратура**

Для верхних планет (рис. 27) характерны другие конфигурации.

Если Земля оказывается между планетой и Солнцем, то такая конфигурация называется **противостоянием**. Эта конфигурация наиболее благоприятна для наблюдений планеты, так как в это время планета находится ближе всего к Земле, повёрнута к ней своим освещённым полушарием и, находясь на небе в противоположном Солнцу месте, бывает в верхней кульминации около полуночи. В соединении планета наиболее удалена от Земли и не наблюдается, так как теряется в лучах Солнца.

Если угол между направлениями с Земли на верхнюю планету и на Солнце составляет 90°, то говорят, что планета находится в **квадратуре**. Различают западную и восточную квадратуры. В конфигурации западной квадратуры планета восходит около полуночи, а в восточной — заходит около полуночи. Моменты конфигураций планет и условия их видимости ежегодно публикуются в астрономических справочниках и календарях.

5. сидерические и синодические периоды обращения планет. Промежуток времени, в течение которого планета совершает полный оборот вокруг Солнца по орбите относительно звёзд, называется **звёздным** или **сидерическим периодом обращения планеты**.

Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными конфигурациями планет называется **синодическим периодом** (греч. *synodos* — собрание, соединение) **обращения планеты**. Он отличается от звёздного периода.

Установим взаимосвязь синодического и сидерического периодов обращения планет.

Пусть T — сидерический период обращения планеты, а T_0 — сидерический период обращения Земли; S — синодический период обращения планеты. Среднее значение дуги, которую проходит плане-

та за одни сутки, называется средним движением (n) и будет равно $n = \frac{360°}{T}$, а среднее движение Земли — $n_0 = \frac{360°}{T_0}$.

У нижних планет $T < T_0$ и $n > n_0$. Одноимённые соединения таких планет (например, нижние соединения на рис. 28) наступают через синодический период обращения S, за который Земля проходит дугу

$$L = n_0 \cdot S = \frac{360}{T_0} \cdot S \qquad (1)$$

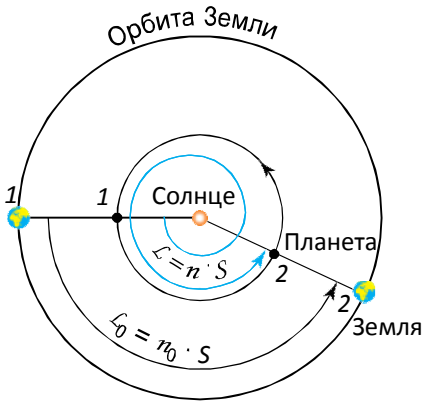


Рисунок 28 — Синодический период последовательных нижних соединений (*1* и *2*) нижней планеты

а планета, забегая вперёд, совершает один оборот вокруг Солнца и догоняет Землю, проходя угловой путь $L = 360° + L_0$, равный

$$L = n \cdot S = \frac{360}{T} \cdot S. \qquad (2)$$

Подставляя в равенство $360° = L - L_0$ значения L и L_0, получим уравнение синодического движения для нижних планет:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \qquad (3)$$

Для верхних планет уравнение синодического движения примет вид:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \qquad (4)$$

так как $T > T_0$ и $n < n_0$.

Уравнения (3) и (4) дают средние значения синодических периодов обращения планет. С помощью этих уравнений по наблюдаемому синодическому периоду обращения планеты легко подсчитать сидерический период её обращения вокруг Солнца.

Главные выводы

1. Гелиоцентрическая система мира — модель Солнечной системы, согласно которой Земля, как и другие планеты, обращается вокруг Солнца и, кроме того, вращается вокруг своей оси.

2. Характерные взаимные положения планет относительно Солнца и Земли на небесной сфере называются конфигурациями планет.

3. По отношению к Земле Меркурий и Венера — нижние планеты, остальные — верхние. Наиболее удобно наблюдать нижние планеты вблизи наибольшей элонгации, а верхние — вблизи противостояния.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются прямое и попятное движения планет?

2. Как, исходя из гелиоцентрической системы мира, объясняется петлеобразное движение планет?

3. Что понимают под конфигурациями планет? Опишите их.

4. дайте определения синодическому и сидерическому периодам обращения планеты. В чём состоит их отличие?

5. Звёздный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния?

6. Какова должна быть продолжительность сидерического и синодического периодов обращения планеты в случае их равенства?

§ 7. видимое движение солнца и луны. Затмения

1. видимое годичное движение солнца. По непрерывно изменяющимся координатам Солнца δ и α на небесной сфере можно отметить большой круг, представляющий видимый путь центра солнечного диска в течение года. Этот круг древние греки назвали эклиптикой. Поскольку годичное движение Солнца отражает реальное обращение Земли по орбите, эклиптика является следом от сечения небесной сферы плоскостью, параллельной плоскости земной орбиты. Эта плоскость называется **плоскостью эклиптики**.

Кроме двух точек равноденствия, о которых мы уже говорили в § 2, на эклиптике выделяются две промежуточные между ними и противо-

положные друг другу точки, в которых склонение Солнца бывает наибольшим и наименьшим. В **точке летнего солнцестояния** Солнце имеет максимальное склонение $\delta = +23°26'$ (около 22 июня). В **точке зимнего солнцестояния** Солнце имеет минимальное склонение $\delta = -23°26'$ (око- ло 22 декабря).

Созвездия, через которые проходит эклиптика, называются **эклиптическими созвездиями**. В Древнем Междуречье возникло разделение эклиптики с окружающими её созвездиями на 12 частей. Этот пояс был назван **Поясом Зодиака** (греч. *zodiakos* — животное). Первоначально зодиакальные знаки и эклиптические созвездия совпадали, так как точных границ созвездий не было. Позднее, в эпоху эллинизма, сложилось представление о знаках зодиака как о 12 равных частях эклиптики, занимающих на небе по 30° дуги. Начало отсчёта знаков установлено от точки весеннего равноденствия ♈. В настоящее время зодиакальные знаки и эклиптические созвездия не совпадают. Эклиптических созвездий 13. Из них 12 (см. табл. 1) совпадают по названиям с зодиакальными знаками. Созвездие Змееносца, являясь эклиптическим, не входит в число знаков зодиака. Эклиптика, проходя через созвездия, имеет в каждом из них участки не равной длины. К тому же, точка весеннего равноденствия из-за прецессии постоянно перемещается. Поэтому зодиакальный знак Овна сейчас находится в созвездии Рыб.

Таблица 1 — Зодиакальные созвездия, их знаки и время нахождения Солнца в знаках зодиака

♈ — Овен (20 марта — 19 апреля)	♎ — Весы (22 сентября — 22 октября)
♉ — Телец (20 апреля — 20 мая)	♏ — Скорпион (23 октября — 21 ноября)
♊ — Близнецы (21 мая — 20 июня)	♐ — Стрелец (22 ноября — 20 декабря)
♋ — Рак (21 июня — 22 июля)	♑ — Козерог (21 декабря — 19 января)
♌ — Лев (23 июля — 21 августа)	♒ — Водолей (20 января — 18 февраля)
♍ — Дева (22 августа — 21 сентября)	♓ — Рыбы (19 февраля — 19 марта)

2. суточное движение солнца на различных широтах. В § 2 мы уже вели речь о годичном движении Солнца среди звёзд по воображаемой линии, называемой эклиптикой. Всю эклиптику (360°) Солнце проходит за один год, однако это движение кажущееся, так как происходит вследствие обращения Земли вокруг Солнца.

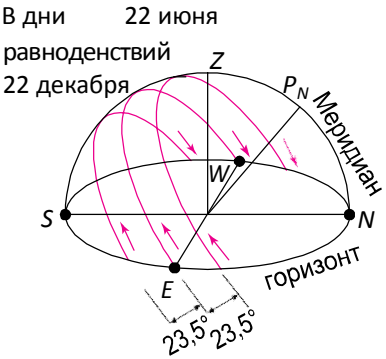


Рисунок 29 — Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях в средних географических широтах

Рассмотрим суточное движение Солнца на различных широтах.

В средних широтах Солнце восходит всегда в восточной стороне неба, постепенно поднимается над горизонтом, в полдень достигает наивысшего положения на небе, затем начинает опускаться к горизонту и заходит в западной части неба. В Северном полушарии это движение происходит слева направо, а в Южном — справа налево. Наблюдатель в Северном полушарии Земли при этом будет видеть Солнце на юге, а находящийся в Южном полушарии — на севере. Дневной путь Солнца на небе симметричен относительно направления север — юг.

За полярным кругом на Земле, где $\varphi > 66{,}5°$, суточный путь Солнца почти параллелен горизонту. На самом полюсе Солнце в течение полугода не заходит, описывая круги над горизонтом. Это полярный день. Затем на полгода Солнце заходит и наступает полярная ночь. На экваторе продолжительность дня всегда равна продолжительности ночи и Солнце, как и другие светила, восходит и заходит перпендикулярно плоскости истинного горизонта.

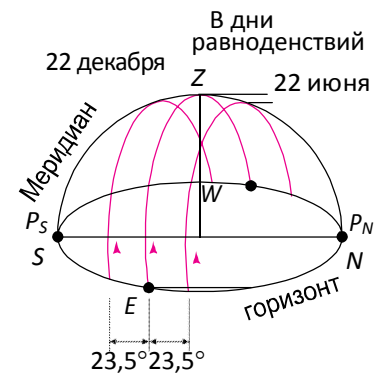


Рисунок 30 — Суточные пути Солнца над горизонтом в разные времена года при наблюдениях на экваторе Земли

3. изменение суточного пути солнца в течение года. Изменение суточного пути Солнца над горизонтом в разные времена года для средних географических широт Северного полушария показано на рисунке 29. Определяя в течение года высоту Солнца в полдень, можно заметить, что дважды в году оно бывает на небесном экваторе. Это происходит в дни весеннего (около 21 марта) и осеннего (около 23 сентября) равноденствий. Плоскость горизонта делит небесный экватор пополам. Поэтому в дни равноденствий пути Солнца над горизонтом и под горизонтом равны; соответственно, продолжительность дня и ночи одинакова. Самый короткий день выпадает на 22 декабря, а самый длинный — на 22 июня.

Для наблюдателей, находящихся на земном экваторе, суточные пути Солнца над горизонтом в течение года показаны на рисунке 30.

4. видимое движение и фазы луны. Луна — естественный спутник Земли. Это ближайшее к Земле небесное тело, которое светит отражённым солнечным светом. Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите в ту же сторону, в какую Земля вращается вокруг своей оси. Поэтому мы видим Луну перемещающейся среди звёзд навстречу вращению неба.

Направление движения Луны всегда одно и то же — с запада на восток. Для наблюдателя с Земли за сутки Луна перемещается на 13,2°.

Полный оборот по орбите вокруг Земли Луна совершает за 27,3 суток (**сидерический месяц**). И за такое же время она делает один оборот вокруг своей оси, поэтому к Земле всегда обращено одно и то же полушарие Луны.

Движение Луны вокруг Земли очень сложное, и его изучение составляет одну из труднейших задач небесной механики. Видимое движение Луны сопровождается непрерывным изменением её вида — сменой фаз. Различные формы видимой освещённой части Луны называются её **фазой**. Смена фаз Луны обусловлена переменами в условиях освещения Солнцем Луны при её движении по орбите (рис. 31).

Рассмотрим основные фазы Луны, начиная с **новолуния**. Эта фаза наступает, когда Луна проходит между Солнцем и Землёй и обращена к нам своей тёмной стороной (см. рис. 31, *положение 1*). Луна совсем не видна с Земли.

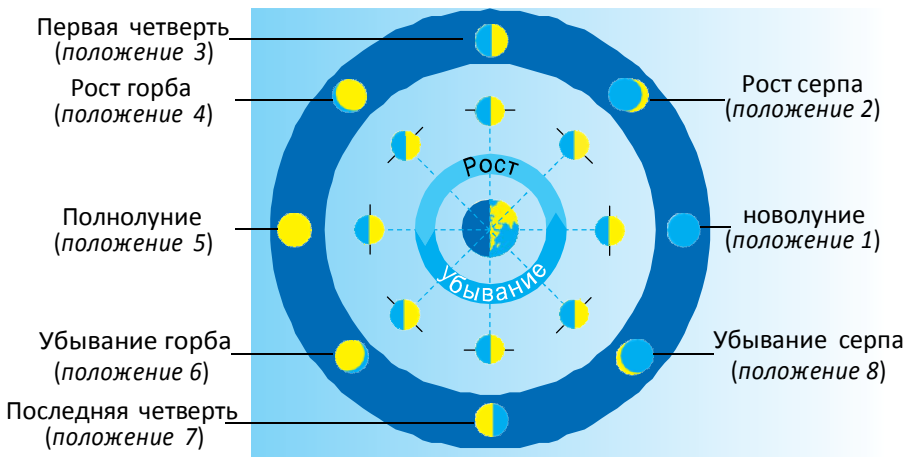


Рисунок 31 — Смена лунных фаз

Спустя один-два дня в западной части неба появляется и продолжает расти узкий яркий серп «молодой» Луны (*положение 2*). Иногда на фоне неба заметна (благодаря тусклому сероватому свечению — так называемому **пепельному свету** Луны) и остальная часть лунного диска. Явление пепельного света объясняется тем, что лунный серп освещается непосредственно Солнцем, а остальная лунная поверхность — рассеянным солнечным светом, отражённым Землёй. Спустя 7 суток уже будет видна вся правая половина лунного диска — наступает **фаза первой четверти** (*положение 3*). В этой фазе Луна восходит днём, к вечеру видна в южной области неба и заходит ночью. Далее фаза увеличивается (*положение 4*), и через 14—15 суток после новолуния Луна приходит в противостояние с Солнцем (*положение 5*). Её фаза становится полной, наступает **полнолуние**. Солнечные лучи освещают всё лунное полушарие, обращённое к Земле. Полная Луна восходит при заходе Солнца, заходит при его восходе, а в середине ночи видна в южной стороне неба.

После полнолуния Луна постепенно приближается к Солнцу с запада и освещается им слева (*положение 6*). Примерно через неделю наступает фаза **третьей**, или **последней, четверти** (*положение 7*). При этом Луна восходит около полуночи, к восходу Солнца оказывается в южной стороне неба и заходит днём. При дальнейшем сближении спутника Земли с Солнцем убывающие фазы Луны становятся серповидными (*положение 8*). Луна видна только под утро, незадолго до восхода Солнца, а заходит в светлое время суток, перед заходом Солнца. Узкий серп Луны на этот раз выпуклостью обращён к востоку. Затем снова наступает новолуние, и Луна перестаёт быть видимой на небе.

От одного новолуния до следующего проходит около 29,5 суток. Этот период смены лунных фаз называют **синодическим месяцем**.

5. солнечные и лунные затмения. В своём движении Луна часто заслоняет (или, как говорят астрономы, покрывает) звёзды зодиакальных созвездий. Значительно реже происходят покрытия Луной планет и Солнца. Покрытие Солнца Луной называется **солнечным затмением**.

Солнечное затмение имеет различный вид для разных точек земной поверхности. Так как диаметр Луны в 400 раз меньше диаметра Солнца и Луна примерно в 400 раз находится ближе к Земле, то на небе Солнце и Луна кажутся дисками одинакового размера. Поэтому при полном солнечном затмении Луна может целиком покрыть яркую

поверхность Солнца, оставляя при этом открытой солнечную атмосферу (см. рис. 118, с. 143).

Рассмотрим схему полного солнечного затмения (рис. 32). Проходя между Солнцем и Землёй, маленькая по размерам Луна не может полностью затенить Землю. Диск Солнца будет целиком закрыт только для наблюдателя А, находящегося внутри конуса лунной тени, максимальный диаметр которой на поверхности Земли не превышает 270 км. Только отсюда, с этой сравнительно узкой области земной поверхности, куда падает тень от Луны, будет видно **полное солнечное затмение**. Там же, куда падает полутень от Луны, внутри так называемого конуса лунной полутени, будет видно (для наблюдателей В и С) **частное солнечное затмени**е.

Если в момент затмения Луна, перемещаясь по своей эллиптической орбите, будет находиться на значительном удалении от Земли, то видимый диск Луны окажется слишком малым, чтобы полностью покрыть

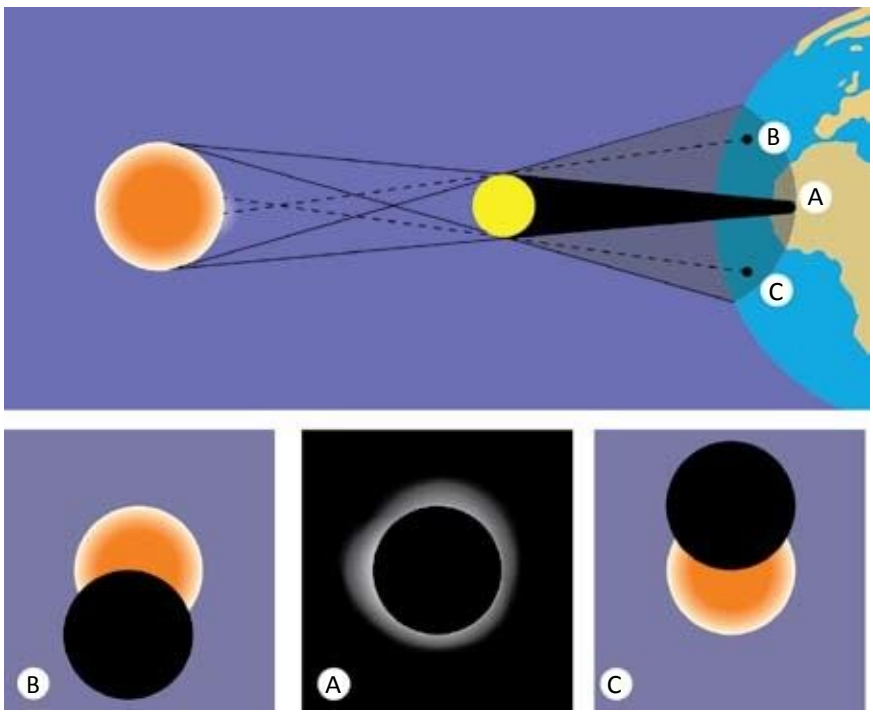


Рисунок 32 — Схема полного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

Солнце. Тогда наблюдатель А (рис. 33) сможет видеть вокруг тёмного диска Луны сияющий ободок солнечного диска. Это **кольцеобразное затмение**. Для наблюдателей В и С такое солнечное затмение будет частным.

За пределами лунной полутени затмения вообще не наблюдаются. Солнечное затмение видно не на всей поверхности Земли, а только там, где пробегают тень и полутень Луны. Путь лунной тени по земной поверхности называется **полосой полного солнечного затмения**.

Лунные затмения происходят тогда, когда Луна попадает в земную тень, которая также имеет форму конуса и окружена полутенью (рис. 34). При частичном погружении Луны в земную тень лунное затмение называется **частным теневым**, а при полном погружении — **полным теневым затмением**. Так как земная тень направлена в сторону, противоположную Солнцу, Луна может пройти сквозь неё только в полнолуние. Луна

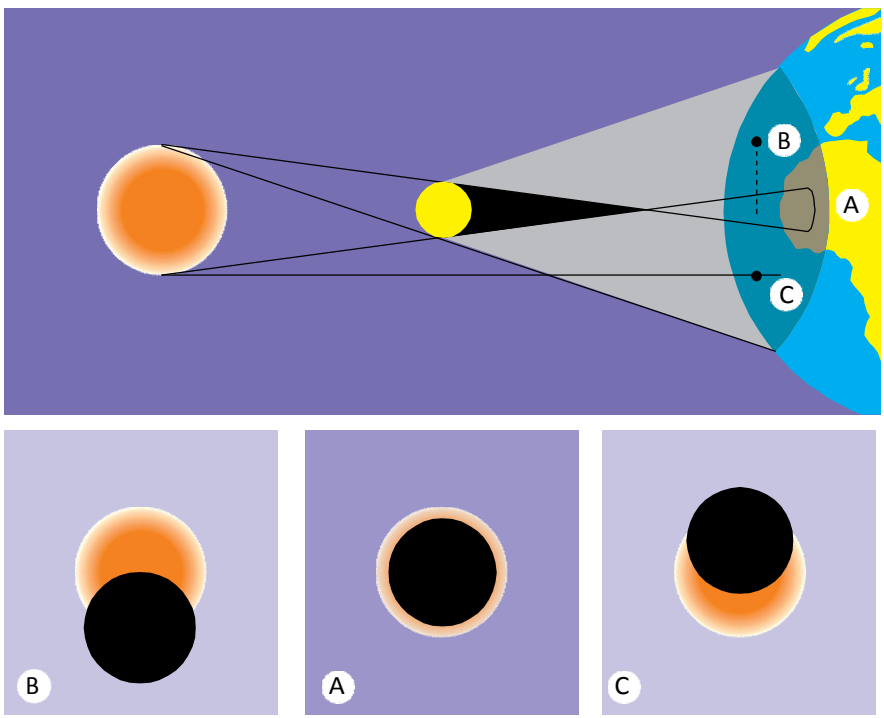


Рисунок 33 — Схема кольцеобразного солнечного затмения (для наблюдателей А, В, С)

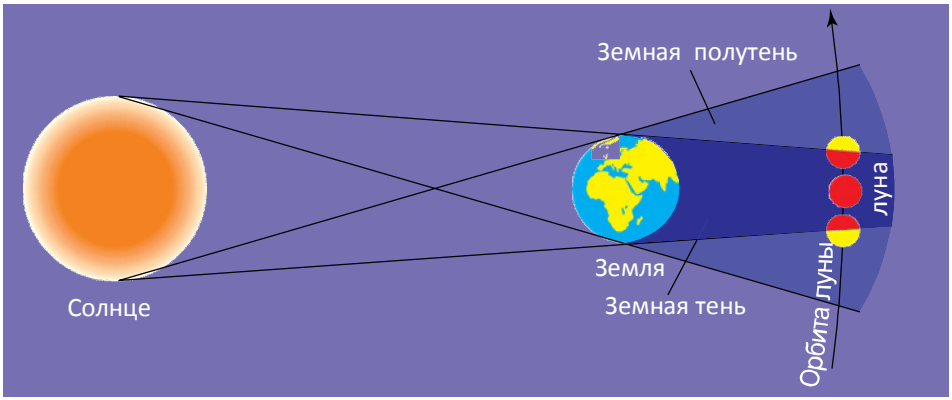


Рисунок 34 — Схема лунного затмения

постепенно погружается в земную тень своим левым краем. При полном затмении она становится бурого или тёмно-красного цвета (рис. 35), поскольку солнечный свет, преломляясь в земной атмосфере, освещает Луну преимущественно красными лучами, которые менее всего рассеиваются и ослабляются земной атмосферой.

Ежегодно происходит от двух до пяти солнечных затмений. В среднем в одном и том же месте Земли полное солнечное затмение можно наблюдать чрезвычайно редко — лишь раз в 200—300 лет, а продолжительность полного солнечного затмения не превышает 7 мин 31 с. Поэтому астрономы тщательно готовятся к наблюдениям затмения, чтобы в течение очень короткого времени успеть изучить внешние разреженные оболочки Солнца.

Как правило, ежегодно происходит одно-два лунных затмения, но выдаются годы, когда затмений совсем не бывает. Лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли, где в это время Луна находится над горизонтом. Поэтому в каждой данной местности они наблюдаются чаще солнечных затмений, хотя происходят примерно в 1,5 раза реже. Максимальная продолжительность лунного затмения достигает 1 ч 47 мин.

Рисунок 35 — Вид Луны при полном лунном затмении

Ещё в VI в. до н. э. было установлено, что примерно через 18 лет и 11,3 суток все затмения будут повторяться в одной и той же последовательности. Этот период между затмениями назвали **саросом** (греч. *saros*— период, повторение).

Во время сароса в среднем происходит 70—71 затмение, из которых 42—43 — солнечных (14 — полных, 13—14 — кольцеобразных и 15 — частных) и 28 — лунных.

Почему солнечные и лунные затмения бывают не каждый месяц? С чем связано явление сароса? Казалось бы (см. рис. 32—34), затмения должны происходить при каждом обороте Луны вокруг Земли. На самом деле такого не случается, так как плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики, а наклонена под углом 5°09′. Поэтому Луна во время новолуния или полнолуния может находиться далеко от плоскости эклиптики, и тогда её диск (диаметром 0,5°) пройдёт выше или ниже диска Солнца или конуса тени Земли. Затмения же наступают только тогда, когда Луна находится вблизи точек пересечения лунной орбиты с эклиптикой (рис. 36). Видно, что в новолуние тень Луны не всегда падает на Землю.

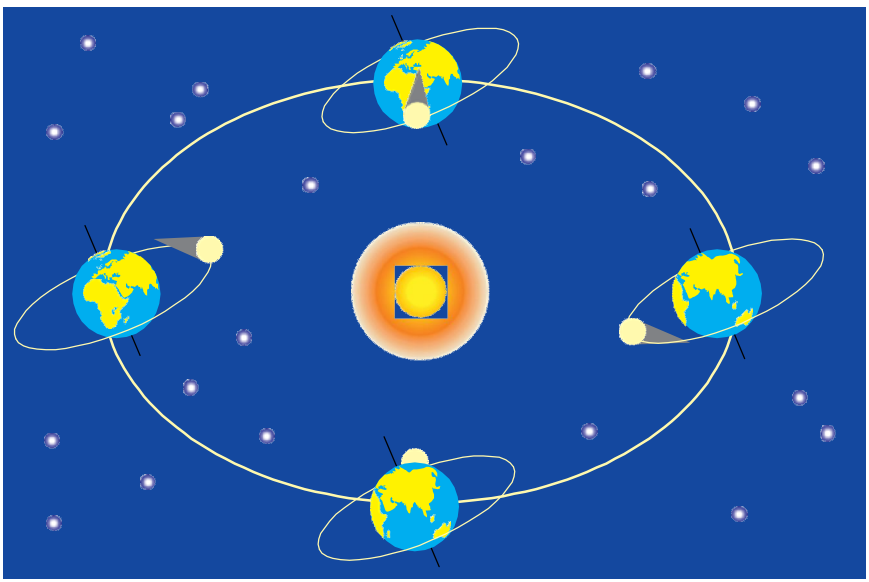


Рисунок 36 — Плоскость лунной орбиты не совпадает с плоскостью эклиптики

Главные выводы

1. На эклиптике выделяют четыре основные точки: весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

2. Суточные пути Солнца в течение года зависят от географической широты места наблюдения.

3. Освещённая часть лунного диска (лунная фаза) зависит от взаимного расположения Солнца и Луны для наблюдателя с Земли.

4. Явление покрытия Луной Солнца называется солнечным затмением.

5. Явление прохождения Луны через земную тень называется лунным затмением.

6. Промежуток времени (сарос), через который в определённом порядке повторяются солнечные и лунные затмения, равен 18 годам и 11,3 суток.

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы особенности суточного движения Солнца на различных широтах?
2. Может ли Солнце наблюдаться в зените в Беларуси? Почему?
3. Почему луна обращена к Земле всегда одной и той же своей стороной?
4. В чём состоит отличие сидерического и синодического месяцев? Чем обусловлена их различная продолжительность?
5. Что понимают под лунной фазой? Опишите фазы луны.
6. Серп луны обращён выпуклостью вправо и близок к горизонту. В какой стороне горизонта он находится?
7. Почему происходят солнечные и лунные затмения?
8. Охарактеризуйте полные, частные и кольцеобразные солнечные затмения.
9. Как отличить фазу затмения луны от одной из её обычных фаз?
10. Почему солнечные затмения происходят не каждое новолуние, а лунные — не каждое полнолуние?
11. Что такое сарос? Какова его периодичность?

§ 8. Законы Кеплера

1. Первый закон Кеплера. До конца XVI в. учёным не удавалось точно рассчитать относительное положение планет на несколько лет вперёд с помощью существовавших в то время теорий. Теоретические выкладки давали заметное расхождение с результатами наблюдений. Причина состояла

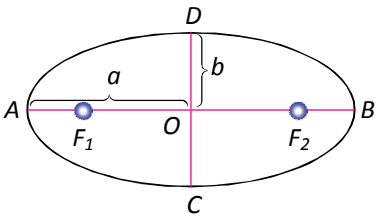


Рисунок 37 — Элементы эллипса

в ошибочном предположении, что планеты равномерно движутся по строго круговым орбитам вокруг Солнца. Кинематические законы движения планет были открыты лишь в начале XVII в. австрийским астрономом и математиком Иоганном Кеплером. Он впервые разрушил укоренившийся пифагорейский предрассудок о «совершенности» орбит планет, показав их эллиптичность.

Кеплер установил, что *планеты обращаются по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.* Данная закономерность получила название **первого закона Кеплера**.

Отрезок AB (рис. 37) называется **большой осью**, а отрезок CD — **малой осью** эллипса. Отрезки $AO = OB = a$, $CO = OD = b$ называются соответственно **большой** и **малой полуосями** эллипса. Отношение

$$\frac{OF}{\quad}\quad\frac{\quad}{2} \qquad (1)$$

называется **эксцентриситетом** эллипса. Чем больше эксцентриситет эллипса, тем больше смещены фокусы по отношению к центру и тем больше будет разность между большой и малой полуосями. То есть эксцентриситет служит мерой «сплюснутости» эллипса.

Для эллипса $0 < e < 1$. Отметим, что при $e = 0$ можно рассматривать окружность как частный вид эллипса ($b = a$).

Допустим, что если Солнце находится в фокусе F_1, то ближайшую к Солнцу точку (A) орбиты планеты называют **перигелием**, а наиболее удалённую (B) — **афелием**. Обозначим $AF_1 = q$ (q — **перигелийное расстояние**), а $BF_1 = Q$ (Q — **афелийное расстояние**). Из рисунка 37 следует, что $q + OF_1 = a$, $OF_1 = a \cdot e$, тогда

$$q = a - a \cdot e = a(1 - e), \qquad (2)$$

$$Q = a(1 + e). \qquad (3)$$

У земной орбиты эксцентриситет равен 0,017. Земля находится в перигелии в начале января, и перигелийное расстояние равно 147 млн км, а в афелии — в начале июля, и афелийное расстояние равно 152 млн км.

2. второй закон Кеплера. Изучая движение Марса в пространстве, Кеплер заметил, что планета движется по орбите неравномерно — зимой быстрее, чем летом. Он стал искать закономерность, по которой происходит изменение скорости Марса, и выдвинул гипотезу, что скорость должна быть обратно пропорциональна расстоянию от Марса до Солнца. Для перигелия и афелия предположение подтвердилось. Тогда Кеплер условно разбил орбиту Марса на 360 частей и начал проверять свою гипотезу для различных её участков. Наблюдения и расчёты показали, что за равные промежутки времени Марс проходит равные площади секторов орбиты.

Современная формулировка этой зависимости распространена на все планеты и носит название **второго закона Кеплера**. Заключается она в следующем: *радиус-вектор планеты* (линия, соединяющая центр Солнца с центром планеты) *за равные промежутки времени описывает равновеликие площади*.

Второй закон Кеплера, или закон площадей, проиллюстрирован на рисунке 38. При движении планеты (P) вокруг Солнца (S) её радиус-вектор за равные промежутки времени описывает равные по площади фигуры — P_1SP_2 и P_3SP_4. Таким образом, скорость движения планеты по орбите меняется, принимая максимальное значение в перигелии и минимальное в афелии.

3. третий закон Кеплера. Сравнивая размеры орбит и периоды обращения планет вокруг Солнца, Кеплер обнаружил, что квадраты периодов обращения планет пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца (или отношение $\frac{r^3}{T^2}$ одинаково для всех планет).

Третий закон Кеплера формулируется следующим образом: *квадраты сидерических периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит*:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3} \qquad (4)$$

Если в этой формуле принять сидерический период обращения Земли вокруг Солнца равным

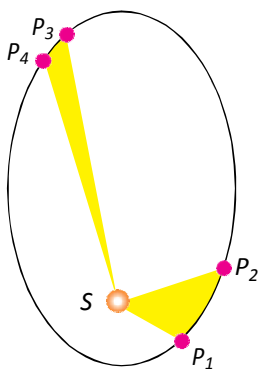


Рисунок 38 — Иллюстрация второго закона Кеплера

1 (один год) и большую полуось земной орбиты равной 1 (одна астрономическая единица, см. § 10), то формула (4) примет вид:

$$T \quad \sqrt{a^3} \qquad (5)$$

На основе открытых законов после многолетних вычислений в 1627 г. Кеплер составил таблицы, по которым можно было найти на небе положение каждой планеты в любой момент времени.

Главные выводы

1. Все планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2. За равные промежутки времени радиусы-векторы планет описывают равновеликие площади.

3. Квадраты сидерических периодов обращения двух планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

4. Законы Кеплера уточняют учение Коперника, в котором орбиты небесных тел считались окружностями.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте законы Кеплера.

2. У Земли эксцентриситет орбиты равен 0,017, а у Марса — 0,093. Орбита какой из планет наиболее вытянута?

3. Во сколько раз афелийное расстояние больше перигелийного расстояния, если эксцентриситет орбиты равен 0,5?

4. Меняется ли скорость планеты, движущейся по эллиптической орбите? круговой орбите?

5. Считая орбиты Земли и Марса круговыми, рассчитайте продолжительность года на Марсе. При решении задачи учтите, что Марс находится от Солнца дальше, чем Земля, в 1,5 раза.

§ 9. Закон всемирного тяготения ньютона

1. небесная механика. После появления работ Коперника, Галилея, Кеплера к середине XVII в. завершился описательный (или геометрический) период изучения движения планет. Была выявлена кинематика их движений, но оставалось неясным, почему планеты движутся. Что

заставляет их обращаться вокруг Солнца, а спутники — вокруг планет? Чем объясняется устойчивость планетной системы?

Все материальные тела, если они ничем не поддерживаются, падают под действием силы тяжести на поверхность Земли. До тех пор, пока Земля считалась центральным телом мироздания, сила тяжести рассматривалась только как земное явление. Однако открытия Коперника и его последователей показали, что Земля — это рядовая планета, которая движется вокруг Солнца, как и другие планеты. Поэтому появилось предположение, что сила тяжести присуща не только Земле, но и другим небесным телам. На материальные тела, находящиеся около других планет, Луны или Солнца, действует сила тяжести, которая направлена к их центру так же, как и на Земле. Таким образом, благодаря распространению свойства тяжести на другие небесные тела, был поставлен вопрос о взаимодействии тел.

На основании третьего закона Кеплера и закона динамики материальной точки строго математически Ньютон обосновал **закон всемирного тяготения**, который гласит: *два тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.*

Математическое выражение закона всемирного тяготения имеет вид:

$$F \quad G\frac{\quad}{2} \qquad (1)$$

где m_1 и m_2 — массы двух тел, притягивающихся друг к другу, r — расстояние между ними. Коэффициент пропорциональности G ($G = 6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Н $\cdot$ м^2/кг^2) называют **постоянной тяготения** или **гравитационной постоянной**, он является одной из основных физических констант.

Формула (1) справедлива для тел (материальных точек), размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними. Два протяжённых шарообразных тела со сферически-симметричным распределением масс притягиваются друг к другу так же, как и материальные точки, т. е. как если бы их массы были сосредоточены в центре тел. А расстояние r следует отсчитывать от центров этих тел.

На основании закона всемирного тяготения и законов механики Ньютон математически доказал, что под действием силы тяготения тело массой m будет двигаться относительно тела массой M по одной из кривых: эллипсу, окружности, параболе или гиперболе.

Таким образом, Ньютон уточнил и обобщил первый закон Кеплера, который в новой формулировке гласит: *под действием тяготения*

одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — эллипсу, окружности, параболе или гиперболе (рис. 39). *При движении по эллипсу притягивающее тело всегда находится в одном из фокусов.*

Наука, основывающаяся на законах Кеплера и Ньютона и изучающая движение небесных тел, называется **небесной механикой**. Небесная механика исследует движение небесных тел с учётом создаваемых ими полей тяготения. Основная задача данной науки заключается в том, чтобы, зная начальное положение тела (материальной точки) и его начальную скорость, определить его положение в любой другой момент времени.

2. возмущения в движении небесных тел. Движение тел, строго подчиняющееся законам Кеплера, называется **невозмущённым**. Такая идеализация предполагает учёт взаимодействия только двух тел и описывает, например, движение планеты под действием только притяжения Солнца. Задача двух тел полностью была решена Ньютоном (закон всемирного тяготения).

Истинные же движения тел Солнечной системы значительно сложнее. Это объясняется тем, что тела Солнечной системы не только притягиваются Солнцем, но и взаимодействуют между собой. Отклонения в движениях тел от законов Кеплера называются **возмущениями**, а реальное движение тел — **возмущённым движением**.

Решение уравнения движения даже для трёх тел — задача исключительной сложности, однако анализ возмущений позволяет довольно точно определить массу и положение возмущающего тела. Наиболее ярким примером этому в истории астрономии стало открытие планеты Нептун на основе анализа возмущений, имеющихся в движении Урана.

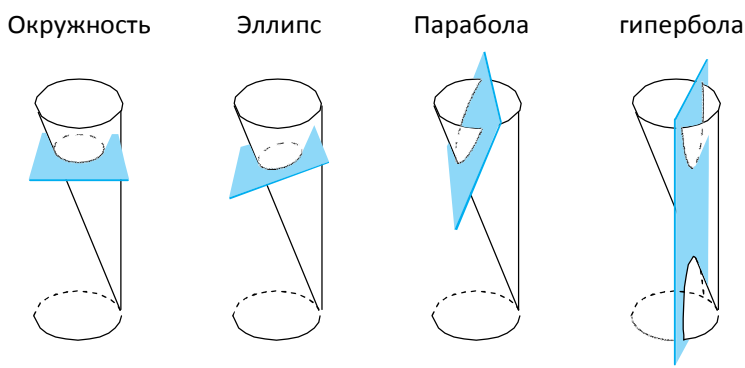


Рисунок 39 — Получение орбитальных кривых при сечении конуса плоскостью

Ещё одним примером проявлений возмущающей силы являются **приливы** и **отливы**. Водная оболочка и земная кора (в меньшей степени) слегка вытягиваются в обе стороны вдоль линии, соединяющей Землю с Луной. Приливные волны в океанах и морях следуют друг за другом с востока на запад с интервалом около 12 ч 25 мин. Приливное трение замедляет вращение Земли, что приводит к увеличению длительности земных суток на 0,0014 секунды за столетие.

3. определение массы Земли. Одной из важнейших характеристик небесного тела является его масса. Закон всемирного тяготения позволяет определять массу небесных тел, в том числе и массу Земли.

На тело массой m, находящееся вблизи поверхности Земли, действует сила тяжести $F = mg$, где g — ускорение свободного падения. Если тело движется только под действием силы тяжести, то, используя закон всемирного тяготения (1), ускорение свободного падения равно: $g = \frac{GM}{R_\oplus^2}$ и направлено к центру Земли.

Следовательно, зная, что ускорение свободного падения $g = 9{,}81$ м/с^2, $G = 6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Н $\cdot$ м^2/кг^2 и радиус Земли $R_\oplus = 6370$ км, можно по формуле $M = \frac{gR_\oplus^2}{G}$ подсчитать массу Земли: $M = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ кг.

Среднюю плотность Земли можно определить, зная её массу и объём. Средняя плотность будет равна $5{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3.

4. определение масс небесных тел. Массы небесных тел можно измерить разными способами:

1. Путём измерения силы тяжести на поверхности данного небесного тела (гравиметрический способ).

2. По третьему обобщённому закону Кеплера.

Первый способ применительно к Земле мы рассмотрели выше.

Прежде чем рассматривать второй способ, проверим выполнение третьего закона Кеплера для случая кругового движения планеты со скоростью $\upsilon_К$.

Пусть тело массой m движется с линейной скоростью $\upsilon_К$ вокруг тела M ($m << M$) по окружности радиуса $r_К$ (рис. 40). Это возможно, если

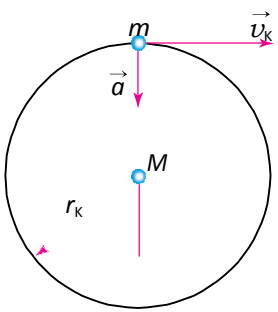


Рисунок 40 — Круговое движение тел

движение происходит под действием силы, создающей центростремительное ускорение $a = \frac{v_к^2}{r_к^2}$. Силой, создающей ускорение, является сила тяготения, равная $\frac{GMm}{r_к^2}$. Приравнивая $\frac{v_к^2}{r_к}$ к ускорению $\frac{GM}{r_к^2}$, создаваемому тяготением, получим, что

$$v_к^2 = \frac{GM}{r_к} \qquad (2)$$

Если период обращения тела m вокруг тела M составляет время T, то линейная скорость движения этого тела по орбите равна

$$v_к = \frac{2\pi r_к}{T} \qquad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим: $\left(\frac{2\pi r_к}{T}\right)^2 = \frac{GM}{r_к}$, или

$$\frac{r_к^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \qquad (4)$$

Для эллиптического движения формула (4) также справедлива, если вместо радиуса окружности $r_к$ подставить большую полуось a эллиптической орбиты. В таком случае получим соотношение:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} \qquad (5)$$

которое можно сформулировать следующим образом: *отношение куба большой полуоси орбиты тела к квадрату периода его обращения и массе центрального тела есть величина постоянная*.

Если массой m меньшего тела нельзя пренебрегать по сравнению с массой M центрального тела, то в третий закон Кеплера, как показал Ньютон, вместо массы M войдёт сумма масс $(M + m)$ и соотношение (5) запишется в виде:

$$\frac{a^3}{T^2 (M+m)} = \frac{G}{4\pi^2} \qquad (6)$$

Обобщив формулу (6) для двух небесных тел массами M_1 и M_2, получим уточнённый **третий закон Кеплера**:

$$\frac{T^2(M \quad)}{T_2^2(M \quad_2)} \quad \frac{3}{\frac{3}{2}} \tag{7}$$

т. е. квадраты сидерических периодов спутников ($_1T^2$ и T_2^2), умноженные на сумму масс главного тела и спутника ($M_1 + m_1$ и $M_2 + m_2$), относятся как кубы больших полуосей орбит спутников ($_1a^3$ и $_2a^3$) (7).

На основе уточнённого Ньютоном (7) третьего закона Кеплера можно вычислить вторым способом как массы планет, имеющих спутники, так и массу Солнца.

Массы планет, не имеющих спутников, могут быть определены по возмущениям, которые они вызывают в движении Земли, Марса, астероидов, комет, а также по возмущениям, производимым ими друг на друга.

Главные выводы

1. Закон всемирного тяготения и законы Кеплера — основа небесной механики.

2. Реальное движение небесных тел — возмущённое движение, которое обусловлено притяжением не только Солнца, но и другими телами.

3. Уточнённый Ньютоном третий закон Кеплера позволяет определять массы планет, имеющих спутники, а также массу Луны и Солнца.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие задачи решает небесная механика?

2. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Каковы особенности в использовании данного закона для проведения расчётов?

3. Определите массу планеты Уран (в массах Земли), если известно, что спутник Урана Титания обращается вокруг него с периодом 8,7 сут. на среднем расстоянии 438 тыс. км. для луны эти величины равны соответственно 27,3 сут. и 384 тыс. км.

4. Как понимают в астрономии «задачу двух тел»? «Задачу трёх тел»?

5. Как ньютон обобщил законы Кеплера?

6. Определите среднюю плотность Солнца, если период обращения Земли вокруг Солнца принять равным 365 сут. При расчётах принять радиус земной орбиты равным 150 млн км, а радиус Солнца — 700 тыс. км.

§ 10. определение размеров небесных тел и расстояний до них в солнечной системе

1. определение размеров Земли. Первый известный науке метод определения размеров Земли применил греческий учёный Эратосфен. Он выбрал два города, лежащих на одном и том же географическом меридиане земного шара, — Александрию (O_1) и Сиену (O_2) (рис. 41). Из рисунка видно, что если обозначить длину дуги меридиана O_1O_2 через l, а её угловое значение через n (в градусах), то длина дуги 1° меридиана l_0 будет равна:

$$l_0 = \frac{l}{n}$$

а длина всей окружности меридиана:

$$L = \frac{360\ l}{n} = 2\pi R$$

где R — радиус земного шара. Отсюда $R = \frac{180\ l}{\pi n}$

Длина дуги меридиана между выбранными на земной поверхности точками O_1 и O_2 в градусах равна разности географических широт этих точек, т. е. $n = \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Длина дуги l — расстояние между Александрией и Сиеной — была хорошо известна. Угол n Эратосфен измерил, используя то обстоятельство, что Сиена лежит на тропике Рака и в день летнего солнцестояния Солнце в полдень здесь наблюдалось в зените. А в Александрии Солнце до зенита не доходило и шест, врытый перпендикулярно в землю, отбрасывал тень. Измерив длину этой тени, Эратосфен получил значение $n = 7{,}2°$ и длину окружности L примерно 45 тыс. км (современное значение 40 тыс. км).

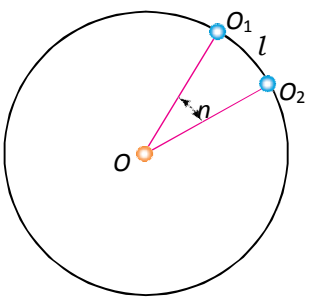


Рисунок 41 — Вычисление радиуса Земли

Современная геодезия располагает точными методами для измерения расстояний на земной поверхности. Определение расстояния l между точками O_1 и O_2 (см. рис. 41) затруднено из-за естественных препятствий (гор, рек, лесов и т. п.).

Поэтому длина дуги l определяется путём вычислений, требующих измерения только сравнительно небольшого расстояния — **базиса** и ряда углов. Этот метод разработан в геодезии и называется **триангуляцией** (лат. *triangulum* —треугольник).

Суть его состоит в следующем. По обе стороны дуги O_1O_2, длину которой необходимо определить, выбирается несколько точек A, B, C, … на взаимных расстояниях до 50 км с таким расчётом, чтобы из каждой точки были видны по меньшей мере две другие точки (рис. 42).

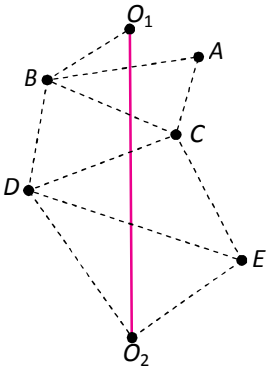


Рисунок 42 — Метод триангуляции

Длину базиса очень тщательно измеряют специальными мерными лентами. Измеренные углы в треугольниках и длина базиса позволяют по тригонометрическим формулам вычислить стороны треугольников, а по ним — длину дуги O_1O_2 с учётом её кривизны.

В России с 1816 по 1855 г. под руководством В. Я. Струве была измерена дуга меридиана длиной 2800 км. В 30-е гг. XX в. высокоточные градусные измерения были проведены в СССР под руководством профессора Ф. Н. Красовского.

Триангуляционные измерения показали, что длина дуги 1° меридиана не одинакова под разными широтами: около экватора она равна 110,6 км, а около полюсов — 111,7 км, т. е. увеличивается к полюсам.

Истинная форма Земли не может быть представлена ни одним из известных геометрических тел. Поэтому в геодезии и гравиметрии форму Земли считают **геоидом**, т. е. телом с поверхностью, близкой к поверхности спокойного океана и продолженной под материками.

В настоящее время созданы триангуляционные сети со сложной радиолокационной аппаратурой, установленной на наземных пунктах, и с отражателями на геодезических искусственных спутниках Земли, что позволяет точно вычислять расстояния между пунктами. Значительный вклад в развитие космической геодезии внёс уроженец Беларуси — известный геодезист, гидрограф и астроном И. Д. Жонголович. На основе изучения динамики движения искусственных спутников Земли он уточнил сжатие нашей планеты и несимметричность Северного и Южного полушарий.

2. определение расстояний методом горизонтального параллакса. Кажущееся смещение светила, обусловленное перемещением наблюдателя,

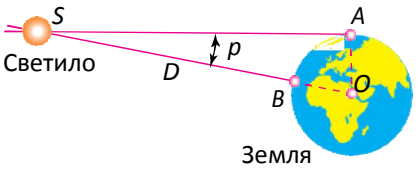


Рисунок 43 — Горизонтальный параллакс светила

называется **параллактическим смещением** или **параллаксом** светила. Параллактические смещения светила тем больше, чем ближе оно к наблюдателю и чем больше перемещение наблюдателя.

Определение расстояний до тел Солнечной системы основано на измерении их горизонтальных параллаксов. Угол p, под которым со светила виден радиус Земли, перпендикулярный к лучу зрения, называется **горизонтальным параллаксом** (рис. 43). Чем больше расстояние до светила, тем меньше угол p.

Зная горизонтальный параллакс светила, можно определить его расстояние $D = SO$ от центра Земли. Расстояние до светила $D = \frac{R_\oplus}{\sin p}$, где $R_\oplus$ — радиус Земли. Приняв $R_\oplus$ за единицу, можно выразить расстояние до светила в земных радиусах.

Например, параллакс Солнца $p_\odot$ = 8,794″. Параллаксу Солнца соответствует среднее расстояние от Земли до Солнца, примерно равное 149,6 млн км. Это расстояние принимается за одну **астрономическую единицу** (1 а. е.). В астрономических единицах удобно измерять расстояния между телами Солнечной системы.

При малых углах $\sin p \approx p$, если угол p выражен в радианах. Если угол p выражен в секундах дуги, то вводится множитель

$$\sin \frac{}{206265}$$

где 206 265 — число секунд в одном радиане. Тогда

$$\text{si} \quad \text{in} \quad \frac{p}{206265} \quad \text{и} \quad D \quad \frac{206\,265}{p} R_\oplus$$

Эта формула значительно упрощает вычисление расстояния D до светила по известному параллаксу p.

3. радиолокационный метод. Для определения расстояний до тел Солнечной системы используются наиболее точные методы измерений —

радиолокационные измерения. Измерив время t, необходимое для того, чтобы радиолокационный импульс достиг небесного тела, отразился и вернулся на Землю, вычисляют расстояние D до этого тела по формуле

$$D = \frac{c}{2}$$

где c — скорость света, равная примерно $3 \cdot 10^8$ м/с.

С помощью радиолокации определены наиболее точные значения расстояний до тел Солнечной системы, уточнены расстояния между материками Земли, более точно определена астрономическая единица (1 а. е. = = 149 597 870 ± 2 км).

Методы **лазерной локации** (использующие, например, специальные уголковые отражатели, доставленные на Луну) позволили измерить расстояния от Земли до Луны с точностью до нескольких сантиметров.

4. определение размеров тел солнечной системы. При наблюдениях небесных тел Солнечной системы можно измерить угол, под которым они видны наблюдателю с Земли. Зная **угловой радиус светила** ρ (рис. 44) и расстояние D до светила, можно вычислить линейный радиус R этого светила по формуле

$$R = D \cdot \sin \rho.$$

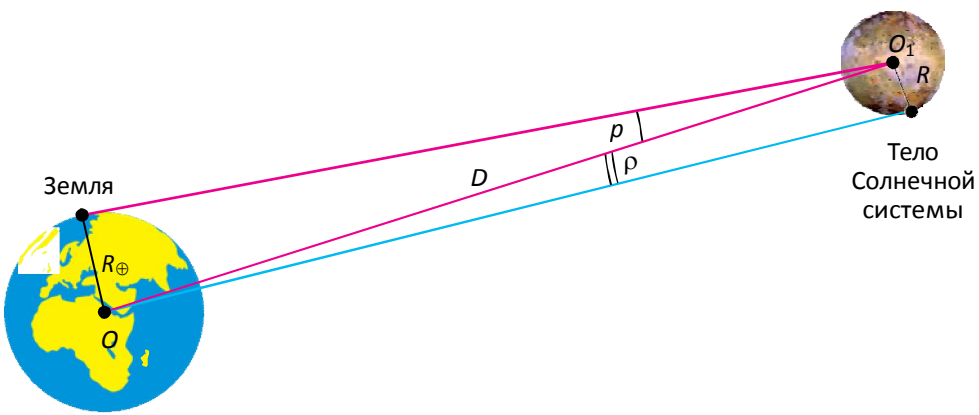


Рисунок 44 — Определение линейных размеров тел Солнечной системы

По определению горизонтального параллакса, радиус Земли $R_\oplus$ виден со светила под углом p, тогда получим:

$$R = \frac{\sin \rho}{\sin p} R_\oplus$$

Так как значения углов ρ и p малы, окончательно имеем:

$$R = \frac{\rho}{p} R_\oplus$$

Определение размеров небесных тел таким способом возможно только тогда, когда видны их диски.

Главные выводы

1. В основу метода определения размеров Земли положены градусные измерения (триангуляция) длин дуг на её поверхности.

2. Определение расстояний до тел Солнечной системы основано на измерении малых углов (параллаксов). В настоящее время для этого используются методы лазерной локации и радиолокации.

3. Для измерения расстояний между телами Солнечной системы используется астрономическая единица (1 а. е.), равная примерно 149,6 млн км.

4. Определение размеров тел Солнечной системы основано на измерении угловых радиусов и расстояний до них.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом греческий учёный Эратосфен определил размеры Земли?

2. Как определяют длину дуги меридиана триангуляционным методом?

3. Что понимают под горизонтальным параллаксом?

4. Как определить расстояние до светила, зная его горизонтальный параллакс?

5. Что такое астрономическая единица?

6. на каком расстоянии от Земли находится небесное тело, если его горизонтальный параллакс равен 1″?

7. В чём состоит радиолокационный метод определения расстояний до небесных тел?

8. Определите линейный радиус луны, если во время наблюдений стало известно, что её горизонтальный параллакс в это время равен 57′, а угловой радиус — 15,5′. Радиус Земли принять равным 6400 км.

§ 11. движение космическихаппаратов

1. Космические скорости. Наиболее простой случай движения тел вблизи поверхности Земли под действием силы тяжести — свободное падение с начальной скоростью, равной нулю. В этом случае тело движется прямолинейно с ускорением свободного падения по направлению к центру Земли. Если тело имеет начальную скорость, величина которой отлична от нуля, и её вектор направлен не по вертикали, то тело под действием силы тяжести начнёт двигаться с ускорением свободного падения по криволинейной траектории.

Рассмотрим тело, находящееся за пределами земной атмосферы. Предположим, что вектор начальной скорости этого тела направлен по касательной к поверхности Земли. В зависимости от значения начальной скорости дальнейшее движение тела может быть различным:

а) при малых начальных скоростях (υ_{01}, υ_{02}, υ_{03}) тело упадёт на Землю;

б) при некотором определённом значении скорости υ_1 (**первая космическая скорость**) тело станет искусственным спутником и начнёт обращаться вокруг Земли подобно её естественному спутнику — Луне;

в) при ещё большем увеличении значения скорости и достижении следующего определённого значения υ_2 (**вторая космическая скорость**) тело уйдёт от Земли так далеко, что сила земного притяжения практически не будет влиять на его движение. Тело начнёт обращаться вокруг Солнца подобно искусственной планете;

г) наконец, если скорость тела достигнет определённого значения υ_3 (**третья космическая скорость**), то данное тело навсегда уйдёт из Солнечной системы в пространство Галактики.

Рассмотрим случай, когда тело становится искусственным спутником Земли, т. е. определим первую космическую скорость υ_1. Найдём эту скорость по второму закону Ньютона из условия, что под действием силы тяготения тело приобретает центростремительное ускорение:

$$G\frac{mM}{R_{\text{орб}}} = ma_{\text{ц}} \qquad (1)$$

где $R_{\text{орб}} = R + h$ — средний радиус орбиты тела (рис. 45), R — радиус Земли, h — высота тела над поверхностью Земли, M — масса Земли, m — масса тела (спутника).

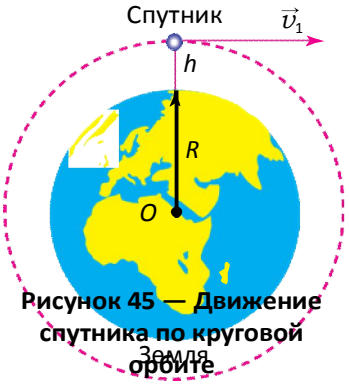


Рисунок 45 — Движение спутника по круговой орбите

Для центростремительного ускорения $a_ц = \frac{v_1^2}{R_{орб}} = \frac{v_1^2}{R+h}$ Подставляя это выражение в формулу (1), после сокращений получаем:

$$v = \sqrt{G\frac{M}{R+h}}$$

У поверхности Земли с учётом выражения для ускорения свободного падения $g = G\frac{M}{R^2}$ можно положить $h = 0$. Тогда первая космическая скорость (без учёта сопротивления воздуха) равна:

$$v = \sqrt{gR} = \sqrt{9{,}8 \cdot 6{,}37 \cdot 10^6} = 7{,}9 \cdot 10^3 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Таким образом, тело, скорость которого равна $7{,}9 \cdot 10^3$ м/с и направлена по касательной относительно поверхности Земли, становится искусственным спутником Земли, движущимся по круговой орбите над Землёй. В небесной механике первая космическая скорость называется также **круговой скоростью**.

Вторая космическая скорость определяется из условия, что тело должно уйти из сферы земного тяготения и стать спутником Солнца. Расчёты дают следующее выражение для определения второй космической скорости (без учёта сопротивления воздуха):

$$v = \sqrt{2gR} \quad (3)$$

где R — радиус Земли.

Используя выражение (2), находим:

$$v_2 = \sqrt{2}\, v_1 \quad (4)$$

Подставляя в (4) уже известное нам значение первой космической скорости, получим, что у поверхности Земли $v_2 \approx 11{,}2 \cdot 10^3$ м/с. Вторая космическая скорость называется также скоростью освобождения (убегания, ускользания) или **параболической скоростью**.

Третья космическая скорость, или **гиперболическая скорость**, — это наименьшая начальная скорость, с которой тело должно преодолеть земное притяжение и выйти на околосолнечную орбиту со скоростью, необходимой для того, чтобы навсегда покинуть пределы Солнечной системы.

Расчёты дают следующую формулу для нахождения величины этой скорости:

$$\sqrt{\sqrt{\quad 2 \quad 2 \quad 2}} \qquad (5)$$

где $v \approx 29{,}8 \cdot 10^3$ м/с — скорость Земли на круговой орбите движения вокруг Солнца.

Подставляя значение второй космической скорости v_2 в (5) и проведя расчёт, получим, что тело должно иметь минимальную скорость $v_3 \approx 16{,}7 \cdot 10^3$ м/с, чтобы покинуть пределы Солнечной системы.

2. орбиты космических аппаратов. Расчёты траекторий полётов космических аппаратов связаны с использованием законов небесной механики. Следует заметить, что движение космических аппаратов описывается по законам небесной механики только после выключения реактивных двигателей. На пассивном участке траектории (т. е. после выключения двигателей) космические аппараты движутся под действием притяжения Земли и других тел Солнечной системы.

Элементы орбиты искусственных спутников Земли взаимосвязаны между собой формулой

$$v \qquad \left(\frac{2}{\quad} \quad \frac{1}{\quad} \right) \qquad (6)$$

где v_0 — начальная скорость спутника, M — масса Земли, r_0 — расстояние точки выхода спутника на орбиту от центра Земли, a — большая полуось орбиты спутника.

Эксцентриситет орбиты e при горизонтальном запуске спутника равен:

$$1 \quad -, \qquad (7)$$

где q — расстояние перигея (ближайшей точки орбиты от центра Земли).

В случае эллиптической орбиты (рис. 46): $q = a(1 - e) = R + h_П$, где $h_П$ — линейная высота перигея над поверхностью Земли. Расстояние апогея (наиболее удалённой точки орбиты от центра Земли): $Q = a(1 + e) = R + h_A$, где h_A — высота апогея над земной поверхностью, R — радиус Земли.

На рисунке 47 показаны орбиты космических аппаратов без учёта возмущений, т. е. когда аппараты остаются вблизи Земли. Но когда космический аппарат удалится от Земли на значительное расстояние, то на дальнейшее его движение будет оказывать влияние прежде всего притяжение Солнца. Радиус сферы действия Земли принимают равным примерно 930 тыс. км; на границе этой сферы влияние Солнца и Земли на космический аппарат одинаково. Момент достижения границы сферы действия Земли считается моментом выхода космического аппарата на орбиту относительно Солнца.

При запуске космических аппаратов к другим планетам исходят из следующих основных соображений:

1) геоцентрическая скорость космического аппарата при выходе на орбиту относительно Земли должна превышать вторую космическую скорость;

2) гелиоцентрическая орбита космического аппарата должна пересекаться с орбитой данной планеты;

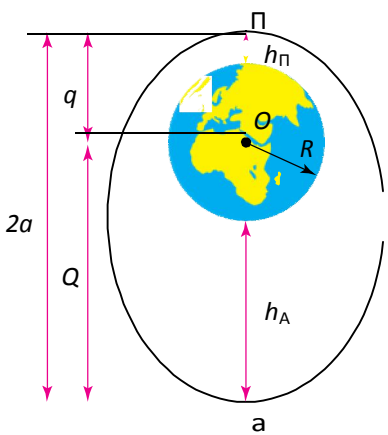


Рисунок 46 — Эллиптическая орбита искусственного спутника Земли

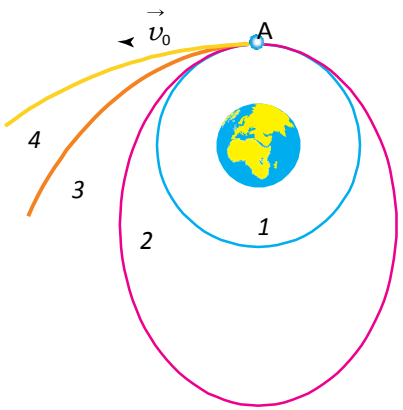


Рисунок 47 — Формы орбит космических аппаратов: *1* — круговая; *2* — эллиптическая; *3* — параболическая; *4* — гиперболическая

3) момент запуска необходимо выбрать так, чтобы орбита была наиболее оптимальной с точки зрения сроков полёта, затрат топлива и ряда других требований.

Одним из классов межпланетных траекторий являются энергетически оптимальные орбиты, которые соответствуют наименьшей геоцентрической скорости космических аппаратов в момент достижения границы сферы действия Земли. На рисунке 48 указана такая траектория перелёта на Марс, построенная на предположении, что орбиты Земли и Марса круговые. Данная орбита носит название гомановской, так как названа в честь немецкого астронома Вальтера Гомана, занимавшегося теорией межпланетных полётов.

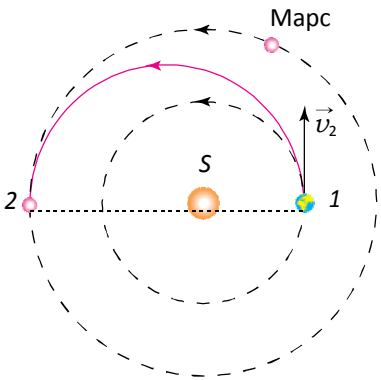


Рисунок 48 — Гомановская траектория перелёта с Земли на Марс

В момент запуска космического аппарата Земля находится в точке 1. Гелиоцентрическая скорость v_2 космического аппарата должна быть направлена так же, как и гелиоцентрическая скорость Земли, — по касательной к орбите Земли. Момент запуска следует подобрать так, чтобы космический аппарат и Марс, двигаясь по своим орбитам, достигли одновременно точки 2. Буквой S обозначено Солнце. Расчёты показывают, что время полёта с Земли до Марса по указанной траектории составит 259 суток (не считая сравнительно короткого времени полёта до границы сферы действия Земли).

3. Проблемы и перспективы космических исследований. Космонавтика — комплексная отрасль науки и техники, обеспечивающая исследование и использование космического пространства с помощью автоматических и пилотируемых космических аппаратов. Главными задачами космонавтики (в порядке их достижения) являются: вывод искусственного спутника на орбиту Земли, полёт человека в космос, полёт человека на Луну, полёт человека на другие планеты, полёт к звёздам. Первые три цели достигнуты.

Начало космической эры было положено в СССР запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. Вторая важнейшая дата космической эры — 12 апреля 1961 г. В этот день Ю. А. Гагарин впервые в истории человечества совершил полёт в космос на космическом корабле «Восток». Третье историческое событие космонавтики —

Ю. А. Гагарин

П. И. Климук

В. В. Ковалёнок

О. В. Новицкий

первая лунная экспедиция, осуществлённая 16—24 июля 1969 г. американскими астронавтами Н. Армстронгом, М. Коллинзом и Э. Олдрином. Значительный вклад в исследование космического пространства внесли и космонавты-белорусы П. И. Климук и В. В. Ковалёнок, О. В. Новицкий. Полёты человека в космос для нас стали уже почти обыденным явлением.

Космонавтика способствовала возникновению и развитию новых технологий. В перспективе — глобальный экологический мониторинг Земли, устранение угроз астероидно-кометной опасности.

Современная теория космических полётов — **астродинамика** — основана на классической небесной механике и теории управления движением летательных аппаратов. Космонавтика нуждается в тщательной разработке оптимальных траекторий космических аппаратов с учётом ряда условий и ограничений.

Создание ракетно-космических комплексов — весьма сложная научно-техническая проблема. Космические аппараты должны обладать способностью к длительному самостоятельному функционированию в условиях космического пространства. Кроме того, возникает ряд дополнительных медико-биологических проблем (защита от космической среды, жизнеобеспечение экипажа и т. д.). Всё это требует разработки специальных систем. Для обеспечения полётов космических аппаратов необходима широкая сеть наземных служб управления.

По своей сущности космонавтика — это область общечеловеческой деятельности, и проводимая даже в рамках национальных проектов она затрагивает интересы многих стран.

Главные выводы

1. Скорость, при которой космический аппарат выводится на круговую орбиту вокруг небесного тела, называется первой космической скоростью.

2. Скорость, необходимая для того, чтобы космический аппарат вышел из сферы гравитационного действия Земли и обращался вокруг Солнца, называется второй космической скоростью.

3. Скорость, при которой космический аппарат, запущенный с Земли, покинет Солнечную систему, называется третьей космической скоростью.

4. Орбиты космических аппаратов представляют собой элементы эллипсов, парабол и гипербол.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите первую, вторую и третью космические скорости.

2. Определите период обращения искусственного спутника Земли, если наивысшая точка его орбиты над поверхностью Земли 36 000 км, а наинизшая — 300 км. Землю считать шаром радиусом 6370 км.

3. По каким орбитам могут двигаться космические аппараты? Каким геометрическим линиям соответствуют орбиты космических аппаратов для первой, второй и третьей космических скоростей?

4. Какие орбиты космических аппаратов называют гомановскими?

5. Рассчитайте первую и вторую космические скорости для луны. Учтите, что масса Луны — $7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг, а её радиус — 1740 км.

раздел IV

срАвнительнАя ПлАнетолоГия

§ 12. общие характеристики планет. Происхождение солнечной системы

1. строение и состав солнечной системы. Под **Солнечной системой** понимается всё космическое пространство и вся материя, находящаяся в сфере притяжения Солнца. Солнечная система включает в себя: звезду Солнце, расположенную в центре системы; планеты со спутниками; карликовые планеты; малые тела (астероиды, кометы, метеоритные и метеорные тела), а также межпланетную пыль, плазму и физические поля в указанных границах.

В Солнечной системе находится 8 больших планет. По мере удаления от Солнца они расположены в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун.

Планетой называют небесное тело, движущееся вокруг звезды в её гравитационном поле, имеющее форму, близкую к сферической, светящееся отражённым от звезды светом и расчистившее область своей орбиты от других мелких объектов. Выделяют планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Массы планет слишком малы, чтобы внутри них могли протекать характерные для звёзд ядерные реакции. Вокруг планет, кроме Меркурия и Венеры, обращаются спутники, которых известно уже больше 170.

По гелиоцентрическим орбитам движутся карликовые планеты, астероиды и метеоритные тела. Кроме того, по сильно вытянутым орбитам движутся ледяные тела — кометы.

Планеты и другие тела Солнечной системы при движении по орбитам сталкиваются с метеорными телами, межпланетной пылью; взаимодействуют с электромагнитным излучением Солнца и плазмой, исходящей от Солнца.

2. особенности строения солнечной системы. Характерные черты строения Солнечной системы, известные по астрономическим наблюдениям и космическим исследованиям, заключаются в следующем.

1. Основная масса вещества Солнечной системы сосредоточена в Солнце, которое представляет собой рядовую звезду. На массу всех других составляющих системы приходится 1/750 часть массы Солнца (рис. 49). Таким образом, доминирующим в Солнечной системе является гравитационное поле Солнца.

2. Орбиты планет и большинства астероидов лежат почти в одной плоскости, незначительно наклонённой к плоскости солнечного экватора. Наклон эклиптики к плоскости солнечного экватора составляет 7°15′. Орбиты планет почти круговые, т. е. их эксцентриситеты мало отличаются от нуля.

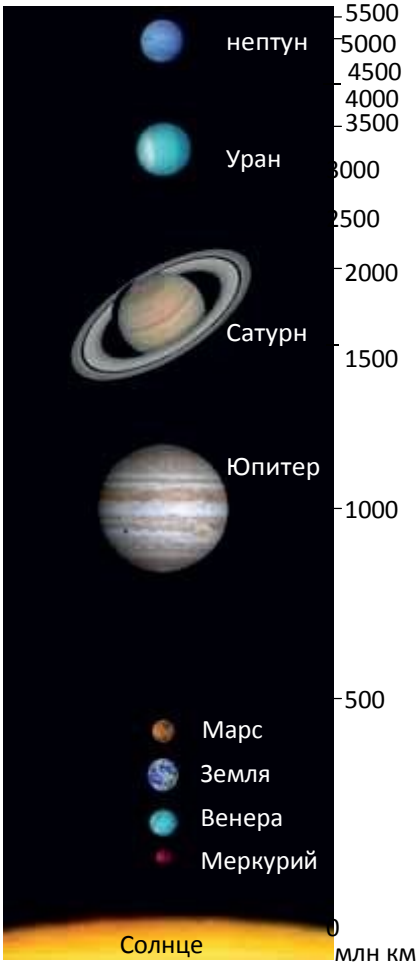


Рисунок 49 — Сравнительные размеры Солнца и планет

3. Все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении. Вращение Солнца вокруг своей оси происходит в ту же сторону, что и движение планет вокруг Солнца. Планеты вращаются вокруг своих осей в направлении, совпадающем с направлением их обращения вокруг Солнца. Исключение составляют Венера и Уран, которые вращаются в противоположную сторону. Причём ось вращения Урана почти лежит в плоскости орбиты планеты. Наклон оси вращения других планет не превышает 60° к плоскостям их орбит.

4. Планеты разделяются на две различающиеся группы: планеты земной группы и планеты-гиганты. **Планеты земной группы** — твёрдые

тела, сравнительно небольшие, маломассивные, но с большой средней плотностью, более медленным вращением и малым числом спутников (или без них). Они расположены вблизи Солнца. **Планеты-гиганты** — массивнее планет земной группы, большие по размерам и с меньшей средней плотностью, большой скоростью вращения и многочисленными спутниками. Планеты-гиганты обладают мощными атмосферами, состоящими в основном из водорода и гелия.

5. Момент количества движения ($m \cdot v \cdot r$) между Солнцем и планетами распределяется неравномерно. На долю Солнца, в котором сосредоточена почти вся масса Солнечной системы, приходится только 2 % её полного количества движения.

6. Орбиты большинства спутников планет близки к круговым. Движение большинства спутников по орбитам происходит в том же направлении, в каком планеты движутся вокруг Солнца. Орбиты крупных спутников в основном имеют малый наклон к плоскостям экваторов своих планет.

Перечисленные особенности необходимо учитывать при построении модели (теории) формирования всего комплекса тел Солнечной системы.

3. Происхождение солнечной системы. Для построения теории происхождения Солнечной системы необходимо знать возраст небесных тел. Согласно современным представлениям, возраст древнейших пород Земли достигает 4,64 млрд лет. Анализ пород, доставленных с Луны, соответствует возрасту от 2 до 4,5 млрд лет. Возраст железных и каменных метеоритов оценивается от 0,5 до 5 млрд лет. Возраст Солнца и других отдельных звёзд определяется на основе теории строения и эволюции звёзд. Для Солнца это приблизительно 5 млрд лет, что совпадает с возрастом других тел системы. Последнее позволяет заключить, что Солнце и планеты сформировались из единого облака газа и пыли.

Впервые идея об образовании Солнца и планет из вещества единой газовой туманности была сформулирована И. Кантом в 1755 г. и доработана П. Лапласом в 1796 г. Согласно этой гипотезе, Солнечная система образовалась из вращающегося горячего газового облака, которое сжималось под воздействием гравитации и распадалось на фрагменты (рис. 50). Однако эта гипотеза оказалась несостоятельной из-за множества противоречий. Джеймс Джинс в 1919 г. выдвинул гипотезу, согласно которой планетное вещество было «вырвано» из Солнца под воздействием близко проходящей звезды. Вырванное солнечное вещество распалось на отдельные части, образуя планеты.

Данные физико-химических исследований метеоритов и земных пород подсказывали, что эти тела образовались не из газовых сгустков, а из твёрдого вещества. В 1944 г. систематической разработкой теории образования планет из твёрдых частиц околосолнечного допланетного облака занялся О. Ю. Шмидт. Эта теория развивается и в настоящее время.

Можно выделить следующие основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы.

1. Около 4,6 млрд лет назад произошёл взрыв сверхновой звезды вблизи места рождения Солнечной системы. Ударная волна от взрыва распространилась в космическом пространстве. Под её действием газопылевое облако, состоящее из водорода, гелия и других разных по составу частичек, содержащих как металлы, так и редкие изотопы тяжёлых химических элементов, начало сгущаться. В нём образовались уплотнения, обогащённые веществом сверхновой звезды. Изначально медленно вращающееся уплотнение под действием сил гравитации начало сжиматься и превращаться в дискообразное газопылевое облако. В дальнейшем в центре этого облака образуется молодое Солнце. Образовавшийся вокруг него протопланетный диск поглощает большую часть момента количества движения.

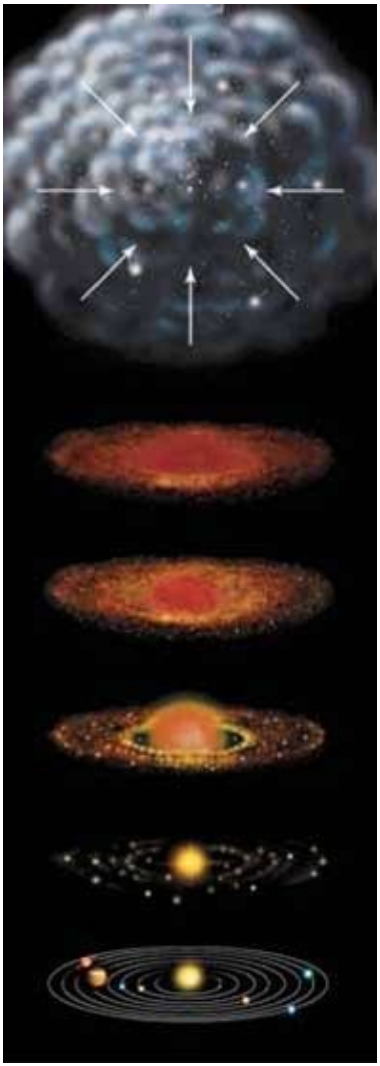


Рисунок 50 — Образование Солнечной системы по гипотезе О. Ю. Шмидта

2. Постепенно в диске газопылевого облака мельчайшие пылинки стали объединяться, захватывая газы из окружающего пространства. Из мелких частичек образовывались более крупные комки, а из них формировались зародыши будущих планет (размерами в несколько километров) — **планетезимали**, а позднее и сами планеты. Во внутренней зоне лёгкие элементы (водород, гелий) под действием светового давления

покидали центральные области диска, уходя на периферию. Поэтому вблизи Солнца планетезимали формировались полностью из каменистых минералов и соединений металлов и в конце концов превратились в планеты земной группы. Частички в средней холодной зоне покрывались льдом, ядра будущих планет-гигантов быстро росли, захватывая окружающий газ. В самой холодной внешней части диска конденсирующее вещество почти всё было ледяным. Множество отдельных ледяных планетезималий и глыб породили ядра комет и ледяные астероиды.

Планеты земной группы почти достигли своих размеров примерно через 100 млн лет.

3. Последующее гравитационное сжатие поднимало температуру в недрах протопланет до температуры плавления железа. С этого времени тяжёлые компоненты стали отделяться и стремиться к центру планет, а наиболее лёгкие вещества — подниматься к поверхности. В течение миллиардов лет шло образование коры — наружного слоя планет земной группы. Разогревание Земли, например, сопровождалось выделением газов и водяных паров. Постепенно водяные пары конденсировались и образовывали моря и океаны, а газы — атмосферу. По составу первичная атмосфера существенно отличалась от современной.

Спутники планет, движущиеся в направлении вращения планет, образовались в результате тех же процессов, что и сами планеты. Спутники, обладающие обратным движением, были захвачены планетой.

Главные выводы

1. Солнечная система — это материя и всё космическое пространство, находящееся в сфере притяжения Солнца.

2. Солнечная система состоит из Солнца, больших и карликовых планет и их спутников, малых тел, межпланетной пыли, плазмы, физических полей.

3. Главные особенности Солнечной системы состоят в том, что её основная масса сосредоточена в Солнце, орбиты планет и большинства астероидов лежат почти в одной плоскости, обращаются в том же направлении, что и Солнце.

4. Среди планет Солнечной системы различают планеты земной группы и планеты-гиганты.

5. Солнечная система образовалась в процессе эволюции вращающегося газопылевого облака.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под Солнечной системой?
2. Что называют планетой? Какие планеты входят в состав Солнечной системы?
3. Укажите основные особенности строения Солнечной системы.
4. Какой возраст древнейших пород Земли; минералов, доставленных с луны; метеоритов, упавших на Землю?
5. В чём состоит суть гипотез И. Канта, П. лапласа, дж. джинса, О. Ю. шмидта о происхождении Солнца и планет?
6. Укажите основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы.

§ 13. Планеты земной группы

1. меркурий. Меркурий — самая близкая к Солнцу планета (рис. 51). Она постоянно «прячется» в солнечных лучах, и поэтому её трудно увидеть земному наблюдателю.

У Меркурия нет атмосферы, и его поверхность не защищена от палящих солнечных лучей днём и космического холода ночью. Днём на поверхности планеты температура поднимается до +430 °С, а ночью опускается до –170 °С. Перепад температур происходит медленно, потому что солнечные сутки (промежуток между двумя последовательными полуднями) на Меркурии равны 176 земным.

Вся каменистая поверхность Меркурия покрыта многочисленными кратерами. Большинство из них образовалось в результате падения метеоритов. Кратеры на картах Меркурия названы в честь выдающихся представителей мировой культуры: Бетховен, Гомер, Достоевский, Пушкин, Толстой и др.

Угол наклона оси вращения Меркурия перпендикулярен его орбите, поэтому дно околополярных кратеров никогда не освещается Солнцем. Эти области служат хранилищами водяного льда, перемешанного с горной породой.

Рисунок 51 — Меркурий

Рисунок 52 — Крутые уступы на поверхности Меркурия

Горы, встречающиеся на Меркурии, достигают высоты всего 2—4 км. На планете обнаружены уступы высотой 2—3 км, тянущиеся на сотни километров (рис. 52). Вероятно, они появились при формировании планеты из-за неравномерного сжатия в ходе охлаждения.

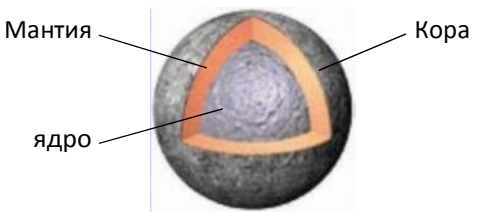
Вблизи поверхности Меркурия обнаружены атомы гелия и водорода, а также аргона и натрия. Их источниками являются солнечный ветер и вещество планеты, подверженное нагреванию и облучению Солнца.

Магнитное поле планеты очень мало, его напряжённость в 300 раз меньше земного.

Параметры Меркурия смотрите в таблице 2.

Таблица 2 — Параметры Меркурия

Звёздная величина (максимальная)	–2,2	Диаметр по экватору	4880 км
Среднее расстояние до Солнца	57,9 млн км	Масса (Земля = 1)	0,055
	0,387 а. е.	Средняя плотность	$5{,}4 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	88 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
Период вращения вокруг оси	58,6 земных суток	Температура поверхности	От –170 до +430 °С



2. Венера. Венера — вторая от Солнца планета Солнечной системы (рис. 53). Она почти такого же размера, как и Земля, а её масса составляет около 80 % земной массы. На небе её можно наблюдать утром или вечером в виде очень яркого светила. Густая атмосфера Венеры долго скрывала тайны её поверхности. Учёные ещё в середине XX в. думали, что планета покрыта тропическими лесами. Но достигшие её советские космические аппараты «Венера» сфотографировали безжизненную раскалённую пустыню. Температура поверхности достигает 470 °С и почти не изменяется в течение суток (см. табл. 3 на с. 83). Густые облака пропускают мало солнечного света и создают «сумеречную» освещённость даже тогда, когда Солнце находится высоко над горизонтом.

Большую часть поверхности Венеры занимают равнины. Самые высокие горы поднимаются на 11 км над средним уровнем поверхности — Горы Максвелла. Обнаружены на Венере кратеры диаметром до сотен километров (рис. 54). Крупные кратеры названы в честь выдающихся женщин мира (Ахматова, Войнич, Дункан, Орлова) или просто женскими именами (Антонина, Валентина, Зоя, Ирина, Нана, Оля и др.). Обширные возвышенности-материки носят имена: Земля Афродиты, Земля Иштар, Земля Лады и др.

Около 500 млн лет назад на Венере произошла глобальная геологическая катастрофа. Сотни тысяч действующих вулканов извергли огромное количество лавы, которая покрыла всю поверхность планеты.

Рисунок 53 — Венера. Фотоснимок выполнен в ультрафиолетовых лучах

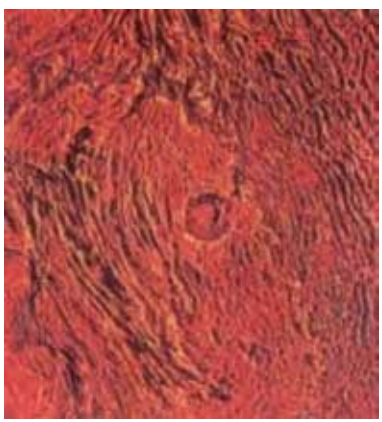


Рисунок 54 — Венера. Район Гор Максвелла: огромный кратер диаметром около 100 км

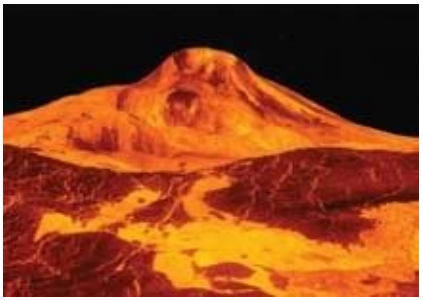


Рисунок 55 — Гора Маат — потухший вулкан на Венере

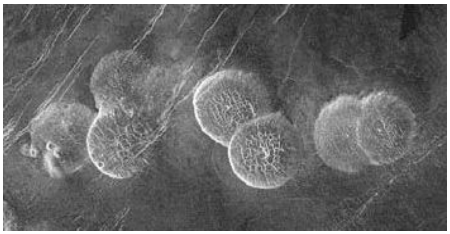


Рисунок 56 — Застывшие пузыри вулканической лавы на Венере. Радиолокационное изображение, переданное космическим аппаратом «Магеллан» в 1991 г.

Самый высокий потухший вулкан (рис. 55) — гора Маат, названная так в честь египетской богини истины и порядка, — вздымается над окружающей её равниной почти на 8 км. Отдельные вулканы достигают высоты 3 км при ширине у подножия 500 км. Многочисленные застывшие пузыри лавы имеют куполообразную форму (рис. 56).

Для исследования рельефа планеты был использован метод радиолокации. Автоматическая межпланетная станция «Магеллан» с 1990 по 1994 г. провела глобальную радиолокацию поверхности Венеры. На основе полученных данных были составлены рельефные карты и появилась возможность воссоздать детали поверхности в объёмном изображении (рис. 57).

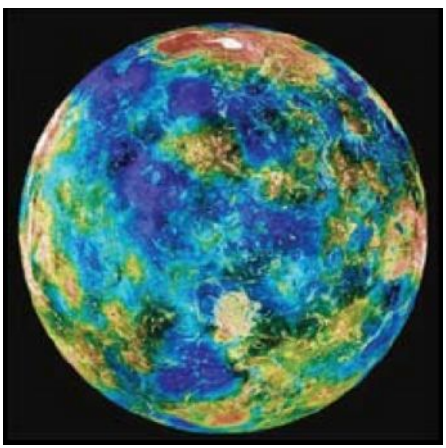


Рисунок 57 — Рельефная карта поверхности Венеры, составленная по данным радиолокационных исследований космического аппарата «Магеллан»

Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа. Давление у поверхности планеты в 95 раз выше, чем у поверхности Земли. Благодаря такому химическому составу, а также большой плотности атмосфера Венеры представляет собой огромный «парник». Парниковый эффект и обусловливает высокую температуру поверхности.

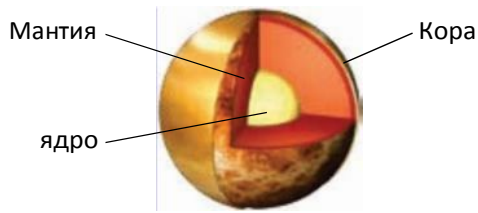
Облака Венеры имеют слоистую структуру. Они располагаются на высоте от 48 до 70 км и содержат капельки серной кислоты. Скорость ветра у поверхности составляет около 1 м/с. В атмосфере наблюдаются молнии.

Магнитное поле Венеры очень мало по причине медленного вращения планеты вокруг оси с востока на запад. Его напряжённость в 10^4 раз меньше земного. Магнитосфера почти полностью отсутствует, поэтому поток заряженных частиц, идущий от Солнца, сталкивается с атмосферой планеты и увлекает за собой её вещество, формируя ионный шлейф. Космическая обсерватория SOHO определила, что этот «хвост» растягивается на 45 млн км, т. е. достигает Земли.

Параметры Венеры смотрите в таблице 3.

Таблица 3 — Параметры Венеры

Звёздная величина (максимальная)	–4,7	Диаметр по экватору	12 104 км
Среднее расстояние до Солнца	108,2 млн км	Масса (Земля = 1)	0,815
	0,723 а. е.	Средняя плотность	$5{,}2 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	224,7 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,9
Период вращения вокруг оси (обратное вращение)	В течение 243 земных суток	Температура поверхности	470 °С



3. Земля. Земля — третья по счёту планета Солнечной системы. Из космоса наша планета выглядит красивым голубым шаром (рис. 58). Сквозь облачный покров можно рассмотреть материки и океаны.

Детали поверхности Земли и условия жизни хорошо вам известны, поэтому мы остановимся более подробно на строении недр. Модели внутреннего строения Земли и остальных планет земной группы примерно схожи.

По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях — **сейсмограммам** — было установлено, что внутреннее строение планеты по вертикали слоистое. По химическому составу и физическим

Рисунок 58 — Фотография Земли из космоса

характеристикам выделяют три основные сферические оболочки: твёрдая кора, мантия и ядро. Самый тонкий внешний слой — **твёрдая кора**. У Земли она простирается в среднем на глубину 35 км (океаническая кора — 10 км, континентальная кора — 70 км). По химическому составу земная кора состоит из кислорода (46,6 %), кремния (27,7 %), алюминия (8,1 %), железа (5 %), кальция (3,6 %) и других химических элементов. Общая масса земной коры составляет всего 0,8 % общей массы Земли. Кора отделяется от следующей за ней **мантии** отчётливой границей.

Ядро — наиболее плотная часть планетных недр. В центре Земли плотность вещества достигает 13 500 кг/м^3, а температура оценивается в 6000 К. Радиус ядра составляет 55 % радиуса Земли, а масса — около 30 % массы планеты. Земное ядро подразделяется на внешнее и твёрдое внутреннее радиусом 1270 км. Переходная зона между внешней и внутренней частями ядра очень тонкая — около 5 км. У Венеры аналогичное ядро. Наиболее мощным ядром обладает Меркурий, радиус которого составляет 70 % радиуса планеты, а масса — 60 % массы всей планеты. У Марса небольшое ядро массой всего 7 % от всей массы планеты, а его радиус составляет 28 % радиуса Марса. Ядра планет в основном состоят из железа с примесью сернистого железа. Жидкий внешний слой ядра, вероятно, есть у Меркурия и Венеры.

Источниками нагрева недр планет служат:

1) выделение тепла при распаде радиоактивных элементов;

2) энергия, выделяющаяся при ударах тел различного размера (астероидов и др.) о поверхность планеты;

3) нагревание за счёт сжатия вещества планеты и гравитационной дифференциации.

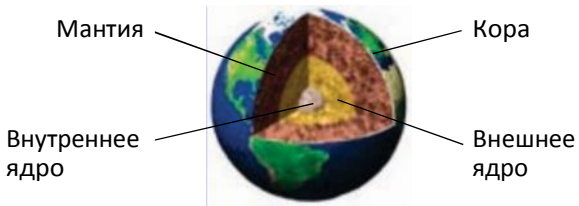
Гравитационная дифференциация представляет собой процесс постепенного перераспределения вещества по плотности — тяжёлые элементы стремятся к центру, а лёгкие элементы поднимаются к поверхности. Этот процесс у Земли ещё не завершился. Движения вещества внутри планеты влияют на кору, вызывая землетрясения, горообразования, тектонические и вулканические процессы.

Магнитное поле Земли генерируется в жидком металлическом слое ядра.

Земная атмосфера состоит в основном из азота и кислорода. Параметры Земли смотрите в таблице 4.

Таблица 4 — Параметры Земли

Угол наклона экватора к плоскости орбиты	23,4°	Диаметр по экватору	12 756 км
Среднее расстояние до Солнца	149,6 млн км	Масса	$5{,}97 \cdot 10^{24}$ кг
	1 а. е.	Средняя плотность	$5{,}5 \cdot 10^{3}$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	365,26 земных суток	Температура поверхности	От –83 до +52 °С
Период вращения вокруг оси	23,93 ч		



4. марс. Марс — четвёртая по счёту планета Солнечной системы по отношению к Солнцу (рис. 59). Для наблюдателя она предстаёт в виде яркого красного светила. С помощью любительских телескопов можно увидеть полярные шапки Марса и некоторые крупные детали его поверхности.

Полученные с помощью космических аппаратов изображения поверхности Марса показали, что планета представляет собой безжизненную пустыню, значительная часть которой покрыта красноватым песком и усеяна камнями. Красный цвет поверхности Марса объясняется высоким содержанием в почве оксидов железа (см. рис. 59).

Рисунок 59 — Марс

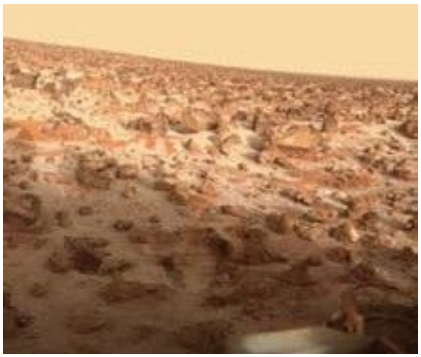


Рисунок 60 — Снег на поверхности Марса. Фотография сделана спускаемым аппаратом «Викинг-2»

На поверхности Марса атмосфера очень разрежена, поэтому существуют большие суточные колебания температуры: если днём на экваторе температура поднимается летом до +15 °С, то ночью она опускается до –65 °С. Зимой на поверхности Марса наблюдаются снег и иней (рис. 60), но вода в жидком состоянии там существовать не может. Давление у поверхности планеты в 100—170 раз меньше, чем на Земле. В условиях низкого атмосферного давления вода закипает при температуре +2 °С и сразу же испаряется.

На Марсе очень много ударных кратеров большого размера. Это свидетельствует о том, что планета пережила множество катастроф, которые изменили условия её поверхности. Кратеры на Марсе названы в честь учёных, посвятивших свою деятельность изучению Марса и планет Солнечной системы (например, кратер Тихов).

Поверхность Марса характеризуется чётко выраженной асимметрией. Южное гористое полушарие в среднем на 5 км выше Северного. На снимках марсианской поверхности хорошо видны многочисленные крупные и мелкие каньоны. Их ширина достигает 600 км, глубина — 5 км. Самый большой каньон — Долина Маринера — тянется почти на 5000 км (на рис. 59 он виден как тёмная структура, пересекающая диск планеты).

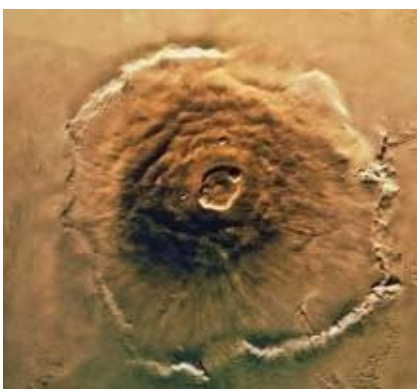


Рисунок 61 — Гора Олимп на Марсе

Поражают своими масштабами потухшие вулканы Марса. Самый высокий — гора Олимп (рис. 61) — поднимается над поверхностью на 27 км. Диаметр его основания достигает 600 км. Возраст данных структур — около 400 млн лет.

Знаменитые полярные шапки Марса образованы толстыми, порядка 3 км, слоями льда, смешанного с пылью. Верхний слой полярных шапок состоит из «сухого

льда» (замёрзшего углекислого газа — CO_2) с небольшой примесью обычного льда (H_2O). Температура здесь опускается ниже –110 °С. Когда на одном из полушарий начинается зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает 57° широты в Северном полушарии и 45° — в Южном. С приходом весны шапки начинают таять. Осенью, когда формируются полярные шапки, можно наблюдать голубовато-белые облака в атмосфере планеты.

Рисунок 62 — Высохшие русла марсианских рек

Загадочные марсианские долины, похожие на высохшие русла рек (рис. 62), были созданы водными потоками, которые иссякли более миллиарда лет назад. Об обилии воды на Марсе в давние времена свидетельствуют многие факты. В 1999 г. были опубликованы исследования, доказывающие, что на Марсе раньше существовал океан воды. Это удалось установить с помощью фотоснимков (переданных на Землю станцией «Марс Глобал Сурвейер») по особенностям рельефа, представляющим древнюю береговую линию. Океан мог существовать, пока температура поверхности Марса была достаточно высока. Планета начала охлаждаться около миллиарда лет назад. Тонкая атмосфера Марса не препятствовала «улетучиванию» воды в межпланетное пространство. При понижении температуры замёрзшая вода вперемешку с песком образовала подповерхностную ледяную оболочку — **криосферу**. Криосфера Марса содержит количество воды, эквивалентное слою толщиной около 1 км по всей планете.

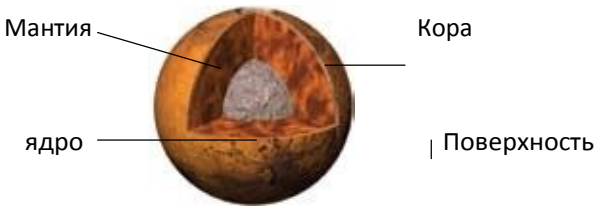
Атмосфера Марса имеет низкую плотность и состоит в основном из углекислого газа. Скорость ветра у поверхности планеты не превышает 15 м/с. Марс — единственная планета, где наблюдаются глобальные пылевые бури. Они создают антипарниковый эффект, так как облака пыли не пропускают солнечное излучение к поверхности. Поэтому поверхность сильно охлаждается, а пыль и окружающая атмосфера, напротив, разогреваются. В атмосфере Марса наблюдаются песчаные вихри, закручивающие столбы пыли высотой до 8 км. Частички облаков состоят из силикатных и ледяных пылинок. Пыль на Марсе поднимается так высоко в атмосферу, что даже закрывает гору Олимп.

Марс обладает слабым магнитным полем напряжённостью в 500 раз меньше земного.

Параметры Марса смотрите в таблице 5.

Таблица 5 — Параметры Марса

Звёздная величина (максимальная)	–2,0	Диаметр по экватору	6794 км
Среднее расстояние до Солнца	228,0 млн км	Масса (Земля = 1)	0,107
	1,524 а. е.	Средняя плотность	$3{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	1,88 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,38
Период вращения вокруг оси	24,62 ч	Температура поверхности	От –130 до +15 °С



Главные выводы

1. Планеты земной группы сравнительно малы (их общая масса не превышает 0,5 % массы всех планет Солнечной системы) и представляют собой твёрдые тела с высокой средней плотностью.

2. Все планеты земной группы обладают сходным строением и состоят из ядра, мантии, твёрдой коры.

3. Для поверхностей планет земной группы характерны кратеры, горы, вулканы.

4. Планеты земной группы (кроме Меркурия) имеют внешние оболочки: атмосферу (Венера, Земля, Марс), гидросферу и биосферу (Земля), криосферу (Марс).

Контрольные вопросы и задания

1. Из каких оболочек состоят планеты?

2. Перечислите источники нагрева недр планет.

3. Что называют гравитационной дифференциацией?

4. Из каких основных химических элементов состоит поверхность: Земли; Меркурия; Марса?
5. Опишите поверхности планет земной группы.
6. Каковы особенности атмосфер планет земной группы?

§ 14. Планеты-гиганты

1. Юпитер. Юпитер — самая большая из планет-гигантов (рис. 63). Его масса намного превышает массу всех других планет, вместе взятых. Юпитер представляет собой газообразное тело с чрезвычайно мощной атмосферой, состоящей главным образом из водорода и гелия, что характерно и для других планет этой группы. По средней плотности, преобладанию водорода и гелия Юпитер похож на звёзды. В отличие от планет земной группы у гигантов нет твёрдой поверхности. То, что мы наблюдаем, — это вершины облаков, плавающих в атмосфере. Из-за быстрого вращения планет-гигантов и сильных ветров облака вытягиваются в полосы, параллельные экватору. Окраску облакам придают примеси аммиачных образований, метан и другие сложные соединения.

Светлые и тёмные полосы атмосферы Юпитера объясняются различными зонами давления. Светлые зоны — это области высокого давления, а тёмные — низкого. Тёплые газы поднимаются вверх в области зон и остывают, достигнув верхней границы облаков. Охлаждаясь, они падают в соседние полосы, где давление низкое.

В экваториальной зоне (от +9 до –9°) газовые течения направлены строго с запада на восток. Скорость движения газовых масс достигает 180 м/с (по исследованиям межпланетной космической станции «Галилео»). Вблизи широт от +20 до –20° вещество движется в противоположную сторону, с востока на запад, со скоростью около 50 м/с. Между основными течениями существуют вихри и струи.

Рисунок 63 — Юпитер. Фотография получена космическим аппаратом «Кассини». Тёмное пятно — тень спутника Ио

Рисунок 64 — Большое Красное Пятно на Юпитере

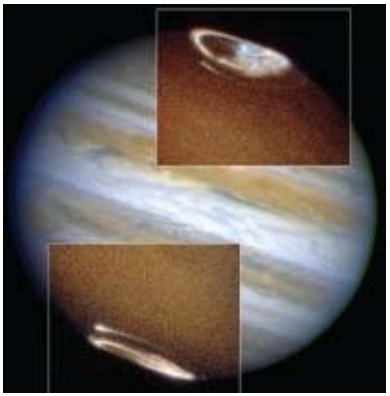


Рисунок 65 — Полярные сияния на Юпитере. Фотография космического телескопа Хаббла

Для Юпитера, как и для всех планет-гигантов, характерны светлые и тёмные овальные пятна. Наиболее примечательное из них — Большое Красное Пятно (рис. 64), наблюдающееся в течение трёх веков. Это огромный и очень устойчивый вихрь, похожий на земной ураган.

В полярных облаках Юпитера наблюдается явление, подобное земному северному сиянию (рис. 65).

Представления о внутреннем строении планет-гигантов получены на основе наблюдений и теоретических моделей, основанных на свойствах водорода.

На дне уплотняющейся вглубь на 1500 км атмосферы Юпитера находится слой жидкого водорода. Затем атмосфера переходит в особое газожидкое состояние.

На уровне примерно 0,77 радиуса планеты начинается оболочка, где водород приобретает свойства металла. Здесь он сжимается так сильно ($4 \cdot 10^{12}$ Па), что электроны покидают свои атомы и свободно перемещаются. Это приводит к появлению магнитного поля Юпитера, напряжённость которого на границе облачного слоя в 12 раз выше, чем у земного магнитного поля.

В центре Юпитера находится твёрдое ядро, состоящее из оксидов кремния, магния и железа с примесями. Диаметр внутреннего ядра — около 25 тыс. км, температура в его центре составляет 23 000 К. Такая высокая температура объясняется медленным гравитационным сжатием планеты.

В 1979 г. космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» обнаружили у Юпитера кольца (рис. 66). Они состоят из очень мелких пылинок

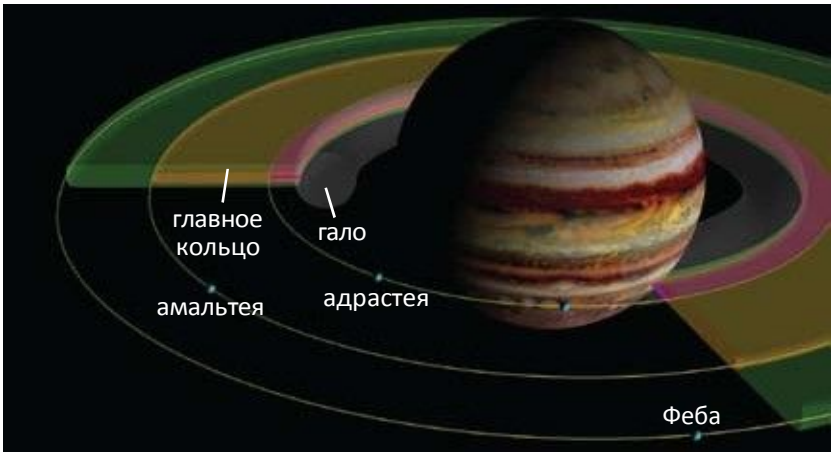


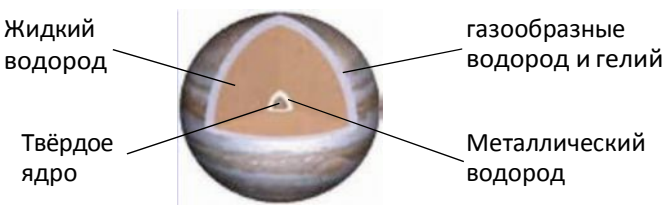
Рисунок 66 — Схема колец Юпитера

(0,2—200 мкм). Эти пылинки постепенно падают в атмосферу Юпитера, а их место занимают другие, которые образуются при столкновении малых спутников, особенно Амальтеи, с метеоритными телами.

Параметры Юпитера смотрите в таблице 6.

Таблица 6 — Параметры Юпитера

Звёздная величина (максимальная)	–2,7	Диаметр по экватору	142 980 км
Среднее расстояние до Солнца	778,6 млн км	Масса (Земля = 1)	318
	5,204 а. е.	Средняя плотность	$1{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	11,87 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	2,2
Период вращения вокруг оси	9,92 ч	Температура верхнего слоя облаков	–133 °С



2. сатурн. Сатурн — это вторая по величине планета-гигант, окружённая красивыми кольцами (рис. 67). Диск планеты заметно сплюснут у полюсов. Это вызвано тем, что у Сатурна самая низкая плотность из всех планет Солнечной системы.

Кольца Сатурна (рис. 68) заметил ещё Галилео Галилей: в 1610 г. он обнаружил по обе стороны диска непонятные придатки. Но только Христиан Гюйгенс в 1656 г. различил тонкое плоское кольцо, не соприкасающееся с планетой. С Земли в телескоп можно увидеть несколько колец, отделённых друг от друга тёмными промежутками.

На основе спектральных исследований в 1895 г. русский учёный А. А. Белопольский установил, что кольца не монолитные, а состоят из отдельных мелких тел. Снимки, полученные космическим аппаратом «Вояджер-2», показали, что систему колец образуют тысячи тонких колец. Каждое из них состоит из бесчисленного множества обломков льда размером от мельчайших пылинок до нескольких метров. Толщина колец не превышает 2 км, а толщина отдельного кольца — не больше 30 м.

Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна, которая имеет наклон 27° к плоскости орбиты. При движении Сатурна по орбите кольца, сохраняя положение в пространстве, дважды за одно обращение планеты вокруг Солнца оказываются повёрнутыми к Земле своим ребром. А так как толщина их мала, то в небольшие телескопы они в это время не видны. Диаметр по наружному краю кольца составляет 272 тыс. км, а по внутреннему — 144 тыс. км. Суммарная масса колец составляет около $3 \cdot 10^{-8}$ массы Сатурна.

Напряжённость магнитного поля Сатурна близка к земной.

Параметры Сатурна смотрите в таблице 7.

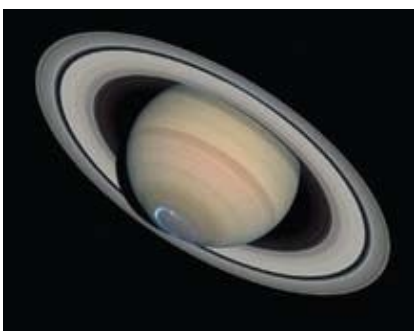
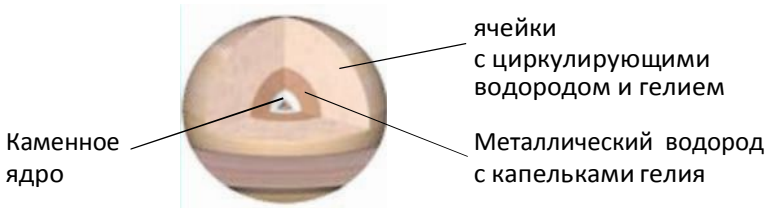


Рисунок 67 — Сатурн. Фотография сделана космическим телескопом Хаббла

Рисунок 68 — Структура колец Сатурна (цвета ненатуральные — они подчёркивают различие минералогического состава колец)

Таблица 7 — Параметры Сатурна

Звёздная величина (максимальная)	0,7	Диаметр по экватору	120 536 км
Среднее расстояние до Солнца	1434 млн км	Масса (Земля = 1)	95,2
	9,56 а. е.	Средняя плотность	$0{,}7 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	29,67 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	1,1
Период вращения вокруг оси	10,66 ч	Температура верхнего слоя облаков	–170 °С



3. Уран. Уран — третья по величине планета-гигант. Планета очень красивого зеленовато-голубоватого цвета (рис. 69). Причина этого кроется в составе атмосферы планеты и её температуре. При температуре –217 °С в верхних слоях водородно-гелиевой атмосферы Урана образовалась метановая дымка. Метан хорошо поглощает красные лучи и отражает голубые и зелёные. Поэтому планета и приобрела красивый бирюзовый цвет. В атмосфере Урана не наблюдается никаких заметных возмущений.

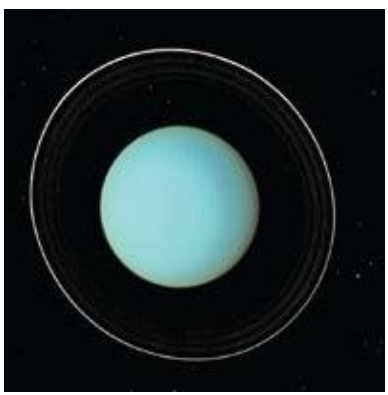


Рисунок 69 — Уран. Фотография получена космическим телескопом Хаббла

В 1977 г. были открыты кольца Урана. Снимки, сделанные «Вояджером-2» в 1986 г., подтвердили их существование. Уран окружён одиннадцатью узкими кольцами, располагающимися в плоскости экватора на расстоянии от 42 до 51,4 тыс. км (или 1,65—2,02 радиуса) от центра планеты.

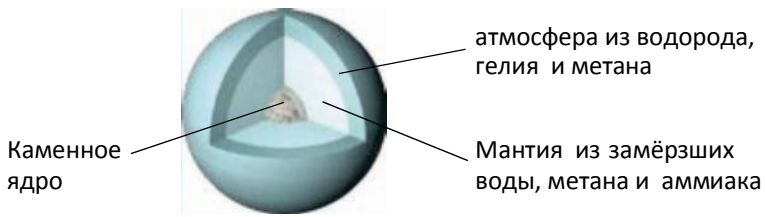
Типичная ширина колец от 1 до 8 км, только у самого большого она меняется от 22 до 93 км. Толщина колец не превышает 1 км. Кольца Урана состоят из мелкой пыли и небольших твёрдых тёмных частиц.

Магнитное поле Урана имеет одну интересную особенность. Ось вращения планеты почти лежит в плоскости орбиты, и линии магнитного поля скручены вращением Урана в длинный штопор позади планеты. Напряжённость магнитного поля приблизительно равна земной.

Параметры Урана смотрите в таблице 8.

Таблица 8 — Параметры Урана

Звёздная величина (максимальная)	5,5	Диаметр по экватору	51 120 км
Среднее расстояние до Солнца	2870 млн км	Масса (Земля = 1)	14,5
	19,18 а. е.	Средняя плотность	$1{,}3 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	84,0 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,9
Период вращения вокруг оси (обратное вращение)	17,24 ч	Температура верхнего слоя облаков	–217 °С



4. нептун. Нептун — самый маленький гигант. Находится почти на краю Солнечной системы и получает очень мало солнечной энергии. Но, несмотря на это, планета очень активна. На фотографиях Нептуна хорошо видны облака, появляющиеся и исчезающие в атмосфере планеты. Примечательной деталью Нептуна является и Большое Тёмное Пятно (рис. 70), схожее по структуре с Большим Красным Пятном Юпитера.

Скорость ветра в атмосфере Нептуна достигает рекордного значения — 600 м/с.

Предположение о существовании колец у Нептуна было выдвинуто в 1984 г. на основе наблюдений по покрытию звёзд планетой. Три замкнутых и одно незамкнутое кольцо видны на снимках, полученных космическим кораблём «Вояджер-2» в 1989 г. Располагаются кольца на расстоянии от 1,7 до 2,5 радиуса планеты. Ширина колец — 1700, 15, 5000 и 50 км соответственно. Они состоят из мелких силикатных пылинок, отражающих 6 % солнечного света.

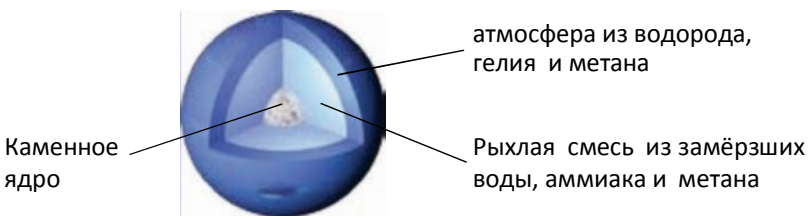
Напряжённость магнитного поля у Нептуна в 3 раза меньше, чем у Земли.

Параметры Нептуна смотрите в таблице 9.

Рисунок 70 — Нептун. Большое Тёмное Пятно. Фотография сделана космическим аппаратом «Вояджер-2»

Таблица 9 — Параметры Нептуна

Звёздная величина (максимальная)	7,8	Диаметр по экватору	49 528 км
Среднее расстояние до Солнца	4491 млн км	Масса (Земля = 1)	17,2
	30,0 а. е.	Средняя плотность	$1{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Солнца	164,5 земного года	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	1,1
Период вращения вокруг оси	16,11 ч	Температура верхнего слоя облаков	–214 °С



Главные выводы

1. В отличие от планет земной группы планеты-гиганты представляют собой крупные массивные газообразные тела с малой плотностью, удалённые от Солнца на значительное расстояние (от 5 до 30 а. е.).

2. Планеты-гиганты очень быстро вращаются вокруг своих осей.

3. Все планеты-гиганты имеют кольца.

4. Основными компонентами атмосфер этих планет являются водород и гелий.

Контрольные вопросы и задания

1. Укажите на отличие основных физических характеристик планет-гигантов от планет земной группы.

2. Какова особенность вращения планет-гигантов вокруг оси?

3. Расскажите об особенностях строения планет-гигантов.

4. Что представляют собой кольца планет?

5. Почему иногда даже в крупные телескопы не видны кольца Сатурна?

§ 15. Луна. Спутники планет

1. Физические условия на Луне. Луна — единственный естественный спутник Земли. Это тело шарообразной формы диаметром 3475 км. Масса Луны всего в 81 раз меньше массы Земли. Средняя плотность Луны равна 0,6 плотности Земли, а ускорение свободного падения в 6 раз меньше земного, т. е. на лунной поверхности предметы весят в 6 раз меньше, чем на Земле. Солнечные сутки на Луне продолжаются синодический месяц (29,5 земных суток). На Луне нет воды в жидком виде и практически нет атмосферы. За лунный день, который длится около 15 земных суток, поверхность успевает нагреться до +130 °С, а ночью охладиться до –170 °С. При высоких температурах скорость газовых молекул превышает вторую космическую скорость для поверхности Луны, равную 2,38 км/с, поэтому газы, выделяющиеся из недр спутника Земли или образующиеся при падении метеорных тел, быстро покидают Луну. Без газовой атмосферы Луна подвержена воздействию всех видов электромагнитного

излучения Солнца, а также ударам метеорных тел разного размера.

Невооружённым глазом на лунной поверхности различимы светлые и тёмные участки. На тёмные, относительно ровные области поверхности, названные «морями», приходится 16,9 % всей поверхности Луны. Более светлые гористые участки, так называемые «материки», занимают оставшуюся поверхность и характеризуются наличием горных хребтов, кольцевых гор, кратеров (рис. 71). Первую подробную лунную карту составил в 1647 г. польский астроном Ян Гевелий. С того времени до наших дней сохранились названия морей — Море Спокойствия, Море Кризисов и др. Названия горных хребтов, тянущихся обычно вдоль окраин морей, созвучны земным — Апеннины, Кавказ, Карпаты и др. Апеннины имеют максимальную высоту около 6 км, а Карпаты — лишь 2 км (рис. 72).

Рисунок 71 — Вид Луны в телескоп

Самыми многочисленными образованиями на лунной поверхности являются кратеры (рис. 73). Их размеры колеблются от микроскопических до более 100 км в диаметре. Кратер состоит из кольцевого вала и внутренней равнины. У большинства «молодых» кратеров на дне возвышаются центральные горки. В полнолуние у «молодых» кратеров, имеющих метеоритное происхождение, можно видеть лучевые системы — светлые полосы, радиально отходящие от кратера и тянущиеся на сотни километров.

Удар крупного метеорита или небольшого астероида о поверхность Луны сопровождается взрывом. При этом происходит выброс лунного вещества под разными углами. Значительная его часть попадает в космос, однако некоторая доля падает обратно на её поверхность. Из струй измельчённого вещества формируются лучевые системы. Для наблюдателя лучи кажутся более светлыми потому, что они отражают свет лучше, чем плотное вещество того же состава.

Крупные и средние кратеры названы в честь выдающихся учёных: Птолемей, Архимед, Платон, Коперник, Тихов, Шмидт и др.

Космические исследования существенно углубили наши знания о Луне. В 1959 г. советским аппаратом «Луна-3» была впервые сфотографирована обратная, невидимая сторона Луны. В 1965 г. появилась первая полная карта Луны, составленная под научным руководством Ю. Н. Липского.

Рисунок 72 — Карта-схема крупнейших деталей видимого в телескоп с Земли полушария Луны

Американские астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин стали первыми людьми, ступившими на поверхность Луны 20 июля 1969 г. Астронавты, находясь на Луне, могли видеть на небе нашу Землю (рис. 74). Американские космические корабли серии «Аполлон» в течение последующих трёх лет шесть раз доставляли в разные места Луны экспедиции (12 астронавтов занимались исследованиями в местах посадок, им удалось собрать более 360 кг лунных образцов). Лунные породы доставляли и советские автоматические станции «Луна».

Поверхностный слой естественного спутника Земли состоит из мелкообломочного материала — **реголита** (рис. 75) и имеет толщину около 10 м. В состав лунного реголита входят также стеклянные сферические микрочастицы. Дробление лунных пород происходит в основном из-за микрометеоритной бомбардировки и резких перепадов температуры. Реголит обладает малой плотностью (верхний слой 1200 кг/м^3) и очень

Рисунок 73 — Часть поверхности Луны. Фотография получена станцией «Зонд»

Рисунок 74 — Земля, видимая с поверхности Луны

низкой теплопроводностью (в 20 раз меньше воздуха), поэтому уже на глубине около 1 м колебания температуры практически не ощутимы.

По химическому составу лунные породы очень близки базальтовым породам Земли. Породы лунных морей отличаются высоким содержанием оксидов железа и титана, материковые — высоким содержанием оксидов алюминия.

В последнее время космические станции обнаружили запасы водяного льда в полярных областях Луны. Поскольку угол наклона лунного экватора к эклиптике всего 1,5°, то дно даже неглубоких кратеров в полярных областях никогда не освещается солнечными лучами. При постоянной температуре –200 °С дно полярных кратеров покрывает смесь реголита со льдом. Источником возникновения и накопления лунных полярных льдов могут быть упавшие в эти области кометы, которые представляют собой ледяные тела.

Внутреннее строение Луны изучено по записям сотрясений от ударов метеоритов, которые фиксировались доставленными на Луну сейсмографами. Под слоем реголита располагается кора, толщина которой на видимой (обращённой к Земле) стороне составляет 60 км, а на обратной — 100 км. Под корой находится мантия, толщина которой около 1000 км. Зона глубже 1600 км напоминает земную мантию, имеет толщину 430 км и температуру около 1800 К. Последние исследования подтвердили, что в центре Луны

Рисунок 75 — Основные типы частичек лунного реголита

находится металлическое ядро радиусом около 300 км, масса которого составляет около 3 % от общей массы Луны.

Существует несколько гипотез образования Луны. По одной из самых популярных Луна образовалась вместе с Землёй из одной планетезимали. Было предположение, что Земля могла разделиться на две части и что впадина Тихого океана — это «яма», оставшаяся после того, как Луна «вырвалась» из Земли.

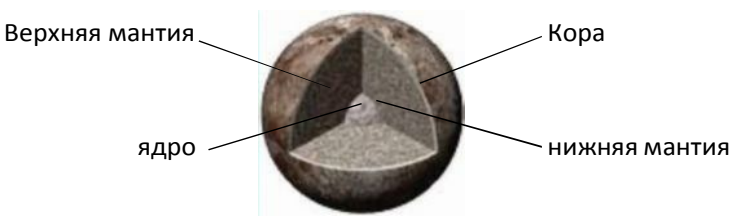
Некоторые учёные полагают, что Луна образовалась путём объединения крошечных камешков, обращавшихся вокруг Земли 4,5 млрд лет назад. Накопление частиц под действием сил гравитации, действующих вблизи Земли, стало «уменьшенным» вариантом такого же процесса, который происходил в первичной солнечной туманности и привёл к рождению планет.

Рассматривается и такой механизм образования Луны. Земля, прошедшая основные стадии дифференциации вещества, столкнулась с крупным небесным телом (размером с Марс). Косой удар разрушил только верхние слои земных недр. На околоземную орбиту было выброшено вещество земной коры и мантии, из которого путём слияния сформировался спутник Земли.

Параметры Луны смотрите в таблице 10.

Таблица 10 — Параметры Луны

Звёздная величина (максимальная)	–12,7	Диаметр по экватору	3475 км
Среднее расстояние до Земли	384,4 млн км	Масса (Земля = 1)	0,012
	60,3 радиуса Земли	Средняя плотность	$3{,}34 \cdot 10^3$ кг/м^3
Период обращения вокруг Земли	27,32 земных суток	Сила притяжения на экваторе (Земля = 1)	0,17
Период вращения вокруг оси	27,32 земных суток	Температура поверхности	От –170 до +130 °С



2. спутники планет. В Солнечной системе на начало 2014 г. известно 173 естественных спутника планет. Семь спутников, включая Луну, имеют диаметр больше 2500 км, а Ганимед и Титан (табл. 11) даже превосходят по размеру Меркурий.

Таблица 11 — Крупные спутники планет

Характеристики	Спутники						
	Ганимед	**Титан**	**Каллисто**	**Ио**	**Луна**	**Европа**	**Тритон**
Планета	Юпитер	Сатурн	Юпитер	Юпитер	Земля	Юпитер	Нептун
Диаметр, км	5268	5150	4806	3640	3475	3130	2700
Масса, □ 10^{23} кг	1,49	1,35	1,08	0,892	0,735	0,485	0,215
Плотность, кг/м^3	1930	1900	1830	3550	3340	3040	2100
Температура поверхности, °С	–140	–179	–140	–130	от –170 до +130	–140	–235

Небольшие спутники размером в десятки километров представляют собой каменные или ледяные тела неправильной формы. Их поверхности усеяны кратерами и покрыты мелкой пылью. Средние спутники (в несколько сотен километров) в основном шарообразные и имеют малую плотность. По внешнему виду их поверхность напоминает лунную. Отличаются разнообразием 7 крупнейших спутников. По своему строению они больше похожи на планеты земной группы. Крупнейшие спутники Юпитера были открыты ещё в 1610 г. Галилеем. Однако основные сведения о природе крупных спутников планет-гигантов получены в результате исследований с помощью космических аппаратов.

Модель внутреннего строения крупных спутников предусматривает наличие у них трёх оболочек: коры, мантии и ядра. Ядром, содержащим соединения железа и занимающим от 0,3 до 0,6 радиуса спутника,

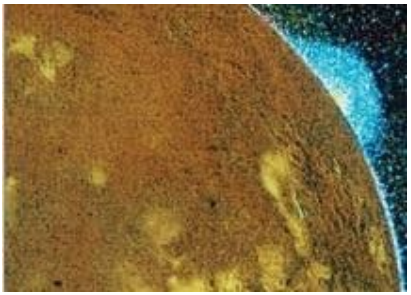


Рисунок 76 — Ио — спутник Юпитера. Извержение вулкана. Фотография сделана межпланетным аппаратом «Галилео»

обладают Ио (рис. 76), Европа (рис. 77) и Ганимед. У Тритона и Каллисто (рис. 78) каменистые ядра такого же или даже большего размеров.

Силикатная (каменистая) кора Ио имеет толщину 30 км. Под ней на глубине 100 км находится жидкая магма, температура которой достигает 2000 К. Магма питает многочисленные вулканы Ио. Остальные спутники покрыты ледяной оболочкой разной толщины, под которой расположена каменистая мантия.

На поверхности Тритона и Ганимеда видны следы тектонической деятельности: разломы, сжатия, трещины, мелкие хребты. Каллисто отличается от них наличием многочисленных кратеров ударного происхождения.

Ледяную оболочку Европы пересекает сеть светлых и тёмных узких полос. Это трещины в толстой ледяной коре, вызываемые приливными воздействиями Юпитера. Многолетние наблюдения за рисунком, который образуют трещины, показали, что ледяные массы немного смещаются относительно друг друга. Это значит, что подо льдом находится вода. В некоторых местах ледяного панциря Европы космический аппарат «Галилео» сфотографировал странные хаотические нагромождения старых льдин, вмороженных в свежий лёд. Эти структуры называются «хаосами»

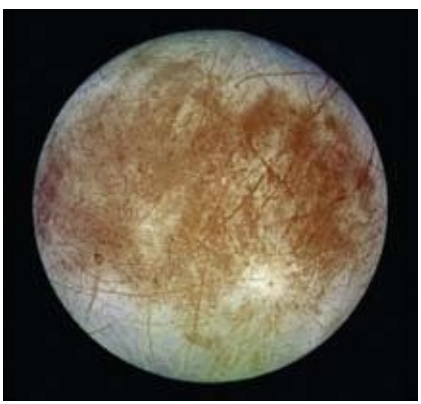


Рисунок 77 — Европа — спутник Юпитера

Рисунок 78 — Каллисто — спутник Юпитера

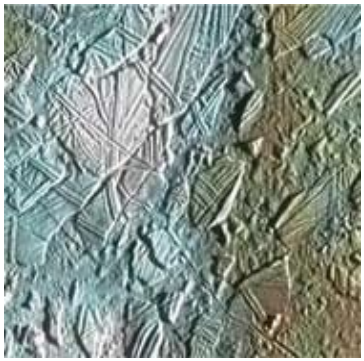


Рисунок 79 — Хаосы на спутнике Юпитера Европа

Рисунок 80 — Спутник Сатурна — Титан — имеет очень плотную атмосферу

(рис. 79). Они свидетельствуют о том, что время от времени лёд подтаивает, но потом снова застывает. Не успевшие растаять льдины оказываются вмороженными в новый лёд. О том, что ледяная поверхность Европы молода, свидетельствует и почти полное отсутствие на ней ударных кратеров.

На Ио нет признаков существования значительного количества воды ни внутри спутника, ни тем более на его поверхности. Зато там открыты многочисленные вулканические извержения. Выброшенные вулканами и оседающие на поверхности соединения серы придают спутнику окраску от белой до ярко-красной и чёрной (см. рис. 76). При этом цвет зависит от температуры вещества. Из жерла вулканов газы выбрасываются на высоту около 200 км со скоростью примерно 1 км/с. Газовые гейзеры замечены над полярной шапкой Тритона. Струи тёмного вещества вырываются вверх с его поверхности и достигают высоты 8 км.

Наиболее мощную атмосферу имеет Титан (рис. 80). Она на 60 % более плотная, чем на Земле, и примерно на 85 % состоит из азота. Давление у поверхности в 1,5 раза превышает земное. Космический аппарат «Гюйгенс» в 2005 г. обнаружил горные хребты, русла рек, озёра жидкого метана и этана.

Разреженную атмосферу из азота и метана имеет Тритон (10^{-5} земной). Слабая атмосфера из молекулярного кислорода окутывает Ганимед и Европу (10^{-9} и 10^{-11} земной). Образуется она так: солнечный свет, космические лучи и микрометеориты выбивают с ледяной поверхности молекулы воды, которые под действием ультрафиолетового излучения распадаются на атомы водорода и кислорода. Атомы водорода сразу же покидают атмосферу, а атомы кислорода объединяются в молекулы. Разреженная атмосфера из

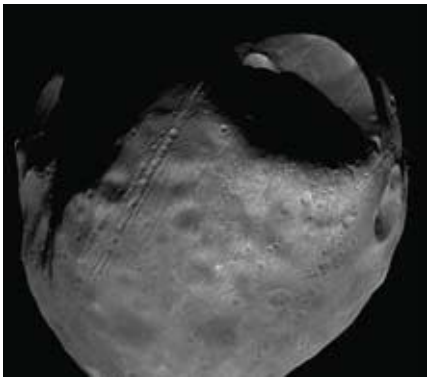


Рисунок 81 — Фобос — спутник Марса. На переднем плане кратер Стикни

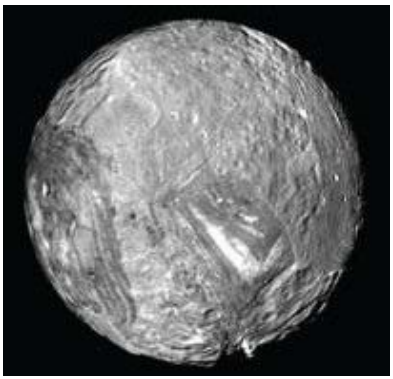


Рисунок 82 — Миранда — спутник Урана

углекислого газа есть у Каллисто, такой же разреженной атмосферой из оксидов серы и вулканических газов обладает Ио (10^{-9} земной).

У нескольких крупных спутников обнаружены собственные магнитные поля.

Из планет земной группы, кроме Земли, только Марс имеет два спутника, открытых в 1877 г. американским астрономом Асафом Холлом. Это небольшие каменистые тела неправильной формы размером 27 □ 19 км — Фобос (рис. 81) и 16 □ 11 км — Деймос.

Изображения некоторых других спутников планет Солнечной системы представлены на рисунках 82—84.

Рисунок 83 — Мимас — спутник Сатурна. Большой кратер имеет диаметр свыше 100 км

Рисунок 84 — Энцелад — спутник Сатурна

Главные выводы

1. Луна — спутник Земли и ближайшее к Земле небесное тело.

2. По своей природе Луна, как и другие крупные спутники планет, близка к планетам земной группы.

3. Небольшие спутники планет (размером в десятки километров) представляют собой каменистые или ледяные тела неправильной формы.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте физические условия на луне. Чем они отличаются от привычных нам условий на Земле?

2. Какие детали на луне видны невооружённым глазом, а какие — в телескоп?

3. Приведите примеры названий некоторых лунных кратеров, морей и горных хребтов.

4. Почему обратную сторону луны удалось сфотографировать только при её облёте на космическом аппарате?

5. Что собой представляет лунный грунт? Отличается ли он от земного?

6. Опишите внутреннее строение луны. Каким образом оно было изучено?

7. Какие гипотезы образования луны вы знаете?

8. назовите крупнейшие спутники планет Солнечной системы. Расскажите о некоторых характерных особенностях каждого из них.

§ 16. Карликовые планеты и малые тела солнечной системы

1. Карликовые планеты. В августе 2006 г. на Ассамблее Международного астрономического союза было принято новое определение планеты и впервые введено понятие «карликовая планета». **Карликовыми планетами** считаются объекты, вращающиеся вокруг звезды, имеющие гидростатически равновесную форму (шарообразную), но не расчистившие близлежащее пространство и не являющиеся спутниками больших планет.

До августа 2006 г. Плутон, открытый Клайдом Томбо в 1930 г., считался девятой планетой Солнечной системы. Однако по динамическим и физическим характеристикам он существенно отличался от других планет. В 1978 г. у Плутона был открыт спутник — Харон. Его диаметр составляет 1205 км, чуть больше половины диаметра Плутона, а соотношение

масс — 1 : 8. Одни астрономы причисляли Харон к спутникам, другие считали систему Плутон — Харон двойной планетой. Согласно решению Международного астрономического союза отличие двойной планеты от системы планета — спутник (например, Земля — Луна) кроется в расположении барицентра — общего центра масс. В первом случае этот центр находится в открытом космосе, во втором — внутри основной планеты, имеющей спутники.

Стало очевидным, что Плутон — лишь один из наиболее крупных известных до настоящего времени объектов **пояса Койпера**, причём по крайней мере один из объектов пояса (Эрида) является более крупным телом, чем Плутон (рис. 85).

Планеты и карликовые планеты — это два разных класса объектов Солнечной системы. Кроме Плутона, карликовыми планетами считаются «бывший» астероид Церера, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, и объекты пояса Койпера — Эрида, Хуамеа и Макемаке. По мнению астрономов, в области пояса Койпера находятся десятки карликовых планет, подобных Плутону, их обнаружение лишь вопрос времени.

2. Астероиды. Все другие объекты, кроме карликовых планет, обращающиеся вокруг Солнца и не являющиеся спутниками, называются **малыми телами** Солнечной системы. К данному типу относится большинство астероидов между Марсом и Юпитером, а также транснептуновые объекты пояса Койпера, кометы и все остальные тела, обращающиеся вокруг Солнца.

Рисунок 85 — Сравнительные размеры Земли и карликовых планет

После 1801 г. между орбитами Марса и Юпитера были обнаружены карликовая планета Церера и множество астероидов. **Астероид** (малая планета) — малое тело Солнечной системы, имеющее неправильную форму и находящееся на гелиоцентрической орбите. К началу XX в. было обнаружено около 500 астероидов с диаметрами от нескольких десятков километров и больше. В настоящее время каталог пронумерованных астероидов содержит более 380 тыс., а всего открыто около 600 тыс. объектов.

Значительная часть (98 %) астероидов движется в плоскостях, близких к эклиптике, по орбитам с малым эксцентриситетом, располагаясь между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии 2,2—4,5 а. е. от Солнца. Вокруг Солнца астероиды движутся в ту же сторону, что и большие планеты. Область пространства между орбитами Марса и Юпитера, где находится подавляющее большинство астероидов, называется Главным поясом астероидов.

По одной из гипотез астероиды представляют собой остатки некогда существовавшего множества планетезималей. Процесс формирования их в планету был когда-то приостановлен из-за возмущений со стороны быстро вращающегося гиганта Юпитера. В результате этого объединение вещества сменилось на дробление. Возмущения планет-гигантов изменяют орбиты астероидов, заставляя их сталкиваться друг с другом, с планетами и их спутниками. По другой версии предполагается, что астероиды возникли в результате разрушения гипотетической планеты, находящейся между Марсом и Юпитером.

В 1951 г. Джерард Койпер предсказал существование пояса астероидов за орбитой Нептуна. Теоретически этот пояс должен быть расположен на расстоянии 35—50 а. е. от Солнца. Возможно, это остаток первоначальной туманности, из которой сформировалась Солнечная система. Суммарная масса тел пояса Койпера сопоставима с массой Земли.

Впервые сфотографировал поверхность астероидов межпланетный космический аппарат «Галилео». Следуя к Юпитеру, он сфотографировал астероиды Гаспра и Ида со спутником Дактиль (рис. 86).

Рисунок 86 — Астероид Ида со спутником Дактиль

Первую мягкую посадку на поверхность астероида совершил космический аппарат NEAR 12 февраля 2001 г. Астероид Эрос оказался каменистым телом неправильной формы с размерами 33 □ 13 □ 13 км и плотностью 2700 кг/м^3, близкой к плотности пород земной коры. По- верхность астероида покрыта пылью и усеяна кратерами и валунами (диаметром до 100 м).

Предполагается, что в Солнечной системе на расстоянии, не превышающем 100 а. е., находится около 1 млн малых тел размерами до 1 км. Орбиты астероидов увеличивают свой эксцентриситет до 0,8 из-за гравитационных сил со стороны планет-гигантов. Благодаря этому некоторые астероиды проникают внутрь орбит Марса, Земли и даже Меркурия. Число астероидов, имеющих диаметр более 1 км и пересекающих орбиту Земли, оценивается в 6500 объектов. Такие небесные тела могут сталкиваться с Землёй не реже, чем один раз в 20 млн лет. Существует не менее 200 тыс. астероидов с поперечником 100 м и более, орбиты которых могут пересекать орбиту Земли. Вероятность столкновения с таким телом — примерно 1 раз в 5 тыс. лет, при этом на Земле образуется кратер с поперечником около 1 км.

29 января 2008 г. на опасно близком расстоянии от Земли (600 тыс. км) пролетел астероид размером 0,25 км. Поэтому в США, России и других странах созданы Службы по слежению за опасными астероидами, чтобы в случае угрозы Земле провести работу по изменению их орбиты или уничтожению.

Первоначально астероидам давали имена мифологических богинь, потом просто женские имена. Когда иссякли и они, астероиды стали называть в честь известных учёных, различных стран и городов. Среди астероидов есть такие, названия которых связаны с Республикой Беларусь, — Минск, Белоруссия, Брест, Хатынь, Шагал, Витебск и др.

3. метеориты. В межпланетном пространстве движется огромное количество каменных и железных тел самых разнообразных по размерам, форме и составу. Эти тела получили название **метеоритных тел**. При вторжении такого тела в атмосферу Земли с космической скоростью в результате трения о воздух оно нагревается, начинает плавиться и светиться — на небе появляется яркий огненный шар. Это явление получило название болид (греч. *bolidos* — метательное копьё). В ночное время болид ярко освещает местность на десятки и сотни километров вокруг. Очень яркие болиды видны даже днём при полном солнечном освещении. За огненным шаром вдоль его траектории остаётся след,

представляющий в своём начале свечение ионизированных молекул воздуха и заканчивающийся струями пыли. Пылинки — это продукты разрушения метеоритного тела во время его движения в атмосфере, так как при полёте с огромной скоростью тело нагревается до нескольких тысяч градусов. Вещество на его поверхности непрерывно расплавляется и частично испаряется: немедленно срывается потоками воздуха и разбрызгивается в виде мельчайших капелек. Они и составляют пылевой след болида. Нарастающее уплотнение воздуха создаёт вокруг метеоритного тела ударную волну. Она вызывает такие звуковые явления, как грохот и гул.

Уцелевший от полного разрушения остаток метеоритного тела падает на поверхность Земли. Это и есть **метеорит**. Метеориты представляют собой обломки небесных тел Солнечной системы. Как правило, они получают свои названия по ближайшему к месту падения населённому пункту или географическому объекту.

Метеоритное тело, имеющее огромную начальную массу в десятки и сотни тысяч тонн, проходит всю толщу атмосферы, сохраняя космическую скорость в несколько километров в секунду. В результате удара происходит взрыв, на месте удара образуется метеоритный кратер, который может иметь размеры от нескольких метров до 100 км. Наиболее известен Аризонский кратер диаметром 1200 м, глубиной 180 м и высотой вала около 50 м (рис. 87). Возможно, он появился 30 тыс. лет назад. Кратеры большого размера (хорошо сохранившиеся на поверхности Луны) на Земле обнаружить сложно. Они быстро разрушаются под воздействием воздуха, воды, ветра, растительности, заносятся слоем песка и грунта. Учёные с помощью космических снимков научились находить древние метеоритные кратеры на Земле. Сегодня обнаружено более 150 астроблем — «звёздных ран», как их образно называют учёные. На территории Беларуси к астроблемам относят Логойскую впадину. Диаметр этого древнего кратера 17 км. Он расположен в 6—8 км северо-западнее города Логойска Минской области.

Рисунок 87 — Метеоритный кратер в Аризоне (США)

Все метеориты по составу подразделяются на три основных класса: каменные, железо-каменные и железные.

Каменные метеориты близки по составу к земным горным породам: содержат оксиды железа, кремния, магния.

Около 85 % каменных метеоритов содержат хондры — сферические частицы размером от микроскопических зёрен до горошины. Такие каменные метеориты называются **хондритами**, остальные — **ахондритами**.

Самый крупный метеорит найден в 1920 г. близ населённого пункта Гоба в Юго-Западной Африке. Это железный метеорит массой около 60 т. Однако такие крупные тела падают редко. На территории Республики Беларусь найдено шесть крупных метеоритов: например, в 1954 г. железный метеорит массой 300 кг найден у деревни Греск Слуцкого района Минской области. Как правило, массы большинства метеоритов колеблются от сотен граммов до нескольких килограммов.

4. Кометы. О кометах, «хвостатых звёздах», было известно с давних времён. Первые китайские записи о кометах относятся к третьему тысячелетию до нашей эры. Вдали от Солнца **комета** выглядит слабым туманным объектом. По мере приближения к Солнцу она становится ярче, увеличивается в размерах, у неё появляется хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. Неожиданное появление яркой кометы, нарушающей небесную гармонию, всегда привлекало внимание людей и внушало им суеверный ужас. Комета считалась предвестницей войн, эпидемий и других несчастий (рис. 88).

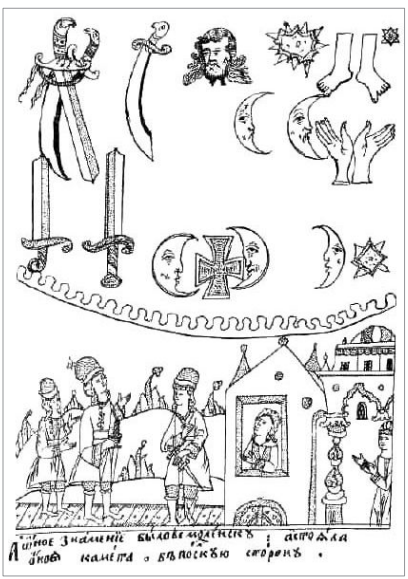


Рисунок 88 — Древняя гравюра, рассказывающая о появлении кометы в Смоленске

За историю человечества уже наблюдалось около 3500 комет. Зарегистрированы в каталогах около 1000 таких объектов и определены элементы их орбит. Почти все кометы движутся по вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом, близким к единице. Кометы подразделяются на **короткопериодические** (с периодом обращения меньше 200 лет) и **долгопериодические**. Первую периодическую комету обнаружил английский астроном Эдмунд Галлей. Он вычислил орбиты 24 ярких комет. Анализируя свой кометный каталог, Галлей заметил сходство элементов орбит комет 1531, 1607 и 1682 гг. и предположил, что это последовательное возвращение одной и той же кометы,

которая движется по сильно вытянутой эллиптической орбите с периодом почти 76 лет. В полном соответствии с предсказанием Галлея её обнаружили в 1758 г. За этой кометой закрепилось название «комета Галлея» (рис. 89). Она движется по орбите с большей полуосью a = 17,94 а. е. в направлении, противоположном движению Земли.

Рисунок 89 — Комета Галлея. 1985 г.

В строении кометы выделяются следующие составные элементы: ядро, голова и хвост.

Ядро кометы — это небольшое твёрдое ледяное тело, включающее тугоплавкие частички и органические соединения. До 80 % ядра кометы состоит из водяного льда, а также из замёрзшего углекислого газа, угарного газа, метана, аммиака и вкраплённых в лёд металлических частиц. Есть в кометных льдах и более сложные вещества, вплоть до аминокислот. По результатам исследований, выполненных космическими аппаратами, ядро кометы Галлея (рис. 90) представляет собой монолитное тело неправильной формы размерами 16 □ 8 км, массой $3 \cdot 10^{14}$ кг и малой плотностью порядка 600 кг/м^3.

При приближении к Солнцу, на расстоянии нескольких астрономических единиц, у кометы образуется голова. Она возникает в результате нагрева ядра, испарения и выделения с его поверхности газов и пыли. Видимые поперечники голов комет с приближением к Солнцу достигают размеров 10^4—10^6 км. Под действием давления солнечного излучения на газы, окружающие голову кометы, образуется хвост. Хвосты ярких комет тянутся на сотни миллионов километров. Например, хвост кометы Хиякутаки наблюдался растянутым на 300 млн км. Концентрация частиц в хвостах комет очень низкая, её можно сравнить с межпланетной средой.

Рисунок 90 — Фотография ядра кометы Галлея, полученная космическим аппаратом «Джотто»

В зависимости от своей формы кометные хвосты подразделяются на несколько *типов*:

1. Хвост образуется при ускорении солнечным ветром кометных ионов и направлен в сторону, противоположную Солнцу.

2. Хвост несколько изогнут, состоит из пылинок, имеющих размер от долей до десятков микрометров.

3. Хвост, состоящий из более крупной пыли, сильно изогнут под воздействием магнитного поля.

4. «Антихвост» — выброс из головы кометы направлен прямо к Солнцу.

Каждое возвращение кометы к Солнцу не проходит бесследно. Ядро кометы теряет около $\frac{1}{1000}$ своей массы. Поэтому, например, время существования кометы Галлея оценивается в 20 тыс. лет. Но кометы могут существовать и меньше времени, так как они подвергаются разрушениям вследствие внутренних напряжений, возникающих из-за нагрева их Солнцем или приливного воздействия Солнца и планет-гигантов. Погибают кометы также при падении на Солнце, столкновении с планетами и метеоритными телами. Документально зарегистрировано более 30 комет, распавшихся на отдельные компоненты на глазах наблюдателей. Так, в 1992 г. комета Шумейкеров — Леви сблизилась с Юпитером и раздробилась на 22 осколка. Спустя два года, обогнув по орбите Юпитер, осколки упали в атмосферу планеты со скоростью 60 км/с (рис. 91).

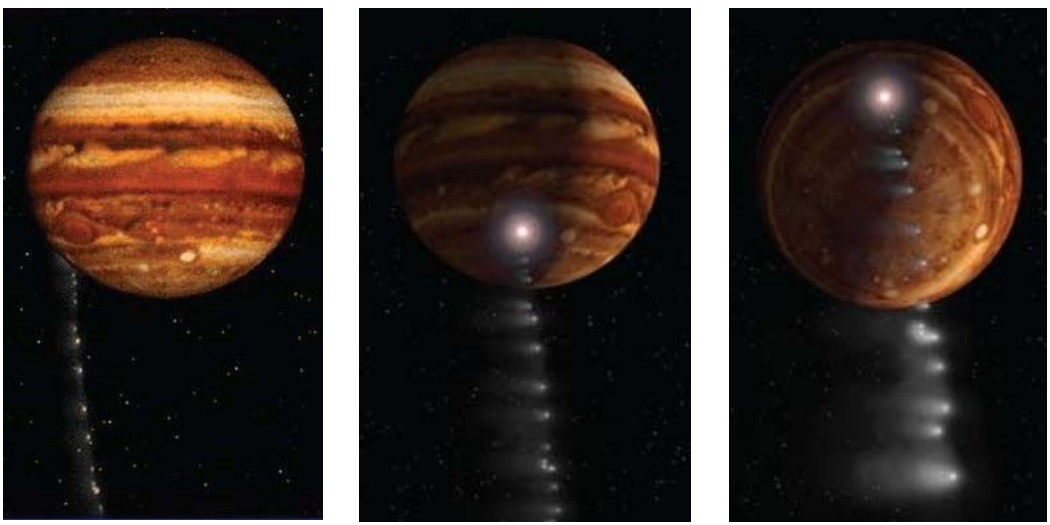


Рисунок 91 — Падение осколков кометы Шумейкеров — Леви на Юпитер

В результате возникли гигантские вихревые тёмные образования, сравнимые по размерам с размерами Земли. Существует и вероятность столкновения ядер комет с Землёй.

Рисунок 92 — Яркий метеор

5. метеоры и метеорные потоки. При движении вокруг Солнца кометы распадаются. Вдоль их орбит вытягиваются шлейфы пыли, которые могут пересекать земную орбиту. Частичка, входя с космической скоростью в атмосферу Земли, сгорает и образует светящийся след. Это явление называется **метеором** (рис. 92). Сама частичка в этом случае называется **метеорным телом**.

Размеры метеорных тел, вызывающих явление метеора, находятся в пределах от нескольких микрон до нескольких сантиметров (дают очень яркое свечение). По некоторым оценкам приток метеорного вещества на Землю составляет около 50 тыс. т в год.

Около 1 % метеорных тел, встречающихся с Землёй, прилетает из межзвёздного пространства. Метеорные тела вторгаются в земную атмосферу со скоростью от 11 до 72 км/с, встречая на своём пути сильное и быстро нарастающее сопротивление воздуха. Поверхность метеорного тела разогревается до нескольких тысяч градусов и превращается в раскалённый газ, который ионизирует окружающие молекулы воздуха. В результате чего наблюдатель на Земле видит светящийся огненный след.

Свечение метеора начинается на высоте 120 км и исчезает на высоте 60—80 км от поверхности Земли, когда тело полностью испарится в земной атмосфере. Весь полёт метеорного тела длится от десятых долей до нескольких секунд. Время наблюдения явления метеора зависит от скорости метеорного тела.

Свойства и природу метеорного вещества помогают изучать визуальные, фотографические, спектральные и радиолокационные наблюдения. Исследования показали, что весь комплекс метеорного вещества подразделяется на случайные (спорадические) метеорные тела и метеорные частицы, принадлежащие к метеорным роям.

Метеоры, появляющиеся в определённое время года и падающие десятками в час, принадлежат **метеорным потокам**, или «звёздным дождям».

Рисунок 93 — Радиант метеорного потока

Метеорные потоки наблюдаются, когда Земля пересекает орбиту метеорного роя. Видимые пути метеоров одного потока, спроектированные на небесную сферу и продолженные в обратном направлении, пересекаются в одной области на небе, называемой **радиантом** (рис. 93).

Метеорный поток носит имя того созвездия, в котором находится радиант, например Дракониды, Ориониды и др. Среди метеорных потоков встречаются такие, интенсивность которых из года в год не меняется. Это значит, что метеорные частички распределены почти равномерно вдоль орбиты роя. Наиболее известным таким потоком является «поток Персеиды», наблюдающийся ежегодно в августе. Орбита этого роя совпадает с орбитой кометы 1862 III. Один раз в 33 года наблюдаются метеорные дожди с радиантом в созвездии Льва, когда Земля встречается с самой плотной частью роя. Этот рой вызывает метеорный поток Леониды (рис. 94), наблюдающийся в середине ноября. Орбита данного метеорного роя практически совпадает с орбитой кометы 1866 I. Таким образом, точно установлено родство метеорных роев с кометами. Комета, разрушаясь, порождает метеорный рой.

Рисунок 94 — «Звёздный дождь» Леониды. Гравюра. 1833 г.

Главные выводы

1. Карликовая планета — объект шарообразной формы, движущийся по гелиоцентрической орбите, но не расчистивший близлежащее пространство.

2. Тела Солнечной системы, обращающиеся вокруг Солнца и не являющиеся планетами, карликовыми планетами и их спутниками, называются малыми телами.

3. К малым телам Солнечной системы относятся: астероиды (малые планеты), метеорные и метеоритные тела, кометы.

4. Астероидно-кометная опасность — вероятность столкновения Земли с кометным ядром или астероидом, которое может привести к катастрофическим последствиям.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под карликовой планетой? Какие карликовые планеты вы знаете?
2. Расскажите, какие небесные объекты называют малыми телами.
3. Почему у астероидов нет атмосфер?
4. Какова связь комет с метеорами и астероидами?
5. Существует ли опасность столкновения Земли с астероидом?
6. Охарактеризуйте смысл понятий «метеор», «метеорит», «болид».
7. Какова природа происхождения «звёздных дождей»?
8. Что такое радиант метеорного потока?

раздел V

методы исследовАния небесных тел

§ 17. исследование электромагнитного излучения небесных тел

1. Электромагнитное излучение. В исследовании природы небесных тел большое внимание уделяется изучению их электромагнитного излучения. Небесные тела в зависимости от своего физического состояния излучают электромагнитные волны различной длины.

В вакууме электромагнитные волны всегда распространяются с одинаковой для всех видов излучения скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Важным свойством электромагнитного излучения является то, что скорость его распространения не зависит ни от длины волны, ни от скорости движения источника. Волны характеризуются частотой (υ) и длиной (λ), между которыми существует зависимость:

$$c = \upsilon \cdot \lambda.$$

Электромагнитные волны, имеющие разную длину волны, взаимодействуют с веществом по-разному. Соответственно методы исследования электромагнитного излучения отличаются. В связи с этим электромагнитное излучение условно делится на несколько диапазонов (табл. 12).

Таблица 12 — Диапазоны электромагнитного излучения

Диапазоны	Длина волны, λ
Радиоволны	Больше 1 мм
Инфракрасные лучи	От 760 нм до 1 мм
Видимые лучи	От 390 до 760 нм
Ультрафиолетовые лучи	От 10 до 390 нм
Рентгеновские лучи	От 0,01 до 10 нм
Гамма-лучи	Меньше 0,01 нм

Излучение с длиной волны от 390 до 760 нм человеческий глаз воспринимает как свет, причём разным длинам волн соответствуют разные цвета (от фиолетового до красного). Для обнаружения излучения в других диапазонах требуются специальные приборы.

В зависимости от своего физического состояния одни небесные тела излучают энергию в узких интервалах частот спектра электромагнитных волн (например, светлые газовые туманности), другие — во всём его диапазоне: от гамма-лучей до радиоволн включительно (например, звёзды). Изучение физической природы небесных тел в широком диапазоне электромагнитного излучения привело к появлению в науке таких разделов, как гамма-астрономия, рентгеновская астрономия, инфракрасная астрономия, радиоастрономия и др.

Изучение электромагнитных волн, испускаемых небесными телами, затрудняется из-за того, что атмосфера Земли пропускает излучение лишь в определённых диапазонах длин волн: от 300 до 1000 нм, от 1 см до 20 м и в нескольких «окнах» инфракрасного диапазона (рис. 95). Излучение, доходящее до поверхности Земли, исследуют с помощью оптических телескопов (видимый свет) и радиотелескопов.

Сильнее всего атмосфера поглощает коротковолновую область диапазона электромагнитного излучения: ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи. Наблюдения в этих диапазонах возможны только с помощью приборов, поднятых на большую высоту (на самолётах или зондах), либо установленных на межпланетных космических станциях, комплексах (рис. 96), искусственных спутниках Земли и ракетах.

2. телескопы и их характеристики. Изучать далёкие недостижимые небесные объекты можно одним способом — собрав и проанализировав их

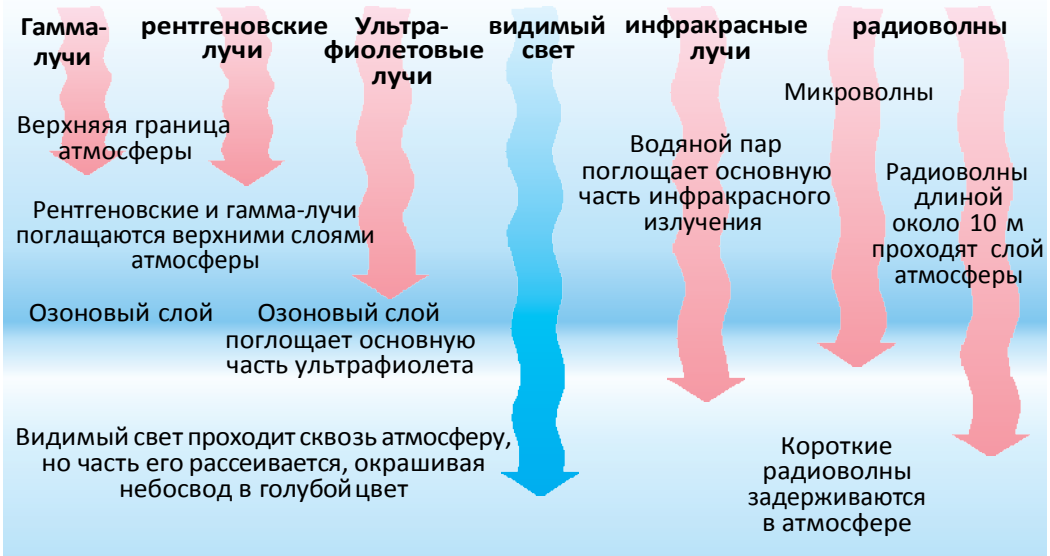


Рисунок 95 — Распространение излучения небесных тел в атмосфере Земли

излучение. Для этой цели и служат телескопы. При всём своём многообразии телескопы, принимающие электромагнитное излучение, решают две основные задачи:

1) собрать от исследуемого объекта как можно больше энергии излучения определённого диапазона электромагнитных волн;

2) создать по возможности наиболее резкое изображение объекта, чтобы можно было выделить излучение от отдельных его точек, а также измерить угловые расстояния между ними.

Рисунок 96 — Международная космическая станция

В зависимости от конструктивных особенностей оптических схем телескопы делятся на линзовые системы — рефракторы; зеркальные системы — рефлекторы; смешанные зеркально-линзовые системы, к которым относятся телескопы Б. Шмидта, Д. Д. Максутова и др.

Телескоп-рефрактор в основном используется для визуальных наблюдений (рис. 97). Он имеет объектив и окуляр. Диаметр объективов рефракторов ограничен из-за трудностей отливки крупных однородных блоков оптического стекла, их прогибов и светопоглощения. Наибольший диаметр объектива телескопа-рефрактора, применяемого в настоящее время, — 102 см (Йеркская обсерватория, США). Недостатками такого типа телескопов считаются их значительная длина и искажение изображения. Для устранения оптических искажений используют многолинзовые объективы с просветлённой оптикой. Телескоп, совмещённый с фотокамерой, называют астрографом. Астрограф по сути представляет собой большой фотоаппарат: в фокальной плоскости его устанавливается кассета с фотопластинкой.

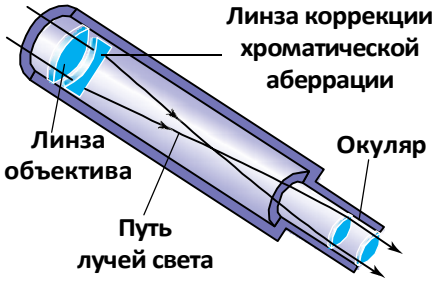


Рисунок 97 — Ход лучей в телескопе-рефракторе

Телескоп-рефлектор имеет зеркальный объектив. В простейшем рефлекторе объектив — это одиночное, обычно параболическое зеркало; изображение получается в его главном фокусе.

По сравнению с рефракторами современные телескопы-рефлекторы имеют намного большие объективы. В рефлекторах с диаметром зеркала свыше 2,5 м в главном фокусе иногда устанавливают кабину для наблюдателя. С увеличением размеров зеркала в таких телескопах приходится применять специальные системы разгрузки зеркал, исключающие их деформации из-за собственной массы, а также принимать меры для предотвращения их температурных деформаций. Сооружение крупных рефлекторов (с диаметром цельного зеркала 4—6 м) сопряжено с большими техническими трудностями. Поэтому разрабатываются конструкции с составными мозаичными зеркалами, отдельные элементы которых требуют точной настройки с помощью специальной следящей аппаратуры.

В небольших и средних по размерам рефлекторах для удобства наблюдения свет отражается дополнительным плоским (вторичным) зеркалом к стенке трубы, где находится окуляр (рис. 98). Рефлекторы используют преимущественно для фотографирования неба, фотоэлектрических и спектральных исследований.

В **зеркально-линзовых телескопах** изображение получается с помощью сложного объектива, содержащего как зеркала, так и линзы. Это позволяет значительно снизить оптические искажения телескопа по

сравнению с зеркальными или линзовыми системами. В телескопах системы Б. Шмидта оптические искажения главного сферического зеркала устраняются с помощью специальной коррекционной пластинки сложного профиля, установленной перед ним. В телескопах системы Д. Д. Максутова искажения главного сферического или эллиптического зеркал исправляются мениском, установленным перед зеркалом (рис. 99). Мениск — это линза с мало отличающимися радиусами кривизны поверхности; такая линза почти не влияет на общий ход лучей, но заметно исправляет искажения оптического изображения.

Основными оптическими параметрами телескопа являются: видимое увеличение, разрешающая способность и проницающая сила.

Видимое увеличение (G) оптической системы — это отношение угла, под которым наблюдается изображение, даваемое оптической системой прибора, к угловому размеру объекта при наблюдении его непосредственно глазом. Видимое увеличение телескопа можно рассчитать по формуле:

$$G = \frac{F_{об}}{F}$$

где $F_{об}$ и $F_{ок}$ — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Для получения значительного увеличения объективы в телескопах должны быть длиннофокусными (фокусное расстояние в несколько метров), а окуляры — короткофокусными (от нескольких сантиметров до 6 мм). Неспокойная атмосфера Земли вызывает дрожание и искажение

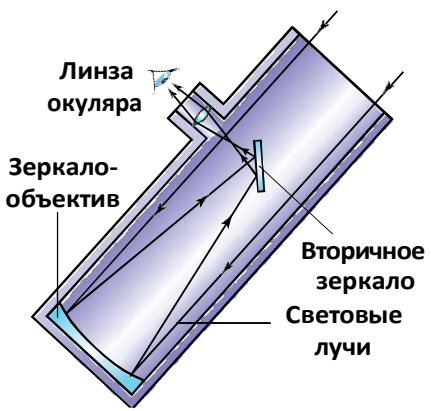


Рисунок 98 — Ход лучей в телескопе-рефлекторе

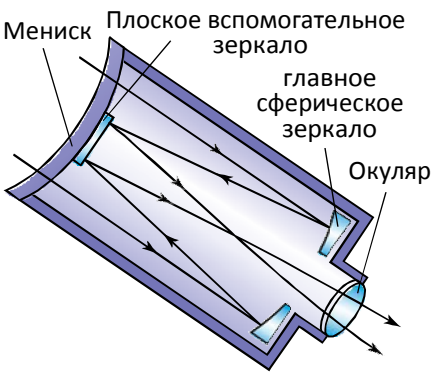


Рисунок 99 — Ход лучей в зеркально-линзовом менисковом телескопе

изображения, размывает его детали. Поэтому даже на крупных телескопах редко устанавливают увеличение более чем в 500 раз.

Под **разрешающей способностью** (ψ) оптического телескопа понимают наименьшее угловое расстояние между двумя звёздами, которые могут быть видны в телескоп раздельно. Теоретически разрешающая способность (в секундах дуги) визуального телескопа для жёлто-зелёных лучей, к которым наиболее чувствителен глаз человека, может быть оценена при помощи формулы:

$$\psi = \frac{140}{D}$$

где D — диаметр объектива телескопа в миллиметрах.

На практике из-за постоянных перемещений воздушных масс разрешающая способность телескопов снижается. В итоге наземные телескопы, как правило, обеспечивают разрешающую способность около 1″, и только в редких случаях при весьма благоприятных атмосферных условиях удаётся достичь разрешающей способности в несколько десятых долей секунды.

Также важной характеристикой телескопа является **проницающая сила** (m), которая выражается предельной звёздной величиной светила, доступного наблюдению с помощью данного телескопа при идеальных атмосферных условиях.

Для телескопов с диаметром объектива D (мм) проницающая сила m, выраженная в звёздных величинах при визуальных наблюдениях, оценивается формулой:

$$m = 2{,}0 + 5 \lg D.$$

С 1995 г. в обсерватории Мауна-Кеа (США) работают два одинаковых 10-метровых телескопа «Кек-1» и «Кек-2». Каждое зеркало телескопа состоит из 36 сегментов. Качеством изображения телескопов руководит компьютер, управляющий каждым сегментом зеркала. По разрешающей способности такой телескоп приближается к космическому. Обсерватория расположена на высоте 4250 м над Тихим океаном на Гавайских островах. Оптика космического телескопа им. Хаббла (рис. 100) приближается к идеальной

Рисунок 100 — Космический телескоп Хаббла (США)

оптической системе. Вне атмосферы зеркало этого телескопа диаметром 2,4 м позволяет достичь разрешения 0,06″.

Значительными возможностями обладает телескоп VLT (англ. *Very Large Telescope* — очень большой телескоп), принадлежащий европейским странам и установленный на горе Параналь (высота 2635 м) на севере Чили. Телескоп VLT состоит из четырёх телескопов, каждый из которых имеет диаметр 8,2 м. Крайние телескопы разнесены один от другого на расстояние 200 м, что позволяет всему комплексу работать в режиме **оптического интерферометра**. Это означает, что если телескопы направлены на одну и ту же звезду, то собранное ими излучение суммируется, а разрешающая способность совместно работающих телескопов эквивалентна применению зеркала диаметром 200 м.

Количество построенных во всём мире телескопов с диаметром зеркала больше 6 м приближается к двадцати.

Собранное объективом телескопа излучение регистрируется и анализируется приёмником излучения. На протяжении первых двух с половиной веков с начала телескопической эры единственным приёмником излучения служил человеческий глаз. Однако это не только не очень чувствительный, но и достаточно субъективный приёмник излучения. С середины XIX в. в астрономии стали широко применяться фотографические методы. Фотографические материалы (фотопластинки, фотоплёнки) обладают рядом ценных преимуществ по сравнению с человеческим глазом. Фотоэмульсия способна суммировать падающую на неё энергию, т. е., увеличивая выдержку на негативе, можно собрать больше света. Фотография позволяет документировать события, так как негативы могут храниться в течение долгого времени. Фотопластинки обладают панорамностью, т. е. могут одновременно и точно фиксировать множество объектов.

Самые крупные современные телескопы управляются компьютерами, а полученные изображения космических объектов фиксируются в форме, которая обрабатывается компьютерными программами. Фотография почти вышла из употребления. В последние десятилетия получили широкое распространение **фотоэлектрические приёмники излучения**, сведения от которых передаются непосредственно на компьютер. К таким приборам относятся ПЗС-матрицы (приборы с зарядовой связью). ПЗС-матрица — это интегральная схема, размещённая на полупроводниковом материале, которая превращает световую энергию излучения в энергию электрического тока. Сила тока пропорциональна интенсивности светового потока. Такие приборы обладают высокой эффективностью в регистрации световых квантов (квантовым выходом): используется до 80 % от общего их количества.

Компьютерная обработка изображения позволяет избавиться от фона и помех, создаваемых рассеянием света в атмосфере Земли и турбулентностью атмосферы.

3. радиотелескопы. Изучением космических радиоисточников занимается *радиоастрономия*. Она зародилась в 1931 г., когда случайно было обнаружено радиоизлучение центра Млечного Пути. Спустя 15 лет в созвездии Лебедя нашли первый точечный источник радиоволн — слабую галактику, которую впоследствии удалось разглядеть в оптическом диапазоне.

Доходящее до Земли радиоизлучение большинства небесных объектов очень слабое. Для обнаружения и приёма космического радиоизлучения используются приборы, которые получили название **радиотелескопов**. Радиотелескопы состоят из антенного устройства и чувствительной приёмной системы. Приёмная система, или радиометр, усиливает принятое антенной радиоизлучение и преобразует его в удобную для дальнейшей обработки форму.

Основное назначение антенного устройства — собрать максимальное количество энергии, приносимой радиоволнами от объекта. В качестве антенны используется сплошное металлическое или сетчатое зеркало, имеющее форму параболоида. Антенна радиотелескопа отличается от обычных антенн радиосвязи высокой направленностью, т. е. способностью выделять радиоизлучение небольшого участка неба. В фокусе параболоида помещается облучатель — устройство, собирающее радиоизлучение, направленное на него зеркалом. Облучатель передаёт принятую энергию на приёмное устройство, где сигнал усиливается, детектируется и регистрируется.

Радиотелескопы очень большого размера могут быть построены из отдельных зеркал, каждое из которых фокусирует принимаемое излучение на один облучатель. Примером является российский радиотелескоп РАТАН-600 (рис. 101). Антенна этого телескопа представляет собой замкнутое кольцо диаметром 576 м, состоящее из 895 плоских зеркал размером 2,1 □ 7,4 м, обра- зующих сегменты параболоида.

Рисунок 101 — Радиотелескоп РАТАН-600

Мощность радиосигнала, поступающего на вход приёмника, прямо пропорциональна площади антенны. Поэтому антенна большего размера с одним и тем же приёмником даёт лучшую

Рисунок 102 — Гигантский радиотелескоп в чаше кратера (Пуэрто-Рико)

чувствительность, т. е. позволяет обнаружить слабые источники с малой мощностью излучения. Антенны крупнейших радиотелескопов достигают сотен метров. Крупный радиотелескоп с вращающимся металлическим рефлектором диаметром 100 м находится недалеко от города Бонна в Германии. Неподвижная антенна в Аресибо (Пуэрто-Рико), располагающаяся в кратере потухшего вулкана, имеет диаметр 305 м (рис. 102). Для того чтобы изменить направление приёма излучения, в этом радиотелескопе делают перестановку облучателя.

Если радиоизлучение источника одновременно воспринимается двумя и более антеннами, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, и затем эти сигналы суммируются, то вследствие интерференции радиосигналов разрешающая способность телескопов значительно возрастает. Такой инструмент называется **радиоинтерферометром**. На рисунке 103 показана схема работы радиоинтерферометра, состоящего из двух радиотелескопов, находящихся друг от друга на расстоянии D, которое может составлять сотни и даже тысячи километров. Например, многоэлементный радиоинтерферометр VLA (штат Нью-Мексико, США) состоит из 27 индивидуальных 25-метровых параболоидов, разнесённых на 25 км друг от друга. Радиоинтерферометры со сверхдлинной базой объединяют радиотелескопы, разнесённые на тысячи километров. С их помощью удалось получить угловое разрешение порядка 0,0001″.

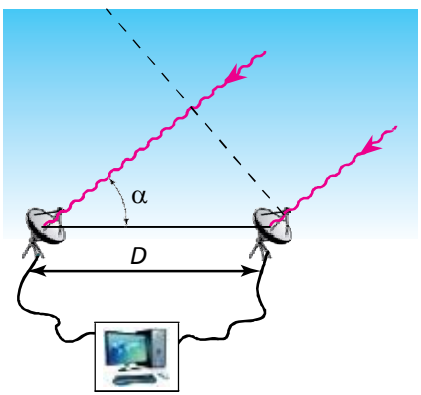


Рисунок 103 — Схема работы радиоинтерферометра

Радиоволны свободно проходят сквозь огромные межзвёздные газопылевые облака и атмосферу Земли. Поэтому методы радиоастрономии очень важны для изучения, например, центральных районов Млечного Пути и других галактик, так как оптические волны, идущие из этих областей, полностью поглощаются.

В большей или меньшей степени радиоизлучательной способностью обладают все галактики. Но некоторые из них отличаются повышенной активностью. На рисунке 104 показано совмещение оптической фотографии и линий интенсивности радиоизлучения галактики Центавр А.

Рисунок 104 — Оптическое и радиоизлучение галактики Центавр А

Все известные радиоисточники в 80-х гг. XX в. были сведены в каталог, который насчитывает свыше 100 тыс. объектов. В 1958 г. астрономы США получили первое радарное эхо от другой планеты — Венеры. Отражения радарных сигналов от других планет дают самые точные измерения расстояний. Эти же методы позволили проникнуть через плотную атмосферу Венеры и исследовать рельеф её поверхности. С помощью радара были точно определены периоды вращения Венеры и Меркурия.

4. внеатмосферная астрономия. Особый раздел астрономии — **внеатмосферная астрономия** — изучает небесные объекты при помощи аппаратуры, вынесенной за пределы земной атмосферы. Различные приборы, установленные на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) и автоматических межпланетных станциях (АМС), позволяют изучать космические объекты во всём диапазоне длин волн, начиная от жёсткого гамма-излучения до километровых радиоволн. Поэтому современная астрономия стала всеволновой.

Изучение **инфракрасного излучения** в астрономии началось с того, что с его помощью провели точные измерения температуры поверхности и атмосферы планет Солнечной системы. Так в атмосферах Марса, Венеры и Юпитера был обнаружен углекислый газ. Инфракрасные наблюдения планет-гигантов позволили узнать структуру их атмосфер и обнаружить лёд на спутниках.

Сенсационным открытием инфракрасной астрономии стала вода, обнаруженная в космосе в большом количестве. Она присутствует в газопылевых туманностях, кометах и на малых планетах.

Так как земная атмосфера сильно экранирует **ультрафиолетовое излучение**, его приёмники приходится размещать на искусственных спутниках Земли. Проведённые в 1999 г. наблюдения дали очень интересные

Рисунок 105 — Крабовидная туманность в рентгеновских лучах

научные результаты. Оказалось, что в нашей Галактике широко распространены массы сильно нагретого (до полумиллиона градусов) межзвёздного газа, находящегося на расстоянии от 5 до 10 тыс. световых лет от центральной плоскости Млечного Пути. Этот газ нагревается скорее всего в результате вспышек сверхновых звёзд.

Источниками **гамма-излучения** являются вспышки на Солнце, ядра активных галактик, квазары. При помощи рентгеновских космических обсерваторий исследуются сверхновые звёзды, туманности (рис. 105), нейтронные звёзды, солнечная корона и вспышки на Солнце.

Искусственные спутники Земли выводят на околоземные орбиты уникальные ультрафиолетовые, инфракрасные и оптические телескопы. Постепенно увеличиваются диаметры их главных зеркал, совершенствуется светоприёмная аппаратура, повышается чувствительность приборов, разрабатываются новые методы стабилизации телескопов на орбите.

Главные выводы

1. Атмосфера Земли пропускает электромагнитное излучение лишь в определённых диапазонах волн, поэтому излучение от космических объектов на поверхности Земли исследуют с помощью оптических телескопов и радиотелескопов.

2. Внеатмосферная астрономия позволяет исследовать небесные объекты во всём диапазоне электромагнитного излучения.

3. В зависимости от конструкции различают оптические телескопы следующих типов: линзовые (рефракторы), зеркальные (рефлекторы) и зеркально-линзовые.

4. Основные оптические параметры телескопов — видимое увеличение, разрешающая способность, проницающая сила.

5. Увеличение разрешающей способности оптических и радиотелескопов достигается за счёт объединения их комплексов в интерферометры.

Контрольные вопросы и задания

1. на какие диапазоны подразделяется весь спектр электромагнитного излучения?
2. Почему с поверхности Земли нельзя вести изучение небесных объектов во всех диапазонах электромагнитного излучения?
3. Какие основные задачи решают в астрономии с помощью телескопов?
4. Как можно определить видимое увеличение оптической системы телескопа?
5. Увеличение телескопа равно 75. Фокусное расстояние объектива 5 м. Определите фокусное расстояние окуляра.
6. Что понимают под разрешающей способностью телескопа? Проницающей способностью?
7. Определите разрешающую способность зрительной трубы с диаметром объектива 5 см.
8. Что понимают под внеатмосферной астрономией?

§ 18. спектральный анализ в астрономии

1. виды спектров. В 1666 г. Исаак Ньютон, пропуская пучок света через трёхгранную стеклянную призму, заметил, что тот не только преломляется к основанию призмы, но и распадается на цветовые составляющие. Полученная на экране цветная полоска, состоящая из семи основных цветов, постепенно переходящих один в другой, была названа **спектром**.

Для наблюдения и исследования спектров применяют прибор — **спектроскоп**. Для получения и регистрации спектров небесных тел используют специальный оптический прибор — **спектрограф**.

Спектры сравнительно ярких светил фотографируют с помощью щелевых спектрографов, состоящих из коллиматора, призмы и фотокамеры (рис. 106). Фотографический снимок спектра небесного тела называется

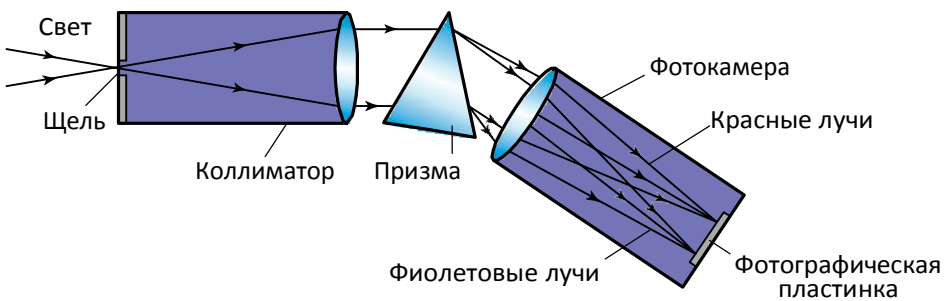


Рисунок 106 — Схема щелевого спектрографа

спектрограммой. Также спектрограммой называют график зависимости интенсивности (мощности) излучения небесного тела от длины волны или частоты.

Любое светящееся тело создаёт **спектр испускания**. Спектры бывают сплошные (непрерывные), линейчатые и полосатые.

Сплошной спектр имеет вид непрерывной полосы, цвета которой постепенно переходят один в другой. Все твёрдые тела, расплавленные металлы, светящиеся газы и пары, находящиеся под очень большим давлением, дают сплошной спектр. Такой спектр можно, например, получить от дугового фонаря и горящей свечи.

Иной вид имеет спектр, если в качестве источника света использовать раскалённые газы или пары, когда их давление мало отличается от нормального и газы находятся в атомарном состоянии. В этом случае говорят о **линейчатом спектре** (атомном). Он состоит из отдельных резких цветных линий, разделённых тёмными промежутками (рис. 107). Установлено, что каждый химический элемент в состоянии раскалённого газа, состоящего из атомов, испускает присущий только ему одному линейчатый спектр с характерными цветными линиями, всегда расположенными на определённом месте.

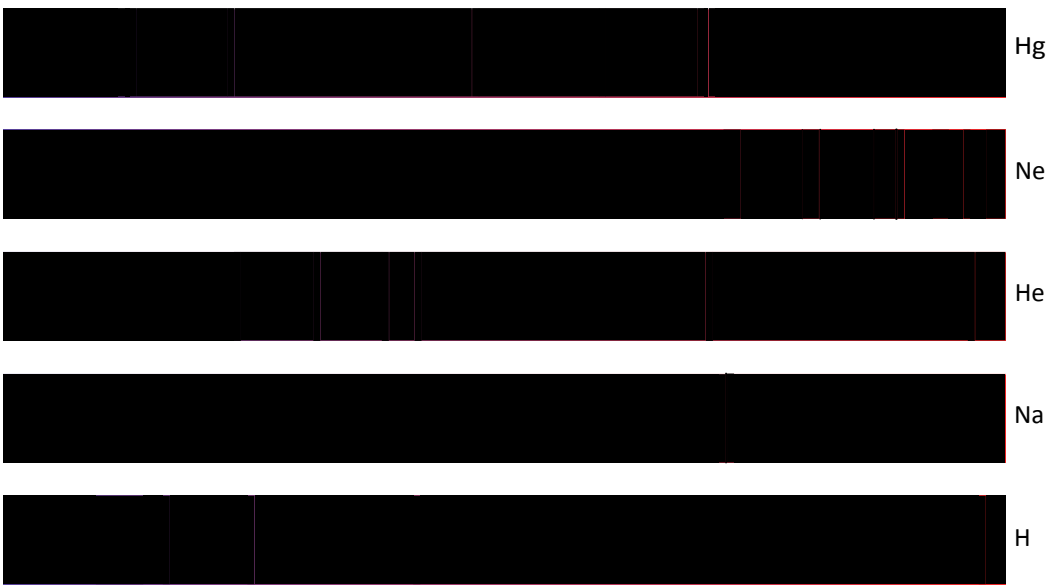


Рисунок 107 — Линейчатые спектры некоторых веществ (Hg, Ne, He, Na, H)

Полосатый спектр (молекулярный) состоит из отдельных линий, сливающихся в полосы (чёткие с одного края и размытые с другого), разделённые тёмными промежутками. Такой спектр испускают молекулы газов и паров.

Наряду со спектрами испускания существуют спектры поглощения.

Сплошной спектр, пересечённый тёмными линиями или полосами в результате прохождения белого света через раскалённые газы или пары, называется **спектром поглощения**. Исследование явления возникновения спектров поглощения показало, что *вещество поглощает лучи тех длин волн, которые оно может испускать в данных условиях* (**закон Кирхгофа**).

Таким образом, для каждого химического элемента его линейчатый спектр испускания и спектр поглощения обладают обратимостью. Это значит, что расположение тёмных линий поглощения в точности соответствует расположению цветных линий испускания.

Спектр содержит важнейшую информацию об излучении. Общий вид спектра и детальное распределение энергии в нём зависят от температуры, химического состава и физических свойств источника, а также от скорости его движения. Метод исследования химического состава тел и их физического состояния с помощью спектров испускания и поглощения называется **спектральным анализом**.

2. химический состав небесных тел. В 1814 г. немецкий физик Йозеф Фраунгофер, наблюдая спектр Солнца при помощи изготовленного им спектроскопа с дифракционной решёткой, обратил внимание на то, что сплошной спектр Солнца содержит значительное число тёмных линий. Учёный установил, что эти линии (названные впоследствии его именем) не случайны и всегда присутствуют в спектре Солнца на строго определённых местах. **Фраунгоферовы линии** — не что иное, как линии поглощения паров различных веществ, находящихся вблизи источника сплошного спектра — яркой поверхности Солнца (между фотосферой и спектральным прибором). Солнце окружено газовой оболочкой, имеющей более низкую температуру и меньшую плотность, чем фотосфера. Таким образом, спектр Солнца есть, по существу, спектр поглощения этих паров.

При детальной классификации фраунгоферовых линий один за другим на Солнце обнаружили все земные элементы. После осуществления большой по объёму работы по установлению соответствия фраунгоферовых линий определённым элементам оказалось, что несколько

спектральных линий не принадлежит ни одному земному элементу. Так был открыт новый элемент — гелий (солнечный). И только через 26 лет гелий обнаружили на Земле.

Сравнивая длины волн линий поглощения, наблюдаемых в спектрах небесных тел, с полученными в лаборатории или рассчитанными теоретически спектрами различных веществ, можно определить химический состав излучающего космического объекта, находящегося на очень большом расстоянии. Спектральный анализ позволяет определить состав не только Солнца, но и других объектов — звёзд, туманностей. Анализ спектров — основной метод изучения физической природы космических объектов, который используется в астрофизике.

3. температура. Законы вина и стефана — больцмана. Всякое, даже слабо нагретое, тело излучает электромагнитные волны (тепловое излучение). При температурах, не превышающих 10^3 К, излучаются главным образом инфракрасные лучи и радиоволны. По мере дальнейшего нагревания спектр теплового излучения меняется: во-первых, увеличивается общее количество излучаемой энергии, во-вторых, появляются лучи всё более и более коротких длин волн — видимые (от красных до фиолетовых), ультрафиолетовые, рентгеновские и т. д.

При тепловом излучении внутренняя энергия теплового движения атомов и молекул тела переходит в энергию испускаемых электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода электромагнитной энергии во внутреннюю энергию тела.

Распределение энергии в непрерывном спектре тел разной температуры можно представить в виде графика (рис. 108). С увеличением температуры максимум излучения абсолютно чёрного тела смещается в коротковолновую область спектра. Длина волны λ_{max}, которой соответствует максимум в распределении энергии, связана с абсолютной температурой T соотношением, которое называют **законом смещения Вина**:

$$\lambda_{max} \cdot T = b,$$

где b — постоянная Вина ($b \approx 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м · К). Данный закон выполняется не только для оптического, но и для любого другого диапазона электромагнитного излучения.

В спектрограмме Солнца наибольшая интенсивность излучения приходится на длину волны $\lambda = 480$ нм, поэтому температура солнечной фотосферы близка к 6000 К.

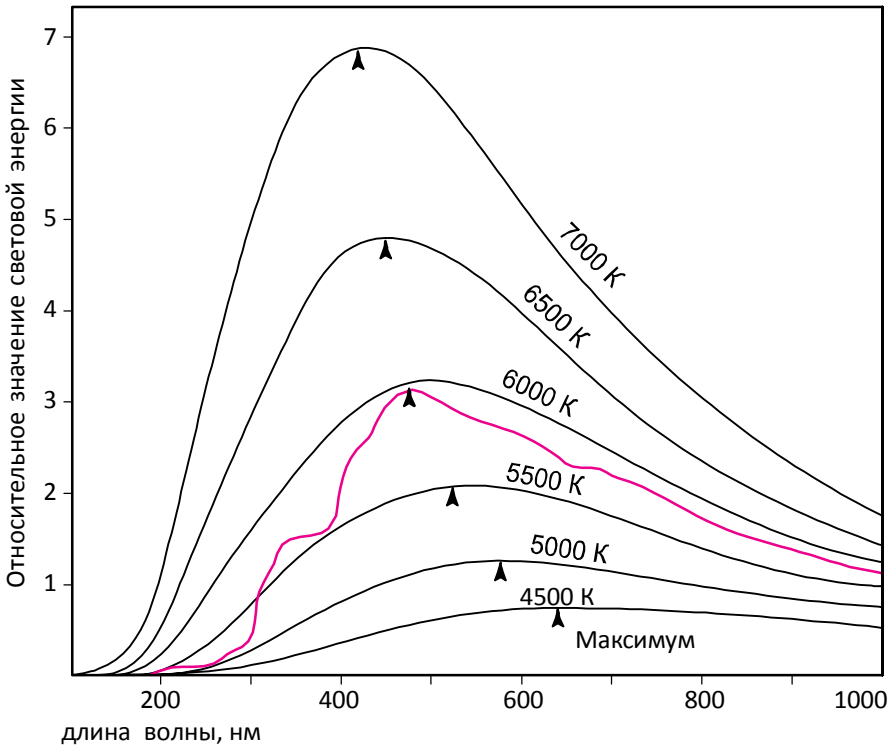


Рисунок 108 — Распределение энергии в непрерывных спектрах тел, нагретых до разных температур. Красная кривая линия — спектр Солнца

По мере увеличения температуры меняется не только цвет излучения, но и его мощность. В результате экспериментов и теоретических расчётов было обосновано, что *мощность излучения абсолютно чёрного тела пропорциональна четверной степени температуры* (**закон Стефана — Больцмана**). Каждый квадратный метр поверхности абсолютно чёрного тела излучает за 1 с по всем направлениям во всех длинах волн энергию:

$$\varepsilon = \square \cdot T^4,$$

где ε — мощность излучения единицы поверхности нагретого тела, T — абсолютная температура, □ — постоянная Стефана — Больцмана, кото- рая равна $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4).

Зная количество энергии, приходящей от звезды к земной поверхности, можно по закону Стефана — Больцмана определить её температуру.

Законы Вина и Стефана — Больцмана справедливы для излучения абсолютно чёрного тела. В первом приближении можно считать, что звёзды, и в частности Солнце, излучают как абсолютно чёрное тело.

4. Эффект доплера. В астрофизике широко используется **эффект Доплера**, возникающий при движении источника излучения относительно наблюдателя. Суть эффекта Доплера заключается в следующем: если источник излучения движется по лучу зрения наблюдателя со скоростью v_r, называемой лучевой скоростью, то вместо длины волны λ_0, которую излучает источник, наблюдатель фиксирует волну длиной λ, так что

$$\lambda \quad \left(\quad \right)$$

где c — скорость света.

Скорость v_r положительна при удалении источника света от наблюдателя ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 > 0$) и отрицательна при приближении к нему ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 < 0$).

С эффектом Доплера мы часто сталкиваемся в акустике. Например, если вы стоите на платформе, мимо которой проходит поезд, то можете заметить, что пока он приближался, звуковой сигнал был более высоким, а когда стал удаляться, высота звука сразу снизилась. Аналогичное явление наблюдается и в оптике: свет от приближающегося источника становится более синим (частота увеличивается), а от удаляющегося — более красным (частота уменьшается). Это изменение сказывается на положении спектральных линий в спектре: они смещаются в синюю или красную область.

Для измерения смещения спектральных линий рядом со спектром исследуемой звезды на ту же фотопластинку фотографируют спектр лабораторного источника, в котором имеются известные спектральные линии. Потом при помощи микроскопов, снабжённых точными микрометрами, измеряют смещение линий объекта по отношению к лабораторной системе длин волн и тем самым находят величину $\Delta\lambda$. Затем по формуле

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad \frac{\lambda \quad \lambda_0}{\lambda_0} \quad —$$

которая следует из приведённой выше, вычисляют лучевую скорость v_r.

Данная выше формула Доплера пригодна лишь для скоростей v_r в пределах до 0,1 скорости света. При движении источников излучения

со скоростями, близкими к скорости света, необходимо учитывать законы теории относительности.

Сдвиг спектральных линий теоретически предсказал в 1842 г. австрийский физик Х. Доплер. Истинность его выводов подтвердил в 1899 г. лабораторными опытами и наблюдениями спектров звёзд русский астрофизик А. А. Белопольский.

Главные выводы

1. Все светящиеся тела создают спектры испускания, которые могут быть сплошными (непрерывными), линейчатыми и полосатыми.

2. Каждый химический элемент имеет свой, только ему свойственный, линейчатый спектр. Линейчатый спектр строго постоянен и не зависит от того, входит этот элемент в состав сложного вещества или взят в чистом виде.

3. При относительном перемещении источника излучения и наблюдателя происходит смещение спектральных линий в его спектре.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое спектр? Какие явления доказывают сложный состав света?

2. назовите и дайте определения трём основным видам спектров.

3. Что такое спектральный анализ?

4. Измерение спектрограммы звезды показало, что линия железа (λ = 530,2 нм) в её спектре смещена по сравнению с линиями лабораторного источника в сторону наиболее коротких волн на 0,02 нм. Какова скорость звезды по лучу зрения?

5. Сформулируйте и запишите закон смещения Вина и закон Стефана — Больцмана. Какое значение эти законы имеют в астрономии?

6. Определите температуру звезды, если в её спектре максимум интенсивности излучения приходится на длину волны равной 340 нм.

7. В каком случае смещение линий спектрограммы может не происходить, несмотря на движение объекта?

СОЛНЦЕ — ДНЕВНАЯ ЗВЕЗДА

§ 19. Солнце как звезда

1. Общие сведения. Солнце занимает исключительное положение в жизни человека. Оно обеспечивает нас светом, теплом, является источником всех видов энергии, используемых людьми. Солнце влияет на магнитное поле и верхние слои атмосферы Земли, вызывая магнитные бури, ионизацию и циркуляцию атмосферы. Солнечная «погода» влияет на климат, биосферу и земную жизнь в целом.

Солнце — центральное тело Солнечной системы, типичная звезда, представляющая собой раскалённый плазменный шар. Солнце — одна из 200 млрд звёзд нашей Галактики. Детально изучая физическую природу Солнца, мы получаем важнейшие сведения о природе остальных звёзд. Диск Солнца, видимый с Земли, — ослепительно жёлтый круг со средним угловым диаметром 32′. Свет от него доходит до Земли за $8^1/_3$ мин.

Диаметр Солнца равен 1 млн 392 тыс. км (109 диаметров Земли). Объём Солнца, таким образом, более чем в миллион раз превосходит объём Земли, а его масса составляет $M_\odot = 1{,}99 \cdot 10^{30}$ кг, что примерно равно 330 000 земных масс.

Измерения за пределами земной атмосферы показали, что на площадку 1 м^2, расположенную перпендикулярно солнечным лучам, ежесекундно поступает энергия, практически не меняющаяся в течение длительного промежутка времени. Она получила название **солнечной постоянной**. Солнечная постоянная равна 1,37 кВт/м^2.

Светимость Солнца, или полное количество энергии, излучаемое Солнцем по всем направлениям в единицу времени, определим следующим образом: величину солнечной постоянной умножим на площадь сферы с радиусом r в одну астрономическую единицу (1 а. е. = $= 149{,}6 \cdot 10^9$ м). Она получится равной:

$$L_\odot = 4\pi r^2 \cdot 1370 \text{ Вт/м}^2 = 3{,}85 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

На Землю попадает ничтожная часть солнечной энергии, составляющая около половины миллиардной доли указанного выше значения.

2. спектр и химический состав. Почти все наши знания о Солнце основаны на изучении его спектра. Химические элементы, которые присутствуют в атмосфере Солнца, поглощают из непрерывного спектра, излучаемого фотосферой, свет определённой частоты. В результате в непрерывном спектре появляются тёмные линии. Как мы уже отмечали, Й. Фраунгофер впервые изучил и зарисовал 576 тёмных линий солнечного спектра. Учёный правильно указал, что источник тёмных спектральных линий — солнечная атмосфера. По положениям в спектре (т. е. длинам волн) и интенсивностям этих фраунгоферовых линий можно установить, какие химические элементы присутствуют в солнечной атмосфере (рис. 109).

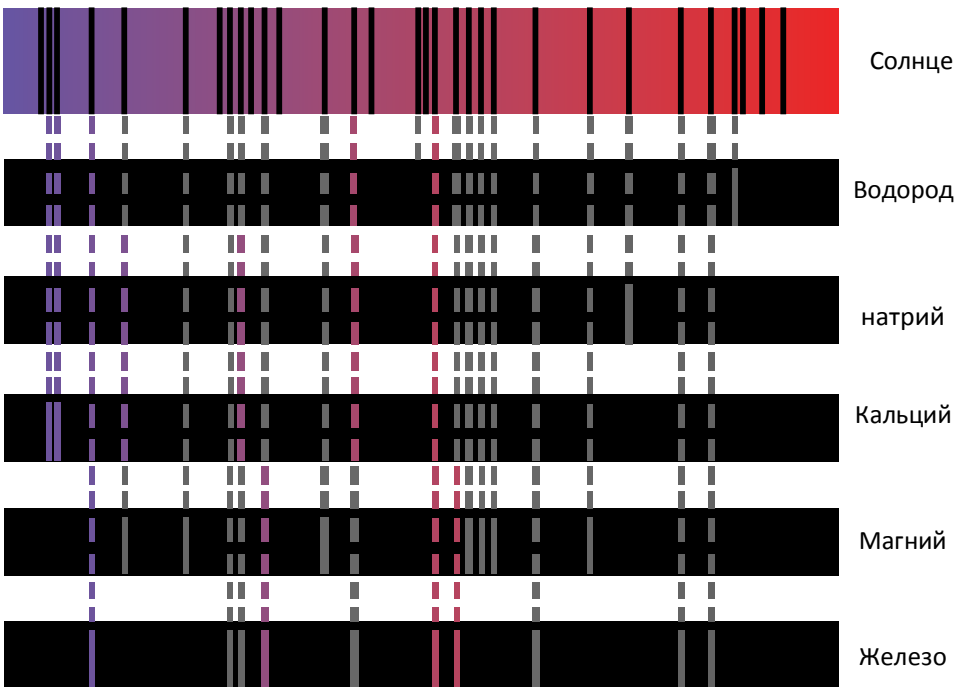


Рисунок 109 — Соответствие между положением фраунгоферовых линий солнечного спектра и линиями химических элементов

Уже отождествлено в видимой области спектра свыше 30 тыс. линий для 70 химических элементов, присутствующих в атмосфере Солнца. Фраунгоферовы линии по интенсивности и ширине чрезвычайно разнообразны. Анализ спектральных линий показал, что преобладающим элементом на Солнце является водород — на его долю приходится примерно 74 % массы Солнца, около 24 % приходится на гелий и около 2 % — на другие элементы.

3. внутреннее строение. Основываясь на данных о радиусе, массе, светимости Солнца, на физических законах (которые в силу своей универсальности применимы и в условиях других небесных тел), можно получить данные о давлении, плотности, температуре и химическом составе на разных расстояниях от центра Солнца. При приближении к центру Солнца растут, достигая максимальных значений, температура, давление и плотность. Химический состав Солнца тоже различается: процентное содержание водорода меньше всего в центре.

Высокое давление внутри Солнца обусловлено действием вышележащих слоёв. Силы тяготения стремятся сжать Солнце. Им противодействуют упругость горячего газа и давление излучения, идущие из недр. Эти силы стремятся расширить Солнце. Тяготение, с одной стороны, упругость газов и давление излучения, с другой стороны, уравновешивают друг друга. Равновесие имеет место во всех слоях от поверхности до центра Солнца. Такое состояние Солнца и звёзд называется **гидростатическим равновесием**. Эта простая идея была выдвинута в 1924 г. английским астрофизиком Артуром Эддингтоном. Она позволила составить уравнения, по которым рассчитывают модели внутреннего строения Солнца, а также других звёзд. Такие модели представляют собой совокупность параметров звёздного вещества (температура, давление, плотность и т. д.) на разных глубинах. В таблице 13 приведена так называемая модель внутреннего строения Солнца, т. е. зависимость его физических свойств от глубины.

Таблица 13 — Модель внутреннего строения Солнца

Расстояние от центра	Температура	Давление	Плотность
$R/R_\odot$	T, К	p, Па	ρ, □ 10^3 кг/м^3
0	$1{,}5 \cdot 10^7$	$2{,}2 \cdot 10^{16}$	150
0,2	$1{,}0 \cdot 10^7$	$4{,}6 \cdot 10^{15}$	36
0,5	$3{,}4 \cdot 10^6$	$6{,}1 \cdot 10^{13}$	1,3
0,8	$1{,}3 \cdot 10^6$	$6{,}2 \cdot 10^{11}$	0,035
0,98	$1{,}0 \cdot 10^6$	$1{,}0 \cdot 10^9$	0,001

Как видно из таблицы, температура в центре Солнца ($R/R_\odot = 0$) достигает 15 млн градусов. Именно в этой области, **зоне ядерных реакций**, генерируется энергия Солнца.

Мы уже знаем, что солнечное вещество в основном состоит из водорода. При огромных давлениях и температурах протоны (ядра водорода) движутся со скоростями в сотни километров в секунду. Внутри Солнца (на расстояниях до 0,3 радиуса от центра) создаются условия, благоприятные для протекания термоядерных реакций превращения атомов лёгких химических элементов в атомы более тяжёлые (рис. 110).

Рисунок 110 — Внутреннее строение Солнца

Из ядер водорода образуется гелий. Для образования одного ядра гелия требуется 4 ядра водорода. На промежуточных стадиях образуются ядра тяжёлого водорода (дейтерия) и ядра изотопа He^3. Эта реакция называется **протон-протонной** (рис. 111). При реакции небольшое количество массы реагирующих ядер водорода теряется, преобразуясь в огромное количество энергии. Выделившаяся энергия поддерживает излучение Солнца. Через слои, окружающие центральную часть звезды, эта энергия передаётся наружу. В области от 0,3 до 0,7 радиуса от центра Солнца

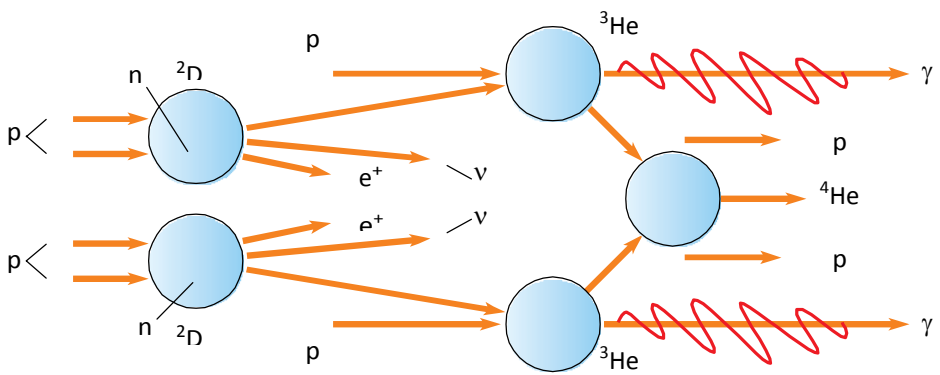


Рисунок 111 — Схема протон-протонной реакции: p — протон; n — нейтрон; ^{2}D — ядро дейтерия; ^{3}He, ^{4}He — ядра изотопов гелия; e^+ — позитрон; ν — нейтрино; γ — гамма-квант

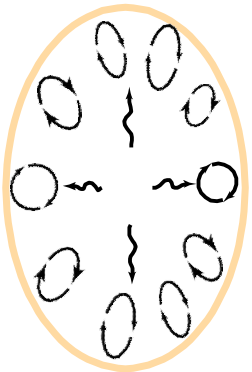


Рисунок 112 — Энергия передаётся излучением от ядра Солнца. Главным переносчиком энергии у поверхности становится конвекция

находится **зона лучистого равновесия энергии**, где энергия распространяется через поглощение и излучение γ-квантов.

Рождающиеся в центре Солнца гамма-кванты имеют энергию в миллионы раз большую, чем энергия квантов видимого света. Длина волны гамма-квантов очень мала. В процессе поглощения квантов атомами и дальнейшего их переизлучения происходит постепенное уменьшение их энергии и увеличение длины волны. Количество квантов во время этого процесса возрастает. Мощные гамма-кванты постепенно дробятся на обладающие меньшей энергией: возникают рентгеновские, ультрафиолетовые и, наконец, видимые и инфракрасные лучи.

В области последней трети радиуса Солнца находится **конвективная зона**. Здесь энергия передаётся не излучением, а посредством конвекции (перемешивания, рис. 112). Причина возникновения конвекции в наружных слоях Солнца та же, что и в сосуде с кипящей водой: количество энергии, поступающее от нагревателя, гораздо больше того, которое отводится теплопроводностью. Поэтому вещество приходит в движение и само начинает переносить тепло. Конвективная зона простирается практически до самой видимой поверхности Солнца (фотосферы).

4. источники энергии. Анализ химического состава земных, лунных пород и метеоритов указывает на то, что Солнечная система образовалась около 4,7 млрд лет назад. Солнце, по современным данным, существует около 5 млрд лет. За последние 3 млрд лет его светимость почти не изменилась. Полная энергия Солнца, выделенная за это время, равна $E_\odot \approx L_\odot t = 3{,}5 \cdot 10^{43}$ Дж. Разделив эту величину на полную массу Солнца, получим, что каждый килограмм солнечного вещества выделил около $1{,}8 \cdot 10^{13}$ Дж энергии. Реально эта величина ещё больше, так как мы не учли первые 2 млрд лет. Ни одно химическое горючее не может обеспечить такую величину внутренней энергии, которую может выделить 1 кг солнечного вещества.

В среднем Солнце теряет примерно 4 млн тонн водорода в секунду. На первый взгляд эта величина может показаться огромной. Однако она

ничтожна по сравнению с полной массой Солнца. Расчёты показывают, что водорода в недрах достаточно для поддержания свечения Солнца на современном уровне ещё на протяжении 5 млрд лет.

Главные выводы

1. Солнце — единственная звезда в Солнечной системе, представляющая собой горячий плазменный шар, диаметр которой больше диаметра Земли в 109 раз и масса которой в 330 тыс. раз больше массы Земли.

2. Количество лучистой энергии, ежесекундно поступающей от Солнца на единицу площади земной поверхности, — солнечная постоянная — практически не меняется на протяжении миллиардов лет.

3. Преобладающими химическими элементами на Солнце являются водород и гелий.

4. Источником энергии Солнца являются реакции термоядерного синтеза, протекающие в его недрах.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое солнечная постоянная? Как её определили?
2. Что понимают под светимостью Солнца? Чему она равна?
3. Какие химические элементы являются преобладающими для Солнца?
4. Опишите внутреннее строение Солнца.
5. на какие зоны условно подразделяются недра Солнца? Какие процессы происходят в каждой из этих зон?
6. Что является источником солнечной энергии?

§ 20. строение солнечной атмосферы

1. Фотосфера. Диск Солнца кажется резко очерченным. Это происходит потому, что практически всё видимое излучение Солнца исходит из очень тонкого слоя — **фотосферы**. Слабое излучение более высоких слоёв Солнца можно наблюдать во время полного солнечного затмения, когда диск Луны полностью закрывает фотосферу и становятся видны

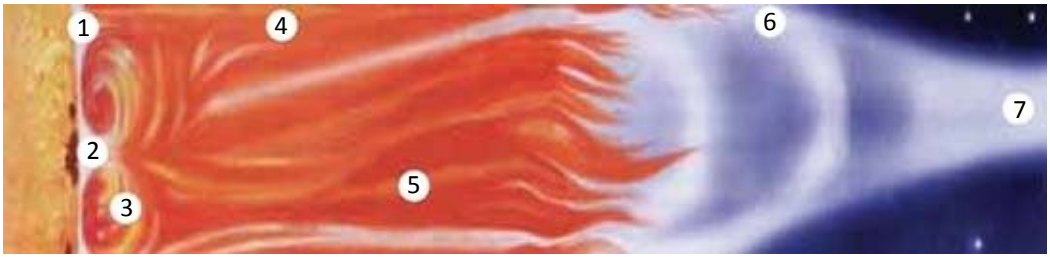


Рисунок 113 — Строение солнечной атмосферы: *1* — фотосфера; *2* — пятна; *3* — протуберанец; *4* — вспышка; *5* — хромосфера; *6* — солнечная корона; *7* — корональные лучи

хромосфера и корона. Фотосфера, хромосфера и корона образуют атмосферу Солнца (рис. 113).

Толщина фотосферы не превышает 300 км. В телескоп видно, что вся поверхность Солнца покрыта гранулами, каждая диаметром около 700 км. Это огромные пузыри плазмы. Рисунок, который образуют гранулы, постоянно изменяется (буквально за 5—10 мин они успевают появиться и исчезнуть). Плазма в гранулах поднимается вверх и, остывая, в межгранульных пространствах опускается вниз. Поэтому разность температур гранул и тёмных промежутков достигает 600 К.

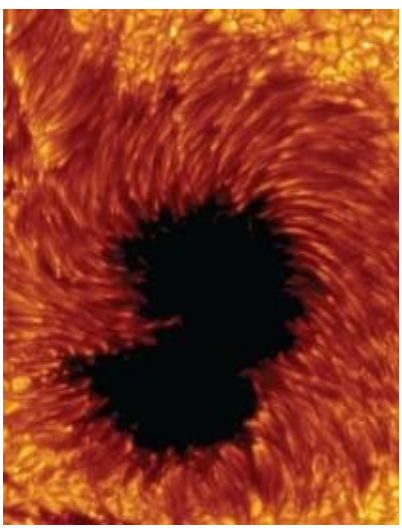


Рисунок 114 — Солнечное пятно и фотосферная грануляция

Процесс постоянного возникновения и исчезновения гранул в фотосфере называется **грануляцией**. Самые приметные объекты на Солнце — это тёмные пятна (рис. 114, 115). Диаметры пятен иногда достигают 200 тыс. км. Совсем маленькие пятна называют порами.

Картина солнечных пятен, хотя и несколько медленнее, также постоянно меняется: пятна появляются, растут и распадаются (рис. 115). Время жизни групп пятен составляет два или три оборота Солнца вокруг своей оси. Пятна холоднее окружающей фотосферы на 2—2,5 тыс. градусов, поэтому на общем фоне солнечного диска они выглядят темнее. Солнечные пятна обычно появляются группами в пределах небольшой области, вытянутой параллельно экватору.

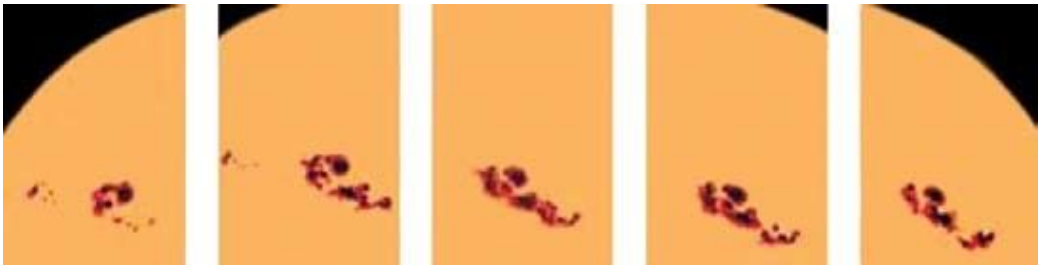


Рисунок 115 — Динамика изменения размеров и формы группы солнечных пятен. Вследствие вращения Солнца группы пятен кажутся перемещающимися по диску

По размерам в группе выделяются два пятна: головное (западное) пятно, идущее впереди по вращению Солнца, и хвостовое.

Систематические наблюдения солнечных пятен показывают, что Солнце вращается в направлении движения планет и плоскость солнечного экватора наклонена к плоскости эклиптики под углом 7°15′. Также обнаружено, что угловая скорость вращения Солнца убывает от экватора к полюсам. Период вращения Солнца изменяется от 25 суток на экваторе до 30 суток у полюсов.

Многолетние наблюдения образования пятен на Солнце показали, что имеются циклические колебания числа пятен. Иногда их не бывает совсем, а иногда одновременно возникают десятки крупных пятен. Средняя продолжительность такого цикла составляет примерно 11 лет.

Кроме пятен, в фотосфере наблюдаются **факелы** — яркие области, в зоне которых часто и развиваются тёмные пятна. Факелы имеют сложную волокнистую структуру, их температура на несколько сотен градусов превышает температуру фотосферы.

Образование пятен и факелов связано с магнитным полем Солнца. Индукция магнитного поля Солнца в среднем в два раза выше, чем на поверхности Земли, однако в местах появления солнечных пятен она увеличивается в тысячи раз, достигая 0,5 Тл. Это приводит первоначально к облегчению конвекции и появлению факела, а потом — к ослаблению и появлению тёмного пятна.

2. температура фотосферы. В непрерывном спектре Солнца максимальная энергия излучения приходится на длину волны $\lambda_{max} = 470$ нм. Тогда по закону смещения Вина получаем температуру:

$$T \quad \frac{0\,0029}{\lambda} \quad \text{откуда } T = 6200 \text{ К}.$$

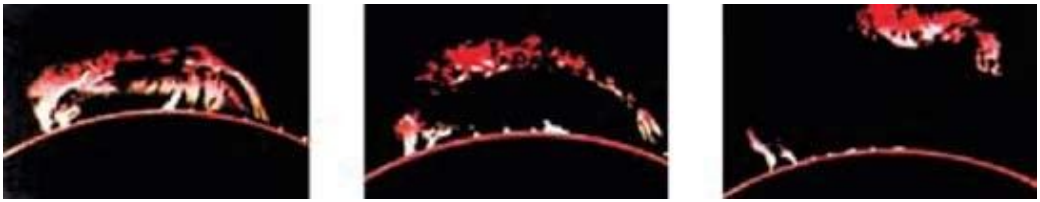


Рисунок 116 — Изменения протуберанца, наблюдавшегося в течение нескольких часов

3. внешние слои атмосферы: хромосфера и корона. Над фотосферой находится **хромосфера** Солнца. Общая её протяжённость 10—15 тыс. км. Температура в хромосфере с высотой не падает, а растёт от 4500 К до нескольких десятков тысяч. Излучение хромосферы в сотни раз меньше фотосферного, поэтому для её наблюдения применяют специальные методы, позволяющие выделять слабое излучение. Хромосфера весьма неоднородна и представляется наблюдателю в виде постоянно вьющихся продолговатых язычков — **спикул** — длиной порядка 10 тыс. км. Спикулы выбрасываются из нижней хромосферы со скоростями до 30 км/с; время их жизни составляет несколько минут.

На краю солнечного диска хорошо видны **протуберанцы** (см. рис. 110, 113) — плотные конденсации вещества, поднятые над поверхностью линиями магнитного поля в виде арок или выступов (рис. 116). Протуберанцы бывают спокойные, активные и эруптивные, выделяются на фоне короны, так как имеют более высокую плотность. Скорость движения вещества активных протуберанцев достигает 200 км/с, а высота подъёма — до 40 радиусов Земли.

На Солнце наблюдаются взрывные выбросы энергии и вещества (со скоростью до 100 тыс. км/с), охватывающие значительные области поверхностного слоя — **вспышки** (рис. 117). Эти яркие образования существуют от нескольких минут до 3 часов. Обычно солнечные вспышки проходят вблизи быстро развивающихся групп солнечных пятен.

Солнечная корона — самая разреженная и горячая оболочка Солнца, распространяющаяся от него на несколько солнечных радиусов и имеющая температуру плазмы от 1 до 2 млн градусов (рис. 118).

Яркость солнечной короны в миллион раз меньше, чем фотосферы. Поэтому наблюдать солнечную корону можно во время полных солнечных затмений или с помощью специальных телескопов-коронографов. Высокая температура и разреженность короны подтверждена спектральным анализом, а также по её радио- и рентгеновскому излучению.

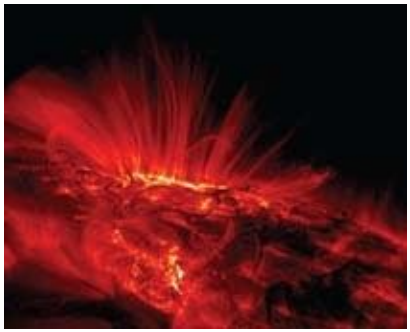


Рисунок 117 — Вспышка на Солнце

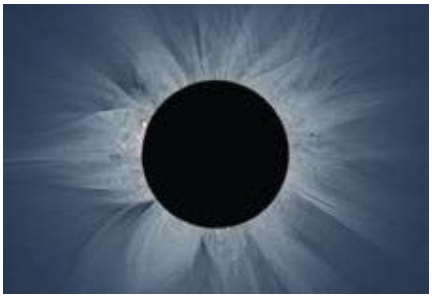


Рисунок 118 — Солнечная корона во время затмения Солнца

Нагревание короны до высоких температур осуществляется за счёт передачи энергии колебательных (конвективных) движений вещества из фотосферы. Волны (с частотой звуковых колебаний) в короне, где плотность вещества быстро убывает, становятся ударными. Они быстро затухают, происходит преобразование механической энергии волн в тепло. Из-за высокой температуры плотность короны убывает медленно, поэтому самые внешние слои атмосферы Солнца тянутся вплоть до орбиты Земли.

4. магнитные поля и активные образования. Масса, радиус, количество энергии, излучаемой Солнцем, остаются практически постоянными, но на всех уровнях солнечной атмосферы наблюдаются структурные образования, изменяющие свои физические параметры во времени. Совокупность нестационарных процессов, периодически возникающих в солнечной атмосфере, называется **солнечной активностью**. Проявлением солнечной активности являются пятна, факелы в фотосфере, протуберанцы, вспышки и выбросы вещества в атмосфере и короне. Места, где они возникают, называются **активными областями** (рис. 119). Все активные образования взаимосвязаны между собой с помощью изменяющихся магнитных полей, которые всегда присутствуют в активных областях Солнца. Центры активности, зарождаясь

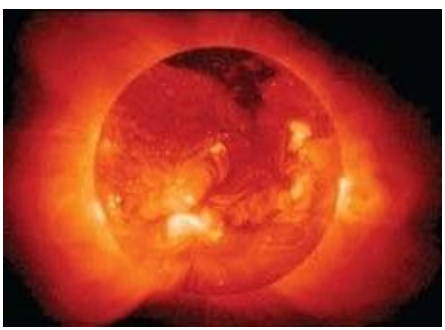


Рисунок 119 — Солнце в рентгеновских лучах. Наиболее яркие места — области проявления солнечной активности

на некоторой глубине под фотосферой, простираются в виде ярусов далеко в солнечную корону.

Не только появление пятен, но и солнечная активность в целом имеют 11-летнюю цикличность (колебание циклов фактически проходит в пределах от 7,5 до 16 лет).

Главные выводы

1. Внешняя газовая оболочка Солнца — атмосфера — состоит из фотосферы, хромосферы и короны.

2. Локальные, периодически возникающие изменения магнитных полей, порождают активные процессы в атмосфере Солнца.

3. Активные процессы на Солнце являются причиной возникновения в слоях атмосферы пятен, факелов, протуберанцев, вспышек и др.

4. Солнечные вспышки — наиболее мощные взрывные процессы в атмосфере Солнца.

5. Солнечная активность имеет 11-летнюю цикличность.

Контрольные вопросы и задания

1. Из каких оболочек состоит атмосфера Солнца?
2. Что такое фотосфера Солнца?
3. Какие объекты характерны для фотосферы Солнца?
4. Почему солнечные пятна темнее, чем фотосфера?
5. Что понимают под грануляцией?
6. Что понимают под хромосферой и короной Солнца?
7. Какие явления наблюдаются в хромосфере и короне Солнца?
8. Что такое солнечная активность и какова её цикличность?

§ 21. влияние солнца на жизнь Земли

1. интенсивность солнечного излучения вне оптического диапазона. Электромагнитное излучение Солнца, максимум которого приходится на видимую часть спектра, проходит строгий отбор в земной атмосфере.

В ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах мощность солнечного излучения резко уменьшается — в сотни тысяч раз по сравнению

с мощностью излучения в оптическом диапазоне. Но если в оптическом диапазоне Солнце является постоянной звездой, то излучение в коротковолновой области спектра зависит от солнечной активности, увеличиваясь или уменьшаясь в несколько раз в течение 11-летнего солнечного цикла. Сильно возрастает поток коротковолнового излучения во время солнечных вспышек. Из нижних слоёв хромосферы исходит ультрафиолетовое излучение, максимальная интенсивность которого может в два раза превышать минимальное значение в 11-летнем цикле. Основное рентгеновское излучение исходит от короны Солнца.

Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение Солнца поглощается в верхних слоях атмосферы Земли. Оно ионизирует газы земной атмосферы. Ионизированный слой верхней атмосферы Земли называется **ионосферой**. Отражение коротких радиоволн от ионосферы Земли используется в радиосвязи. При сильных всплесках солнечного рентгеновского излучения из-за солнечных вспышек нарушается связь на коротких радиоволнах.

Длинноволновое (мягкое) ультрафиолетовое излучение Солнца способно проникать до высоты 30—35 км в атмосферу Земли. Там оно разделяет молекулу кислорода O_2 на два составляющих её атома. Свободные атомы, соединяясь с молекулами кислорода, образуют новое вещество — **озон**, каждая молекула которого состоит из трёх атомов кислорода.

Озоновый слой поглощает практически всё ультрафиолетовое излучение Солнца, оставляя лишь малую долю, достигающую поверхности Земли и вызывающую у людей ожоги кожи, которые называются «загар». Когда толщина озонового слоя уменьшается, солнечное ультрафиолетовое излучение может возрасти в 1,5—2 раза. Тогда это излучение становится очень активным и может вызывать заболевание раком кожи.

2. солнечный ветер. Непрерывный расширяющийся поток разреженной плазмы, радиально исходящий от Солнца вдоль линий напряжённости магнитного поля и заполняющий собой межпланетное пространство, называется **солнечным ветром**. В его состав входят протоны, электроны, а также α-частицы и в незначительных количествах ряд высокоионизированных атомов (кислород, кремний, сера, железо). Скорость частиц солнечного ветра увеличивается по мере удаления от Солнца. Вблизи Земли средняя скорость солнечного ветра достигает 450 км/с, а плотность составляет несколько частиц в кубическом сантиметре.

Поток солнечной плазмы не может преодолеть противодействие магнитного поля Земли и обтекает его. При этом образуется полость

каплеобразной формы — **магнитосфера** (рис. 120). Со стороны Солнца она сжата давлением солнечного ветра. Граница магнитосферы, обращённая к Солнцу, находится на расстоянии, равном в среднем 10—12 радиусов Земли. С противоположной (ночной) стороны магнитосфера вытянута подобно хвосту кометы и растягивается на 6000 радиусов Земли. С изменением скорости и плотности частиц солнечного ветра изменяется и форма магнитосферы.

3. солнечно-земные связи. Солнечная активность оказывает сильное влияние в первую очередь на внешние оболочки Земли — магнитосферу и ионосферу. Во время мощных солнечных вспышек частицы могут разгоняться до 100 000 км/с, т. е. возникают космические лучи солнечного происхождения. Под воздействием солнечных космических лучей образуется окись азота NO, которая, взаимодействуя с озоном, активно его разрушает за счёт реакции $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$. После мощных вспышек на Солнце наблюдается понижение содержания озона в стратосфере над полярными шапками Земли.

С помощью коронографов, установленных на космических аппаратах, регистрируют грандиозные выбросы вещества из возмущённой ко-

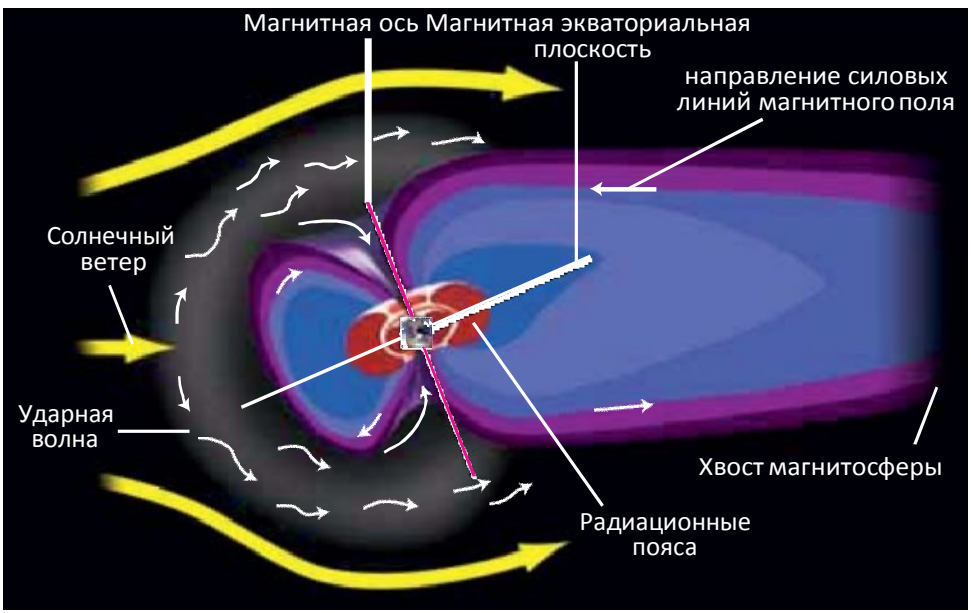


Рисунок 120 — Схема образования магнитосферы Земли

роны Солнца. Оторвавшийся от Солнца сгусток корональной плазмы, несущий внутри себя замкнутую петлю магнитного поля, называется **корональным выбросом массы**.

Столкновение плазменного облака с магнитосферой Земли является причиной её сильного возмущения. Воздействие коронального выброса приводит к возникновению сильных магнитных бурь, к разогреву и ускорению плазмы внутри магнитосферы. При этом быстрые протоны и электроны, сталкиваясь с молекулами воздуха на высоте 100—200 км, ионизуют их и заставляют светиться. В результате этого на Земле, преимущественно в околополярных широтах, наблюдаются **полярные сияния** (рис. 121). При высокой геомагнитной активности полярные сияния появляются на высоте 300—400 км, и их можно наблюдать даже на широтах Республики Беларусь.

Во время магнитной бури изменяются электрические поля над поверхностью Земли. Это приводит, во-первых, к возникновению перегрузок в линиях электропередачи (до нескольких сотен ампер) и их отключению; во-вторых, к наведению сильных токов в трубах газо- и нефтепроводов и к выходу из строя их систем управления. Последствия магнитной бури сказываются на бортовых электронных системах космических аппаратов.

Магнитные бури приводят к изменению давления в тропосфере (нижнем слое атмосферы Земли), в результате чего развиваются циклоны.

На тот факт, что Солнце влияет на биологические объекты, в том числе и на здоровье человека, впервые ещё в 1915 г. обратил внимание Александр Леонидович Чижевский. Проанализировав исторические документы, учёный пришёл к выводу, что в прошлом массовые стихийные бедствия и вспышки эпидемий приходились преимущественно на годы максимумов солнечной активности. На основании выведенной связи А. Л. Чижевский попытался предсказать некоторые эпидемии на 35 лет вперёд. Его прогнозы сбылись в семи случаях из восьми.

А. Л. Чижевский является одним из основателей гелиобиологии. Эта наука, возникшая на стыке физики Солнца и биологии, изучает влияние циклической активности Солнца на биологические объекты и здоровье человека.

Рисунок 121 — Полярное сияние

К колебаниям солнечной активности особенно чувствительна нервная система человека. Достоверно установлено, что число больных, поступающих в клиники, резко увеличивается в дни подъёма солнечной активности. Предполагается, что солнечная активность влияет на человека через возмущения магнитного поля Земли.

Чтобы всесторонне исследовать явления, происходящие на Солнце, учёные проводят непрерывные наблюдения Солнца, которые называют **Службой Солнца**.

Главные выводы

1. Мощность радио-, коротковолнового и корпускулярного излучений Солнца значительно возрастает при активных процессах в солнечной атмосфере.

2. Озоновый слой атмосферы Земли является защитной оболочкой от вредного для человека и живых организмов ультрафиолетового излучения Солнца.

3. Солнечный ветер — непрерывный поток разреженной плазмы, радиально исходящий от Солнца.

4. Неоднородность солнечного ветра вызывает на Земле магнитные бури, полярные сияния, радиовсплески.

5. Гелиобиология — наука, изучающая влияние активности Солнца на биологические объекты и человечество.

Контрольные вопросы и задания

1. Как земная атмосфера влияет на прохождение различных видов солнечного излучения к поверхности Земли?

2. Почему на Земле часто наблюдается нарушение связи на коротких радиоволнах?

3. Какова роль озонового слоя в атмосфере Земли? Каким образом активность Солнца может влиять на толщину озонового слоя Земли?

4. Что такое солнечный ветер? Как он возникает?

5. Что называют магнитосферой Земли? Какое влияние на неё оказывает солнечный ветер?

6. Каковы причины и последствия магнитных бурь на Земле?

7. Каковы причины происхождения полярных сияний?

раздел VII

ЗвёЗды

§ 22. основные характеристики звёзд. светимость

1. видимая звёздная величина. При первоначальном знакомстве со звёздным небом (§ 2) мы рассмотрели понятие «звёздная величина» (m). Вы уже знаете, что звёзды 1-й звёздной величины создают в 2,512 раза большую освещённость (отношение светового потока к площади, им освещаемой), чем звёзды 2-й звёздной величины, которые, в свою очередь, дают световые потоки в 2,512 раза больше, чем звёзды 3-й звёздной величины, и т. д. Таким образом, за интервал в одну **видимую звёздную величину** (обозначается 1^m) принято отношение освещённостей (E) в 2,512 раза. В виде формулы эти соотношения выразил Н. Погсон:

$$\frac{E}{E_2} \quad 2 \quad 1 \qquad {}^{1} \tag{1}$$

Измеряя при помощи фотометра отношение блеска звёзд, можно определить разность звёздных величин по формуле Погсона. Нуль-пункт же выбирают условно, по соглашениям. При этом договорено, чтобы стандартная звезда 1-й звёздной величины (средняя из 20 самых ярких звёзд) давала бы в 100 раз больше света, чем звезда 6-й звёздной величины, находящаяся на пределе зрения.

Видимая звёздная величина Луны в полнолуние равна $-12{,}7^m$, а в фазе первой четверти составляет $-9{,}0^m$. По формуле (1) можем найти, что освещённость Луны в полнолуние ($E_п$) больше освещённости Луны в фазе первой четверти (E_1) в 30 раз:

$$\frac{E}{E} \qquad 512 \quad {}^{27} \qquad {}^{37} \quad 0$$

Видимую звёздную величину Солнца определил Витольд Карлович Цераский. Она оказалась равной $-26{,}8^m$. Шкала звёздных величин позволяет выражать в звёздных величинах блеск слабых светил, невидимых невооружённым глазом. В настоящее время крупнейшие телескопы с диаметром зеркал 8—10 м и современной приёмной аппаратурой позволяют регистрировать объекты до 28-й звёздной величины.

2. определение расстояний до звёзд. Учёные давно предполагали, что звёзды имеют такую же физическую природу, как и Солнце. Из-за колоссальных расстояний диски звёзд не видны даже в сильные телескопы. Чтобы сравнивать звёзды между собой и с Солнцем, необходимо найти методы определения расстояний до них. Основным методом является метод параллактического смещения звёзд, рассмотренный нами ранее. Так как радиус Земли слишком мал по сравнению с расстоянием до звёзд, необходимо выбрать больший базис для измерения параллактического смещения звёзд. Ещё Н. Коперник понимал, что, согласно его гелиоцентрической системе, близкие звёзды на фоне далёких звёзд должны описывать эллипсы в результате годового движения Земли вокруг Солнца.

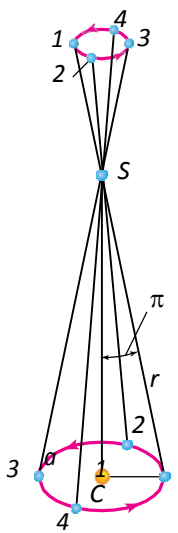


Рисунок 122 — Параллактическое смещение звезды на протяжении года: *C* — Солнце; *S* — звезда; *a* — полуось земной орбиты; π — годичный параллакс

Кажущееся перемещение болееблизкой звезды на фоне очень далёких звёзд происходит по эллипсу с периодом в один год и отражает движение наблюдателя вместе с Землёй вокруг Солнца (рис. 122). Положение Земли на орбите и видимые с Земли положения звезды на небе на данном рисунке обозначены одинаковыми цифрами. Маленький эллипс, описываемый звездой, называется параллактическим эллипсом. В угловой мере большая полуось этого эллипса равна величине угла, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты, перпендикулярная направлению на звезду. Этот угол называется **годичным параллаксом** (π). Параллактические смещения звёзд служат неопровержимым доказательством обращения Земли вокруг Солнца.

Расстояния до звёзд определяются по их годичному параллактическому смещению.

Из рисунка 123 видно, что если $CT = a$ есть средний радиус земной орбиты, $SC = r$ — расстояние до звезды S от Солнца C, а угол π — годичный параллакс звезды, то

$$\frac{\quad}{\text{si}}$$

Так как годичные параллаксы звёзд оцениваются десятичными долями секунды, а 1 радиан равен 206 265″, то расстояние до звезды можно определить из соотношения

$$\frac{206\ 265}{\quad} \text{ а. е.} \qquad (2)$$

Для измерения расстояний до звёзд астрономическая единица слишком мала. Поэтому для удобства определения расстояний до звёзд в астрономии применяется специальная единица длины — парсек (пк), название которой происходит от слов «параллакс» и «секунда». **Парсек** — это расстояние, с которого радиус земной орбиты был бы виден под углом в 1″.

Согласно формуле (2), 1 пк = 206 265 а. е. = $3{,}086 \cdot 10^{13}$ км. Таким образом, расстояние до звёзд в парсеках будет определяться выражением

$$\text{— пк.} \qquad (3)$$

В астрономических единицах обычно выражаются расстояния до тел Солнечной системы. Расстояния до небесных тел, находящихся за пределами Солнечной системы, обычно выражаются в парсеках, килопарсеках (1 кпк = 10^3 пк) и мегапарсеках (1 Мпк = 10^6 пк), а также в световых годах (1 св. г. = $9{,}46 \cdot 10^{12}$ км = = 63 240 а. е. = 0,3067 пк или 1 пк = = 3,26 св. г.). **Световой год** — расстояние, которое электромагнитное излучение (в вакууме) проходит за один год.

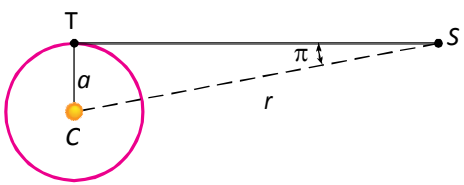


Рисунок 123 — Годичный параллакс звезды: *C* — Солнце; *S* — звезда; *T* — Земля

Нижний предел измерений параллаксов не превышает 0,005″, что позволяет определять расстояния не свыше 200 пк. Расстояния до ещё более далёких объектов определяются менее точно и иными методами.

3. Абсолютная звёздная величина. Видимый блеск звёзд не характеризует их реального излучения. Он определяется двумя факторами: истинным излучением звезды и расстоянием до неё. Солнце, например, гораздо ближе к Земле, чем любая другая звезда, поэтому оно — самое яркое светило на небе. Следовательно, для сравнения истинного блеска звёзд необходимо вычислять их звёздную величину на определённом одинаковом расстоянии. За такое одинаковое (или стандартное) расстояние принято 10 пк. Видимая звёздная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк, называется **абсолютной звёздной величиной**.

Пусть видимая звёздная величина звезды на расстоянии r равна m, а освещённость, создаваемая этой звездой, — E. По определению, видимая звёздная величина с расстояния $r_0 = 10$ пк будет равна абсолютной звёздной величине M, а E_0 — освещённость (или излучение) звезды с расстояния 10 пк. Тогда, используя формулу (1), можем записать:

$$\frac{E}{E_0} \quad 2 \quad 1 \quad M \tag{4}$$

Из физики известно, что освещённости, создаваемые одним и тем же источником излучения, обратно пропорциональны квадратам расстояний до него, т. е.

$$\frac{E}{E_0} \quad \frac{2}{0} \quad \frac{}{2} \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), получим, что $2{,}512^{M-m} = \frac{100}{r^2}$. Прологарифмировав данное равенство и упростив его, получим:

$$M = m + 5 - 5\lg r. \tag{6}$$

Учитывая, что $r = \frac{1}{\pi''}$, формулу (6) можно записать в виде:

$$M = m + 5 + 5\lg \pi. \quad (7)$$

По формуле (6) вычислим абсолютную звёздную величину Солнца. Расстояние до Солнца $r = 1$ а. е. $= \frac{1}{206265}$ пк; видимая звёздная величина Солнца равна $-26{,}8^m$. После подстановки этих значений в формулу получим, что $M_\odot = -26{,}8^m + 5^m + 26{,}6^m = 4{,}8^m$. Это означает, что со стандартного расстояния в 10 пк Солнце выглядит слабой звёздочкой почти 5-й звёздной величины.

Абсолютные звёздные величины звёзд колеблются от -9^m до 19^m, т. е. отличаются на 28^m, или по освещённости в 160 миллиардов раз, друг от друга.

4. Светимость звёзд. Зная абсолютную звёздную величину звезды, можно вычислить действительное общее излучение звезды или её светимость. **Светимостью** называется полная энергия, излучаемая звездой за 1 с. Светимость звезды можно выразить в ваттах, но чаще её выражают в светимостях Солнца. Напомним, что светимость Солнца равна $3{,}85 \cdot 10^{26}$ Вт (см. § 19).

Используя формулу (1), можно записать соотношение между светимостями и абсолютными звёздными величинами какой-либо звезды и Солнца:

$$\frac{L}{L_\odot} \quad 2{,}512 \quad , \quad (8)$$

где L и $L_\odot$ — светимости звезды и Солнца; M и $M_\odot$ — соответственно их абсолютные звёздные величины. Если принять $L_\odot = 1$ и с учётом того, что $M = 4{,}8^m$, формула (8) примет вид:

$L \quad 2{,}512^{M} \quad M$ или $L \quad 2 \quad 1 \quad 4 \quad M$

Звёзды-сверхгиганты, имеющие $M = -9^m$, обладают мощностью излучения больше Солнца в 330 тыс. раз, а самые неяркие звёзды с абсолютной звёздной величиной $M = 19^m$ излучают свет в 480 тыс. раз слабее Солнца.

Главные выводы

1. Звёзды движутся в пространстве и находятся от нас на различных расстояниях.

2. Видимая звёздная величина — мера наблюдаемого блеска (освещённости, создаваемой светилом на приёмнике лучистой энергии) небесного объекта, видимого с Земли. Интервал в одну звёздную величину соответствует разности освещённостей в 2,512 раза.

3. Расстояние до недалёких звёзд определяется методом годичного параллакса, основанного на измерении угла, под которым виден радиус земной орбиты с исследуемой звезды.

4. Единицами измерения расстояний до звёзд являются парсек и световой год.

5. Абсолютная звёздная величина — видимая звёздная величина, которую имела бы звезда, находясь на стандартном расстоянии 10 пк.

6. Полная энергия, излучаемая звездой по всем направлениям за единицу времени, называется её светимостью. Обычно светимость звезды выражается в единицах светимости Солнца.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под годичным параллаксом звезды?

2. Что такое парсек и световой год?

3. Чем отличается абсолютная звёздная величина от видимой звёздной величины?

4. Расстояние до звезды Бетельгейзе 652 св. г. Чему равен её параллакс?

5. Что понимают под светимостью звезды? Какова светимость Солнца?

6. Какая зависимость существует между светимостью звезды и её абсолютной звёздной величиной?

7. Вычислите расстояние до звезды Веги в парсеках и световых годах, если известно, что её видимая и абсолютная звёздные величины соответственно равны $0{,}0^m$ и $0{,}5^m$.

§ 23. температура и размеры звёзд

1. температура звёзд. В первом приближении можно считать, что звёзды излучают как абсолютно чёрные тела. Температуру T поверхности (фотосферы) звёзд можно определить, воспользовавшись законом Стефана — Больцмана, так же, как мы это уже делали при определении температуры Солнца (см. § 18):

$$T \sqrt[4]{\frac{L}{4 \quad 2}} \qquad (1)$$

Подсчитанную таким методом температуру называют **эффективной температурой**. Однако этот метод применяется ограниченно, так как достаточно точное значение радиусов измерено только у нескольких десятков ярких гигантских звёзд.

Температуры звёзд сильно различаются. Холодные красные звёзды имеют температуру около 3000 К. Солнце с температурой фотосферы 6000 К относится к жёлтым карликам. Температура самых горячих звёзд достигает 100 000 К. Основная часть излучения горячих звёзд приходится на ультрафиолетовую часть спектра, и мы их воспринимаем как звёзды голубого цвета.

2. спектральная классификация звёзд. Звёзды отличаются большим разнообразием, однако среди них можно выделить отдельные группы, обладающие общими свойствами. При первом знакомстве со звёздным небом обращает на себя внимание тот факт, что звёзды разнятся по цвету. Гораздо сильнее это заметно при рассмотрении спектров. Важнейшие различия спектров звёзд заключаются в количестве и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, а также в распределении энергии в непрерывном спектре. С учётом видов спектральных линий и их интенсивности строится **спектральная классификация звёзд**.

В Гарвардской обсерватории (США) в 20-е гг. XX в. была разработана классификация спектров звёзд, в которой последовательность спектральных классов обозначается заглавными буквами латинского алфавита. Основные характеристики спектральных классов помещены на форзаце 4. Тонкие различия внутри каждого класса дополнительно подразделяют на 10 подклассов — от 0 до 9. Например, Солнце принадлежит к спектральному классу G2.

Данная последовательность спектральных классов отражает уменьшение температуры атмосфер (фотосфер) звёзд от класса O к классу L. Спектральная последовательность одновременно является и цветовой: звёзды класса O имеют голубоватый цвет, класса B — голубовато-белый, A — белый и т. д. Для запоминания этой последовательности используется следующая фраза (мнемоническое правило):

O	B	a	F	G	K	M	L
Один	Бритый	англичанин	Финики	Жевал	Как	Мелкий	лук

Химический состав атмосфер большинства звёзд почти одинаков. Наружные слои звёзд состоят из водородно-гелиевой смеси с очень малой добавкой более тяжёлых элементов. Например, аналогично Солнцу другие звёзды содержат в своих атмосферах 73 % водорода, 25 % гелия и 2 % всех остальных элементов.

Различия в спектрах звёзд определяются главным образом различиями температуры. В фотосферах холодных звёзд могут существовать простейшие молекулы. Поэтому характерными деталями спектров звёзд классов M и L являются широкие полосы поглощения молекул, например CrH. При более высоких температурах молекулярные соединения распадаются. В таких спектрах пропадают спектральные полосы молекулярных соединений, зато появляются линии, соответствующие нейтральным металлам. Таким образом, спектральная классификация звёзд — это температурная классификация звёздных спектров, основанная на оценках относительной интенсивности и вида спектральных линий.

В настоящее время спектральной классификацией охвачено более 500 тыс. звёзд.

3. размеры звёзд. Линейный радиус R звезды можно определить, если известны её угловой радиус ρ и расстояние до звезды r или годичный параллакс π по формуле $R = r \cdot \sin \rho$.

Так как $r = \dfrac{206\,265''}{\pi''}$ а. е., для углового радиуса $\sin \rho'' = \dfrac{\rho''}{206\,265''}$, то имеем $R = \dfrac{\rho''}{\pi''}$ а. е.

Линейные радиусы звёзд принято выражать в радиусах Солнца. В радиусах Солнца 1 а. е. равна $149{,}6 \cdot 10^6$ км : $0{,}696 \cdot 10^6$ км = 215. Используя это соотношение, получим формулу для определения линейных радиусов звёзд в радиусах Солнца в следующем виде:

$$R = 215\frac{\rho}{\pi}.$$

Звёзды настолько далеки от нас, что их угловые размеры меньше предела разрешения крупнейших телескопов. Для ярких близких звёзд угловой радиус находят по интерференционной картине, которая получается в результате перекрытия изображений звезды, при помощи двух широко расставленных телескопов. Например, с помощью оптического интерферометра, состоящего из двух сферических зеркал диаметром 6,6 м каждое, разнесённых на максимальное расстояние 180 м, удалось измерить угловой

диаметр ε Ориона. Он оказался равным 0,00072″, а так как годичный параллакс звезды равен π″ = 0,0024″, то $R = \frac{0{,}00036''}{0{,}0024''} = 32\,R_\odot$. 215×

Радиусы звёзд могут быть вычислены по их мощности излучения (светимости) и температуре. Запишем значение полной мощности излучения для какой-либо звезды и для Солнца:

$$L \quad 4 \quad ^2 \quad ^4 \qquad L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_\odot^4,$$

где L и $L_\odot$, R и $R_\odot$, T и $T_\odot$ — соответственно светимости, линейные радиусы и абсолютные температуры звезды и Солнца.

Принимая $L_\odot = 1$ и $R_\odot = 1$, получим:

$$L = R^2 \frac{T^4}{T_\odot^4},$$

или окончательно в линейных радиусах Солнца:

$$R = \sqrt{L}\left(\frac{T_\odot}{T}\right)^2. \qquad (2)$$

Диаметры звёзд сильно отличаются: от размеров, сравнимых с большой полуосью орбиты Юпитера (красные сверхгиганты), до размеров Земли (белые карлики) или даже до нескольких километров у нейтронных звёзд (рис. 124).

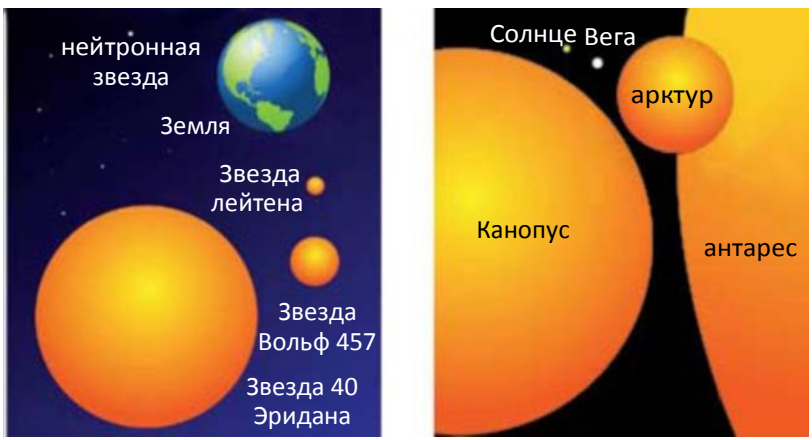


Рисунок 124 — Размеры некоторых звёзд в сравнении с размерами Земли (на рисунке слева) и Солнца (на рисунке справа)

Главные выводы

1. Спектральная классификация звёзд основана на оценках относительной интенсивности и вида спектральных линий.

2. Размеры звёзд пропорциональны расстояниям до них и видимым угловым размерам.

3. Зная мощность излучения звезды (светимость), температуру звезды и температуру Солнца, можно определить её размер (в радиусах Солнца).

Контрольные вопросы и задания

1. Каким образом можно определить температуру звезды, используя законы Стефана — Больцмана и Вина?

2. По каким принципам производится спектральная классификация звёзд?

3. Определите размеры звезды Спики (α девы), если температура её фотосферы равна 17 600 К, а светимость в 1950 раз больше светимости Солнца.

4. Из каких химических элементов в основном состоят звёзды?

5. Во сколько раз отличаются светимости двух звёзд одинакового цвета, если радиус одной из них больше в 25 раз?

§ 24. двойные звёзды. масса звёзд

1. типы двойных звёзд. Наблюдения показывают, что многие звёзды во Вселенной образуют пары или являются членами сложных систем. **Двойными звёздами** называют близко расположенные пары звёзд. Различают оптические и физические двойные звёзды. **Оптические двойные звёзды** (пары) состоят из весьма далёких друг от друга в пространстве звёзд, которые случайным образом проектируются на небесную сферу по лучу зрения. **Физические двойные звёзды** представляют собой системы близко расположенных в пространстве звёзд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс.

Звёзды физических двойных пар часто имеют различный цвет. Так, у Антареса — очень яркой красной звезды в созвездии Скорпиона — имеется слабый голубоватый спутник.

Первая известная ещё в древности звёздная пара — это Мицар (Конь) и Алькор (Всадник). Мицар — средняя звезда ручки «ковша» созвездия Большой Медведицы, которая имеет видимую звёздную величину $2{,}2^m$. На угловом расстоянии 12′ от неё расположена слабая звезда Алькор со звёздной величиной $4{,}0^m$. Звёздная пара Мицар и Алькор — пример оптической двойной звезды. В свою очередь, даже в школьный телескоп хорошо видно: Мицар состоит из двух очень близких звёзд, неразличимых невооружённым глазом. Компоненты звёздной пары Мицар А и Мицар В отстоят друг от друга на расстоянии 14″ и имеют звёздные величины $2{,}4^m$ и $4{,}0^m$ соответственно. Звёздная пара Мицар — пример фи- зической двойной звезды.

Физические двойные звёзды в зависимости от способа их наблюдений подразделяются на **визуально-двойные звёзды** (их компоненты можно увидеть при помощи телескопа визуально или сфотографировать), **затменно-двойные звёзды** (их компоненты периодически загораживают друг друга от наблюдателя и поэтому звезда меняет блеск), **спектрально-двойные звёзды** (двойственность проявляется в периодических смещениях или раздвоениях линий их спектров), **астрометрически-двойные звёзды** (одна звезда не видна и возмущает правильное движение соседней).

Двойные звёзды являются частным случаем **кратных звёзд**, состоящих иногда из нескольких компонентов. Существуют звёзды тройные, четверные и даже более высокой кратности. К кратным звёздам принято причислять звёзды, имеющие менее 10 компонентов. Системы с большим числом звёзд называются **звёздными скоплениями**.

Первый список двойных звёзд составил в 1803 г. астроном Уильям Гершель. Этот перечень содержал несколько сотен объектов. К настоящему времени известно, что примерно половина звёзд нашей Галактики — двойные. Двойственность и кратность в звёздном мире — широко распространённое явление.

2. Затменно-двойные звёзды. **Затменно-двойные**, или **затменно-переменные**, **звёзды** представляют собой тесные пары, обращающиеся с периодом от нескольких часов до нескольких суток по орбитам, большая полуось которых сравнима с самими звёздами. По этой причине мы не можем увидеть отдельно их компоненты, так как угловое расстояние между звёздами очень мало. Судить о двойственности системы можно лишь по периодическим колебаниям блеска, если по лучу зрения плоскости орбит звёзд практически совпадают. В этом случае наблюдаются затмения, когда один из компонентов проходит впереди или сзади

Рисунок 125 — Изменение блеска затменно-двойной звезды

другого. Рассмотренную ситуацию поясняет рисунок 125, на котором приводится кривая изменения блеска m затменно-двойной звезды, связанного с периодическими затмениями одного компонента другим. На графике показаны разные положения компонентов звезды на орбите. Разность звёздных величин в минимуме и максимуме блеска называется **амплитудой**, а промежуток времени между двумя последовательными наименьшими минимумами — **периодом переменности**.

Типичный пример затменно-переменной звезды — звезда β Персея (Алголь), которая регулярно затмевается на 9,6 ч с периодом 2,867 суток. Падение блеска в минимуме у этой звезды составляет $2{,}3^m$.

Всего известно около 4000 затменно-двойных звёзд.

3. спектрально-двойные звёзды. Звёзды, двойственность которых устанавливается лишь на основании спектральных наблюдений, называются **спектрально-двойными**.

Предположим, что наблюдатель находится в плоскости орбиты двойной системы, состоящей из более массивной и яркой звезды А и менее яркой и массивной звезды В (рис. 126). Каждый из компонентов — А и В, обращаясь вокруг центра масс системы, то приближается к наблюдателю, то удаляется от него. Вследствие эффекта Доплера в первом случае линии в спектре звезды будут сдвинуты к фиолетовой области спектра, во втором — к красной, причём период этих смещений равен периоду обращения. На рисунке римские цифры обозначают соответствие спектров положениям звёзд на орбитах.

Постоянное совершенствование методики определения сдвига спектральных линий позволило в 1995 г. обнаружить у звезды 51 Пегаса спутник массой в половину массы Юпитера. К настоящему времени методом лучевых скоростей у более чем 600 звёзд обнаружены планетные системы. Они получили общее название — **экзопланеты**.

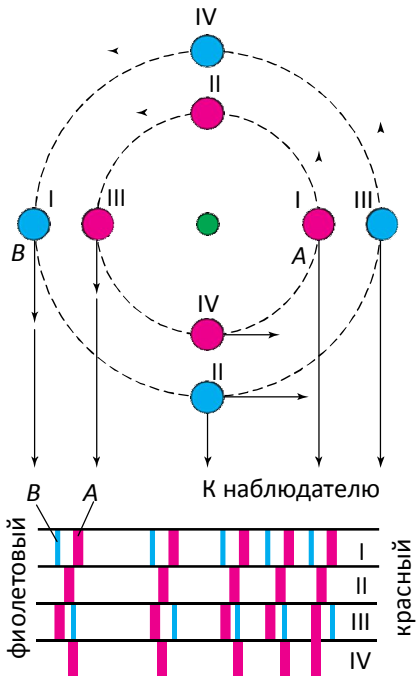


Рисунок 126 — Смещение линий в спектре двойной звезды

4. Астрометрически-двойные звёзды. Встречаются такие тесные звёздные пары, когда одна из звёзд или очень мала по размерам, или имеет низкую светимость. В этом случае такую звезду рассмотреть не удаётся, но обнаружить двойственность всё же можно. Яркий компонент будет периодически отклоняться от прямолинейной траектории то в одну, то в другую сторону (рис. 127), как будто по прямой движется центр масс системы. Такие возмущения пропорциональны массе спутника. Исследования одной из ближайших к нам звёзд, известной под названием Росс 614 (её блеск $11{,}4^m$ и параллакс 0,25″), показали, что амплитуда отклонений звезды от ожидаемого направления достигает 0,36″. Период обращения звезды относительно центра масс равен 16,5 года.

Среди близких к Солнцу звёзд обнаружено около 20 астрометрически-двойных звёзд.

5. масса звёзд. Длительные наблюдения визуально-двойных звёзд убедили астрономов, что относительное видимое движение компонентов совершается по эллипсу и удовлетворяет закону площадей. Из этого следует, что в двойных системах обращения звёзд происходят в соответствии с законами Кеплера и подчиняются закону всемирного тяготения Ньютона.

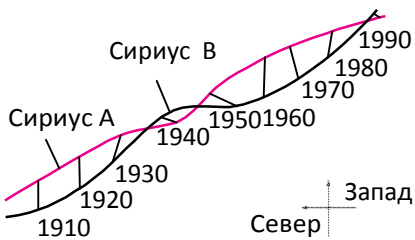


Рисунок 127 — Отклонение в движении Сириуса, вызванное гравитационным возмущением спутника

По данным наблюдений двойных звёзд получены оценки масс для звёзд различных типов. Анализ этих данных привёл к следующим результатам.

1. Массы звёзд заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца. Наибольшее количество звёзд имеет от 0,4 до 3 масс Солнца.

2. Существующая зависимость между массами звёзд и их светимостью даёт возможность оценивать массы одиночных звёзд по их светимостям. В интервале масс $0{,}5M_\odot \le M \le 10M_\odot$ светимость звезды пропорциональна четвёртой степени её массы $L \approx M^4$. При $M > 10M_\odot$ показатель степени равен 2, т. е. $L \approx M^2$.

3. Масса звезды в момент её формирования является важнейшим параметром, определяющим её последующую эволюцию.

4. Радиусы звёзд имеют весьма широкие пределы, поэтому средняя плотность звёзд колеблется от $5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^8$ кг/м^3 (сравните с Солнцем — $1{,}4 \cdot 10^3$кг/м^3).

Главные выводы

1. Две звезды, выделяющиеся на фоне других близостью своих видимых положений, называются двойной звездой. Двойные звёзды являются частным случаем кратных звёзд.

2. Физические двойные звёзды — система двух звёзд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс.

3. В зависимости от метода наблюдения двойные звёзды подразделяются на визуально-двойные, затменно-двойные, спектрально-двойные, астрометрически-двойные.

4. Компоненты физических двойных звёзд совершают видимое относительное движение по эллипсу в соответствии с законами Кеплера и подчиняются закону всемирного тяготения.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие звёзды называются двойными? Приведите их классификацию.

2. Что такое амплитуда и период переменности затменно-переменных звёзд?

3. дайте объяснение: почему происходит смещение линий в спектрах спектрально-переменных звёзд?

§ 25. Эволюция звёзд

1. диаграмма «спектр-светимость». Существует зависимость между основными физическими характеристиками звёзд. На основе наблюдений определяются спектральные классы звёзд, а по известному расстоянию — абсолютные звёздные величины, или светимости звёзд.

В начале XX в. независимо друг от друга датский астроном Эйнар Герцшпрунг и американский астрофизик Генри Рессел установили связь между этими характеристиками. Данную зависимость можно представить в виде диаграммы: по горизонтальной оси откладывается спектральный класс (или температура) звёзд, а по вертикальной — их светимость (в абсолютных величинах). Каждой звезде соответствует точка на этой диаграмме. Такая диаграмма называется **диаграммой Герцшпрунга — Рессела** или **диаграммой «спектр — светимость»** (см. форзац4).

Звёзды на диаграмме не распределяются случайным образом по всей её площади, а образуют несколько групп, называемых **последовательностями**.

Большинство звёзд на диаграмме лежат в пределах чётко выраженной диагональной полосы, простирающейся от левого верхнего до правого нижнего угла, которая называется **главной последовательностью**.

В левой верхней части главной последовательности находятся массивные горячие звёзды спектрального класса O, которые в десятки тысяч раз превышают по светимости Солнце. Такие звёзды называют горячими сверхгигантами. По мере уменьшения температуры светимость звёзд падает. Затем полоса главной последовательности проходит через область, где находятся похожие на Солнце звёзды класса G. И наконец, главная последовательность опускается к нижней правой части диаграммы. Здесь находятся звёзды класса M и L с малой массой и относительно низкой температурой. Эти звёзды называют красными и коричневыми карликами.

К звёздам главной последовательности относятся хорошо известные звёзды — Сириус (α Большого Пса), Вега (α Лиры), наше Солнце. Звёзды с относительно низкой температурой фотосферы ($3—5 \cdot 10^3$ K) и светимостью в 100—1000 раз большей светимости Солнца образуют **последовательность красных гигантов**. К данной последовательности относятся, например, Арктур (α Волопаса), Альдебаран (α Тельца).

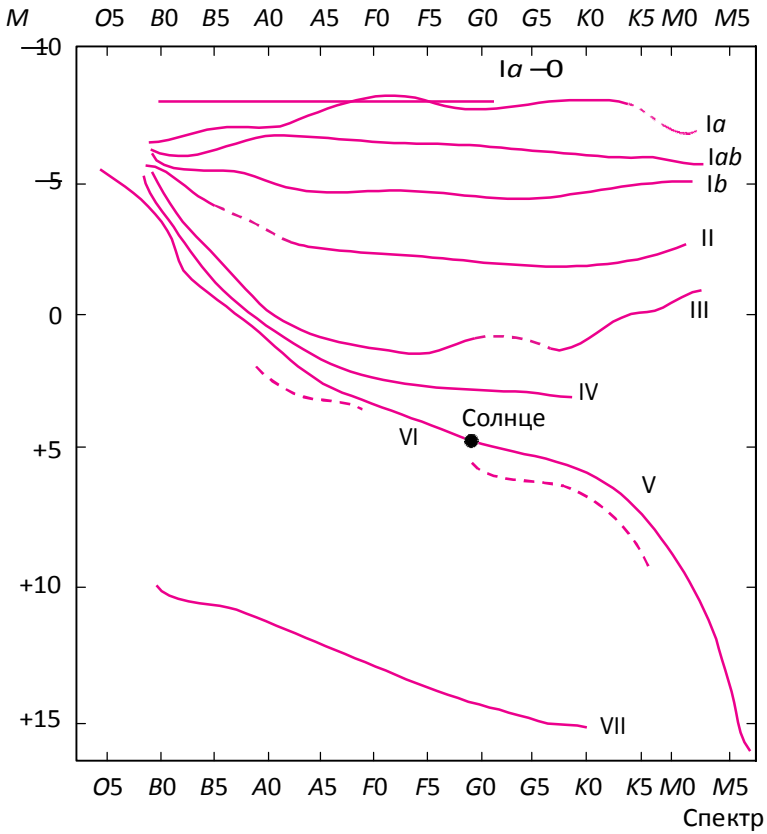


Рисунок 128 — Диаграмма «спектр — светимость» с указанием классов светимости

В верхней части диаграммы «спектр — светимость» располагается **последовательность сверхгигантов** (рис. 128). Это звёзды с очень высокой светимостью, низкой плотностью, в десятки и сотни раз большими диаметрами, чем у Солнца. К сверхгигантам причисляют звезду Бетельгейзе (α Ориона).

В левой нижней части диаграммы расположены горячие звёзды слабой светимости — **последовательность белых карликов**. Их размеры сравнимы с размерами Земли, а массы близки к массе Солнца. Поэтому средняя плотность белых карликов превышает плотность земных пород в сто тысяч раз. С другой стороны, средняя плотность звёзд-сверхгигантов очень низкая — в тысячи раз меньше плотности земной атмосферы. Плотность вещества в атмосфере звезды влияет на ширину спектральных линий. Поэтому, например, у красных карликов спек-

тральные линии шире, чем у гигантов и сверхгигантов. Значит, по виду спектральных линий определяется, к какой последовательности принадлежит звезда (главная, карлики, гиганты).

По последовательности оценивается абсолютная звёздная величина, а затем и расстояние (см. формулу 6, § 22). Этот метод определения расстояний называется **методом спектральных параллаксов**.

Наиболее многочисленными звёздами являются красные карлики: на 10 млн красных карликов приходится около 1 млн белых карликов, примерно 1000 гигантов и только 1 сверхгигант.

В Йеркской обсерватории разработана двумерная спектральная классификация, в которой каждый спектр звезды учитывает особенности спектральных линий и светимость звёзд (см. рис. 128). Эта классификация разделяет все звёзды на несколько **классов светимости** (от I до VII).

I*a*-0 — самые яркие сверхгиганты;
I*a* — яркие сверхгиганты;
I*ab* — средние сверхгиганты;
I*b* — слабые сверхгиганты;
II — яркие гиганты;
III — слабые гиганты;
IV — субгиганты;
V — главная последовательность;
VI — субкарлики;
VII — белые карлики.

2. рождение звёзд. Процесс звездообразования идёт в Галактике непрерывно — с момента её возникновения. Подтверждением рождения звёзд в настоящее время является существование массивных горячих звёзд классов O и B, время жизни которых не превосходит 10 млн лет.

Продолжительность жизни звёзд составляет от миллионов до десятков миллиардов лет. Это время слишком велико, чтобы проследить жизненный путь звёзд, или их **эволюцию**. Поэтому основным методом исследования эволюции звёзд служит построение **моделей внутреннего строения звёзд**.

При построении модели задают начальные условия физического состояния газа: химический состав, давление (плотность), температуру, массу. Затем на основании физических законов (газовых законов, закона тяготения) рассчитывают изменения этих параметров с течением времени.

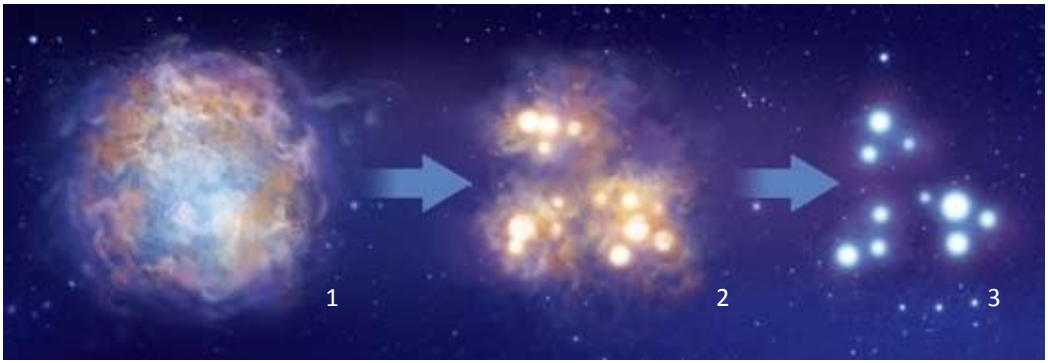


Рисунок 129 — Образование звёзд из газопылевого облака

По современным представлениям звёзды образуются в результате сжатия (гравитационной конденсации) вещества межзвёздной среды (рис. 129, *1*). Звёзды рождаются группами из гигантских газопылевых комплексов размерами до 100 пк и массой в десятки, а иногда и сотни тысяч солнечных масс. Газ в этих комплексах находится в молекулярном состоянии с температурой около 10 К.

Под действием гравитационных сил комплекс сжимается, плотность его растёт, и он распадается на отдельные сгустки, или газопылевые облака (рис. 129, *2*).

В газопылевом облаке случайно или под действием внешних причин возникают гравитационно-неустойчивые фрагменты, которые продолжают сжиматься. Внешними причинами, стимулирующими звездообразование, могут служить столкновения молекулярных облаков; звёздный ветер от молодых горячих звёзд; ударные волны, порождённые вспышками сверхновых звёзд. Если масса фрагмента достаточно велика, то происходит дальнейший распад на отдельные фрагменты-сгустки (рис. 129, *3*).

Фрагменты звёздной массы, сжимающиеся под действием собственного тяготения, называют **протозвёздами**. При гравитационном сжатии газ в протозвезде разогревается, и она начинает излучать в инфракрасном диапазоне спектра. Вещество, окружающее ядро протозвезды, падает на него, увеличивая его массу и температуру. Когда давление, создаваемое излучением звезды, становится достаточно большим, падение вещества прекращается. Давление излучения ограничивает массу будущих звёзд величиной в несколько десятков масс Солнца. Длительность стадии сжатия зависит от массы протозвезды: при массе меньше солнечной — сотни миллионов лет, при большей — сотни тысяч лет.

Вращение протозвёзд играет важную роль в их дальнейшей эволюции. Часто у вращающейся протозвезды образуется вокруг центрального сгущения протяжённый газопылевой диск, из которого потом образуется планетная система. Формирующаяся звезда в конце стадии сжатия имеет значительные размеры при ещё относительно низкой температуре поверхности. Сжатие протозвезды прекращается, когда температура в центре ядра достигнет нескольких миллионов градусов, тогда включаются термоядерные источники энергии, реакции протон-протонного цикла. Момент начала термоядерных реакций есть момент рождения звезды. Теперь температура и плотность внутренних слоев становятся такими, что сила их упругости может противодействовать весу наружных слоёв. После начала водородных реакций и установления равновесного состояния звезда попадает на главную последовательность диаграммы «спектр-светимость». Новорождённые звёзды появляются на главной последовательности по всей её длине (в зависимости от их массы).

3. Эволюционные перемещения. От массы в первую очередь зависит, какую температуру будет иметь ядро звезды в момент установления устойчивого равновесия. Чем больше масса сжимающегося газопылевого комплекса, затем протозвезды и наконец звезды, тем больший вес вышележащих слоёв приходится выдерживать её ядру. Поэтому нужна более высокая температура, чтобы газовое давление могло противостоять этому весу.

Самые массивные звёзды (размером в 30—50 масс Солнца) порождают наиболее горячие звёзды класса О. Температура центральных областей таких звёзд составляет 30—35 млн градусов.

Бо□льшую часть времени звезда находится на главной последователь- ности. Но так как запасы водорода пропорциональны массе, а расход энергии (светимость) пропорционален четвёртой степени массы, то водо- род в массивных звёздах выгорает быстрее. Время пребывания звезды на главной последовательности определяется простой зависимостью

$$10^{10}\frac{}{M^3}\ \text{(лет)},$$

где M — масса звезды в массах Солнца.

По приведённой выше формуле можно подсчитать, что Солнце исчерпает свой запас водородного топлива примерно за 10 млрд лет (таким

Рисунок 130 — Эволюция звёзд различной массы

образом, Солнце, возраст которого по оценкам учёных составляет около 5 млрд лет, «прожило» на главной последовательности лишь половину своей жизни). Звёзды с массами, равными 10 массам Солнца, исчерпают его всего за 10 млн лет, слабо излучающие красные карлики массой около 0,5 массы Солнца — за 80 млрд лет. Горячих молодых звёзд-гигантов наблюдается меньше из-за малого времени существования. Поэтому наиболее заполнена правая нижняя часть главной последовательности диаграммы «спектр — светимость».

После выгорания водорода в недрах звезды образуется горячее гелиевое ядро. Дальнейшая эволюция звезды зависит от массы этого ядра. Если она меньше 1,4 массы Солнца, то под действием гравитационного сжатия гелиевое ядро снова разогревается (температура повышается до 100 млн градусов). Внешние слои звезды при этом расширяются и охлаждаются. Звезда словно разбухает. Светимость её возрастает, а температура падает. Звезда сходит с главной последовательности и в зависимости от массы становится красным гигантом (рис. 130) или сверхгигантом.

Разрастающаяся атмосфера звезды постепенно удаляется от ядра, образуя **планетарную туманность**. Конечной стадией эволюции этих звёзд являются белые карлики. **Белый карлик** — компактная звезда с массой, равной примерно массе Солнца, радиусом примерно в 100 раз меньше Солнца. Плотность таких звёзд более чем в 100 тыс. раз превосходит плотность воды.

Как и все звёзды, Солнце проходит стадии эволюции. Через 5—8 млрд лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым карликом. Звёзды, которые намного массивнее Солнца, превращаются в ходе эволюции в нейтронные звёзды (при массе от 1,4 до 2,5 массы Солнца) или чёрные дыры (при массе более 2,5 массы Солнца), проходя стадию Сверхновой.

Главные выводы

1. Между различными физическими характеристиками звёзд существует связь. Диаграмма зависимости спектральных классов звёзд (или температур) от их светимости называется диаграммой «спектр — светимость».

2. Эволюция звёзд — постепенное изменение с течением времени физических характеристик, внутреннего строения и химического состава звёзд.

3. Звёзды образуются в результате гравитационного сжатия вещества из газопылевых комплексов.

4. Звёзды в процессе эволюции проходят стадии от протозвёзд до конечных стадий (в зависимости от массы) — белых карликов, нейтронных звёзд или чёрных дыр.

5. Переход звёзд с различной массой на диаграмме «спектр — светимость» с одной последовательности на другую в ходе изменения их параметров со временем называется эволюционным перемещением.

6. Классы светимости — звёздные группы, учитывающие особенности спектральных линий и светимость звёзд.

Контрольные вопросы и задания

1. По какому принципу строится диаграмма «спектр — светимость» (диаграмма герцшпрунга — Рессела)?

2. Как на диаграмме «спектр — светимость» располагаются звёзды различного размера?

3. дайте краткую характеристику звёздам: сверхгиганты, красные гиганты, белые карлики, красные карлики.

4. Что понимают под эволюцией звёзд?

5. Опишите в общих чертах процесс образования звёзд.

6. Что понимают под классами светимости?

§ 26. нестационарные звёзды

1. общая характеристика переменных звёзд. Многие звёзды изменяют свои физические характеристики в течение относительно короткого периода времени. Такие звёзды называются **нестационарными**. В отличие от затменно-переменных звёзд (см. § 24) они меняют свою светимость в результате физических процессов, происходящих в самих звёздах. По этой причине их называют **физическими переменными звёздами**.

В зависимости от характера протекающих внутри звезды процессов физические переменные звёзды бывают пульсирующими и эруптивными.

Пульсирующие переменные звёзды — физические переменные звёзды, у которых происходят периодические колебания блеска (например, цефеиды, звёзды типа RR Лиры, мириды).

Эруптивные звёзды — физические переменные звёзды, проявляющие свою переменность в виде вспышек, которые объясняются выбросами вещества (например, новые и сверхновые звёзды).

Все переменные звёзды имеют специальные обозначения, если им не были присвоены раньше буквы греческого алфавита. В каждом созвездии первые 334 переменные звезды обозначаются последовательностью букв латинского алфавита R, S, T, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, ..., AZ, QQ... с добавлением названия соответствующего созвездия. Следующие переменные, которым не хватило комбинации этих букв в созвездии, обозначаются V 335, V 336 и т. д.

2. Пульсирующие переменные звёзды. Первая пульсирующая звезда была открыта немецким астрономом Давидом Фабрициусом в 1596 г. в созвездии Кита и названа Мирой. Период изменения блеска этой звезды составляет 331,6 суток.

Долгопериодические переменные звёзды (с периодами от нескольких недель до года и более; звёзды типа Миры Кита) называются **миридами**. Практически все звёзды этого типа — красные гиганты огромных размеров и большой светимости. Амплитуды изменения блеска таких звёзд могут достигать десяти звёздных величин.

При эволюционном превращении звезды в звезду-гиганта происходит увеличение её объёма и уменьшение средней плотности вещества. В это время внутреннее строение звезды изменяется коренным образом, что может сопровождаться нарушением равновесия между силами гравитационного притяжения и лучевого давления. Это приводит к перио-

дическим колебаниям объёма звезды: её оболочка то расширяется, то сжимается. Такие периодические колебания переменных звёзд называются пульсационными. Пульсация звезды происходит благодаря клапанному механизму, когда непрозрачность наружных слоёв звезды задерживает часть излучения внутренних слоёв. При нагревании наружный слой становится прозрачным, поток выходящего излучения увеличивается. Но это приводит к охлаждению и сжатию, из-за чего слой снова становится непрозрачным и весь процесс повторяется снова.

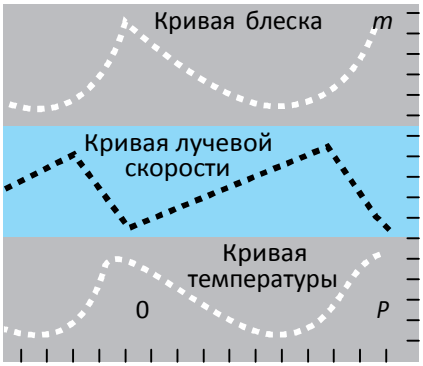


Рисунок 131 — Графики изменения блеска, лучевой скорости и температуры цефеид

Обширный класс очень ярких переменных звёзд-сверхгигантов и гигантов классов F и G называется **цефеидами**. Это пульсирующие переменные звёзды, блеск которых плавно и периодически меняется от 0,5 до 2 звёздных величин. Период изменения блеска составляет от 1,5 до 70 суток. Название происходит от δ Цефея — одной из наиболее типичных для данного класса переменных звёзд.

Одновременно с видимой звёздной величиной у цефеид меняется спектр и температура (в среднем на 1500 градусов) (рис. 131).

Период пульсаций звезды зависит от средней плотности её вещества и подчиняется следующей закономерности:

$$P \quad \frac{t}{\sqrt{\rho}} \quad \frac{0{,}12}{\sqrt{\rho}}$$

где P — период пульсаций в сутках, ρ — средняя плотность (в единицах средней плотности Солнца). Средняя плотность вещества цефеид составляет около 10^{-2} кг/м^3.

Цефеиды с большей массой имеют большую светимость, больший радиус, но меньшую плотность и, соответственно, больший период пульсации, т. е. цефеиды обладают важной зависимостью «период — светимость» (рис. 132). Эта зависимость описывается выражением: $M = -1{,}01 - 2{,}791g\,P$, где P — период изменения блеска в сутках, а M — средняя абсолютная звёздная величина. Таким образом, по известному

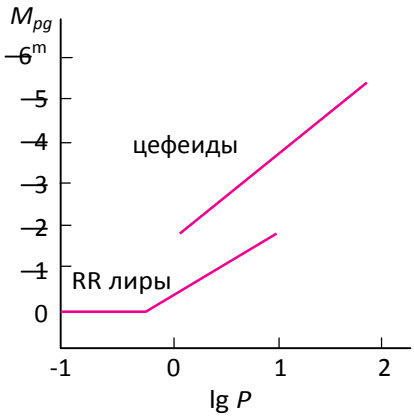


Рисунок 132 — График зависимости абсолютной звёздной величины от периода изменения блеска звёзд у цефеид и звёзд типа RR Лиры

из наблюдений периоду можно определить абсолютную звёздную величину или светимость звезды. Сравнивая её с наблюдаемой видимой звёздной величиной, можно определить расстояние до цефеиды. Высокая светимость и переменность блеска позволяют обнаруживать цефеиды вплоть до расстояний 20 Мпк. Их наблюдают в ближайших галактиках, определяя таким образом расстояния до этих звёздных систем.

Цефеиды образно называют маяками Вселенной. К настоящему времени в нашей Галактике известно свыше 800 цефеид.

Другой разновидностью пульсирующих переменных звёзд являются **звёзды типа RR Лиры**, имеющие более короткие периоды от 0,2 до 1,2 суток. Практически все звёзды этого типа — гиганты спектрального класса А. Они очень быстро меняют блеск. Амплитуда изменения блеска достигает 1-й звёздной величины. У этих звёзд, как и у цефеид, существует зависимость между периодом и светимостью (см. рис. 132).

3. новые звёзды. Звёзды, блеск которых внезапно увеличивается в тысячи и миллионы раз за несколько суток, после чего ослабевает до первоначального в течение года и более, называются **новыми звёздами**.

Термин «новая звезда» не подразумевает, что звезда родилась. Так называют звёзды, у которых блеск внезапно увеличился. Например, одна из новых звёзд, вспыхнувшая в июне 1918 г., увеличила свой блеск за четыре дня с 11-й до –0,5-й звёздной величины (т. е. в 40 тыс. раз), а затем приняла прежнее значение блеска за период чуть более 1,5 года.

Наблюдения показывают, что вспыхивающими новыми звёздами являются горячие белые карлики спектральных классов О — В, имеющие абсолютную звёздную величину порядка 4^m—5^m. Во время вспышки эти звёзды увеличивают свой блеск на 7^m—16^m звёздных величин (рис. 133). За время вспышки новая звезда излучает энергию около 10^{38} Дж (такая энергия излучается Солнцем примерно за 100 тыс. лет!).

Причиной взрыва новых звёзд является обмен вещества между компонентами тесных двойных пар, к которым принадлежат все достаточ-

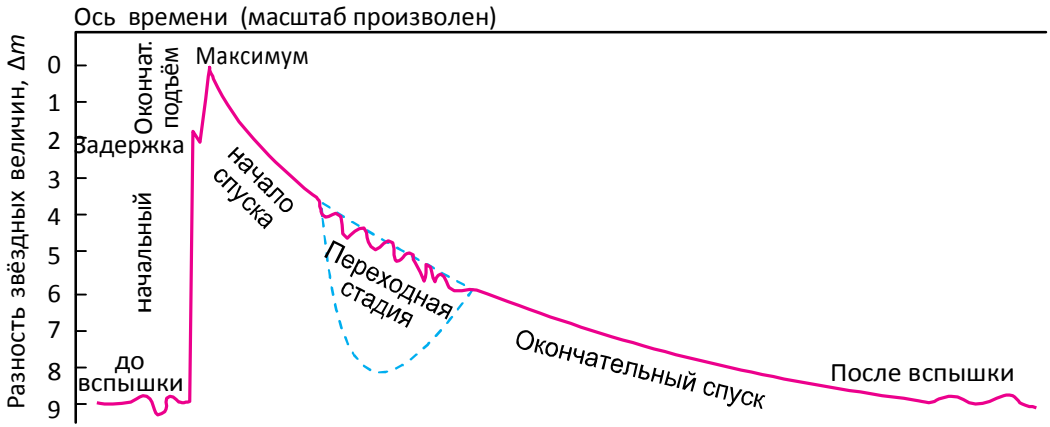


Рисунок 133 — График изменения блеска новой звезды

но детально исследованные бывшие новые звёзды. Многие новые звёзды вспыхивают неоднократно. Если вспышка повторяется, такую звезду называют повторной новой.

4. сверхновые звёзды. Сверхновые звёзды — одно из самых грандиозных и захватывающих космических явлений. Сверхновыми называются звёзды, вспыхивающие подобно новым и достигающие в максимуме абсолютной звёздной величины от -18^m до -19^m. Отдельные сверхновые в максимуме блеска превышают светимость Солнца в десятки миллиардов раз, достигая абсолютной звёздной величины $M = -20^m$—21^m.

В китайских летописях упоминается о внезапном появлении в 1054 г. в созвездии Тельца и наблюдавшейся китайскими и японскими астрономами «звезды-гостьи», которая казалась ярче Венеры и была видна даже днём. Спустя два месяца эта звезда начала угасать, а ещё через несколько месяцев совершенно исчезла из поля зрения. В наше время с помощью достаточно мощных телескопов в этом созвездии можно видеть туманность причудливой формы, напоминающую плывущего в воде краба. Туманность так и назвали — Крабовидная (рис. 134).

Рисунок 134 — Крабовидная туманность — остаток от взрыва сверхновой звезды

Рисунок 135 — Сверхновая SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке (указана стрелкой)

Наблюдения показали, что она расширяется. С учётом скорости расширения можно заключить, что Крабовидная туманность — это остаток взрыва сверхновой 1054 г.

В нашей Галактике за последнее тысячелетие зарегистрировано несколько случаев вспышек сверхновых звёзд. Наиболее яркая сверхновая звезда, наблюдавшаяся с помощью современной техники, появилась в 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом Облаке (рис. 135).

Звезда вспыхивает вследствие коллапса (схлопывания) своего массивного ядра. Происходит это следующим образом. На разных этапах жизни массивной звезды в её ядре протекают термоядерные реакции, при которых сначала водород превращается в гелий, затем гелий — в углерод и т. д. до образования ядер элементов группы железа (Fe, Ni, Co). Постепенно звезда всё больше и больше «расслаивается» (рис. 136).

Ядерные реакции с образованием ещё более тяжёлых химических элементов идут с поглощением энергии, поэтому звезда начинает охлаждаться и сжиматься. Внутренние слои словно обрушиваются к центру звезды, происходит термоядерный взрыв, возникает ударная волна, движущаяся обратно от центра. В итоге наружные слои звезды выбрасываются с огромной скоростью и наблюдается вспышка сверхновой.

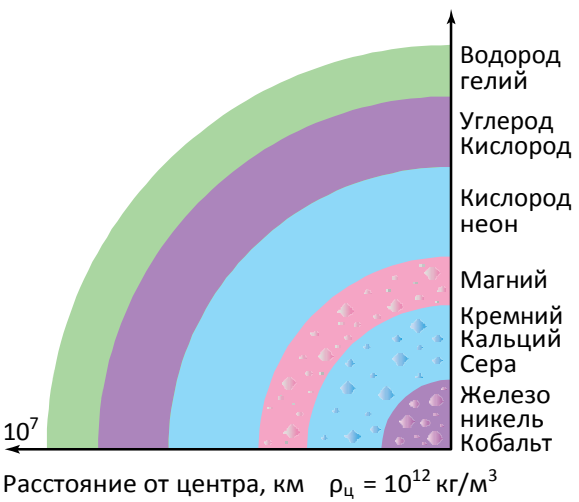


Рисунок 136 — Расслоение массивных звёзд

При взрыве освобождается энергия порядка 10^{46} Дж. Такую энергию наше Солнце способно излучить лишь за миллиарды лет. От огром-

ной звезды остаются только расширяющаяся с большой скоростью газовая оболочка и нейтронная звезда (или чёрная дыра).

Если звёздная масса невелика, то силы гравитации сравнительно слабы и сжатие звезды (гравитационный коллапс) прекращается. При очень высокой плотности вещества электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтральные частицы — нейтроны. Вскоре почти вся звезда будет состоять из одних нейтронов, тесно прижатых друг к другу и огромная звёздная масса будет сосредоточена в очень небольшом шаре размером порядка десяти километров (рис. 137). Плотность этого шара — **нейтронной звезды** — может составлять 10^{17}—10^{18} кг/м^3. Если такая звезда обладает мощным магнитным полем и находится в двойной системе, вещество соседки может захватываться и падать вдоль линий магнитного поля, создавая в районе магнитного полюса горячее пятно, излучающее в радиодиапазоне. В таком случае будет наблюдаться **пульсар** — быстро вращающаяся нейтронная звезда, испускающая радиоимпульсы с периодом от 0,0014 до 11,8 с.

Рисунок 137 — Относительные размеры белого карлика и нейтронной звезды

Если в недрах звезды отсутствуют силы, противодействующие её сжатию под действием сил гравитации, то звезда и дальше будет продолжать сжиматься. Плотность вещества будет продолжать увеличиваться. В результате массивная звезда на заключительном этапе своей эволюции превращается в неудержимо сжимающийся объект — **чёрную дыру** (рис. 138). Поле тяготения на границе чёрной дыры настолько велико, что сигналы от этого объекта не выходят наружу (отсюда происходит её название). Другими словами: гравитационное поле чёрной дыры настолько сильное, что даже свет не в состоянии его преодолеть.

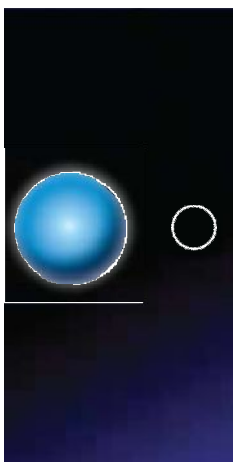


Рисунок 138 — Относительные размеры нейтронной звезды и чёрной дыры

Критический радиус, до которого должна сжаться звезда, чтобы превратиться в чёрную дыру,

называется **гравитационным радиусом** (r_g) или радиусом *Шварцшильда*. Для массивных звёзд r_g составляет несколько десятков километров и может быть рассчитан по формуле:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса звезды, c — скорость света.

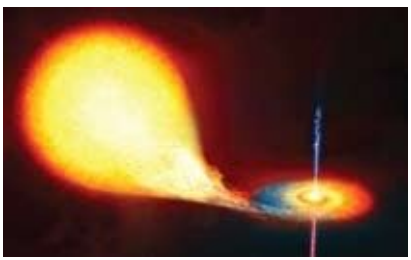


Рисунок 139 — Схема чёрной дыры в двойной системе

Теория относительности приводит к выводу, что вещество должно быть сжато в микроскопически малом объёме пространства в центре чёрной дыры. Это состояние называется **сингулярностью**. Границу чёрной дыры именуют **горизонтом событий**.

Так как чёрные дыры непосредственно наблюдать нельзя, поиски их сопряжены с большими трудностями. Чаще всего чёрную дыру удаётся обнаружить двумя способами. Во-первых, если дыра образовалась в двойной системе звёзд, то её положение можно определить по обращению второго компонента вокруг массивного «пустого места» (рис. 139). Во-вторых, при падении вещества на чёрную дыру должно возникать мощное рентгеновское излучение. Источники такого излучения (Лебедь X-1, Скорпион X-1 и др.) зарегистрированы «кандидатами» в чёрные дыры, которые также могут существовать и наблюдаться как постоянно взаимодействующие с веществом в ядрах галактик.

Главные выводы

1. Звёзды, которые изменяют свои физические характеристики в течение относительно короткого периода времени, называются нестационарными. Они бывают пульсирующими и эруптивными.

2. Физические переменные звёзды — это пульсирующие звёзды, которые меняют свою светимость за короткие промежутки времени в результате физических процессов, происходящих в самой звезде.

3. Эруптивные звёзды — физические переменные звёзды, проявляющие свою переменность в виде вспышек. К ним относятся новые и сверхновые звёзды.

4. Нейтронные звёзды образуются при взрывах сверхновых звёзд. Некоторые из них наблюдаются как пульсары, для которых характерно мощное узконаправленное пульсирующее радиоизлучение.

5. Чёрная дыра — область замкнутого пространства, созданная гравитационным полем массивного тела, которую не могут покинуть ни частицы, ни излучение.

6. В ходе эволюции звёзд (в результате термоядерных реакций и взрывов) происходит образование химических элементов.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются физические переменные звёзды от затменно-переменных звёзд?

2. Какова причина пульсаций цефеид?

3. В чём состоит отличие новой звезды от сверхновой?

4. Определите среднюю плотность цефеиды, если её период пульсаций составляет 1,0 сут.

5. Как образовалась Крабовидная туманность?

6. Каковы причины взрыва новых и сверхновых звёзд?

7. Объясните механизм радиоизлучения пульсара.

8. Какой объект называют чёрной дырой? Какими свойствами обладает чёрная дыра?

9. Определите радиус шварцшильда для Солнца.

раздел VIII

строение и эволюция вселенной

§ 27. наша Галактика

1. структура Галактики. На осеннем ночном небе в ясную безлунную ночь с запада на восток через зенит (широты Беларуси) тянется хорошо заметная светящаяся полоса — **Млечный Путь**. Древние греки Млечный Путь назвали **Галактикой** (греч. *gala* — молоко). Ещё Галилео Галилей в 1609 г. в телескоп обнаружил, что Млечный Путь состоит из множества слабых звёзд.

Млечный Путь проходит через оба полушария по большому кругу небесной сферы (рис. 140). Линия, идущая вдоль середины Млечного Пути, названа **галактическим экватором**, а образующая его плоскость — **галактической плоскостью**. Галактическая плоскость наклонена к плоскости небесного экватора под углом 63°.

Рисунок 140 — Млечный Путь

Итак, Галактика — это гравитационно-связанная система, состоящая из сотен миллиардов звёзд и межзвёздной среды, а Млечный Путь — её светящаяся проекция на небесную сферу.

Количественные подсчёты звёзд в разных направлениях от галактического экватора предпринял ещё У. Гершель в 70-х гг. XVIII в. Выборочные подсчёты показали, что

число звёзд резко убывает по обе стороны от галактической плоскости. Дальнейшими исследованиями было установлено, что все звёзды неба образуют единую звёздную систему. В Млечном Пути сосредоточено подавляющее число звёзд Галактики — огромной звёздной системы, имеющей форму плоского линзообразного диска (рис. 141) поперечником около 30 и толщиной около 4 кпк (или соответственно около 100 и 12 тыс. световых лет). Звёздный диск Галактики имеет структуру в виде спиральных ветвей (рукавов). Шарообразное утолщение в середине диска получило название **балдж** (англ. *bulge* — вздутие). Наиболее плотная и компактная центральная часть Галактики, расположенная в созвездии Стрельца, называется **ядром**.

Рисунок 141 — Строение нашей Галактики. Стрелка указывает положение Солнечной системы

Ядро Галактики скрыто от нас газопылевыми облаками и звёздами. Оно обладает очень высокой активностью и излучает в радио-, инфракрасном и рентгеновском диапазонах длин волн. Масса ядра оценивается в несколько десятков миллионов масс Солнца. Исследование процессов, происходящих в центральной области Галактики, позволяет предположить, что в ядре расположена сверхмассивная чёрная дыра. Часть звёзд нашей Галактики не входит в состав диска, а образует сферическую составляющую — **звёздное гало**, радиус которого не менее 20 кпк. Гало окружает очень разряженная и большая по размерам (50—60 кпк) внешняя часть Галактики — **корона**. Солнечная система в Галактике находится далеко от центра — на расстоянии около 8 кпк — и лежит почти в галактической плоскости.

2. Звёздные скопления. Структурными составляющими Галактики являются звёздные скопления. **Звёздные скопления** — это гравитационно-связанные группы звёзд, которые имеют общее происхождение. Звёздные скопления движутся в поле тяготения Галактики как единое целое.

По внешнему виду они подразделяются на рассеянные и шаровые.

Рисунок 142 — Рассеянное звёздное скопление Плеяды в созвездии Тельца

Рассеянное звёздное скопление — это не имеющая правильной формы сравнительно неплотная группа звёзд, содержащая от нескольких десятков до нескольких тысяч звёзд. Размеры таких скоплений — 6—14 пк. Ближайшие к нам рассеянные звёздные скопления — Плеяды и Гиады — находятся в созвездии Тельца. Невооружённым глазом можно различить в Плеядах 5—7 слабых звёздочек, располагающихся в виде маленького ковша (рис. 142). В настоящее время известно около 1200 рассеянных звёздных скоплений. Общее же их число в Галактике оценивается в 20 тыс. объектов. Все они концентрируются у галактической плоскости и состоят из молодых бело-голубых звёзд главной последовательности.

Шаровые звёздные скопления имеют сферическую или эллипсоидальную форму (рис. 143), они насчитывают от десятков тысяч до миллионов звёзд. Диаметры таких звёздных скоплений лежат в пределах от 20 до 100 пк. Пространственная концентрация звёзд резко возрастает к центру скопления, достигая десятков тысяч в кубическом парсеке (в окрестностях Солнца — 0,13 пк$^{-3}$). Шаровые скопления образуют протяжённое гало вокруг центра Галактики, сильно концентрируясь к нему. Всего в Галактике открыто около 150 шаровых скоплений, а их общее число примерно составляет около 500. Звёздное население шаровых скоплений состоит из давно проэволюционировавших звёзд — красных гигантов и сверхгигантов. Шаровые скопле-

Рисунок 143 — Шаровое звёздное скопление M5 (NGC 5904) в созвездии Змеи

ния нашей Галактики — одни из старейших. Их возраст составляет 10—15 млрд лет.

3. движение звёзд. В 1718 г. английский астроном Эдмунд Галлей сравнил наблюдавшиеся в его время положения звёзд с теми, которые были приведены в каталогах Гиппарха (II в. до н. э.). Учёный заметил смещение ярких звёзд Сириуса и Проциона на 0,7°, Арктура более чем на 1°. На основании этого факта был сделан вывод о пространственном движении звёзд относительно Солнца. Так впервые было обнаружено, что звёзды движутся. Скорость движения звезды в пространстве относительно Солнца называется **пространственной скоростью**. В общем случае пространственная скорость υ (рис. 144) направлена под некоторым углом к лучу зрения наблюдателя. Вектор пространственной скорости разложим на две составляющие: по направлению луча зрения (**лучевая скорость** υ_r) и перпендикулярную лучу зрения (тангенциальная скорость υ_t). Модули пространственной, тангенциальной и лучевой скоростей связаны друг с другом соотношением:

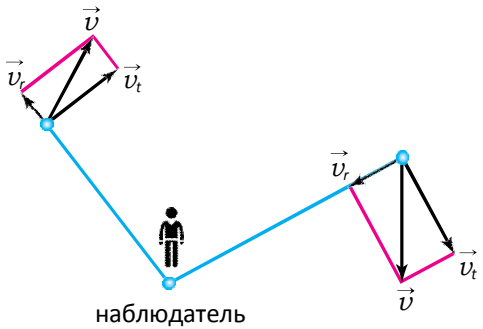


Рисунок 144 — Пространственная (υ), лучевая (υ_r) и тангенциальная (υ_t) скорости

$$\sqrt{\quad}^{2} \quad ^{2}$$

Лучевая скорость звезды определяется по доплеровскому смещению ($\Delta\lambda$) линий в её спектре:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Тангенциальную скорость определяют по смещению звезды на небесной сфере. Такое смещение у сравнительно близких (к наблюдателю) звёзд составляет несколько секунд за десятки лет:

$$4 \quad 4\frac{\mu}{}\text{км/с},$$

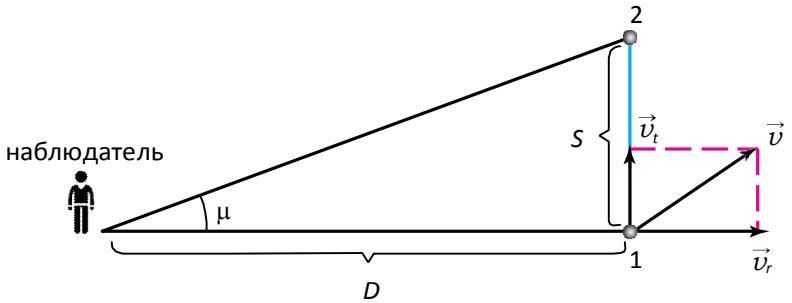


Рисунок 145 — Определение тангенциальной скорости звезды

где μ — **собственное движение** (видимое угловое смещение звезды на небесной сфере за один год). Оно выражается секундами дуги в год (рис. 145).

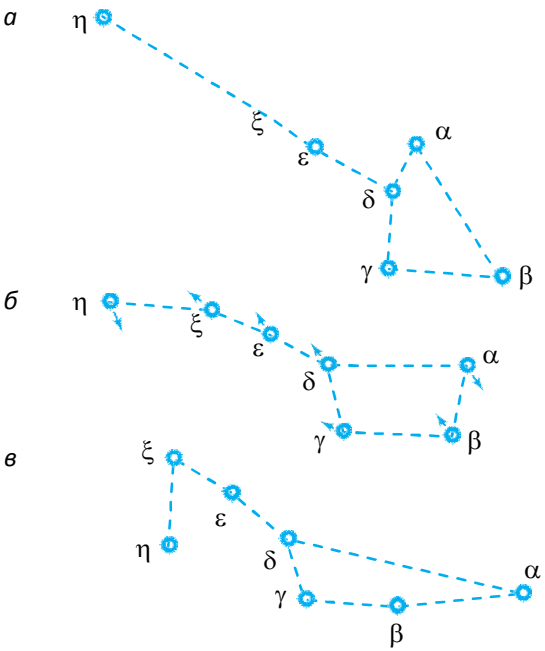


Рисунок 146 — Изменение относительного расположения звёзд в «ковше» Большой Медведицы за 100 тыс. лет: *а* — 50 тыс. лет назад; *б* — настоящее время (стрелками указаны направления тангенциальных скоростей звёзд); *в* — через 50 тыс. лет

Анализ собственных движений звёзд привёл также к обнаружению движения Солнца среди звёзд. Та точка небесной сферы (α = 270°, δ = +30°, созвездие Геркулеса), по направлению к которой движется Солнце (со скоростью 19,4 км/с по отношению к соседним звёздам), называется **апексом** Солнца (лат. *apex* — вершина), а диаметрально противоположная точка неба называется солнечным **антиапексом**. Вследствие собственных движений звёзд по истечении десятков тысяч лет вид созвездий меняется (рис. 146).

4. вращение Галактики. Способ для доказательства вращения Галактики былразработан в 1859 г. профессором Казанского университета М. А. Ковальским. Изучение лучевых

скоростей звёзд в различных направлениях от Солнца позволило сформулировать законы вращения Галактики.

1. *Все звёзды диска Галактики обращаются вокруг её ядра по орбитам, близким к круговым.* Это вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть на Галактику со стороны её северного полюса, находящегося в созвездии Волосы Вероники.

2. *Угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра.* Однако это убывание происходит несколько медленнее, чем требуют законы Кеплера.

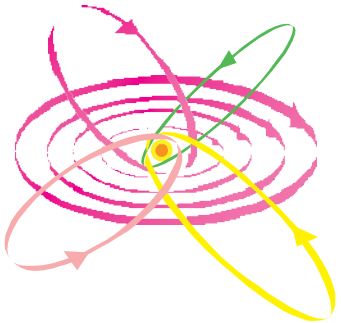


Рисунок 147 — Траектории звёзд в Галактике (диск Галактики — тонкие линии, сферическая составляющая — утолщённые линии)

3. Линейная скорость вращения сначала возрастает с удалением от центра Галактики, достигая максимума (около 220 км/с) на расстоянии Солнца, после чего очень медленно убывает.

4. Полный период обращения Солнца вокруг ядра Галактики составляет примерно 220 млн лет (галактический год).

5. *Звёзды и скопления звёзд сферической составляющей Галактики движутся по сильно вытянутым и наклонённым к плоскости диска под разными углами орбитам* (рис. 147). Такие звёзды имеют относительно Солнца очень большие скорости (до 200—300 км/с).

Как видим, движение звёзд в Галактике несколько напоминает движение тел Солнечной системы.

Зная скорость обращения и радиус круговой орбиты, можно вычислить массу внутренней части Галактики. Из формулы для круговой скорости (см. § 9) следует:

$$M = \frac{v^2 r}{G}$$

Подставляя значения $v = 2{,}2 \cdot 10^5$ м/с, $r = 2{,}5 \cdot 10^{20}$ м и $G = 6{,}7 \cdot 10^{-11}$ Н · м^2/кг^2, получим, что $M = 1{,}8 \cdot 10^{41}$ кг, или около 100 млрд масс Солнца. Масса Галактики в пределах объёма радиусом 15 кпк оценивается примерно в 200 млрд масс Солнца. С учётом остальной части Галактики её масса оценивается примерно в 10^{12} масс Солнца.

Главные выводы

1. Наша Галактика — гравитационно-связанная система, состоящая из сотен миллиардов звёзд и межзвёздной среды.

2. Млечный Путь — протянувшаяся через всё звёздное небо слабо светящаяся полоса, которая является проекцией огромного количества звёзд Галактики.

3. Структурными составляющими Галактики являются гравитационно-связанные группы звёзд (шаровые скопления, рассеянные скопления), имеющие общее происхождение и движущиеся в поле тяготения Галактики как единое целое.

4. Солнечная система относительно ближайших звёзд Галактики движется со скоростью около 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса.

5. Наша звёздная система обладает дифференциальным вращением, т. е. угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра.

Контрольные вопросы и задания

1. найдите на звёздной карте созвездия, через которые проходит Млечный Путь.

2. Почему наблюдателю, находящемуся на Земле, Млечный Путь представляется прерывистым и клочковатым?

3. Как устроена наша галактика?

4. Каково положение Солнечной системы в галактике?

5. Чем отличаются звёзды диска галактики от звёзд гало?

6. Как распределены шаровые скопления в галактике? Чем они отличаются от рассеянных скоплений?

7. Звезда 83 геркулеса находится от нас на расстоянии D = 100 пк, её собственное движение составляет $\mu = 0{,}12''$. Какова тангенциальная скорость этой звезды?

8. Каковы особенности вращения нашей галактики?

9. Сколько раз за время существования Солнце успело обернуться вокруг центра галактики?

§ 28. межзвёздная среда

1. межзвёздный газ. Звёздное небо содержит много туманных объектов. Они бывают светящиеся и тёмные, поглощающие свет.

Широкое применение фотографии в астрономии позволило тщательно исследовать, описать и составить каталоги тёмных туманностей.

На фоне светлых областей Млечного Пути отчётливо выделяются тёмные пятна неправильной формы и различных угловых размеров. Эти тёмные пятна и области доказывают существование вблизи галактической плоскости холодной разреженной материи.

Межзвёздная среда — это вещество и поля, заполняющие межзвёздное пространство внутри Галактики. Бо□льшая часть массы межзвёздно- го вещества приходится на разреженный газ и пыль. Вся межзвёздная среда пронизывается магнитными полями, космическими лучами, элек- тромагнитным излучением. Основной компонент межзвёздной среды — **межзвёздный газ**, который состоит из водорода (70 % массы) и гелия (28 %). Остальная часть массы межзвёздного вещества приходится на более тяжёлые химические элементы (O, C, N, Ne, S, Ar, Fe и др.).

Общая масса межзвёздного вещества нашей Галактики (не считая короны) оценивается в 2 % от общей массы всей Галактики. В зависимости от температурных условий и плотности межзвёздный газ может находиться в трёх различных состояниях: *ионизированном*, *атомарном* и *молекулярном*.

Основные данные о межзвёздном газе получены радиоастрономическими методами, после того как в 1951 г. было обнаружено радиоизлучение нейтрального атомарного водорода на волне 21 см. Оказалось, что атомарный водород, имеющий температуру 100 К, образует в диске Галактики тонкий слой толщиной 200—300 пк, увеличивающийся до нескольких килопарсек на расстоянии 15—20 кпк от её центра.

Основная часть межзвёздного газа сосредоточена в спиральных ветвях Галактики, где он распределён также неравномерно: собран в клочковатые образования размерами в десятки и сотни парсек со средней концентрацией частиц несколько атомов в 1 $см^3$. Около половины массы межзвёздного газа содержится в гигантских **молекулярных облаках** со средней массой 10^5 масс Солнца и диаметром около 40 пк. Из-за низкой температуры (около 10 К) и повышенной плотности (до 10^3 частиц в 1 $см^3$) водород и другие элементы в этих облаках

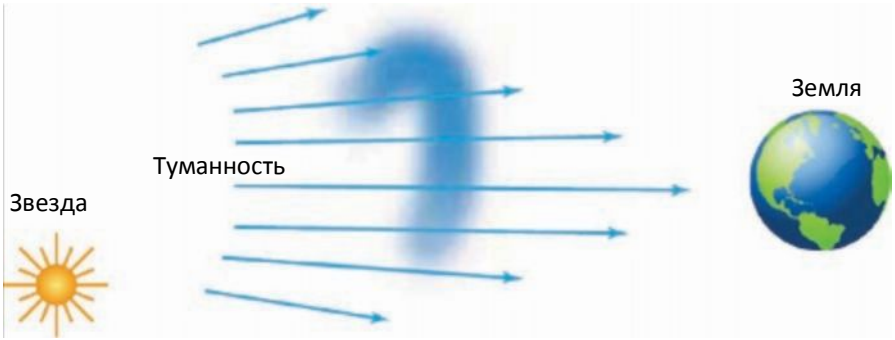


Рисунок 148 — Туманность излучает свет, если её освещает близлежащая звезда

объединены в молекулы. Таких молекулярных облаков в Галактике насчитывается около 4000.

Области ионизированного водорода с температурой 8000—10 000 К проявляют себя в оптическом диапазоне как **светлые диффузные туманности.** Их свечение возбуждается ультрафиолетовым излучением близкорасположенных горячих звёзд (спектральных классов B и O).

Светлая туманность излучает свет, если её освещает близлежащая звезда (рис. 148). Звёзды класса W, O, B способны вызвать ионизацию атомов водорода на расстоянии примерно 500 световых лет.

Светлые диффузные туманности, имеющие неправильную, клочковатую форму, достигают размеров до 10 пк, а их плотность колеблется от 10^{-17} до 10^{-20} кг/м^3. Распределяются области такого ионизированного водорода в плоской подсистеме Галактики, являясь также указателями мест протекающего в настоящее время звездообразования. Так, в Большой туманности Ориона (рис. 149) с помощью космического телескопа Хаббла обнаружены протозвёзды, окружённые протопланетными дисками.

Рисунок 149 — Большая туманность Ориона

Большая туманность Ориона — самая яркая газовая туманность на ночном небе. Расстояние до этой туманности около 1000 световых лет.

При наблюдении через фильтр можно увидеть, что некоторые из туманностей состоят из отдельных воло-

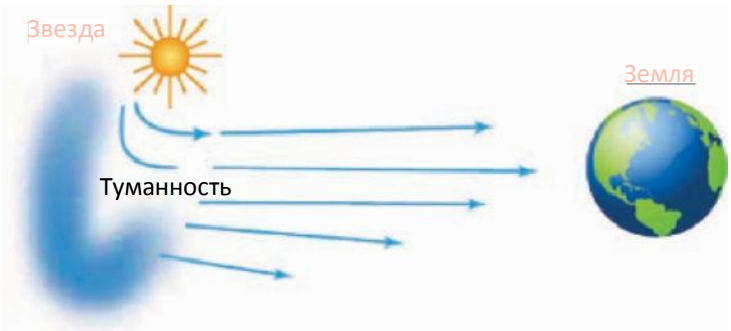


Рисунок 150 — Туманность светит отражённым светом близлежащей звезды

кон. Например, известная Крабовидная туманность в созвездии Тельца (см. рис. 134), являющаяся остатком взорвавшейся сверхновой звезды.

Если близлежащие звёзды не столь горячи и не могут ионизировать водород, то туманность светится за счёт отражения звёздного света (рис. 150). Данные туманности содержат много пыли. Примером такой светлой туманности является туманность в скоплении Плеяды в созвездии Тельца (см. рис. 142).

Особым типом туманностей являются **планетарные туманности**, которые выглядят как слабо светящиеся диски или кольца, напоминающие диски планет. Их насчитывается более 1200. Планетарные туманности представляют собой светящуюся расширяющуюся оболочку ионизированного газа, сброшенного красным гигантом на конечной стадии своей эволюции. В центре планетарной туманности находится остаток погибшего красного гиганта — горячий белый карлик или нейтронная звезда. Под действием внутреннего давления газа планетарная туманность расширяется примерно со скоростью 20—40 км/с, при этом плотность газа падает. Эти объекты обогащают межзвёздную среду веществом. Планетарная туманность Песочные Часы (рис. 151) показывает, какие

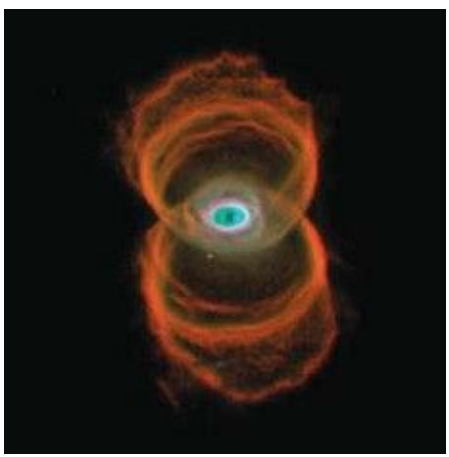


Рисунок 151 — Планетарная туманность Песочные Часы

сложные процессы могут происходить на последней стадии эволюции звезды.

2. межзвёздная пыль. В межзвёздном пространстве рассеяны мелкие твёрдые частицы (металлические, силикатные или графитовые) размерами от 0,01 до 1 мкм. Тугоплавкие частички образуются и поставляются в межзвёздную среду за счёт расширения оболочек новых и сверхновых звёзд, планетарных туманностей, холодных красных гигантов и сверхгигантов. В межзвёздном пространстве пыль везде сопутствует газу. На её долю приходится около 1 % от массы газа.

Межзвёздная пыль, как и межзвёздный газ, концентрируется в галактической плоскости, образуя газопылевые облака клочковатой структуры. В межзвёздных облаках мелкие пылинки быстро обрастают оболочками из наиболее распространённых элементов (H, C, N, O). За миллионы лет даже при низкой температуре в оболочках происходят сложные химические процессы с образованием молекул воды, этилена, синильной кислоты, этилового спирта и др. Зарегистрировано около 90 типов молекул, некоторые из них содержат до 13 атомов.

Из-за пыли самые плотные газовые образования — молекулярные облака — практически непрозрачны и выглядят на небе как тёмные области, почти лишённые звёзд (рис. 152). Такие газопылевые образования называются **тёмными диффузными туманностями** (рис. 153).

Благодаря развитию внеатмосферной астрономии появилась возможность наблюдать межзвёздную пыль в инфракрасном диапазоне, что позволяет рассмотреть новые детали (рис. 154).

Рисунок 152 — Облака межзвёздной пыли в направлении на центр Галактики

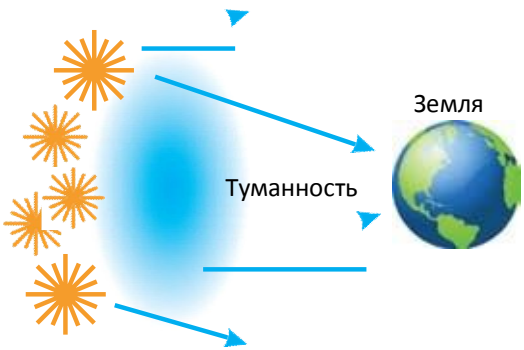


Рисунок 153 — Тёмная туманность заслоняет свет звёзд, находящихся на большом расстоянии от Земли

Рисунок 154 — Туманность Конская Голова в созвездии Ориона. Справа — изображение в оптических лучах, слева — в инфракрасных. Фотографии космического телескопа Хаббла

3. Космические лучи и межзвёздное магнитное поле. Кроме разреженного газа и пыли, в межзвёздном пространстве с огромными скоростями, близкими к световой, движется большое количество элементарных частиц и ядер различных атомов. Потоки этих частиц называют **космическими лучами**. Они пронизывают всё межпланетное и межзвёздное пространство. На площадку в 1 м^2 ежесекундно попадает в среднем около 10 тыс. различных частиц. В составе космических лучей присутствуют электроны, ядра гелия и более тяжёлых элементов, но в основном преобладают протоны (более 90 %), которые имеют среднюю энергию $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ Дж.

Основными источниками космических лучей в Галактике служат остатки сверхновых звёзд и пульсары (см. § 26).

Первое свидетельство существования **межзвёздного магнитного поля** было получено итальянским физиком Энрико Ферми и американским учёным Эдвардом Теллером при изучении космических лучей.

Электроны, входящие в состав космических лучей, постепенно тормозятся в магнитном поле, теряя энергию на излучение радиоволн. Такое излучение называется **синхротронным**. Оно регистрируется радиотелескопами. Мощными источниками синхротронного излучения являются остатки сверхновых звёзд.

Главные выводы

1. Межзвёздная среда — это вещество и поля, заполняющие межзвёздное пространство внутри Галактики.

2. Большая часть массы межзвёздной среды приходится на разреженный газ и пыль, общая масса которых оценивается в 2 % от общей массы Галактики.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под межзвёздной средой? Чем она заполнена?
2. Какова масса межзвёздного вещества нашей галактики?
3. Что понимают под туманностями? назовите основные виды туманностей. Почему одни туманности светлые, а другие — тёмные?
4. Что собой представляет межзвёздная пыль?
5. Из каких наблюдений можно сделать вывод о существовании межзвёздной пыли?
6. Каково происхождение газопылевых туманностей и молекулярных облаков?
7. Что представляют собой космические лучи? Какими свойствами они обладают?

§ 29. Звёздные системы — галактики

1. типы галактик. В 1924 г. с помощью крупнейшего в то время телескопа (обсерватория Маунт-Вилсон, США) Эдвин Хаббл установил, что туманность Андромеды образована огромным числом звёзд, сливающихся в сплошное туманное пятно при наблюдении в менее мощный телескоп. Большинство других известных туманностей оказались такими же удалёнными гигантскими системами, состоящими из миллионов и миллиардов звёзд. Гигантские гравитационно-связанные системы звёзд и межзвёздного вещества, расположенные вне нашей Галактики, стали называть **галактиками**. Современные мощные телескопы сделали доступной регистрацию сотен миллиардов галактик.

Фотоснимки показали, что галактики различаются по внешнему виду и структуре. Хаббл предложил классифицировать галактики по их форме. Согласно современной классификации различают галактики следующих основных типов: эллиптические (E), спиральные (S), неправильные (Ir) и линзовидные (S0) — рисунок 155.

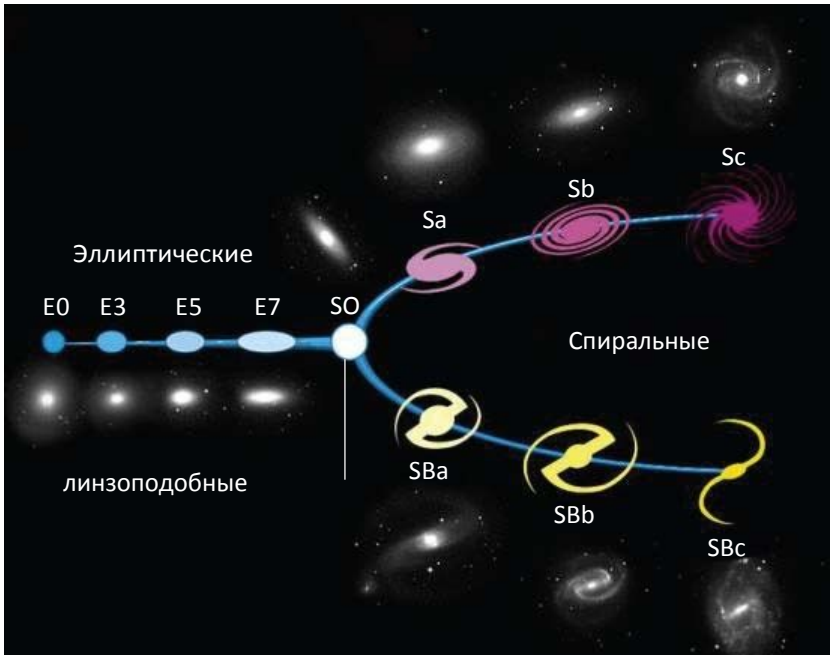


Рисунок 155 — Классификация галактик Э. Хаббла

Эллиптические галактики в проекции на небесную сферу выглядят как круги или эллипсы (рис. 156). Число звёзд в них плавно убывает от центра к краю. Звёзды вращаются в такой системе в разных плоскостях. Сами эллиптические галактики вращаются очень медленно. Они содержат только жёлтые и красные звёзды, практически не имеют газа, пыли и молодых звёзд высокой светимости. Физическим характеристикам этих галактик свойствен довольно широкий диапазон: диаметры — от 5 до 50 кпк, массы — от 10^6 до 10^{13} масс Солнца, светимости — от 10^6 до 10^{12} светимостей Солнца. Около 25 % изученных галактик принадлежит к галактикам эллиптического типа.

Рисунок 156 — Эллиптическая галактика M 87 в созвездии Девы

Около половины изученных галактик относится к спиральному типу.

а *б* *в*

Рисунок 157 — Спиральные галактики: *а* — М 81; *б* — М 51; *в* — М 101

Спиральные галактики — это сильно сплюснутые системы с центральным уплотнением (в котором находится ядро галактики) и заметной спиральной структурой. Размеры этих галактик достигают 40 кпк, а светимости — 10^{11} светимостей Солнца. В окружающем уплотнение диске имеются две или более клочковатые спиральные ветви (рис. 157). Так, к хаббловским типам спиральных галактик относится галактика М 81, тип Sa, система с туго закрученными спиральными ветвями, шарообразная часть яркая и протяжённая (рис. 157, *а*). Галактика М 51 относится к типу Sb, имеет более мощные и чёткие спирали, центральная часть менее выделяется (рис. 157, *б*). Галактика М101 принадлежит к типу Sc, система с развитой клочковатой спиральной структурой, шарообразная часть которой слабо просматривается на общем фоне (рис. 157, *в*). Примерно у половины спиральных галактик в центральной части имеется почти прямая звёздная перемычка — **бар**, от которой начинают закручиваться спиральные рукава (рис. 158). Такие галактики называются **спиральными с перемычкой**.

Рисунок 158 — Спиральная галактика с перемычкой (баром) NGC 1365

В спиральных ветвях галактик сосредоточены самые яркие и молодые звёзды, яркие газопылевые туманности, молодые звёздные скопления и звёздные комплексы. Поэтому спиральный узор отчётливо виден даже у далёких галактик, хотя на долю спиральных рукавов приходится всего несколько процентов массы

всей галактики. Наша Галактика является спиральной. Ближайшая звёздная система, похожая по структуре и типу на нашу Галактику, — это туманность Андромеды (рис. 159). Свет от этой галактики доходит до нас примерно за 2 млн лет.

Рисунок 159 — Туманность Андромеды

К **неправильным галактикам** относят маломассивные галактики неправильной структуры. У них не наблюдается чётко выраженного ядра и вращательной симметрии. Видимая яркость таких галактик создаётся молодыми звёздами высокой светимости и областями ионизированного водорода. Массы неправильных галактик составляют от 10^8 до 10^{10} масс Солнца, размеры этих галактик достигают 10 кпк, а светимости их не превышают 10^{10} светимостей Солнца. В таких галактиках содержится много газа — до 50 % их общей массы. Ближайшими к нам яркими неправильными галактиками являются Магеллановы Облака (Большое и Малое). Они выглядят как два туманных облачка, серебристо светящихся в хорошую погоду на ночном небе. Они расположены в Южном полушарии и поэтому невидимы с территории Беларуси. Большое Магелланово Облако (рис. 160), имеющее в диаметре 7 кпк, расположено от нас на расстоянии 52 кпк. По мнению некоторых астрономов, в Магеллановых Облаках можно различить зачатки спиральной структуры.

Рисунок 160 — Большое Магелланово Облако — одна из близких к нам галактик

Линзовидные галактики внешне (если видны плашмя) очень похожи на эллиптические, но имеют сплюснутый звёздный диск. По структуре подобны спиральным галактикам, однако не имеют плоской составляющей и спиральных ветвей. От спиральных галактик, наблюдаемых с ребра, линзовидные галактики отличаются отсутствием полосы тёмной материи. Немецкий

астроном Карл Шварцшильд выдвинул теорию, согласно которой линзовидные галактики могут образовываться из спиральных в процессе «выметания» газопылевой материи.

2. расстояния до галактик. Закон хаббла. Расстояния до ближайших галактик определяются по оценкам видимых звёздных величин цефеид (см. § 26). Для долгопериодических цефеид установлена зависимость «период колебаний — светимость». С помощью этой зависимости определяют абсолютную звёздную величину по длительности колебаний блеска: чем короче период колебаний блеска, тем цефеида слабее по абсолютной звёздной величине. Расстояние r вычисляется по формуле:

$$\lg r = 0{,}2(m - M) + 1, \qquad (1)$$

где m и M — видимая и абсолютная звёздные величины.

Для галактик, где не обнаружены цефеиды или их невозможно увидеть, в качестве индикаторов расстояний используют ярчайшие звёзды-сверхгиганты, новые и сверхновые звёзды, шаровые звёздные скопления.

Расстояния определяют также по формуле (1). Видимую звёздную величину оценивают из наблюдений, а абсолютную — считают известной (средней) для данного класса объектов. Например, шаровые скопления, как это следует из наблюдений, имеют примерно одинаковую абсолютную величину.

Расстояния до далёких галактик определяют также по их угловым размерам или по видимой звёздной величине, а до очень далёких галактик — исключительно по величине красного смещения в их спектре. **Красное смещение** (z) обычно измеряется относительным изменением длины волны спектральных линий:

$$\frac{\lambda \quad \lambda_0}{\lambda_0}$$

Ещё в 1912—1914 гг. американский астроном Весто Слайфер обнаружил, что линии в спектрах далёких галактик смещены относительно их нормального положения в сторону красного конца спектра. Это означало, что галактики удаляются от нас со скоростями в сотни километров в секунду. Позже Э. Хаббл определил расстояния до некоторых галактик и их скорости. Из наблюдений следовало, что чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется (графически

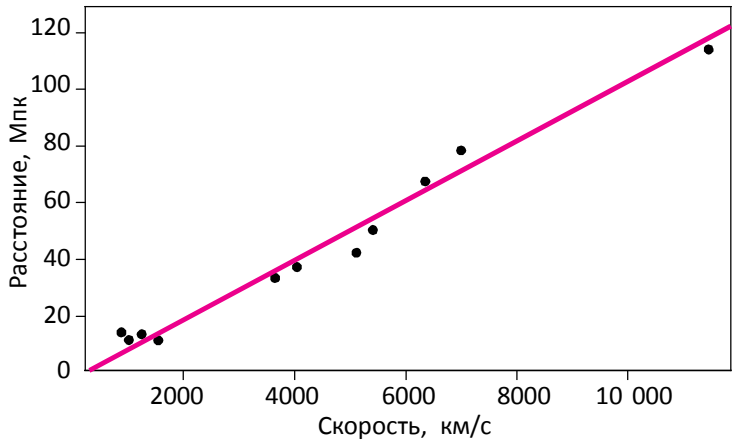


Рисунок 161 — Зависимость скорости удаления галактик от расстояний до них

данная зависимость представлена на рис. 161). Закон, по которому скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до неё, получил название закона Хаббла. Закон Хаббла можно сформулировать таким образом: *относительное увеличение длин волн линий в спектрах галактик пропорционально расстоянию r до них, т. е.*

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Предполагая, что явление красного смещения обусловлено движением галактик со скоростью υ_r по лучу зрения в направлении от наблюдателя, можем найти лучевую скорость галактики по измеренному относительному смещению длины волны спектральных линий:

$$\frac{(\lambda\ \lambda_0)}{\lambda_0} \qquad (2)$$

С учётом закона Хаббла зависимость (2) можно записать в виде:

$$\upsilon_r = Hr, \qquad (3)$$

где H — коэффициент пропорциональности, называемый **постоянной Хаббла**. Коэффициент Хаббла показывает, на сколько километров в секунду возрастает скорость галактик с увеличением расстояния до них на 1 Мпк. Значение H постоянно уточняется, по различным оценкам оно

заключено в пределах от 50 до 80 км/(с · Мпк). При расчётах чаще всего принимают H = 75 км/(с · Мпк).

Необходимо отметить, что закон Хаббла выполняется только для далёких галактик, расстояние до которых превышает 5—10 Мпк.

3. массы галактик. Массы галактик можно оценить на основании линейных скоростей вращения их внешних частей. Скорости вращения v устанавливают путём сравнения смещений спектральных линий в различных частях галактики.

Предположим, что вся масса M галактики сконцентрирована в её центре и вращение происходит по законам Кеплера. Тогда из второго закона Ньютона $F = ma$ ($a = \frac{v^2}{R}$ — центростремительное ускорение) с учётом движения тел в поле сил тяготения $F = G\frac{mM}{R^2}$ получим:

$$\frac{GM}{R^2} \quad \frac{^2}{R}$$

где R — радиус галактики. После преобразований выражение для нахождения массы галактики будет иметь следующий вид:

$$M \quad \frac{Rv^2}{G} \qquad (4)$$

Для галактик, как и для звёзд, имеется определённая зависимость между массой и светимостью, которая используется для вычисления масс галактик. Однако оценки масс галактик по их светимостям получались значительно меньше, чем по вращению галактик. Это явление было названо «парадоксом скрытой массы». Чтобы объяснить его, нужно предположить, что где-то в галактике расположена несветящаяся, тёмная материя.

В 70-х гг. XX в. с помощью методов рентгеновской астрономии был открыт горячий межгалактический газ. По температуре газа можно оценить массу его скоплений. Первые результаты рентгеновских наблюдений горячего газа в группах галактик подтвердили присутствие в них скрытой массы, не входящей в состав отдельных галактик. Сегодня астрономы достаточно уверенно заключают: Вселенная в основном

заполнена невидимым веществом. Оно образует протяжённые гало галактик и заполняет межгалактическое пространство, концентрируясь в скоплениях галактик.

Спектральные наблюдения, проделанные с использованием космического телескопа Хаббла и крупных современных наземных телескопов, подтвердили наличие больших масс (около 50 млн масс Солнца) несветящегося вещества в ядрах ряда галактик.

4. Галактики с активными ядрами. У большинства галактик можно выделить яркую центральную часть — ядро (рис. 162). Эта область отличается большой звёздной плотностью, достигающей 10^6—10^8 пк$^{-3}$. Но, несмотря на это, столкновений ядер и звёзд в этой области не происходит.

Исследования последних лет показали, что ядро — не просто более плотное место галактики: в самом центре его можно обнаружить ещё одно уплотнение — ядрышко. Так, при наблюдении ядра туманности Андромеды (его размеры около 100 пк) удалось выделить яркое ядрышко поперечником 1—14 пк. Оно вращается как твёрдое тело (с периодом обращения 500 тыс. лет). Масса ядрышка составляет примерно 13 млн солнечных масс. Плотность — около 1500 солнечных масс на 1 пк^3,

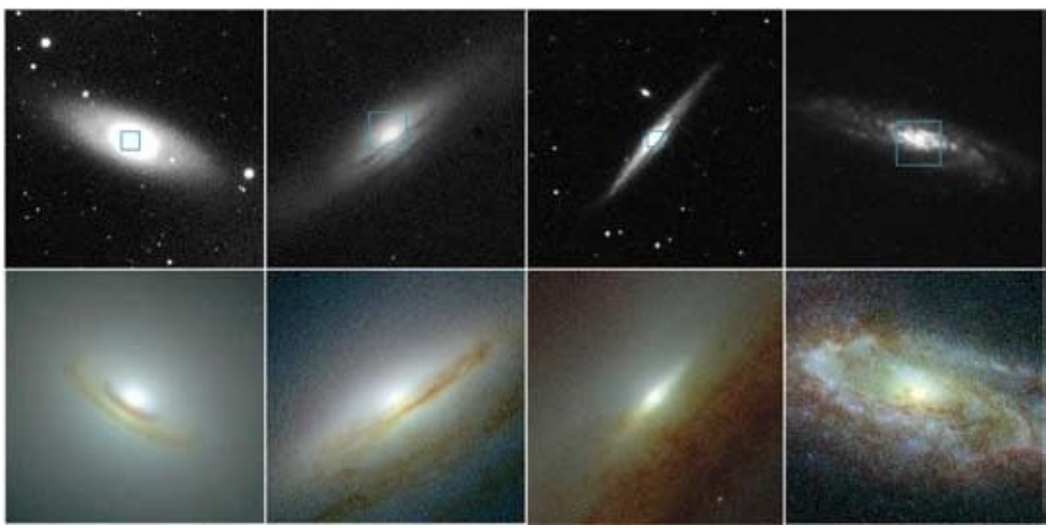


Рисунок 162 — Ядра галактик содержат массивные чёрные дыры. Нижний ряд фотографий получен с помощью космического телескопа Хаббла

Рисунок 163 — Ядро галактики выбрасывает газовые струи — джеты

т. е. в 20 тыс. раз больше, чем около Солнца. Ядрышко ведёт себя таким образом, как будто это самостоятельное образование, «вложенное» в галактику.

Радиоисследования нашей Галактики показали, что в её центре также имеется ядрышко размером примерно в 6 пк.

В ядрах некоторых галактик происходит колоссальное выделение энергии, которое нельзя объяснить излучением или взрывами обычных звёзд. Такие галактики получили название галактик с **активными ядрами**.

Формы проявления активности ядер галактик различны. Это может быть большая мощность излучения в инфракрасной, оптической или рентгеновской области спектра, причём меняющаяся за сравнительно небольшое время (за несколько лет, месяцев или даже дней). В некоторых случаях наблюдается быстрое движение газа в ядре (со скоростями ≈ 1000 км/с). Иногда газ образует длинные прямолинейные газовые струи — **джеты** (рис. 163).

Наиболее вероятная гипотеза, объясняющая активность ядер, предполагает наличие массивной чёрной дыры в центре галактики.

5. взаимодействующие галактики. Близко расположенные галактики иногда бывают связаны между собой полосой светящейся материи. Часто эти голубоватые полосы являются продолжением спиральных ветвей. Полосы состоят из газа и горячих молодых звёзд. Нередко галактики погружены в общий «звёздный туман», тогда их называют **взаимодействующими**.

В большинстве случаев особенности форм взаимодействующих галактик объясняются возмущающими приливными силами, действующими на звёзды одной галактики со стороны другой. Многие исследователи считают, что взаимодействующие галактики сближаются, а наблюдения в современные крупные телескопы показывают, что среди таких галактик очень много сталкивающихся. Даже наша Галактика является взаимодействующей. В настоящий момент она поглощает одну карликовую галактику, находящуюся на противоположной от нас стороне галакти-

ческого диска. Через несколько миллиардов лет наша Галактика «проглотит» Магеллановы Облака, а через 5 млрд лет столкнётся с туманностью Андромеды (M 31) — рисунок 164. Но при этом очень мала вероятность того, что будут сталкиваться отдельные звёзды, так как они удалены одна от другой на расстояния, в сотни миллионов раз превышающие их диаметр.

Рисунок 164 — Так, возможно, будет выглядеть на небе туманность Андромеды через несколько миллиардов лет

Ближе всего к нам находится пара сталкивающихся крупных галактик NGC 4038 и NGC 4039 в созвездии Ворона (рис. 165). Эта взаимодействующая система удалена на 63 млн световых лет. Под влиянием сил тяготения у галактик появились длинные «антенны», состоящие из газа и звёзд, поэтому их часто называют «антенными» галактиками. Эти образования возникли в результате соударения звёздных систем. Астрономы открыли в «антенных» галактиках более тысячи недавно образовавшихся звёздных скоплений. В каждом из них содержится до миллиона звёзд. Возраст скоплений не превышает 100 млн лет. Они образовались под действием приливных сил, возбуждённых сближением двух систем.

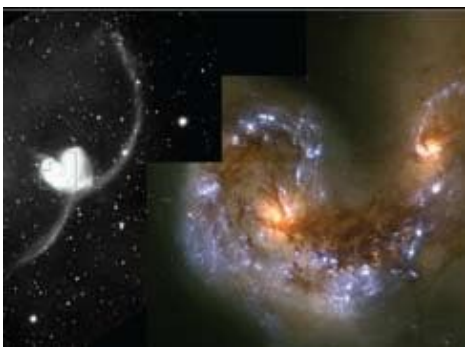


Рисунок 165 — Сталкивающиеся галактики NGC 4038 и NGC 4039. Красным цветом светятся газопылевые облака, падающие на чёрные дыры в ядрах галактик, голубым — молодые горячие звёзды, рождающиеся благодаря возмущениям газопылевых масс

6. Квазары. В начале 60-х гг. XX в. по радиоизлучениям были обнаружены объекты, подобные активным ядрам галактик, — **квазары**. Слово «квазар» образовано от словосочетания «квазизвёздные радиоисточники», т. е. подобные на радиоизлучающие звёзды. Спектры квазаров содержат яркие эмиссионные линии, сильно смещённые в красную сторону, как у далёких галактик. Расстояния, определённые по красному смещению,

оказались более 5 млрд световых лет. На фотографиях квазары выглядят очень яркими по сравнению с удалёнными галактиками и в радиодиапазоне излучают так же сильно, как близкие радиоисточники.

Природа активности радиоизлучения квазаров точно пока не установлена, однако с определённой уверенностью можно сказать следующее:

1) квазары — самые далёкие объекты, наблюдаемые во Вселенной;

2) значительная часть квазаров — это ядра далёких галактик, которые находятся в состоянии очень высокой активности;

3) квазары — самые мощные из известных в природе источников видимого и инфракрасного излучений, т. е. это космические объекты с колоссальной поверхностной яркостью излучения.

Изучение большого количества квазаров с помощью космического телескопа Хаббла в 1995 г. привело учёных к выводу, что недалёкие квазары (с красным смещением $z = 0{,}5$) связаны с взаимодействующими эллиптическими галактиками. Многие квазары располагаются в центрах подобных звёздных систем. Это подтверждает предположение, что квазары являются массивными чёрными дырами в центрах галактик, на которые происходит падение вещества.

Главные выводы

1. Галактики — гигантские гравитационно-связанные системы звёзд и межзвёздного вещества, расположенные вне нашей Галактики.

2. Мир галактик чрезвычайно разнообразен. По внешнему виду и структуре галактики классифицируются на основные типы: эллиптические, спиральные, неправильные и линзовидные.

3. Спектральные линии в спектрах далёких галактик заметно смещены в сторону красного конца спектра.

4. Относительное увеличение длин волн линий в спектрах галактик пропорционально расстоянию до них (закон Хаббла).

5. Постоянная Хаббла — коэффициент пропорциональности между скоростью удаления внегалактических объектов и расстоянием до них, принимаемый в расчётах 75 км/ (с · Мпк).

6. Квазары — квазизвёздные объекты — самые мощные по электромагнитному излучению объекты во Вселенной, считающиеся активными ядрами далёких галактик.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте типы галактик по классификации Э. Хаббла. Чем эллиптические и неправильные галактики отличаются от спиральных? К какому типу относится наша галактика?

2. на каком расстоянии находится галактика, если скорость её удаления равна 20 тыс. км/с?

3. Сформулируйте и объясните закон Хаббла.

4. Как оценивают массы галактик?

5. Сколько времени придётся ждать ответа на радиотелеграмму, отправленную к галактике андромеды, расстояние до которой 0,69 Мпк?

6. Каково расстояние до галактики, если в ней обнаружена новая звезда, видимая звёздная величина которой 18^m, а абсолютная звёздная величина -7^m?

§ 30. расширяющаяся вселенная

1. Пространственное распределение галактик. Галактики, как и звёзды, образуют группы и скопления. Известно около 7000 скоплений галактик. Около 40 ближайших галактик, из которых наиболее массивные — наша Галактика и туманность Андромеды, — образуют систему галактик размерами в несколько сотен килопарсек, которая получила название **Местной группы галактик**.

Более крупные объединения галактик группируются в **системы галактик**. Они содержат до тысячи галактик, и их размер составляет несколько мегапарсек. Ближайшее крупное объединение галактик размером примерно 5 Мпк находится в направлении созвездия Девы на расстоянии около 20 Мпк (рис. 166). В его состав входят гигантские эллиптические и спиральные галактики, например радиогалактика Дева А, спиральная галактика «Сомбреро» (рис. 167) и др.

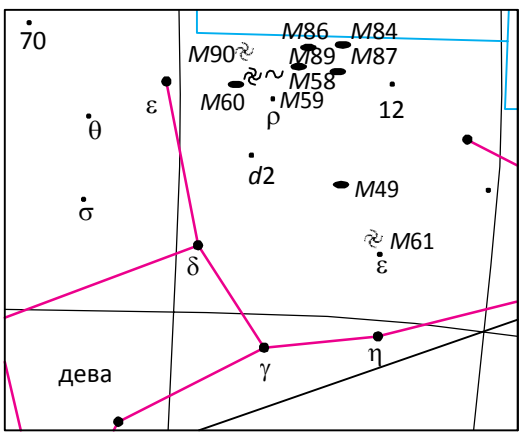


Рисунок 166 — Скопление галактик в созвездии Девы

Рисунок 167 — Галактика «Сомбреро»

Самое удалённое скопление галактик, до которого определено расстояние (5200 Мпк), располагается в созвездии Волосы Вероники. Только с помощью самых крупных телескопов можно различить его ярчайшие галактики. Комплексы скоплений галактик размерами 30—60 Мпк, содержащих десятки скоплений, называются **сверхскоплениями галактик**. Скопление галактик в созвездии Девы является центральным сгущением в сверхскоплении галактик, в которое входит и наша Местная группа галактик. Общее число галактик нашего сверхскопления, исключая карликовые, — около 2000, а размер — около 60 Мпк. Пока выявлено около 50 сверхскоплений. Скоплений более высокого ранга не обнаружено.

Сверхскопления и скопления галактик образуют в пространстве волокноподобные структуры, напоминающие собой ячейки или пчелиные соты (рис. 168). В «волокнах» собраны скопления галактик, на пересечении «сот» — сверхскопления галактик. Размеры пустот «ячеек» составляют около 100—150 Мпк, толщина «волокон» — около 10 Мпк. Средняя плотность вещества в «волокнах» — порядка 10^{-24} кг/м^3. Крупномасштабная структура Вселенной имеет ячеисто-сотовый вид. Средняя плотность светящегося вещества в масштабах больше 300 Мпк равна $3 \cdot 10^{-28}$ кг/м^3. Это и есть среднее значение плотности светящегося вещества в наблюдаемой части Вселенной, т. е. в больших масштабах Вселенная в среднем однородна.

2. расширение вселенной. Совокупность наблюдаемых галактик всех типов и их скоплений, межгалактической среды образует Вселенную.

Одно из важнейших свойств Вселенной — её постоянное расширение, «разлёт» скоплений галактик, о чём свидетельствует красное смещение в спектрах галактик. Вселенная находится в состоянии приблизительно однородного и изотропного расширения. Однородность означает одинаковость всех свойств материи всюду в пространстве, а изотропия — одинаковость этих свойств в любом направлении. Однородность свидетель-

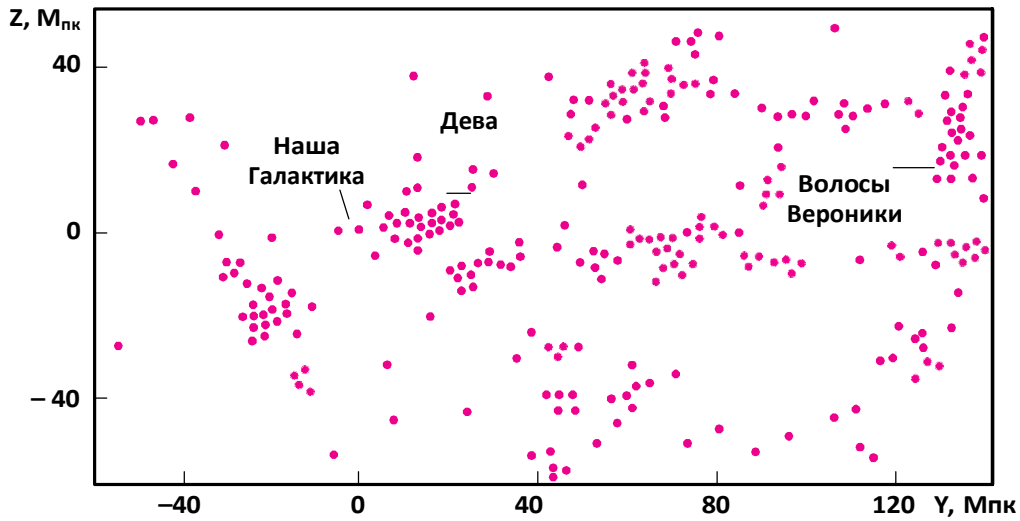


Рисунок 168 — Ячеистое распределение галактик в пространстве (в разрезе, проходящем через скопление в созвездии Волосы Вероники)

ствует об отсутствии выделенных областей пространства, а изотропия — об отсутствии выделенного направления. Предположение об однородности и изотропии Вселенной называют **космологическим принципом**.

Гипотезу о расширении Вселенной на основе общей теории тяготения А. Эйнштейна и строгих расчётов выдвинул в 1922 г. русский учёный А. А. Фридман. Расчёты показали, что Вселенная не может быть стационарной; в зависимости от средней плотности вещества во Вселенной она должна либо расширяться, либо сжиматься. Нестационарная модель Вселенной утвердилась в науке лишь после того, как Э. Хаббл обнаружил разбегание галактик (см. закон Хаббла в § 29).

Из расчётов Фридмана вытекали три возможных следствия: Вселенная и её пространство расширяются с течением времени; Вселенная через определённое время начнёт сжиматься; во Вселенной чередуются через большие промежутки времени циклы сжатия и расширения. Возникает вопрос: какой из трёх вариантов реализуется в нашей Вселенной? Ответить на него предстоит наблюдательной астрономии, которая должна оценить современную среднюю плотность вещества во Вселенной и уточнить значение постоянной Хаббла. Почему важно уточнение этих двух постоянных величин?

При создании модели расширяющейся Вселенной было показано, что существует некоторое значение критической плотности $\rho_{кр}$ Вселенной, определяемое по формуле:

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

где G — гравитационная постоянная, H — постоянная Хаббла. Расчёты по данной формуле дают, что $\rho_{кр} = 10^{-26}$ кг/м^3. По современным оценкам, плотность вещества Вселенной близка к критическому значению: она либо немного больше, либо немного меньше (не решён окончательно вопрос об учёте межгалактического газа и «скрытой массы»). Если фактическая средняя плотность вещества во Вселенной больше критической, то в будущем расширение Вселенной должно смениться её сжатием. Если средняя плотность вещества во Вселенной меньше критической, то расширение продолжится.

Постоянная Хаббла позволяет оценить время, в течение которого продолжается процесс расширения Вселенной. Определено, что оно не меньше 10 млрд и не более 19 млрд лет. Наиболее вероятное значение среднего возраста Вселенной — около 15 млрд лет. Эта величина не противоречит оценкам возраста наиболее старых звёзд.

3. модель горячей вселенной. В основе современной астрономической картины мира об эволюции Вселенной лежит **модель горячей Вселенной**. В соответствии с ней на ранних стадиях расширения Вселенная характеризовалась не только высокой плотностью вещества, но и его высокой температурой. Гипотезу «горячей Вселенной» выдвинули Ж. Леметр и Г. А. Гамов. Она получила название Большого взрыва.

Согласно этой теории, предполагается, что Вселенная возникла в результате взрыва из состояния с очень высокой плотностью материи, обладающей огромной энергией. Это начальное состояние материи называется **сингулярностью** — точечный объём с бесконечной плотностью. Расширение Вселенной нельзя рассматривать как расширение сверхплотной вначале материи в окружающую пустоту, ибо окружающей пустоты не было. Вселенная — это всё существующее. Вещество Вселенной с самого начала однородно заполняло всё безграничное пространство. И хотя давление было огромным, оно не создавало расширяющей силы, так как везде было одинаковым. Причины начала расширения Вселенной

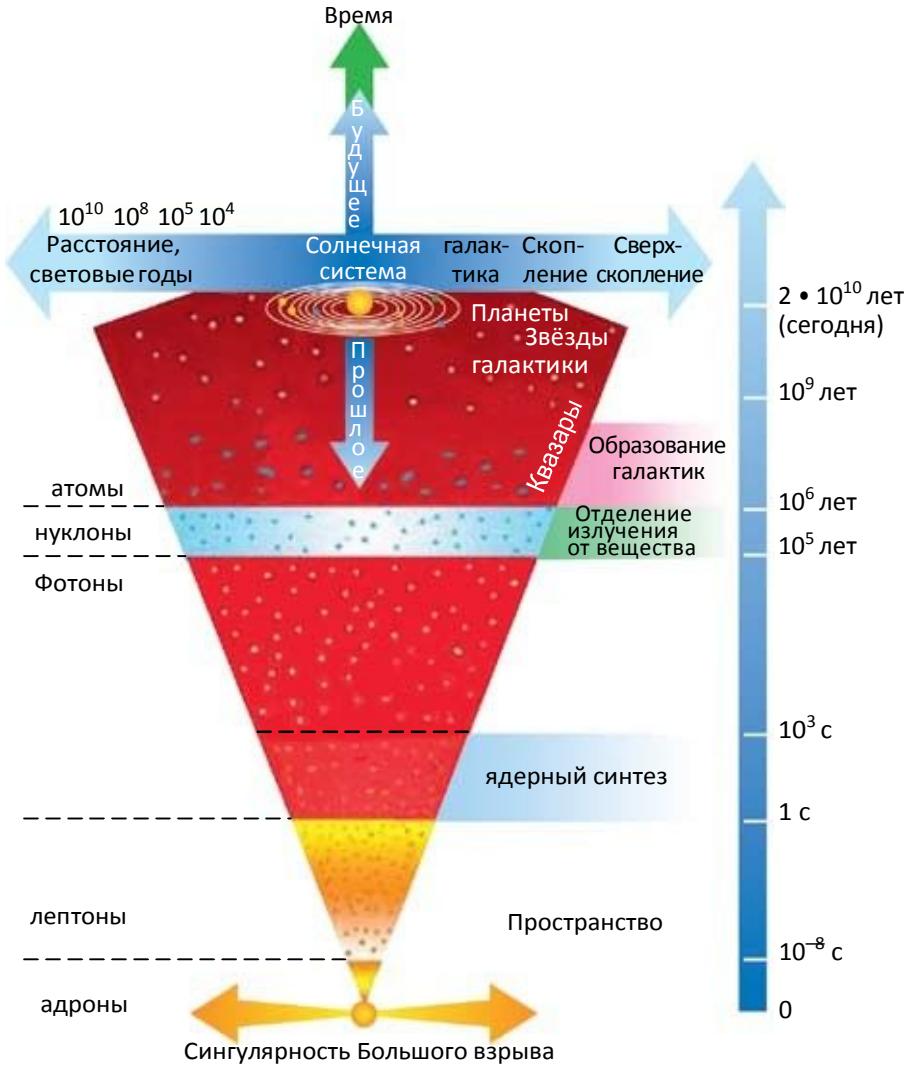


Рисунок 169 — Схема развития Вселенной от Большого взрыва до настоящего времени

до конца не известны. По мере её расширения температура падала от очень высокой до очень низкой, что и обеспечило благоприятные условия для образования звёзд и галактик.

На основании моделей Фридмана была разработана поэтапная физическая картина эволюции вещества начиная с момента взрыва (рис. 169).

Чуть более трёх минут спустя формирование ранней Вселенной закончилось и начался процесс соединения протонов и нейтронов в составные ядра. Затем почти 500 тыс. лет шло медленное остывание. Когда температура Вселенной упала примерно до 3 тыс. градусов, ядра водорода и гелия уже могли захватывать свободные электроны и превращаться в нейтральные атомы. Через миллион лет после начала расширения наступила эра вещества, когда из горячей водородно-гелиевой плазмы с малой примесью других ядер стало развиваться многообразие нынешнего мира.

Неоднородности во Вселенной, из которых впоследствии возникли все структурные образования, зародились в виде ничтожных случайных отклонений (флуктуаций), а затем усилились в эпоху, когда ионизированный газ во Вселенной стал превращаться в нейтральный, т. е. когда излучение «оторвалось» от вещества.

После того как вещество стало прозрачно для электромагнитного излучения, в действие вступили гравитационные силы. Они стали преобладать над всеми другими взаимодействиями между массами практически нейтрального вещества, составлявшего основную часть материи Вселенной. Гравитационные силы создали галактики, звёзды и планеты.

Какова судьба Вселенной? Существуют две теоретические модели будущего Вселенной — закрытая и открытая.

Закрытая модель предполагает, что Вселенная может быть представлена как грандиозная закрытая система, испытывающая множество эволюционных циклов. Цикл расширения сменяется циклом последующего сжатия до возвращения в сингулярное состояние, затем новый взрыв и т. д. Полный цикл расширения и сжатия Вселенной составляет примерно 100 млрд лет. Каждый раз, возвращаясь к сингулярности, Вселенная теряет «память» о прошлом состоянии и может снова «родиться» с совершенно новым набором физических констант.

В **открытых** моделях Вселенной рассматриваются разные варианты её «тепловой смерти». Предполагается, что уже через 10^{14} лет многие звёзды остынут, и это в последующем приведёт к отрыву планет от своих звёзд, а те, в свою очередь, начнут покидать галактики. Затем центральные части галактик коллапсируют, образуя чёрные дыры, и тем самым прекращают свое существование.

Главные выводы

1. В охваченной астрономическими наблюдениями части Вселенной существуют миллиарды галактик. В пространстве галактики распределены неравномерно, образуя группы, скопления и сверхскопления галактик.

2. Основное свойство Вселенной — её расширение.

3. На современном этапе развития науки рассматривается модель эволюционной Вселенной, которая со временем изменяет свою структуру и свойства.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите пространственное распределение галактик во Вселенной.

2. Как объясняется красное смещение и о чём оно свидетельствует?

3. В чём состоит сущность теории расширяющейся Вселенной?

4. К каким выводам о стационарности Вселенной пришёл а. а. Фридман?

5. Что такое критическая плотность Вселенной? В какой взаимосвязи критическая плотность находится с расширением или сжатием Вселенной?

6. Опишите модель горячей Вселенной.

7. Что понимается под закрытой и открытой моделями Вселенной?

§ 31. жизнь и разум во вселенной

1. Антропный принцип и проблемы существования разумных цивилизаций. Сущность **антропного принципа** заключается в том, что появление жизни, разума является неотъемлемой частью Вселенной, естественным следствием её эволюции. Наша Вселенная удивительно приспособлена к возникновению и развитию в ней жизни. Так, из бесконечного разнообразия начальных условий и значений физических постоянных, которые, вероятно, возникали в ранней Вселенной, реализовались только пригодные для существования разумной жизни.

Приведём несколько примеров.

1. Мы живём в пространстве трёх измерений. Но только в таком пространстве возможны устойчивые планетные движения (гравитационное взаимодействие).

2. Если бы гравитационная постоянная была в несколько раз больше, то время жизни Солнца как устойчивого горячего плазменного шара измерялось бы несколькими десятками миллионов лет.

3. Если бы масса электрона была в три раза больше современной, то время жизни протона было бы малым. При взаимодействии протона с электроном протон распадался бы на нейтрон и нейтрино. Тогда звёзды и галактики состояли бы из нейтронов, а более сложных форм не существовало бы.

4. Если бы средняя плотность вещества во Вселенной была значительно меньше, то силы инерции (разлёта) преобладали бы над силами тяготения. Поэтому не успели бы образоваться звёзды и галактики.

И этот иллюстративный ряд можно продолжить. Следовательно, вывод один: наша Вселенная представляет собой единое связное целое, согласованную систему, удивительно приспособленную к существованию жизни. Другие вселенные с иными физическими параметрами развивались бы, как отметил советский космолог А. Л. Зельманов, без свидетелей.

2. Поиски жизни в солнечной системе. Интерес к иным формам жизни в Солнечной системе преследует человечество с давних пор. Когда-то люди думали, что обитаемы все планеты, даже Луна. Но чем больше исследователи узнавали о планетах, тем менее оптимистичными становились их прогнозы. В итоге главными «претендентами» остались только Венера и Марс. Однако изучение поверхности Венеры показало, что ничто живое не может выжить на этой планете. Тогда все надежды стали связывать с самой загадочной планетой — Марсом.

Главная цель полётов автоматических орбитально-посадочных станций «Викинг» к Марсу состояла в поиске жизни на этой планете. Было выполнено несколько сложных биологических экспериментов. В ходе анализа марсианского грунта не было обнаружено никаких следов органических соединений — продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. Для сравнения: такой же прибор при пробах антарктического грунта нашёл значительное количество ископаемых органических соединений.

В 1976 г. станция «Викинг» передала на Землю фотографию загадочного объекта (из области Сидония) размером около полутора километров, который назвали «головой сфинкса» (рис. 170). Была выдвинута гипотеза, что это архитектурное сооружение древней цивилизации. Но исследователи Марса заявили: это природный объект. Споры не утихали до 2001 г., пока космический аппарат «Марс Глобал Сервейор» не передал на Землю более подробный снимок этого объекта (рис. 171). На новом изображении хорошо видно, что «голова сфинкса» — природная структура.

Оптимизм учёных иссяк, и посылаемые к Марсу в последующие годы посадочные аппараты не содержали на борту приборов, которые могли бы найти признаки жизни.

В то время как поиски жизни на Марсе зашли в тупик, космический аппарат «Галилео», изучающий систему Юпитера, передал сообщение, что на одном из больших спутников — Европе — обнаружен океан тёплой воды, находящийся под ледяным панцирем.

Поверхность Европы покрыта молодым водяным льдом, который испещрён трещинами и «хаосами» (см. рис. 79). Анализ полученных в разное время изображений показал, что лёд несколько смещается

Рисунок 170 — Фотография «головы сфинкса» на Марсе, полученная в 1976 г.

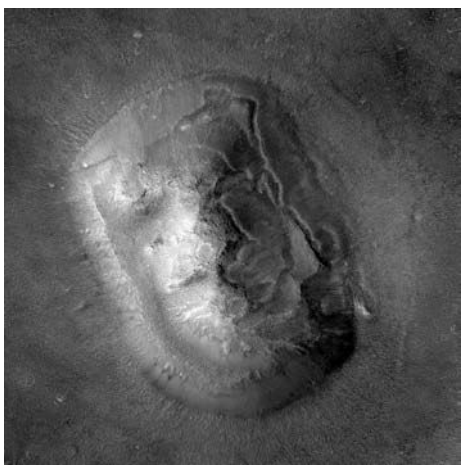


Рисунок 171 — Фотография «головы сфинкса», полученная с лучшим разрешением в 2001 г.

(подобную картину можно наблюдать на земных полярных морях во время весеннего таяния льда). Исходя из размеров и геометрии ледяных трещин, учёные предположили, что на спутнике Европа тонкий ледяной слой закрывает воду или талый лёд. Вероятной причиной появления таких структур может быть действие гидротермальных источников (гейзеров). Следовательно, если на Европе есть тёплая вода, то могут существовать и какие-либо формы жизни. Однако обнаружить их можно только «приземлившись» на поверхность.

3. Поиски жизни в Галактике. Современная наука определяет **внеземные цивилизации** как гипотетические общества разумных существ, которые могут возникнуть и существовать вне Земли.

Для оценки числа внеземных цивилизаций в Галактике американский радиоастроном Фрэнсис Дрейк предложил следующую формулу:

$$N = R \cdot f \cdot n \cdot k \cdot d \cdot q \cdot L,$$

где N — число внеземных цивилизаций в Галактике; R — скорость образования звёзд в Галактике, усреднённая по всему времени её существования (около 10 звёзд в год); f — доля звёзд, обладающих планетными системами; n — среднее число планет, входящих в планетные системы и экологически пригодных для жизни; k — доля планет, на которых действительно возникла жизнь; d — доля планет, на которых после возникновения жизни развились её разумные формы; q — доля планет, на которых разумная жизнь достигла фазы, обеспечивающей возможность связи с другими мирами, цивилизациями; L — средняя продолжительность существования таких внеземных (космических, технических) цивилизаций.

В формуле Дрейка все величины, кроме первой, имеют очень неопределённый характер и определяются на основе экспертных оценок учёных. Поэтому создаётся значительная неопределённость в оценке общей величины N. Одни подсчёты показывают, что сейчас всего лишь несколько геоподобных цивилизаций Галактики (в которой 10^{11} звёзд) готовы к контакту с нами. Согласно другим, более оптимистическим, — таких цивилизаций может быть значительно больше. Как один из

аргументов в пользу того, что внеземные цивилизации — явление весьма редкое, выдвигается отсутствие видимых проявлений их деятельности.

Первые работы по поиску сигналов внеземных цивилизаций провёл в 1960 г. Ф. Дрейк (США). Он исследовал радиоизлучение ближайших звёзд (τ Кита и ε Эридана) на волне 21 см. Искусственные сигналы обнаружить не удалось, но эра поисков сигналов внеземных цивилизаций была открыта. В настоящее время космическое пространство прослушивается одновременно на многих частотах. Принятые радиотелескопом сигналы обрабатываются компьютерами.

Параллельно ведётся работа по сообщению внеземным цивилизациям информации о нашей земной цивилизации. В 1974 г. с радиоастрономической обсерватории в Аресибо в сторону шарового скопления М31 (созвездие Геркулеса), находящегося от Земли на расстоянии 24 тыс. световых лет, было направлено послание, содержащее закодированный текст о жизни и цивилизации на Земле. Информационные сообщения (пластинки с нанесёнными рисунками, видеодиски с записями изображений, звуков и человеческой речи на разных языках) не раз помещались на космические аппараты, траектории которых выходили за пределы Солнечной системы (рис. 172).

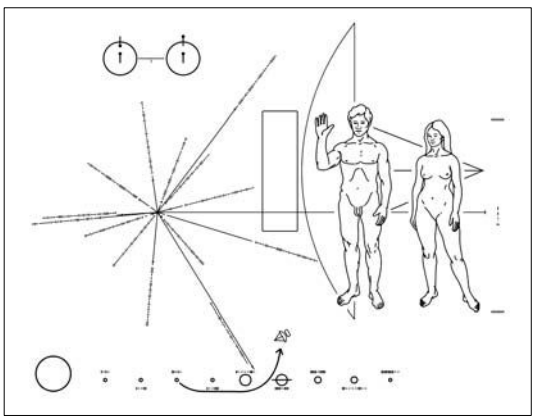


Рисунок 172 — Табличка с посланием, адресованная представителям внеземных цивилизаций, помещена на борту «Пионера-10»

В последнее время среди учёных и философов всё больше утверждается мнение, что человечество одиноко если не во всей Вселенной, то во всяком случае в нашей Галактике. Из этого вытекает важнейший вывод о значении, ценности и уникальности нашей цивилизации. Человечество, таким образом, в огромной степени ответственно не только за нашу планету, но и за Вселенную в целом.

Главные выводы

1. Разумная жизнь во Вселенной является следствием её фундаментальных свойств — в этом заключается сущность антропного принципа. Данный принцип поставил на научную основу вопрос: почему наш мир устроен таким, каким мы его наблюдаем?

2. В Солнечной системе на небесных телах, кроме Земли, пока не обнаружено жизни.

3. Поиск внеземных цивилизаций пока не привёл к положительным результатам.

4. На человечестве лежит огромная ответственность за сохранение жизни и разума на Земле и во Вселенной в целом.

Контрольные вопросы и задания

1. В чём заключается сущность антропного принципа?

2. на каких планетах Солнечной системы учёные предполагают возможность существования жизни?

3. Каким образом можно оценить число внеземных цивилизаций в нашей галактике?

4. Почему формула Ф. дрейка даёт значительную неопределённость в оценке количества цивилизаций в галактике, готовых к контакту с нами?

5. Каким образом человечество пытается установить контакты с внеземными цивилизациями?

Приложения

основные астрономические символы

Знаки зодиака		Планеты	
♈	Овен, а также точка весеннего равноденствия	☉	Солнце
♉	Телец	☽	Луна
♊	Близнецы	S	Меркурий
♋	Рак	T	Венера
♌	Лев	@	Земля
♍	Дева	Q	Марс
♎	Весы, а также точка осеннего равноденствия	V	Юпитер
♏	Скорпион	W	Сатурн
♐	Стрелец	X	Уран
♑	Козерог	Y	Нептун
♒	Водолей	V	Плутон
♓	Рыбы		

другие обозначения

☊ Восходящий узел лунной орбиты ☋ Нисходящий узел лунной орбиты

Греческий алфавит

Начертание буквы	Название буквы	Начертание буквы	Название буквы	Начертание буквы	Название буквы	Начертание буквы	Название буквы
α	а□льфа	η	э□та	ν	ни	τ	та□у
β	бе□та	θ	те□та	ξ	кси	υ	ипсило□н
γ	га□мма	ι	йо□та	ο	омикро□н	ϕ	фи
δ	де□льта	κ	ка□ппа	π	пи	χ	хи
ε	эпсило□н	λ	ла□мбда	ρ	ро	ψ	пси
ζ	дзе□та	μ	ми	σ	си□гма	ω	оме□га

Географические координаты городов республики беларусь

Город	Широта (с. ш.)	Долгота (с. д.)		Часововой пояс
Минск	53° 54′	27° 33′	1ч 50,3м	2
Барановичи	53° 09′	26° 02′	1ч 44,1м	2
Бобруйск	53° 08′	29° 15′	1ч 57,0м	2
Борисов	54° 14′	28° 31′	1ч 54,1м	2
Брест	52° 06′	23° 42′	1ч 34,8м	2
Витебск	55° 12′	30° 11′	2ч 00,8м	2
Гомель	52° 25′	31° 00′	2ч 04,1м	2
Гродно	53° 41′	23° 50′	1ч 35,3м	2
Лида	53° 53′	25° 17′	1ч 41,1м	2
Могилёв	53° 54′	30° 19′	2ч 01,3м	2
Мозырь	52° 08′	29° 16′	1ч 57,1м	2
Молодечно	54° 18′	26° 50′	1ч 47,3м	2
Новополоцк	55° 32′	28° 37′	1ч 54,5м	2
Орша	54° 30′	30° 26′	2ч 01,7м	2
Пинск	52° 07′	26° 07′	1ч 44,5м	2
Полоцк	55° 29′	28° 47′	1ч 55,1м	2
Речица	52° 21′	30° 24′	2ч 0,16м	2
Светлогорск	52° 39′	29° 43′	1ч 58,9м	2
Слуцк	53° 01′	27° 33′	1ч 50,2м	2
Солигорск	52° 47′	27° 33′	1ч 50,2м	2

динамические характеристики планет

Параметры	Планеты							
	Меркурий	**Венера**	**Земля**	**Марс**	**Юпитер**	**Сатурн**	**Уран**	**Нептун**
Среднее расстояние до Солнца, а. е.	0,387	0,723	1,000	1,524	5,203	9,54	19,18	30,1
Сидерический период обращения	88,0 сут	224,7 сут	365,26 сут	687,0 сут	11,86 лет	29,46 лет	84,0 лет	164,8 лет
Синодический период обращения, сут	115,9	583,9	—	779,9	398,9	378,1	369,7	367,5
Эксцентриситет орбиты	0,207	0,0067	0,0167	0,0934	0,0484	0,0557	0,0471	0,0087
Наклонение орбиты к эклиптике	7° 01′	3° 24′	—	1° 51′	1° 18′	2° 29′	0° 46′	1° 46′

Физические характеристики планет

Параметры	Планеты							
	Меркурий	**Венера**	**Земля**	**Марс**	**Юпитер**	**Сатурн**	**Уран**	**Нептун**
Масса (по сравнению с массой Земли)	0,055	0,816	1,000	0,107	318	95,1	14,6	17,2
Радиус, км	2439	6051	6378	3393	71 400	60 400	24 300	25 050
Средняя плотность, ρ, 10^3 кг/м^3	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,6	1,7
Период вращения	58,8 сут	243 сут	23 ч 56 мин	24 ч 37 мин	9 ч 50 мин	10 ч 14 мин	17 ч 14 мин	16 ч 7 мин
Наклон экватора к плоскости	7°	3° 24′	23° 26′	25° 12′	3° 07′	26° 45′	82°	29°
Число известных спутников	—	—	1	2	67	62	27	14

справочные данные о Земле

Параметр	Величина
Экваториальный радиус, км	6378,140
Полярный радиус, км	6356,755
Средний радиус, км	6371,004
Поверхность Земли, км^2	$5{,}0949 \cdot 10^8$
Поверхность суши, %	29,2
Водная поверхность, %	70,8
Масса Земли, кг	$5{,}973 \cdot 10^{24}$
Масса воды во всех её формах, кг	$1{,}43 \cdot 10^{21}$
Масса атмосферы Земли, кг	$5{,}158 \cdot 10^{18}$
Линейная скорость точки экватора, м/с	465,12
Средняя скорость движения Земли по орбите, км/с	29,765
Ускорение силы тяжести на Земле (на широте 45°), м/с^2	9,806

справочные данные о луне

Параметр	Величина
Минимальное расстояние от Земли, км	356 410
Максимальное расстояние от Земли, км	406 740
Среднее расстояние от Земли, км	384 400
Средний эксцентриситет орбиты	0,0549
Среднее наклонение плоскости орбиты к эклиптике	5°08′43″
Период обращения по орбите, сут	27,32
Средняя периодичность смены фаз Луны, сут	29,53
Средний угловой радиус Луны	15′33″
Масса, кг	$7{,}35 \cdot 10^{23}$
Средняя плотность, кг/м^3	3340
Ускорение силы тяжести, м/с^2	1,62
Вторая космическая скорость, км/с	2,38
Максимальная температура днём, °С	+130
Минимальная температура ночью, °С	–170
Освещённость от полной Луны на земной поверхности, лк	0,25
Освещённость от полной Земли на лунной поверхности, лк	16
Средняя отражательная способность ото всей лунной поверхности, %	12,44
Отражательная способность материковых областей, %	13,44
Отражательная способность морских областей, %	7,30
Общая площадь поверхности Луны, км^2	$3{,}8 \cdot 10^7$
Площадь морей на всей поверхности, %	16,9
Площадь морей на видимой стороне, %	31,2
Площадь поверхности, которую можно наблюдать вследствие либрации, %	59

справочные данные о солнце

Параметр	Величина
Параллакс Солнца при среднем расстоянии Земли от Солнца, □□	8,794
Среднее расстояние до Солнца, км	149 600 000
Диаметр Солнца, км	1 392 000
Видимый угловой диаметр (средний)	31□59□□
Масса, кг	$1{,}989 \cdot 10^{30}$
Средняя плотность, кг/м^3	1408
Ускорение силы тяжести на поверхности, м/с^2	273,8
Вторая космическая скорость, км/с	617,7
Сидерический период вращения точки экватора, сут	25,380
Синодический период вращения точки экватора, сут	27,275
Наклон экватора к эклиптике	7°15□
Светимость Солнца, Дж/с	$3{,}88 \cdot 10^{26}$
Эффективная температура фотосферы Солнца, К	5780
Абсолютная фотовизуальная звёздная величина	$+4{,}96^{m}$
Скорость движения Солнца относительно окружающих звёзд, км/с	19,5
Апекс движения Солнца	$\alpha = 270° =$ $= 18^{ч}\,00^{м}$ $\delta = +30°$
Расстояние Солнца от центра Галактики, кпк	8
Скорость движения Солнца вокруг центра Галактики, км/с	220
Период обращения Солнца вокруг центра Галактики, млн лет	около 220
Средняя продолжительность полного цикла солнечной активности, лет	22,11

Физические характеристики некоторых ярких звёзд

Обозначение в созвездии	Название звезды	Экваториальные координаты		Блеск, m	Спектр	Температура, К	Параллакс	Собственное движение	Лучевая скорость, км/с
		α	δ						
α Андромеды	Альферац**	00ч 08м	+29° 05′	2,02	B 8	13 600	0,025″	0,209″	–11,7
α Эридана	Ахернар	01ч 36м	–57° 28′	0,47	B 5	15 000	0,034″	0,083″	+19
α Овна	Гамаль	02ч 07м	+23° 28′	2,00	K 2	4000	0,043″	0,241″	–14,4
α Малой Медведицы	Полярная*	02ч 32м	+89° 16′	1,94	F 7	5800	0,003″	0,046″	–16,4
α Персея	Мирфак	03ч 24м	+49° 52′	1,79	F 5	6700	0,028″	0,035″	–2,8
α Тельца	Альдебаран*	04ч 36м	+16° 31′	0,75	K 5	3300	0,049″	0,202″	+54,1
β Ориона	Ригель**	05ч 15м	–8° 12′	1,12	B 8	11 800	0,009″	0,001″	+20,7
α Возничего	Капелла	05ч 17м	+46° 00′	0,08	G 5	5000	0,074″	0,435″	+29,1
γ Ориона	Беллатрикс	05ч 25м	+6° 21′	1,64	B 2	17 100	0,023″	0,015″	+18,2
α Ориона	Бетельгейзе*	05ч 55м	+7° 24′	0,4–1,3	M 1	2900	0,005″	0,028″	+21,8
α Киля	Канопус	06ч 23м	–52° 41′	–0,73	F 0	9100	0,018″	0,022″	+20
α Большого Пса	Сириус**	06ч 45м	–16° 43′	–1,46	A 1	11 200	0,376″	1,324″	–7,6
α Близнецов	Кастор**	07ч 35м	+31° 53′	1,58	A 2	10 600	0,070″	0,198″	+4,0
α Малого Пса	Процион	07ч 39м	+5° 14′	0,38	F 5	6800	0,087″	1,250″	–3,6
β Близнецов	Поллукс**	07ч 45м	+28° 02′	1,14	K 0	4400	0,093″	0,625″	+3,5
α Гидры	Альфард	09ч 28м	–8° 40′	1,98	K 3	3500	0,020″	0,034″	–4,6
α Льва	Регул**	10ч 08м	+11° 58′	1,35	B 7	13 600	0,040″	0,248″	+5,0

Окончание таблицы

Обозначение в созвездии	Название звезды	Экваториальные координаты		Блеск, m	Спектр	Температура, К	Параллакс	Собственное движение	Лучевая скорость, км/с
		α	δ						
α Большой Медведицы	Дубте**	11ч 04м	+61° 45′	1,79	K 0	4200	0,031″	0,138″	–9,0
β Льва	Денебола	11ч 49м	+14° 34′	2,14	A 3	9900	0,076″	0,511″	–0,6
ξ Большой Медведицы	Мицар**	13ч 22м	+55° 18′	2,4	A 2	10 000	0,037″	0,127″	–5,6
α Девы	Спика	13ч 25м	–11° 10′	0,98	B 1	17 600	0,019″	0,054″	+3,0
α Волопаса	Арктур	14ч 16м	+19° 11′	–0,04	K 1	3900	0,091″	2,284″	–5,3
α Центавра	Топиман	14ч 38м	–60° 44′	0,33	G 2	5400	0,746″	3,674″	+22,2
α Северной Короны	Гемма*	15ч 35м	+26° 43′	2,23	A 0	11 600	0,044″	0,154″	+1,6
α Скорпиона	Антарес**	16ч 29м	–26° 26′	0,9–1,8	M 1	2900	0,019″	0,029″	–3,2
α Змееносца	Рас Альхаг	17ч 35м	+21° 34′	2,08	A 5	9100	0,056″	0,260″	+12,7
α Лиры	Вега	18ч 37м	+38° 47′	0,03	A 0	11 300	0,123″	0,345″	–13,9
α Орла	Альтаир**	19ч 51м	+8° 52′	0,77	A 7	8400	0,198″	0,658″	–26,3
α Лебедя	Денеб	20ч 41м	+45° 17′	1,25	A 2	9900	0,004″	0,003″	–4,6
α Южной Рыбы	Фомальгаут	22ч 58м	–29° 37′	1,16	A 3	9800	0,147″	0,367″	+4,0

* — переменная звезда.
** — двойная звезда.

СодержАние

Предисловие.....3

раздел I. введение.....4
§ 1. Предмет астрономии.....4

раздел II. основы практической астрономии.....13
§ 2. Звёздное небо.....13
§ 3. Небесные координаты.....21
§ 4. Определение географической широты.....25
§ 5. Измерение времени. Определение географической долготы.....28

раздел III. движение небесных тел.....38
§ 6. Гелиоцентрическая система Коперника.....38
§ 7. Видимое движение Солнца и Луны. Затмения.....44
§ 8. Законы Кеплера.....53
§ 9. Закон всемирного тяготения Ньютона.....56
§ 10. Определение размеров небесных тел и расстояний до них в Солнечной системе.....62
§ 11. Движение космических аппаратов.....67

раздел IV. сравнительная планетология.....74
§ 12. Общие характеристики планет. Происхождение Солнечной системы.....74
§ 13. Планеты земной группы.....79
§ 14. Планеты-гиганты.....89
§ 15. Луна. Спутники планет.....96
§ 16. Карликовые планеты и малые тела Солнечной системы.....105

раздел V. методы исследования небесных тел 116
§ 17. Исследование электромагнитного излучения небесных тел 116
§ 18. Спектральный анализ в астрономии 127

раздел VI. солнце — дневная звезда 134
§ 19. Солнце как звезда 134
§ 20. Строение солнечной атмосферы 139
§ 21. Влияние Солнца на жизнь Земли 144

раздел VII. Звёзды 149
§ 22. Основные характеристики звёзд. Светимость 149
§ 23. Температура и размеры звёзд 154
§ 24. Двойные звёзды. Масса звёзд 158
§ 25. Эволюция звёзд 163
§ 26. Нестационарные звёзды 170

раздел VIII. строение и эволюция вселенной 178
§ 27. Наша Галактика 178
§ 28. Межзвёздная среда 185
§ 29. Звёздные системы — галактики 190
§ 30. Расширяющаяся Вселенная 201
§ 31. Жизнь и разум во Вселенной 207

Приложения 213

(Название учреждения образования)

Учебный год	Имя и фамилия ученика	Состояние учебника при получении	Отметка ученику за пользование учебником
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Учебное издание

Галузо Илларион Викторович
Голубев Владимир Александрович
Шимбалёв Александр Альбертович

Астрономия

Учебник для 11 класса учреждений общего среднего образования
с русским языком обучения

Редактор *Т. К. Слаута*
Художник обложки *Е. В. Максимова*
Художник *Е. В. Максимова*
Художественные редакторы *Н. С. Маслакова, С. А. Шестовская*
Компьютерный набор *Н. С. Маслакова*
Компьютерная вёрстка *Н. С. Маслакова*
Корректор *В. А. Килич*

Подписано в печать 27.04.2015. Формат 70 □ 90 $^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16,38 + 0,29 форз. Уч.-изд. л. 11,7 + 0,3 форз.
Тираж 106 900 экз. Заказ

РУП «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».
Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/19 от 14.11.2014. Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск.

РУП «Издательство «Белорусский Дом печати».
Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 2/102 от 01.04.2014. Пр-т Независимости, 79, 220013, г. Минск.