

Е.В. Кондакова

ОСНОВЫ КОСМОЛОГИИ

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Учебное пособие



Елец – 2018

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

Е.В. Кондакова

ОСНОВЫ КОСМОЛОГИИ

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Учебное пособие

Елец – 2018

УДК 524.8
ББК 22.632

К 64

*Издаётся по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина
от 29.01.2018, протокол № 1*

Рецензенты:

К.Г. Иванов, доктор физико-математических наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна)

Е.И. Трофимова, доктор педагогических наук, профессор
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

Е.В. Кондакова

К 64 Основы космологии: подготовка к практическим занятиям. –
Учебное пособие. – Елец: Елецкий государственный университет
им. И.А. Бунина, 2018. – с.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих курсы астрофизики и основ космологии. Тематика практических занятий в целом соответствует лекционному курсу, но не дублирует его. Помимо краткого обзора основных понятий и терминов, для каждой темы приводятся информационные источники для самостоятельной работы, примеры решения задач.

Учебное пособие отвечает требованиям ФГОС высшего образования в плане усиления роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Структурирование учебного материала призвано помочь студентам на всех этапах их самостоятельной работы: от поиска информации до самооценки уровня сформированности знаний. Задания, предлагаемые учащимся, весьма разнообразны: расчётные и качественные задачи, мини-исследования, поиск информации в различных источниках и её обработка, создание моделей, проектная деятельность.

Пособие будет полезно преподавателям астрономии и астрофизики в вузах и в школе, студентам и школьникам, желающим самостоятельно изучить отдельные темы или углубить свои астрономические знания.

УДК 524.8
ББК 22.632

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Изучение основ науки астрономии (включающей в себя все разделы, в том числе астрофизику и космологию) призвано обеспечить формирование системы астрономических знаний на основе современных представлений о свойствах и строении небесных объектов и Вселенной в целом; обосновать важность науки астрономии в практической деятельности человечества и в развитии науки и технологий; способствовать развитию умений применять физические законы для объяснения астрономических явлений и процессов и решения практических задач. Традиционно эта дисциплина изучается на старших курсах. Для лучшего освоения материала данный курс подкрепляется практическими занятиями, в основном, связанными с решением разного рода задач. Предлагаемое пособие предназначено для использования при проведении этих занятий.

Согласно требованиям ФГОС высшего образования, в программах учебных дисциплин значительная часть времени отводится на самостоятельную работу студентов. Специфика такого вида деятельности заключается в самостоятельном поиске нужной информации, её осмыслении, переработке, анализе, и в результате – формировании системы знаний. При этом очень важно не только научить студентов выполнять все указанные действия, но и оценить уровень сформированности знаний. Данное пособие организовано таким образом, чтобы помочь студентам на всех этапах их самостоятельной работы: от поиска информации до самооценки уровня сформированности знаний.

Тематика практических занятий в целом соответствует лекционному курсу. Для каждого занятия приводится краткий теоретический материал, включающий определения важнейших терминов и понятий и дополнительный (по отношению к лекционному курсу) материал. В зависимости от учебного плана, уровня подготовки студентов, конкретного расписания занятий каждая из тем учебного пособия может изучаться на одном или нескольких занятиях.

В пособие вошли темы, изучение которых предполагается в первом семестре изучения курса «Астрономия и космология»: Астрономия и Вселенная; описание видимых движений небесных объектов; движения Солнца и Луны; измерение времени; видимые и действительные движения планет; методы астрофизических исследований. Помимо краткого обзора основных понятий и терминов, для каждой темы приводятся информационные источники для самостоятельной работы, примеры решения задач. Для оценки уровня сформированности знаний и готовности к самостоятельной работе предлагаются задания для самопроверки различных типов: вопросы с выбором ответа, оценка достоверности

приведенного высказывания (правда или ложь), дополнение высказывания (вставить нужные термины в предложение). Задания для самостоятельной работы весьма разнообразны: расчётные и качественные задачи, мини-исследования, поиск информации в различных источниках и её обработка, создание моделей, проектная деятельность. Часть заданий предполагает, что студенты работают совместно, в малых группах, с последующим обсуждением полученных результатов.

Курс «Астрофизика и космология» способствует обобщению и систематизации знаний, полученных при изучении общей и теоретической физики. Поэтому в пособие включены задачи межпредметного характера, направленные на развитие у студентов умений применять знания в нестандартной ситуации.

Все темы, представленные в пособии, имеют одинаковую структуру:

- краткий обзор теоретического материала;
- задания для самопроверки;
- информационные источники для самостоятельной работы;
- задания для самостоятельной работы (в том числе задания, для выполнения которых студенты используют ресурсы Интернет);
- проекты и работа в группах.

Такая подача материала способствует лучшей организации самостоятельной работы студентов и сокращает время, необходимое для поиска необходимой и дополнительной информации. Работа в группах способствует развитию коммуникативных умений, формирует навыки командной работы, что весьма актуально в современных условиях развития интеграционных процессов как в науке, так и в жизни общества.

При подготовке к практическим занятиям и в самостоятельной работе воспользуйтесь интернет-ресурсами. Сайтов, посвященных астрономии, огромное множество. Рекомендуем использовать те из них, которые содержат научную информацию, статьи, написанные ведущими учёными и методистами. Краткий обзор приведен ниже.

Астронет – российская астрономическая сеть (научная информация по астрономии, глоссарий, библиотека астрономической литературы, фотогалерея космических объектов и т.п.) <http://www.astronet.ru/>

Постнаука - интернет-журнал о современной фундаментальной науке и учёных, которые её создают, о популяризации научных знаний <https://postnauka.ru/>

Стеллария - сайт для учителей астрономии и лекторов планетариев, а также для всех интересующихся <http://stellaria.school>

Элементы - популярный сайт о фундаментальной науке <https://elementy.ru/>

Учебное пособие представляет практический интерес для преподавателей астрономии и астрофизики в вузах и в школе, для студентов и школьников, желающих самостоятельно изучить отдельные темы или углубить свои астрономические знания.

Тема 1 Методы астрофизических исследований

Краткий обзор теоретического материала

1.1 Предмет, объекты изучения и методы астрофизики

Астрономия – наука о Вселенной, изучающая небесные объекты и образованные ими системы, их происхождение, строение, развитие и взаимосвязи.

Понятие **Вселенная** не имеет строгого и однозначного определения. **Вселенная** – это весь населённый мир, а в более широком, научном смысле, **Вселенная** – это вся система мироздания, весь мир. Таким образом, астрономия – это наука “обо всём”, что нас окружает.

Астрономия изучает происхождение, строение, развитие, движения и взаимодействия небесных тел, их совокупностей и межзвёздной среды.

Небесные (или **космические**) **тела** – это физические объекты, которые мы можем наблюдать невооружённым глазом или с помощью телескопов. К ним относятся: планеты, спутники планет, астероиды, кометы, метеороиды, звёзды на разных этапах их жизни.

Небесные тела образуют совокупности различной степени иерархии: планетные системы, звёздные скопления, галактики, скопления галактик, сверхскопления галактик, Метагалактика.

Межзвёздная среда (МЗС) – это вещество (газ и пыль), электромагнитное излучение и магнитные поля, заполняющие пространство между звёздами в галактиках. Пыль обычно составляет не менее 1 % от массы газа и содержит атомы и молекулы тяжёлых элементов. Состав межзвёздного газа: ~89% водорода, ~9% гелия, ~2% составляют более тяжёлые элементы. Плотность – от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов частиц в кубическом метре.

Астрономия возникла первоначально как наблюдение за небесными объектами: Солнцем, Луной, планетами, звёздами; и небесными явлениями: видимые движения небесных тел, затмения. Старейшим астрономическим документом, возраст которого около 30 тысяч лет, является “кроманьонский календарь” – кости с гравировкой, расшифрованной как запись фаз Луны.

Слово “астрономия” происходит от греческих слов “астрон” – звезда, светило; “номос” – закон.

Древние астрономы не только наблюдали и описывали небесные тела, но и пытались установить взаимосвязи между ними и своей жизнью, предсказать небесные явления и объяснить их. Развитие астрономии стимулировали практические потребности человека: необходимость вести счет времени, ориентироваться на поверхности Земли, давать объяснение

наблюдаемым явлениям. Астрономия, в свою очередь, стимулировала развитие математики, а позднее – физики.

Астрономия всегда оказывала определяющее значение на формирование мировоззрения людей. Доступность небесных светил и явлений для созерцания определяет место астрономической картины мира как первой области приложения донаучного, религиозного истолкования природы, когда ее положения становились догмами – нерушимыми постулатами, предметами веры.

Первая великая научная революция была связана с именем Коперника и повлекла за собой ломку и всей научной картины мира, и всего мировоззрения. Сейчас имеет смысл говорить о построении новой картины мира, в рамках которой дается стройное объяснение тому, что мы наблюдаем в дальнем и ближнем Космосе.

Астрология в течение долгих лет имела статус науки о влиянии положений и движений небесных тел на жизнь людей. В настоящее время астрологию квалифицируют как лженауку и предрассудки. Например, Национальный научный фонд США использует астрологию как “эталонную” лженауку в оценочной системе “Science and Engineering Indicators”.

Основным методом в астрономии является **наблюдение**. Люди не могут непосредственно изучать небесные объекты (за исключением разве что метеоритов), а потому вынуждены пользоваться лишь той информацией, которую они получают из непосредственных наблюдений. В течение долгих столетий основным средством получения информации о космических объектах были лишь органы зрения. 7 января 1610 года Г. Галилей (Италия) впервые направил изобретенный им телескоп на небо. В настоящее время астрономия является всеволновой: человек научился записывать и обрабатывать информацию, которую приносит нам излучение небесных тел во всем диапазоне – от гамма-излучения до радиоволн. Кроме того, с 1957 года началась эра космических исследований с помощью искусственных космических тел – спутников, орбитальных станций, межпланетных космических аппаратов и пр.

Важной особенностью астрономии является изучение объектов в процессе их эволюции. В силу больших расстояний астрономы имеют возможность наблюдать звёзды, их скопления, галактики на разных стадиях их эволюции. Для измерения расстояний в астрономии используются достаточно крупные единицы длины: астрономическая единица, световой год, парсек.

Астрономическая единица (а.е.) – единица измерения расстояний в астрономии, приблизительно равная среднему расстоянию между Землёй и Солнцем.

В сентябре 2012 года 28-я Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС) приняла решение привязать

астрономическую единицу к Международной системе единиц (СИ). Астрономическая единица по определению равна в точности 149 597 870 700 метрам. Кроме того, МАС принял решение стандартизовать международное обозначение астрономической единицы: «ае».

Астрономическая единица применяется для измерения расстояний в Солнечной системе, в других планетных системах, между компонентами двойных и кратных систем. Но эта единица оказывается неудобной для измерения расстояний уже на уровне Галактики. Поэтому была введена единица измерения, называемая **световым годом**.

Световой год (св.г.) – это расстояние, которое свет проходит за 1 год. $1 \text{ св.г.} \approx 9,5 \cdot 10^{15} \text{ м.}$

Свет от Солнца достигает Земли за $8\frac{1}{3}$ минуты, от Луны до Земли – за $1\frac{1}{3}$ минуты, от ближайшей к Солнцу звезды (Проксима Центавра) – за 4,22 года, от ближайших к нам галактик – за сотни тысяч и миллионы лет. Таким образом, мы видим удалённые от нас галактики такими, какими они были в прошлом. Сравнивая далёкие галактики с более близкими, астрономы исследуют эволюционные изменения, которые происходят во Вселенной за большие промежутки времени.

Зачастую, и световой год оказывается недостаточно удобной единицей измерения расстояний в космосе, и астрономы ввели ещё одну единицу измерения расстояний – **парсек**.

Парсек (обозначается пк) – расстояние, на котором звезда имела бы параллакс, равный одной угловой секунде. Название «парсек» происходит от «**п**араллакс в **с**екундах».

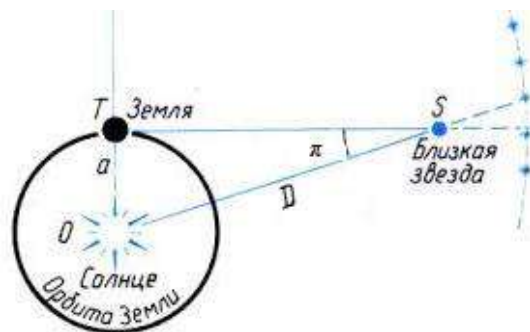


Рисунок 1.1 Годи́чный параллакс звезды

Параллаксом называется изменение видимого положения объекта по отношению к удаленному фону в зависимости от нахождения наблюдателя. В астрономии угол, под которым с какой-либо звезды (или другого объекта вне Солнечной системы) видна большая полуось земной орбиты a , перпендикулярная к лучу зрения, называется **годи́чным параллаксом** π звезды (Рис.1.1). Линия, соединяющая два диаметрально противоположных положения движущегося объекта, называется **базой** b . Обратите внимание, что в определении годичного параллакса звезды базой является большая полуось земной орбиты a .

Таким образом, парсек, определяемый как параллакс угловой секунды – это расстояние, с которого средний радиус орбиты Земли (астрономическая единица, а. е.), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом $1''$.

Парсек равен 3,2616 световых года, 206265 астрономических единиц, или $3,0863 \cdot 10^{13}$ км.

Зная параллакс небесного объекта, можно вычислить расстояние D до него (Рис.1.1): $D = \frac{a}{\sin \pi}$.

Так как параллаксы π небесных объектов очень малы $\sin \pi \approx \pi$. Выразив π в единицах дуги, получим $D = \frac{206265}{\pi''} a$ [1]. Так как расстояние, соответствующее $\pi = 1''$ – это 1 парсек, то в парсеках расстояние вычисляется как $D = \frac{1}{\pi''}$ [2].

Горизонтальным экваториальным параллаксом p называется угол, под которым со светил виден экваториальный радиус Земли R , перпендикулярный к лучу зрения.

Греческий математик Евклид предложил метод определения расстояний, который может быть использован для тел внутри Солнечной системы. Суть этого метода заключается в следующем. Одновременно проводят наблюдения небесного объекта из двух разнесенных на большое расстояние мест земной поверхности (сотни, тысячи километров). Точно отмечают на небе положение этого объекта относительно звезд, которые достаточно удалены. При этом положение объекта относительно звезд для каждого места наблюдения будет своим. Зная расстояние между точками наблюдения и угловое расстояние между положениями объекта для каждой точки, легко рассчитать расстояние до объекта (Рис.1.2). Такой способ определения расстояний называют **методом горизонтального параллакса**.

На рис. 1.2 окружность, в центре которой находится искомая планета, проходит через известную базу АВ на Земле. Чтобы вычислить расстояние до планеты d , составим отношение: база АВ относится к длине большой окружности как параллакс (выраженный в градусах) к полному обороту в градусах (360°), т.е. $\frac{b}{2\pi d} = \frac{p}{360^\circ}$.

Откуда $d = \frac{b(360^\circ/2\pi)}{p}$ [3]



Рисунок 1.2 Вычисление расстояний с использованием параллакса

Угол $360^\circ/2\pi \approx 57,3^\circ$ по определению равен 1 радиан. 1 радиан равен $206265''$. Если параллакс измеряется в угловых единицах (угловая минута, секунда), то $d = b \frac{206265}{p}$ [4].

Пример 1.1. Два астронома, расстояние между которыми 1000 км, наблюдая Луну, определили её параллакс $p = 9,0'$. Найти расстояние до Луны.

Решение: Используем формулу (3). Выразим параллакс в градусах:

$$p = 9,0' = 0,15^\circ.$$

$$d = 1000 \times \frac{57,3^\circ}{0,15^\circ} = 382000 \text{ км}$$

Можно использовать формулу (4), выразив параллакс в угловых секундах: $p = 9,0' = 540''$; $d = 1000 \cdot \frac{206265}{540} = 381972 \text{ км}$.

Более точные исследования установили, что среднее расстояние до Луны равно 384000 км.

Зная расстояние до объекта d , можно определить много других характеристик. Так, измерив **угловой диаметр** φ объекта, можно рассчитать его линейный диаметр D (Рис. 1.3):

$$\frac{D}{2\pi d} = \frac{\varphi}{360^\circ}; \quad D = d \frac{\varphi}{(360^\circ/2\pi)}; \quad D = d \frac{\varphi}{57,3^\circ} \quad [5]$$

Пример 1.2. Угловой диаметр Луны равен примерно $32'$. Определите линейный диаметр Луны.

Решение: Используем формулу $D = d \frac{\varphi}{(360^\circ/2\pi)}$. $\varphi = 32' \approx 0,5^\circ$.

$$D = 384000 \cdot \frac{0,5}{57,3} = 3350 \text{ км}$$

Более точные измерения диаметра Луны дали результат 3476 км.

Цели и возможности астрономии определяются уровнем науки и техники, на которых базируются методы наблюдений. До XX века это были наблюдения видимого излучения небесных тел – оптические. В конце XX века для наблюдений стал доступен электромагнитный спектр от гамма-излучения (длина волны 0,01 нм) до радиоволн (длина волны >1 мм). Изучением космических объектов сегодня занимается инфракрасная и радиоастрономия, рентгеновская и гамма-астрономия, наземная и внеатмосферная астрономия. Используя современную технику, которая способна «поштучно» регистрировать



Рисунок 1.3 Определение линейных размеров удалённого объекта

световые кванты, удалось обнаружить планеты у других звезд, убедиться в существовании протозвезд, вырожденных и нейтронных звезд, черных дыр.

Чёткого и единого деления астрономии на разделы нет. Статус самостоятельных наук получили следующие разделы астрономии: астрометрия, небесная механика, астрофизика, космогония, космология. В нашем курсе мы познакомимся с основами астрофизики и космологии.

Астрофизика – раздел астрономии, изучающий строение, физические свойства и эволюцию космических объектов.

Космология изучает Вселенную как целое. Основываясь на наблюдательных данных и теоретических выводах, относящихся к охваченной астрономическими наблюдениями части Вселенной, космология базируется на основных физических теориях (теория гравитации, теория электро-магнитного поля, квантовая теория, статистическая термодинамика, физика элементарных частиц и др.). Её выводы и обобщения имеют большое общенаучное и философское значение.

1.2 Звездное небо и созвездия

С древних времен люди объединяли яркие звезды в созвездия, которым давали имена героев мифов. Названия созвездий были различными в разных культурах. В 1928 году международный астрономический союз определили 88 официально различимых созвездий. Союз определил границы каждого созвездия и международное название. Таким образом, в настоящее время характерная, легко различимая на ночном небе группа звезд, которая имеет исторически сложившееся устойчивое имя, носит название ***астеризм***. ***Созвездия*** – это участки, на которые разделена небесная сфера для удобства ориентирования на звёздном небе.

Астроном-любитель Иоганн Байер в 1603 году выпустил атлас «Уранометрия» – первую в мире полную карту звездного неба, в котором звёздам даны были имена: самая яркая звезда получала название первой буквы греческого алфавита α , следующая по яркости β , и так до самой тусклой, ω . С усовершенствованием наблюдательной техники количество видимых звезд в зонах созвездий увеличивалось, и к греческим буквам добавились латинские строчные буквы, а затем и прописные. Начиная с семнадцатого века, ученые составляют каталоги звездного неба, в которых дают звёздам обозначения, основанные на тех или иных физических характеристиках.

Как известно, наблюдению невооруженным глазом в обоих полушариях Земли доступно около шести тысяч звезд. Примерно 275 из них имеют собственные имена. Они были даны звездам в разные эпохи, в разных странах.

Звезды, которые входят в одно и то же созвездие, расположены на различных расстояниях друг от друга и от Земли. Они выглядят для нас одинаково далекими в силу особенностей зрения: в определенный участок неба (созвездие) проецируются все звёзды, находящиеся внутри «конуса» со сложной поверхностью, вершина которого совпадает с глазом наблюдателя. Так, например, звёзды ковша Большой Медведицы Мерак и Дубхе удалены от Земли соответственно на 79 и 124 световых года. Кроме того, звёзды движутся вокруг центра Галактики с различными скоростями, что приводит к изменению взаимного расположения звезд с течением времени. Это изменение происходит очень медленно, так как звёзды удалены от Земли на большие расстояния. Так, ковш Большой Медведицы выглядел иначе, чем в настоящее время, и в будущем изменит свои очертания, как иллюстрирует рис. 1.4.

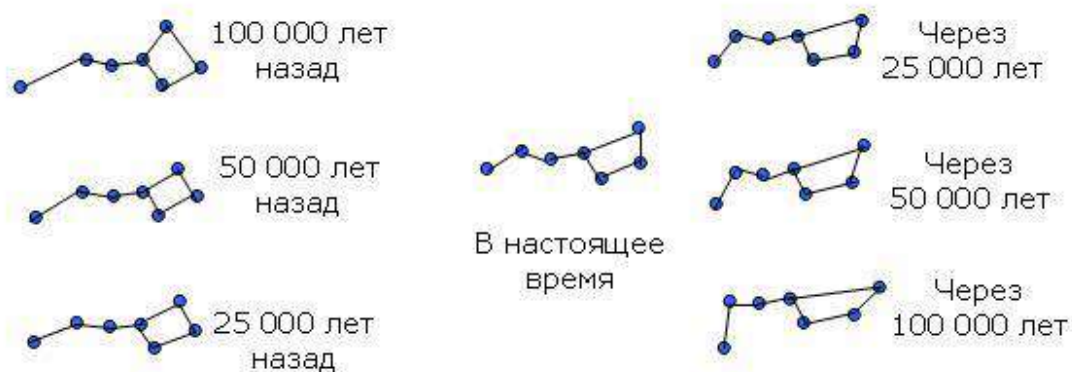


Рисунок 1.4. Изменение контура ковша Большой Медведицы

1.3 Небесная сфера и ее основные элементы

Даже невнимательный наблюдатель заметит, что небесные объекты перемещаются по небу: Солнце восходит, движется (при этом высота, на которую поднимается Солнце, зависит от даты наблюдения на данной широте), заходит ежедневно. Луна перемещается на фоне звёзд по своей траектории. И даже звёздное небо меняет свой вид: одни созвездия можно наблюдать зимой (например, Орион), а летом в то же самое время мы не сможем их увидеть. Часть таких «небесных» перемещений мы видим в течение суток, часть становятся заметными при довольно длительных – в течение недель и месяцев – наблюдений.

Если мы проследим путь звезды на небе в течение суток, то мы увидим, что звезда восходит в восточной части горизонта, поднимается до определённого максимального положения над горизонтом (*кульминирует*) и заходит в западной части горизонта, описывая на небе дугу. При этом у каждой звезды наблюдается свой путь, но создаётся впечатление, что всё небо с находящимися на нём звёздами медленно вращается вокруг некоторой оси.

Если продолжать наблюдения от ночи к ночи в одно и то же время, то вы заметите, что те созвездия, которые вы видели восходящими неделю назад, в настоящее время уже находятся над горизонтом. Звёзды также встают в восточной части неба и заходят в западной, но моменты восхода и захода ежедневно происходят почти на 4 минуты раньше, чем в предыдущий день.

Солнце и Луна также перемещаются по небу в течение суток, двигаясь с востока на запад, поднимаясь на максимальную высоту над горизонтом. Точки восхода и захода этих светил изменяют своё положение в течение года, и лишь дважды в год Солнце восходит и заходит точно в точках востока и запада. Меняется и время восхода и захода. Кроме того, Луна меняет свой внешний вид – от невидимой Луны до полной и обратно чуть более, чем за 4 недели.

Ещё в древности люди обратили внимание на пять звёздоподобных небесных объектов, которые меняли свою яркость, а также двигались на фоне звёзд подобно Солнцу и Луне, но, в отличие от них, то с запада на восток, то с востока на запад, описывая сложные петлеобразные пути. Эти объекты называли **планетами**, что означало блуждающие (звёзды). Имена планетам дали римляне в честь своих богов: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн. Позже, с помощью телескопа, были открыты другие планеты, которым также присвоили имена древнеримских богов: Уран и Нептун.

Таким образом, вид неба и положения светил на нём меняются как в течение суток, так и в течение года. Причина этого видимого движения светил – суточное вращение Земли вокруг своей оси и обращение Земли вокруг Солнца в течение года.

У древних народов звездное небо ассоциировалось с куполом, или со сферой. Действительно, при взгляде на небо создаётся впечатление, что Солнце, звезды, Луна и другие небесные тела расположены на внутренней поверхности гигантской небесной сферы, вращающейся в направлении с востока на запад. Поэтому для описания положений небесных тел на небе и было введено понятие **небесной сферы**.

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в точке наблюдения, на которую проецируются космические объекты. Проекции космических объектов на небесную сферу называют **светилами**. Небесная сфера используется в астрономии для описания взаимных положений светил на небосклоне.

Прямая линия, которая совпадает в данной точке с направлением действия силы тяжести, называется **отвесной линией**. Направление

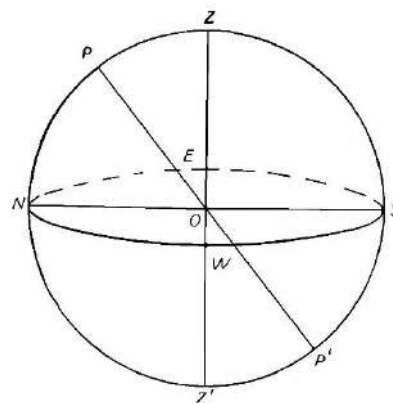


Рисунок 1.5. Схематическое изображение небесной сферы

отвесной линии можно определить с помощью простейшего отвеса – грузика на тонкой нити. Отвесная линия пересекает небесную сферу в двух точках: верхняя (над головой наблюдателя) Z называется **зенитом**, нижняя Z' – **надиром** (рис. 1.5).

Небесная сфера вращается вокруг воображаемой линии, PP' , называемой **осью мира**. Точки пересечения небесной сферы и оси мира называют **северным P** и **южным P' полюсами мира**. Северным полюсом мира считают тот, при наблюдении с которого вращение небесной сферы происходит по часовой стрелке, если смотреть на сферу извне. Ось мира параллельна оси вращения Земли.

Северный полюс мира в настоящее время находится на расстоянии менее 1° от Полярной звезды (α Малой Медведицы). Человек, находящийся в северном полушарии Земли, при достаточно длительном наблюдении за звёздным небом увидит, что звёзды совершают круговое движение вокруг Полярной звезды, которая остаётся практически неподвижной. Это вращение происходит против часовой стрелки и является отражением вращения Земли, а потому его называют **кажущимся**.

Ось вращения Земли вследствие гравитационного воздействия Солнца и Луны периодически изменяет направление в пространстве и испытывает колебания. Очень медленное движение оси вращения Земли, которая для поддержания постоянного наклона по отношению к плоскости эклиптики меняет свое направление в пространстве, описывая при этом коническую поверхность, называется **прецессией**. В результате прецессии земная ось описывает в пространстве конус. Период прецессии составляет примерно 26 000 лет (Рис. 1.6).

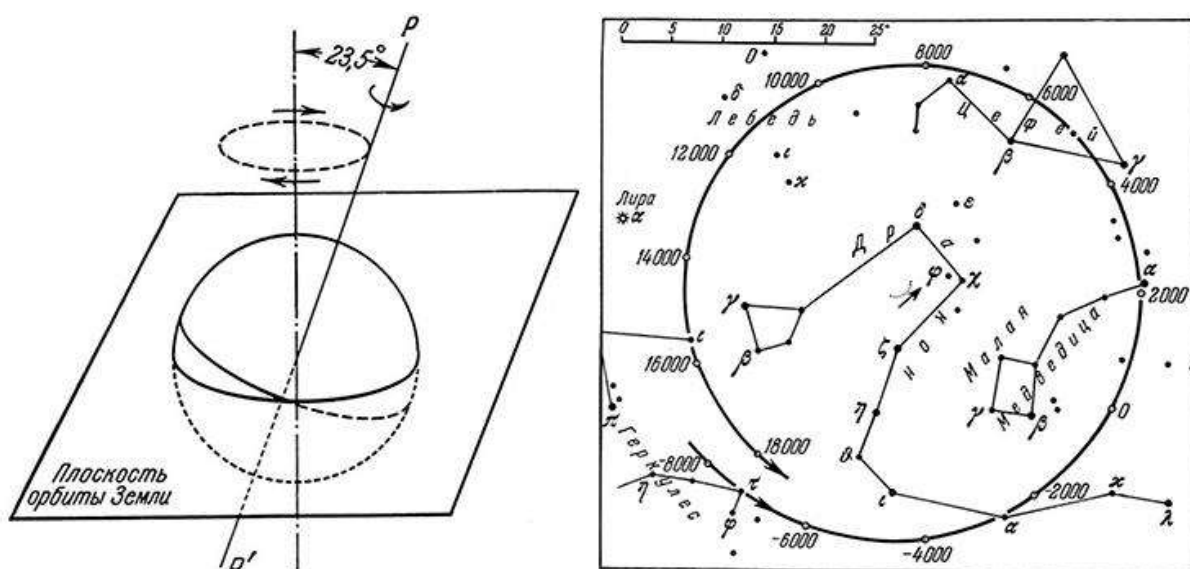


Рисунок 1.6 Прецессия и нутации земной оси

Нутации – это небольшие колебания земной оси, которые накладываются на прецессию. Наиболее вероятное объяснение нутации – гравитационное действие Луны. Из-за наличия нутации движение земной оси происходит по двойной “волнистой” конической поверхности (Рис. 1.6).

Для определения основных элементов небесной сферы в астрономии используют понятие большого и малого кругов. **Большой круг** образуется при пересечении сферы плоскостью, проходящей через её центр, то есть диаметр большого круга равен диаметру сферы. Если плоскость не проходит через центр, то получается **малый круг**.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется **небесным экватором** (Рис. 1.7). По аналогии с моделью Земли (глобусом) в астрономии используют небесные меридианы и параллели. Параллели – это линии, условно проведённые по поверхности небесной сферы параллельно небесному экватору. По форме параллели – это окружности, радиус которых уменьшается к полюсам. Таким образом, параллели – это малые круги небесной сферы.

Небесным меридианом называется большой круг небесной сферы, проходящий через зенит Z , надир Z' и полюсы мира P и P' (Рис. 1.7).

На небесной сфере проведём диаметр, перпендикулярный отвесной линии, и построим на нём большой круг. Построенный таким образом большой круг называется **математическим** (истинным) **горизонтом**. Математический горизонт пересекается с небесным меридианом в точках севера N (находится ближе к северному полюсу мира) и юга S , а с небесным экватором – в точках востока E и запада W (Рис. 1.7).

Математический горизонт делит небесную сферу на видимое и невидимое полушария, небесный экватор делит её соответственно на Северное и Южное полушария.

Солнце перемещается по небесной сфере как в течение суток, так и в течение года, изменяя свое положение среди звезд. В действительности видимое движение Солнца есть не что иное, как отражение движения Земли вокруг Солнца. Плоскость земной орбиты называют **плоскостью эклиптики**. Тогда на небесной сфере большой круг, по которому перемещается центр солнечного диска в течение года (видимое движение Солнца), называется **эклиптикой** (Рис. 1.8).

Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках: **точке весеннего равноденствия**, в которой Солнце переходит из южного полуша-

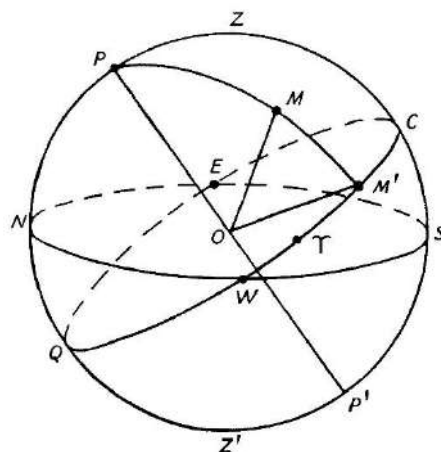


Рисунок 1.7 Небесная сфера и её основные элементы

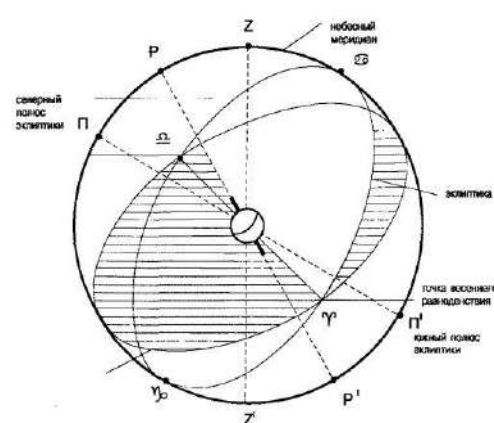


Рисунок 1.8 Положение эклиптики на небесной сфере

рия неба в северное, и в противоположной его точке – **точке осеннего равноденствия**. Принято обозначать эти точки знаками Овна Υ для весеннего и Весов $\ Libra$ для осенних равноденствий. Эти обозначения пришли к нам из античности: в то время точка весеннего равноденствия находилась в созвездии Овна, а осеннего – в созвездии Весов. Причиной смещения точек весеннего и осеннего равноденствия является **прецессия**. В настоящее время точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыб, точка осеннего равноденствия – в созвездии Девы.

1.4 Системы небесных координат

Для определения системы координат необходимо задать её начало, направления осей и выделить её основную плоскость. В древности наиболее используемой была эклиптическая система координат, в которой плоскость эклиптики является основной. Такой выбор обусловлен тем, что изучались, в основном, движения Солнца и Луны, планет, которые располагаются вблизи эклиптики. В средние века, когда появились астрономические инструменты с экваториальной установкой, стала использоваться экваториальная система координат, которая задается плоскостью небесного экватора и точкой весеннего равноденствия. Несколько позже стали использоваться горизонтальная и галактическая системы координат, основными плоскостями которых являются плоскость математического горизонта и плоскость экватора Галактики. Все вышеуказанные системы координат являются сферическими.

Рассмотрим подробнее две системы небесных координат.

Горизонтальная система координат определяет положение светил по отношению к горизонту, т.е. основной плоскостью этой системы координат является плоскость математического горизонта. Плоскость, проходящая через точки зенита Z и надира Z' пересекает небесную сферу по окружности, называемой **вертикальным кругом** (или **кругом высоты**). Вертикальный круг, проходящий через светило C , называется **вертикалом** этого светила.

Координатами в этой системе являются: (1) **высота h** светила над горизонтом или **зенитное расстояние z** светила; (2) **азимут A** .

Дуга вертикала BC называется **высотой h** светила над горизонтом. Дуга вертикала ZC называется **зенитным расстоянием z** светила C . Из рис. 2.5 видно, что $z + h = 90^\circ$.

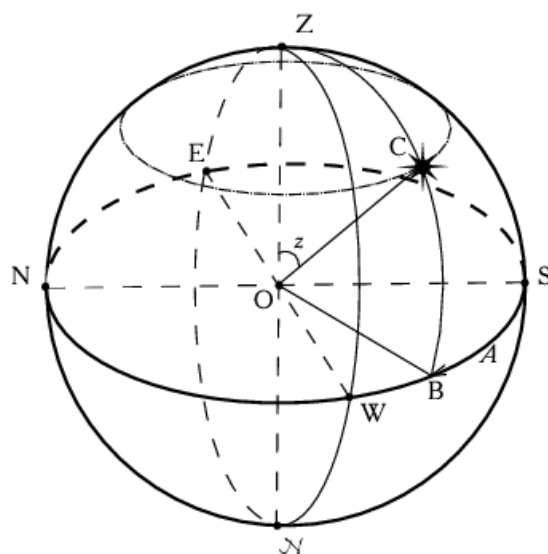


Рисунок 1.9. горизонтальная система координат

Если светило находится над горизонтом, то его зенитное расстояние изменяется от 0° (объект в зените) до 90° (объект в плоскости горизонта). Соответственно, если объект находится в зените, его высота равна 90° ; если объект – в плоскости горизонта, $h = 0^\circ$.

Если $h < 0^\circ$, или $z > 90^\circ$, то говорят, что светило находится под горизонтом, и в этом случае оно невидимо для наблюдателя.

Азимут A называют двугранный угол между плоскостью небесного меридиана и вертикалом светила. Азимут отсчитывается от точки юга в направлении на запад (по часовой стрелке) от 0° до 360° .

Вследствие суточного вращения небесной сферы горизонтальные координаты h (или z) и A непрерывно меняются, так как они отсчитываются от неподвижных точек небесной сферы, не участвующих во вращении.

Горизонтальная система координат используется для определения направления на светило относительно наблюдателя на Земле, для проведения наблюдений с телескопом на азимутальной монтировке.

Теорема о высоте полюса мира над горизонтом: высота h_p северного полюса мира над горизонтом равна географической широте φ места наблюдения.

Экваториальные системы координат (первая и вторая) связаны с направлением оси вращения Земли. В них центр небесной сферы совпадает с центром масс Земли. Координаты звезд в экваториальной системе определяются аналогично широте и долготе на поверхности Земли, если рассматривать небесную сферу снаружи. Обратите внимание, что при взгляде на небесную сферу снаружи расположение звезд зеркально отличается от того, что видит наблюдатель с поверхности Земли.

Основной плоскостью является плоскость небесного экватора. Большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и через светило S , называется **кругом склонения** светила.

Одна координата (аналогичная широте на Земле) – **склонение** светила δ , определяется углом между плоскостью небесного экватора и светилом. Если светило находится в северном полушарии, склонение δ положительно. Для светил южного полушария склонение δ отрицательно.

Склонение является общей координатой для первой и второй экваториальных систем. Вторые координаты отличаются выбором точки отсчёта.

Первая экваториальная система координат использует следующие координаты: (1) **склонение** δ и (2) **часовой угол** t .

Часовой угол t светила – это угол между плоскостью небесного меридиана и направлением на светило, отсчитываемый в сторону суточного вращения неба; выражается в градусах или в часах и минутах.

Во **второй экваториальной системе координат** одной координатой является **склонение** δ , второй – **прямое восхождение** α .

Прямое восхождение α определяется как дуга небесного экватора, отсчитываемая от точки весеннего равноденствия Υ до круга склонения,

проходящего через светило. Прямое восхождение отсчитывается в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы, и выражается в единицах времени: 1 час (1^h) соответствует 15° , 1 минута (1^m) – $15'$, 1 секунда (1^s) – $15''$.

Так как точки экватора, от которых отсчитываются экваториальные координаты светил, жёстко связаны с небесной сферой, экваториальные координаты не изменяются вследствие вращения небесной сферы и одинаковы для любого наблюдателя на Земле.

Первая экваториальная система координат (склонение δ и часовой угол t) преимущественно используется при определении точного времени, а также при проведении наблюдений на телескопах с экваториальной монтировкой. Вторая экваториальная система координат (склонение δ и прямое восхождение α) является общепринятой в астрометрии. Эта система используется при составлении звездных карт, каталогов положений небесных объектов.

1.5 Шкала электромагнитных волн

Наша родная планета удалена от других астрономических тел, и поэтому мы не можем изучать их непосредственно: мы не можем измерить термометром температуру Солнца или других звёзд, мы не можем измерить с помощью измерительных инструментов расстояния до звёзд и т.п. Астрономы изучают космические тела, анализируя свет и другие виды электромагнитного излучения, приходящие на Землю от этих тел.

Свет – сложное физическое явление, имеющее двойственную природу. В широком смысле понятие «свет» используют для названия любого электромагнитного излучения. Двойственность природы света проявляется в том, что его можно рассматривать и как поток отдельных частиц – **фотонов** (квантов света), и как волну.

Электромагнитные волны распространяются в вакууме с постоянной скоростью c – скоростью света: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Характеристиками волны являются частота ν или длина волны λ , зависимость между которыми выражается простой формулой: $\nu \cdot \lambda = c$.

Частицы света – фотоны – обладают энергией, импульсом, собственным моментом импульса и нулевой массой покоя. Энергия фотона E пропорциональна частоте излучения: $E = h \cdot \nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

С помощью специального оборудования электромагнитное излучение можно разложить на составляющие его электромагнитные колебания разных длин волн. Результат этого разложения называется **спектром**. Так, радуга является примером естественного разложения света Солнца в спектр.

Видимое излучение – всего лишь узкая часть спектра электромагнитных волн: от 0,4 мкм до 0,7 мкм. Цвет видимого излучения определяет

ся его длиной волны (или частотой). Непрерывная последовательность длин волн (или частот) электромагнитных излучений, характеризующихся распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, называется **шкалой электромагнитных волн** (Рис. 1.10).

До начала 20 века основным методом наблюдений в астрономии были оптические наблюдения. В настоящее время астрономам доступны наблюдения во всех длинах волн излучения (Таблица 1.1). Развитие наблюдательной техники (как инструментов, так и методов) позволяют астрономам «увидеть» такие важные с точки зрения астрономии явления как формирование звёзд и планетных систем, то, что остаётся после смерти звёзд, а также чёрные дыры по их косвенным проявлениям.

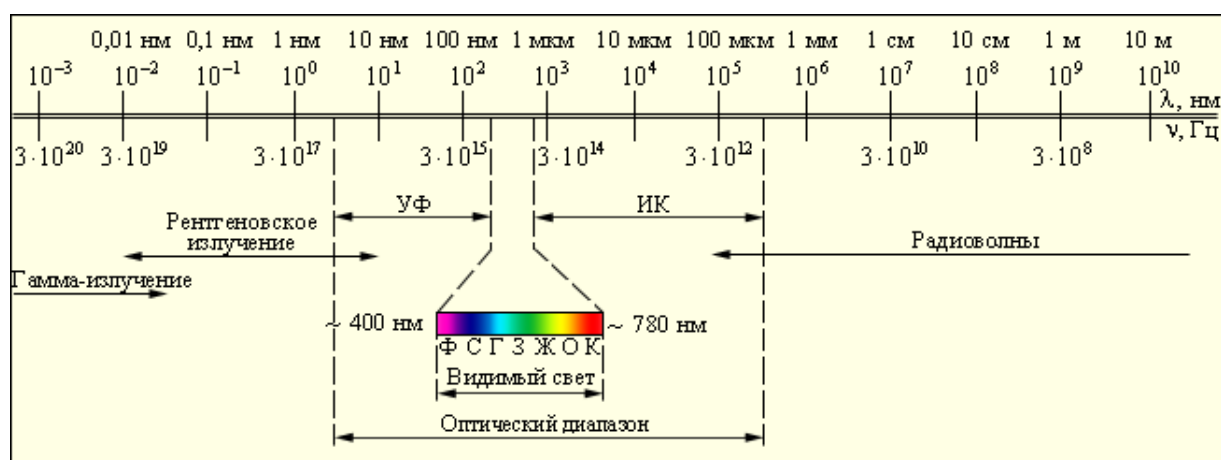


Рисунок 1.10 Шкала электромагнитных волн

Таким образом, астрономы получают информацию о космических объектах, изучая

- «свет» – электромагнитное излучение;
- спектры – весь диапазон длин волн электромагнитного излучения: от гамма-излучения до радиоволн.

Соответственно, используются два метода анализа приходящего от небесных объектов излучения: **фотометрия** и **спектроскопия**.

Фотометрия рассматривает энергетические характеристики оптического излучения, испускаемого источниками, распространяющегося в различных средах и взаимодействующего с другими объектами. Применительно к астрономии эту технику исследования излучения называют **астрофотометрией**. Фотометрические измерения в совокупности с физическими законами позволяют определить расстояния до звёзд и галактик, их светимость, размеры и т.п.

Спектроскопия – это детальное изучение электромагнитного излучения. Используя специальную технику, астрономы посредством анализа спектров небесных объектов могут определить многие их свойства: химический состав, температуру, плотность, массу, светимость и т.п.

Таблица 1.1 Электромагнитный спектр, исследуемый в астрофизике

Область спектра	Длины волн	Прохождение сквозь земную атмосферу	Методы исследования	Приемники излучения
Гамма-излучение	$\leq 0,01$ нм	Сильное поглощение O, N ₂ , O ₂ , O ₃ и другими молекулами воздуха	В основном, внеатмосферные (космические ракеты, искусственные спутники).	Счетчики фотонов, ионизационные камеры, фотоэмульсии, люминофоры
Рентгеновское излучение	0,01-10 нм	Сильное поглощение O, N ₂ , O ₂ , O ₃ и другими молекулами воздуха	В основном, внеатмосферные (космические ракеты, искусственные спутники).	Счетчики фотонов, ионизационные камеры, фотоэмульсии, люминофоры
Далекий ультрафиолет	10-310 нм	Сильное поглощение O, N ₂ , O ₂ , O ₃ и другими молекулами воздуха	Внеатмосферные	Фотоэлектронные умножители, фотоэмульсии
Близкий ультрафиолет	310-390 нм	Слабое поглощение	С поверхности Земли	Фотоэлектронные умножители, фотоэмульсии
Видимое излучение	390-760 нм	Слабое поглощение	С поверхности Земли	Глаз, фотоэмульсии, фотокатоды, полупроводниковые приборы
Инфракрасное излучение	0,76 – 15 мкм	Частые полосы поглощения H ₂ O, CO ₂ и другими	Частично с поверхности Земли	Болометры, термпары, фотосопротивления, специальные фотокатоды и фотоэмульсии
Инфракрасное излучение	15 мкм – 1 мм	Сильное молекулярное поглощение	С аэростатов	Болометры, термпары, фотосопротивления, специальные фотокатоды и фотоэмульсии
Радиоволны	> 1 мм	Пропускается излучение с длиной волны около 1 мм, 4,5 мм, 8 мм и от 1	С поверхности Земли	Радиотелескопы

		см до 20 м		
--	--	------------	--	--

1.6 Спектральный анализ видимого света

Зрение человека устроено таким образом, что мы видим мир в цвете. Первой наукой, которая занималась выяснением сущности цвета, была физика. Цвет не только сложное для нашего понимания явление, он сложен и по своему составу. Белый цвет можно разложить на составляющие цвета, а, собрав их воедино, снова получить первоначальный белый цвет. Это открытие сделал три века назад английский физик Исаак Ньютон, и с этого началась наука о цвете. Совокупность составляющих цветов Ньютон назвал **спектром**, что в переводе с латыни означает «видимое».

Благодаря изучению спектров, полученных от небесных объектов, ученым удастся заглянуть в глубины космоса, мир планет, звезд и огромных звездных систем – галактик. Спектральный анализ является важнейшим средством для исследования Вселенной. Спектральный анализ является методом, с помощью которого определяется химический состав небесных тел, их температура, размеры, строение, расстояние до них и скорость их движения. Спектральный анализ проводится с использованием приборов **спектрографа** и **спектроскопа**.

С помощью спектрального анализа определили химический состав звёзд, комет, галактик и тел солнечной системы, т.к. в спектре каждая линия или их совокупность характерна для какого-нибудь элемента. По интенсивности спектра можно определить температуру звёзд и других тел.

В 1859 г. Густав Роберт Кирхгоф сформулировал основные законы спектрального анализа:

1. Накалённое твёрдое тело, сильно нагретая жидкость (а при достаточно большом давлении и раскаленный газ) излучают непрерывный спектр.

2. Нагретый газ при низком давлении излучает спектр, состоящий из отдельных ярких линий испускания (или эмиссионных линий).

3. Газ, помещённый перед более горячим источником непрерывного излучения, создаёт в спектре источника тёмные линии (линии поглощения), которые приходятся в точности на те же самые длины волн, что и линии излучения этого газа.

Исследуя спектры различных химических элементов, можно определить положения их спектральных линий. Зная положение линий, можно найти их в спектре Солнца и других звёзд и тем самым выявить их химический состав. Исследования спектров Солнца и звёзд установили принципиальное единство химического состава звёзд и Земли.

Триумф спектрального анализа – обнаружение на Солнце неизвестного в то время химического элемента гелия. Лишь позже он был обнаружен на Земле.

Для исследования спектров звезд используется *спектрограф* – прибор, позволяющий снимать спектр на фотоплёнку или записывать его с помощью различных фотоэлектрических приборов. Спектры излучения ярких звёзд определяют индивидуально. Для получения спектров слабых источников применяют объективную призму – тонкую стеклянную призму, размещаемую перед объективом телескопа. При этом на фотоплёнку попадают сразу изображения многих звёзд. Такие звёздные радуги для многих целей, например, предварительной спектральной классификации звёзд, пригодны. Зарегистрированные спектры небесных светил обязательно добавляются спектрами сравнения, полученными от источников, для которых положения спектральных линий точно известны. Сравнение спектров земных и небесных источников позволяет выявить даже небольшие изменения положений и форм спектральных линий.

То богатство материала наблюдений, которое позволяют получить современные приемники излучения видимого диапазона, обеспечивает работой астрономов на много десятилетий вперед.

1.8 Телескопы

Впервые астрономические наблюдения с помощью телескопа-рефрактора провел итальянский ученый Галилео Галилей (1564-1642). В 1609 году он сконструировал зрительную трубу из свинца с двумя стеклянными линзами и впервые применил этот прибор для наблюдения за небесными объектами. В течение долгого времени телескоп оставался оптическим инструментом, регистрирующим свет от небесных источников. Современные телескопы способны принимать излучения во всех длинах волн электромагнитного излучения – от гамма-излучения до радиоволн.

Конструкция и размеры телескопов зависят от конкретных задач исследования, в первую очередь, от вида исследуемого объекта. И хотя многие современные приёмники излучения мало похожи на своих прародителей (как, например, нейтринный телескоп), их по-прежнему называют телескопами, добавляя к этому слову характеристику по виду регистрируемого излучения: оптические, инфракрасные, ультрафиолетовые, радиотелескопы...

Но при все эти разнообразные телескопы решают две основные задачи:

- 1) собрать как можно больше энергии излучения данного вида от объекта наблюдения;
- 2) создать возможно резкое изображение объекта, позволяющее выделять излучение от его отдельных деталей и измерять расстояние между ними.

Важнейшими элементами любого телескопа являются:

- 1) объектив, собирающий излучение и создающий изображение;
- 2) приёмник излучения (глаз, фотопластинка, фотоэлектрический приёмник излучения, ПЗС-матрица, и т.п.).

Современные астрономические телескопы – это очень сложные, высокоточные, дорогие измерительные инструменты, оснащённые разнообразным оборудованием для управления работой телескопа, регистрации и анализа излучения.

Оптические телескопы предназначены для регистрации видимого излучения. Принцип работы такого телескопа основан на свойстве выпуклой линзы или вогнутого зеркала, используемых в качестве **объектива**, собирать в точку, называемую **фокусом**, параллельные лучи света, приходящие от далёких источников, и создавать резкое **изображение** этих источников в **фокальной плоскости**. Изображение в фокальной плоскости можно рассматривать с помощью специальной линзы – **окуляра**, фотографировать, разлагать в спектр или изучать каким-либо другим способом.

Телескопы, у которых в качестве объектива используется линза или система линз, называют **рефракторами**. Если в качестве объектива используется зеркало, телескоп называют **рефлектором**.

Диаметр объектива является самым важным параметром телескопа: чем больше его площадь, тем больше света попадает в телескоп, следовательно, тем более слабые объекты будут доступны наблюдениям. Все основные характеристики телескопов (и не только оптических) зависят от характеристик объектива.

1. Проницающая сила телескопа

Проницающая сила телескопа определяется предельной звёздной величиной самой слабой звезды, которую можно наблюдать. На основе теоретических расчётов была выведена формула: $m = 6 + 5 \cdot \lg\left(\frac{D}{d}\right)$, где D – диаметр объектива, d – «выходное отверстие» окуляра. Но астрономы используют эмпирическую формулу, учитывающую реальные условия наблюдений:

$$m = 2,1 + 5 \lg D.$$

2. Угловое разрешение (разрешающая способность) β

Качество изображения в телескопах характеризуется его **угловым разрешением**, которое определяется как минимальное угловое расстояние β между двумя звёздами, при котором их изображения не сливаются в одно. Разрешение телескопа тем лучше, чем выше качество его объектива и чем спокойнее земная атмосфера.

Разрешающая способность человеческого глаза в среднем 2-3 угловые минуты. Современные технологии изготовления больших объективов для телескопов позволяют добиться разрешения, превышающего разрешение человеческого глаза в сотни раз. Но атмосфера Земли неоднородна, поэтому при наземных наблюдениях изображения размываются, и реальное разрешение

оказывается меньше теоретически возможного.

Разрешение объектива ограничивается также самой волновой природой света. Обусловленное этим **теоретическое разрешение** β_0 находится как отношение длины волны излучения к диаметру объектива телескопа: $\beta_0 \approx \frac{\lambda}{D}$.

3. Светосила телескопа Φ

Светосила телескопа определяется как $\Phi = (D/F)^2$ и характеризует освещённость, создаваемую объективом в фокальной плоскости. Чем меньше это отношение, тем лучше телескоп подходит для наблюдения галактик и туманностей.

4. Угловое увеличение G

Изображения, формируемые объективом, можно рассматривать глазом (визуально) с помощью *окуляра*. В этом случае отношение фокусного расстояния F объектива к фокусному расстоянию f окуляра называется **угловым увеличением** телескопа: $G = \frac{F}{f}$. Это увеличение может быть также выражено через отношение диаметров входного и выходного зрачков телескопа: $G = \frac{D}{d}$.

Меняя окуляры, можно с одним и тем же телескопом получить различные увеличения. В настоящее время с научной целью визуальные наблюдения практически не производятся.

Основная задача **приёмника** излучения – преобразование электромагнитной энергии света в другие формы (например, в механическую, электрическую или тепловую), которые могут быть измерены лабораторными физическими методами, и на этой основе можно делать выводы о характеристиках принимаемого телескопом светового сигнала. В разное время в астрономии для регистрации излучения использовались: фотопластинки, фотоэмульсии, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи (ЭОП). Современные приёмники излучения – приборы с зарядовой связью (ПЗС), обладают компактными размерами: самые большие из них не превосходят по размеру почтовую марку. Их чувствительность близка к абсолютному пределу, поставленному природой: хорошие ПЗС могут регистрировать «поштучно» большую часть падающих на них квантов света.

Разрешение телескопа можно улучшить, используя интерференцию света. Если два телескопа с расстоянием между ними L наблюдают один и тот же объект – источник излучения, то зарегистрированные ими электромагнитные излучения можно «сложить», так как излучение источника будет когерентным. В результате получают изображение наблюдаемого объекта, эквивалентное создаваемому объективом диаметром L . Такая система телескопов называется **интерферометром**, L – база интерферометра. Основной сложностью создания интерферометров является обеспечение выравнивания оптических путей излучения.

Проверь себя (задания для самопроверки)

I. Укажите верный, на Ваш взгляд, ответ для каждого вопроса.

1. Созвездие – это

- 1.1. группа звезд, образующая фигуру, хорошо запоминающуюся своими контурами;
- 1.2. строго определенный участок неба со звездами, расположенными в нем;
- 1.3. группа звезд, расположенных приблизительно на одном расстоянии от наблюдателя и образующая фигуру, хорошо запоминающуюся своими контурами;
- 1.4. группа близкорасположенных друг к другу на небесной сфере звезд.
- 1.5. среди ответов 1.1. – 1.4. нет правильного.

2. Звезды в созвездиях:

- 2.1. все имеют собственные имена;
- 2.2. обозначаются соответствующим номером в порядке убывания их видимой яркости;
- 2.3. обозначаются латинскими буквами, затем соответствующим номером в порядке убывания их видимой яркости;
- 2.4. обозначаются буквами греческого алфавита, затем буквами латинского алфавита, затем соответствующим номером в порядке убывания их видимой яркости;
- 2.5. среди ответов 1.1. – 1.4. нет правильного.

3. Звезды принадлежат одному созвездию, если они:

- 3.1. расположены в строго определенном участке неба;
- 3.2. образуют фигуру, хорошо запоминающуюся своими контурами;
- 3.3. расположены приблизительно на одном расстоянии от наблюдателя и образуют фигуру, хорошо запоминающуюся своими контурами;
- 3.4. образуют группу близкорасположенных друг к другу на небесной сфере звезд;
- 3.5. среди ответов 1.1. – 1.4. нет правильного.

4. Астрономическая единица – это

- 4.1. среднее расстояние от Земли до Солнца;
- 4.2. радиус Галактики;
- 4.3. среднее расстояние от Луны до Земли;
- 4.4. радиус Солнечной системы;
- 4.5. среднее расстояние от Юпитера до Солнца.

5. Небесная сфера – это

- 5.1. воображаемая сфера, радиус которой равен радиусу Вселенной, а центр совпадает с центром Земли;
- 5.2. воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой совпадает с центром Земли;
- 5.3. воображаемая сфера определенного радиуса с центром в точке наблюдения;

5.4. воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в точке наблюдения.

6. *Какие из областей спектров излучения космических тел недоступны для наблюдения с Земли?*

6.1. гамма-излучение;

6.2. далекий ультрафиолет;

6.3. радиоволны;

6.4. близкий ультрафиолет;

6.5. рентгеновское излучение.

7. *Какие характеристики определяют качество оптического телескопа?*

7.1. площадь объектива;

7.2. светосила телескопа;

7.3. поле зрения;

7.4. угловое разрешение;

7.5. фокусное расстояние объектива.

8. *Укажите отличия радиотелескопов от оптических телескопов:*

8.1. угловое разрешение радиотелескопа хуже, чем у оптического телескопа;

8.2. изготовление зеркал не требует большой точности;

8.3. угловое разрешение оптического телескопа хуже, чем у радиотелескопа;

8.4. можно проводить наблюдения в течение суток;

8.5. можно проводить наблюдения только днем.

II. Правда или ложь. Отметьте правдивые высказывания символом П, неверные высказывания – символом Л.

1. Световой год – единица измерения расстояний.

2. Угловое расстояние между небесными объектами измеряют в парсеках.

3. Астрология – это раздел науки астрономии, изучающий влияние небесных тел на жизнь людей.

4. Современные астрономы могут вести наблюдения во всех длинах волн.

5. Солнце восходит и заходит точно в точках востока и запада.

6. Ось вращения Земли не изменяет своей ориентации в пространстве с течением времени.

7. Исследования спектров Солнца и звёзд установили принципиальные различия химического состава звёзд и Земли

8. Все современные наземные оптические телескопы являются рефракторами.

9. Разрешение телескопа тем лучше, чем спокойнее земная атмосфера.

10. Разрешение телескопа можно улучшить, используя интерференцию света.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. _____ – единица измерения расстояний в астрономии, равная примерно 150 млн км.

2. Основным методом в астрономии является _____.

3. Земля – _____ от Солнца в Солнечной системе.

4. Линия, вдоль которой происходит видимое движение Солнца в течение года, называется _____.
6. Высота h_p северного полюса мира над горизонтом равна _____.
7. Явление пересечения светилом небесного меридиана называется _____.
8. Угловое разрешение всех наземных оптических телескопов ограничено _____ телескопа и _____ исследуемого излучения.
9. Угловое разрешение наземных оптических телескопов гораздо сильнее ограничено _____, чем дифракцией.
10. Система двух или более телескопов, одновременно наблюдающих один и тот же объект, называется _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии Учебное пособие. Изд 2-е, испр. - М.: Едиториал, 2004 г. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М, Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методическое пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

Задания для самостоятельной работы

1. С помощью вычислений обоснуйте, какую единицу измерения расстояний удобнее всего использовать для тел Солнечной системы.
2. Представьте, что на крыше научной библиотеки ЕГУ им. И.А. Бунина установили сверхмощный источник света. До какого из приведенных ниже мест смог распространился свет за 1 минуту: до Москвы (354 км); до Парижа (2550 км); до Кейптауна (примерно 10 000 км); до Луны (384 000 км); до Венеры (45 000 000 км)?
3. Экспедиция отправляется в космическое путешествие. Изменяются ли очертания знакомых нам созвездий, если путешествие происходит в Солнечной системе? Будут ли очертания созвездий такими же, как при наблюдении с Земли, если экспедиция достигнет ближайшей звезды? Каким будет вид звёздного неба, когда экспедиция достигнет центра Галактики? Смогут ли путешественники увидеть известные им созвездия?
4. 1 парсек равен 206265 астрономических единицам. 1 радиан равен 206265". Случайно ли это совпадение? Ответ поясните.

5. Линейный размер звездного скопления равен 1 парсек (. Скопление состоит из солнцеподобных звезд, средняя плотность одной звезды $\rho \approx 1,4 \text{ г/см}^3$, радиус $R \approx 5 \times 10^5 \text{ км}$. Считая скопление шарообразным, оцените количество звезд в нем.
6. Колонисты, осваивающие Марс, решили определить «марсианскую» астрономическую единицу в терминах орбиты Марса. «Марсианский» парсек колонисты определили идентично определению парсека, которым мы пользуемся. Сколько «марсианских» астрономических единиц в «марсианском» парсеке? Сколько «земных» астрономических единиц в «марсианском» парсеке? Сколько «земных» парсеков в «марсианском» парсеке?
7. Назовите естественные небесные объекты, у которых остаются неизменными: (а) прямое восхождение и склонение; (б) азимут и высота.
8. Определите интервал склонений звёзд, которые на широте Ельца ($52^\circ, 6$) (а) никогда не заходят; (б) никогда не восходят; (в) могут восходить и заходить.
9. Какое склонение должна иметь звезда, кульминирующая в Ельце в зените?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Изучите список 88 созвездий. Как Вы считаете, есть ли в этом списке созвездия, имена которым были даны в недавнее время? Поясните, почему названия этих созвездий не являются архаическими с Вашей точки зрения. Где располагаются эти созвездия?
2. В астрономии используют понятия: Вселенная, космос, Метагалактика, мегамир. Дайте определение этим понятиям. Укажите различия между ними.
3. Приведите примеры практического и фундаментального значения астрономии.
4. Общеизвестно, что астрономия стимулировала развитие других наук в прошлом. Характерно ли это явление для современной науки? Приведите примеры.
5. Определите, в каких местах Земли можно наблюдать созвездие Южного Креста, расположенное в пределах южного склонения от -55° до -64° . Жители каких стран могут наблюдать это созвездие?
6. На свету зрачок человеческого глаза сужается до 2 мм, а в полной темноте может расширяться до 6 мм. Как при этом изменятся оптические характеристики глаза? Почему это происходит? Астрономы Древнего Китая, используя только визуальные наблюдения, открыли наличие пятен на Солнце в IV в до н.э. Каковы были размеры этих пятен?
7. Найдите информацию о характеристиках телескопа Чандра (Chandra).
8. Составьте список самых больших телескопов мира, приведите их характеристики. Сравните разрешающую способность современных наземных

телескопов и космических телескопов, работающих в том же диапазоне длин волн. Сделайте вывод.

Проекты (работа в группах)

1. Подготовьте рассказ о полярных созвездиях и созвездиях, которые видны в данное время вечером. Используйте мифы и легенды, образы созвездий из атласа Яна Гевелия. Представьте, что вы рассказываете во время вечерних наблюдений. Для показа созвездий пользуйтесь немymi картами (на которых нанесены только звезды и ничего не подписано). Но вначале вы должны сами уметь находить наиболее известные созвездия на этих картах.
2. Организуйте 2 группы и проведите исследование, как адаптивная (группа 1) и активная (группа 2) оптика позволила улучшить наблюдения с наземных телескопов. Сравните эти два метода. В чём их различия и сходства? Сделайте выводы о разрешающей способности современных наземных телескопов.

Тема 2 Физика Солнечной системы

Краткий обзор теоретического материала

2.1 Видимые движения планет

Планеты, участвуя в общем суточном движении, изменяют своё положение относительно звёзд подобно Солнцу и Луне. Они описывают на фоне звёзд сложные петлеобразные траектории, медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное движение*).

Наблюдая за пятью планетами невооружённым глазом, астрономы установили некоторые закономерности их движений:

- Меркурий удаляется от Солнца не более, чем на 28° , а Венера – не более, чем на 48° .
- Марс, Юпитер и Сатурн могут находиться на любых угловых расстояниях от Солнца, в том числе диаметрально противоположно ему. В эти моменты планеты движутся среди звёзд попятно.
- Длина дуги попятного движения составляет: для Марса 14° , для Юпитера – 10° , для Сатурна – 7° .

Астрономы разделили эти пять планет по условиям их видимости с Земли на *внутренние* (Меркурий и Венера) и *внешние* (Марс, Юпитер, Сатурн). Характерные взаимные положения планет, Солнца и Земли называют *конфигурациями*.

Конфигурации внутренних планет (Рис. 2.1):

- *верхнее соединение* – Земля и планета расположены на одной линии с Солнцем, но по разные стороны от него;

- **нижнее соединение** – Солнце, Земля и планета расположены на одной линии, планета находится между Солнцем и Землёй;
- **элонгация (наибольшее удаление)** – Солнце, Земля и планета образуют прямоугольный треугольник. В зависимости от положения планеты относительно Солнца различают **восточную** и **западную элонгации**. Угол между направлением на Солнце и внутреннюю планету меняется в зависимости от расстояний от Земли до планеты и Солнца. Для Меркурия этот угол лежит в пределах от $17^{\circ}30'$ до $27^{\circ}45'$, для Венеры – от 43° до 48° .

Конфигурации внешних планет (Рис. 2.2):

- **противостояние** – Солнце, Земля и планета расположены на одной линии, планета находится между Солнцем и Землёй (планета «противостоит» Солнцу);
- **соединение** – Земля и планета расположены на одной линии с Солнцем, но по разные стороны от него;
- **элонгация (наибольшее удаление)** – Солнце, Земля и планета образуют прямоугольный треугольник. В зависимости от положения планеты относительно Солнца различают **восточную** и **западную элонгации**. Угол между направлением на Солнце и внутреннюю планету меняется в зависимости от расстояний от Земли до планеты и Солнца. Для Меркурия этот угол лежит в пределах от $17^{\circ}30'$ до $27^{\circ}45'$, для Венеры – от 43° до 48° .



Рисунок 2.1 Конфигурации внутренних планет: 1 – верхнее соединение; 2 – нижнее соединение; 3 – восточная элонгация; 4 – западная элонгация.



Рисунок 2.2 Конфигурации внешних планет.

2.1 Состав и строение Солнечной системы

Солнечная система включает в себя Солнце и небесные тела, кото-

рые движутся вокруг него. Кратко охарактеризуем все составляющие нашей планетной системы.

Центральное тело системы – Солнце, именно оно и дало название всей системе. Солнце – это звезда, самое массивное тело Солнечной системы: в нём сосредоточено 99,866% всей её массы. Именно Солнце определяет происхождение, эволюцию, законы движения всех тел, входящих в Солнечную систему.

Вокруг Солнца обращаются 8 **планет**: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. **Планетой** называется тело, которое движется по орбите вокруг Солнца; обладает достаточной массой для того, чтобы под действием собственной силы гравитации поддерживать гидростатическое равновесие и иметь шарообразную форму; доминирует на своей орбите, т.е. способна расчистить прилегающее пространство от других тел¹.

По физическим характеристикам (плотность, химический состав планет и их атмосфер, размеры) планеты делятся на (1) планеты земной группы и (2) планеты группы Юпитера (другое название – планеты-гиганты). К планетам земной группы относятся Меркурий, Венера, Земля, Марс, расположенные внутри пояса астероидов. Они имеют большую среднюю плотность вещества (от $3,5 \cdot 10^3$ кг/м³ до $5,5 \cdot 10^3$ кг/м³), сравнительно (относительно планет-гигантов) медленное вращение, обладают сходным строением.

Планеты группы Юпитера в десятки и сотни раз массивнее планет земной группы, но при этом их плотности значительно меньше, чем у планет типа Земля. Так, например, плотность Сатурна меньше плотности воды. Планеты-гиганты обладают большей, чем планеты земного типа, скоростью вращения. Анализируя особенности вращения планет-гигантов, учёные пришли к выводу, что они являются газовыми телами: состоят из водорода и гелия с незначительными примесями других элементов. Все планеты-гиганты имеют сильные магнитные поля, окружены кольцами и множеством спутников.

Также вокруг Солнца обращаются **карликовые планеты** – класс объектов, который был выделен Международным астрономическим союзом (МАС) в 2006 году. Согласно определению МАС, **карликовая планета** – тело, которое движется по орбите вокруг Солнца; обладает достаточной массой для того, чтобы под действием собственной силы гравитации поддерживать гидростатическое равновесие и иметь шарообразную форму; вблизи своей орбиты не имеет пространства, свободного от других тел; не является спутником. К карликовым планетам относится Плутон, который до 2006 года считался планетой, Церера (до 2006 года – астероид), Эрида, Хаумеа, Макемаке и другие. Число карликовых планет увеличивается, так

¹ Определение понятия планета принято Международным астрономическим союзом (МАС, англ. IAU) в 2006 году.

как в далёких областях Солнечной системы открывают новые объекты.

Кроме планет и карликовых планет в Солнечной системе имеется множество *малых тел*. К малым телам относят астероиды, кометы, метеороиды (другое название – метеорные тела).

Отдельная группа тел Солнечной системы – спутники планет. На настоящее время их известно более 60. Среди них есть как небольшие по размерам (Фобос и Деймос – спутники Марса), так и сравнимые по размерам с Меркурием. Как известно, форму небесного тела определяет его масса: если масса тела равна или больше 10^{17} кг, то под действием собственной гравитации оно принимает сферическую форму. Например, масса Луны $7,35 \cdot 10^{22}$ кг, масса спутника Марса Фобоса – $1,3 \cdot 10^{16}$ кг; Луна – тело сферической формы, Фобос выглядит как огромный камень.

Солнце удерживает своим тяготением все прочие компоненты Солнечной системы, движение которых описывается законами Кеплера. Между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс астероидов. За орбитой Нептуна, примерно от 30 до 100 а.е., находится дискообразная область, содержащая множество небольших ледяных тел – *пояс Койпера*. Солнечная система окружено гипотетическим *облаком Оорта*, которое имеет сферическую форму и является источником долгопериодических комет. На настоящий момент нет убедительных доказательств существования облака Оорта. Считается, что Солнечная система заканчивается там, где притяжение Солнца перестаёт быть доминирующим и становится сравнимым с притяжением других звёзд. Астрономы оценивают размеры Солнечной системы в пределах 100-300 а.е.

2.2 Планеты земной группы

Самая близкая к Солнцу и очень быстро перемещающаяся по небу планета – Меркурий. Он назван так в честь бога Меркурия (по римской мифологии) – покровителя торговли, путешественников и воров, а также вестника богов.

С Земли Меркурий наблюдать очень сложно вследствие его близости к Солнцу. На небосклоне он отходит от Солнца максимум на 29° и поэтому виден перед восходом Солнца (утренняя видимость), либо после захода (вечерняя видимость) и только вблизи элонгаций (максимальных угловых удалений от Солнца). Из-за значительного наклона орбиты Меркурия к эклиптике ($i = 7^\circ$, одно из самых больших в Солнечной системе) увидеть его можно не всегда даже в эти периоды.

Средняя удаленность Меркурия от Солнца составляет 57,9 млн. км (0,387 а.е.), при этом минимальная — 45,9 млн. км, максимальная — 69,7 млн. км (меняется на 23,8 млн. км). Расстояние до Земли колеблется от 82 до 217 млн. км. Ось Меркурия почти перпендикулярна к плоскости его орбиты, а сама орбита очень вытянута (эксцентриситет $e = 0,206$).

Меркурий — небольшая по размерам планета. Ее масса почти в 20

раз меньше массы Земли и равна $3,3 \cdot 10^{23}$ кг (это составляет 0,055 от массы Земли). Меркурий движется по орбите со средней скоростью 47,9 км/с.

Вследствие приливного воздействия со стороны Солнца Меркурий находится в своеобразной резонансной ловушке. Период его обращения вокруг Солнца (87,95 земных суток) относится к периоду вращения вокруг оси (58,65 земных суток) как 3/2. Три полных оборота вокруг оси Меркурий завершает за 176 суток. За тот же срок планета совершает два оборота вокруг Солнца. В результате этого Меркурий повернут к Солнцу одним полушарием в течение долгих периодов. Поэтому на поверхности Меркурия контраст между ночью и днем сильнее, чем на любой другой планете. Температура противоположного к Солнцу полушария ночью падает до -180° С. Но когда Меркурий подходит к афелию (то есть ближе к «вечеру»), температура может достигать 430° С. Поверхность Меркурия очень похожа на Лунную поверхность.

Данные об атмосфере Меркурия указывают лишь на её сильную разрежённость. Давление у поверхности планеты в 500 миллиардов раз меньше, чем у поверхности Земли (это меньше, чем в современных вакуумных установках на Земле). Меркурий расположен очень близко к Солнцу и захватывает солнечный ветер своим тяготением, поэтому в атмосфере Меркурия присутствует гелий, зарегистрировано наличие водорода. Общее количество атомов и молекул газа в столбе атмосферы Меркурия около $2 \cdot 10^{14}$ над 1 см^2 поверхности. При высоте атмосферы в несколько сотен километров это дает плотность у поверхности около 10^7 частиц в кубическом сантиметре. Кроме того, в спектре атмосферы регистрируются атомы щелочных металлов, которые выделяются нагретыми до высоких температур твёрдыми породами.

Венера из всех планет Солнечной системы по размерам и структуре более всего похожа на Землю. Орбита практически круговая, ее эксцентриситет равен 0,0068 – самый маленький в Солнечной системе. Наклонение орбиты к плоскости эклиптики составляет $3^{\circ}39'$. Венера – самая близкая к Земле планета, расстояние до нее меняется от 40 до 259 миллионов километров. Средняя скорость движения планеты по орбите составляет 35 км/с. Период обращения по орбите равен 224,7 земных суток, а период вращения вокруг оси – 243,02 земных суток. Венера, единственная из планет, вращается в сторону, противоположную своему движению по орбите (если смотреть с северного полюса Венеры, планета вращается по часовой стрелке).

Плотность Венеры равна $5,24 \text{ г/см}^3$. У планеты имеется очень плотная атмосфера: 96,5 % углекислого газа, не более 3 % приходится на долю азота; обнаружены примеси инертных газов (в первую очередь, аргона), обнаружены следы кислорода, воды, хлороводорода и фтороводорода. Освещенность дневной стороны Венеры примерно такая же, как на Земле в пасмурный день, небо имеет яркий желто-зеленый оттенок.

Туманная дымка простирается до высоты около 50 км. Далее до высоты 70 км идут облака из мелких капель концентрированной серной кислоты. Замечены также примеси соляной кислоты и плавиковой кислоты. Считается, что серная кислота в атмосфере Венеры образуется из диоксида серы, источником которого могут быть вулканы Венеры.

Скорость вращения на уровне верхней границы облаков иная, чем над самой поверхностью планеты. Это означает, что над экватором Венеры на высоте 60–70 км постоянно дует ураганный ветер со скоростью 100 м/с и даже 300 м/с в направлении движения планеты. На больших широтах Венеры скорость ветра на больших высотах уменьшается, а возле полюсов существует полярный вихрь.

Самые верхние слои атмосферы Венеры состоят почти целиком из водорода. Водородная атмосфера Венеры простирается до высоты 5500 км. Температура облачных слоев колеблется от -70°C до -40°C .

Высокая температура нижних слоёв атмосферы Венеры объясняется *парниковым эффектом*. Зарегистрированный максимум температур на поверхности планеты $+480^{\circ}\text{C}$!

Марс – первая после Земли планета Солнечной системы, к которой человек проявил особый интерес с надеждой, что там есть развитая внеземная жизнь. Вряд ли какая-нибудь планета вызвала у людей столько споров и дискуссий, как Марс. Спорили не только учёные, но и люди самых различных профессий, занятий и возрастов.

Совершенствовались методы исследований, сменяли друг друга астрономы разных поколений, изменялся и сам характер дискуссий. В XIX веке спорили, главным образом, о каналах на Марсе, о наличии там разумных обитателей – марсиан. Спорили о существовании на Марсе растительности и вообще органической жизни.

Марс обращается вокруг Солнца по орбите радиусом 1,524 а.е. за 687 земных суток. Эксцентриситет 0,093 сравнительно высок, поэтому орбита Марса вытянута. Расстояние до Солнца меняется в течение года на 21 миллион километров, а энергия, которую получает Марс, изменяется в 1,45 раза. Наклонение орбиты к эклиптике – $1^{\circ}51'$, а средняя скорость движения составляет 24,1 км/с. Расстояния от Земли меняются от 56 до 400 миллионов км. Расстояния между Землей и Марсом в моменты противостояний изменяются от 55 до 102 миллионов км, при этом все противостояния, когда расстояние между двумя планетами меньше 60 млн. км, называются великими противостояниями, они повторяются каждые 15–17 лет.

Период вращения вокруг оси – звездные сутки – равен 24,62 часа – всего на 41 минуту больше периода вращения Земли. Наклон экватора к орбите: $25^{\circ}12'$ (у Земли – около 23°). Это значит, что смена дня и ночи и смена времён года на Марсе протекает почти так же, как на Земле. Есть там и климатические пояса, подобные земным. Но есть и отличия. Прежде

всего, из-за удалённости от Солнца климат, вообще, суровее земного. Далее, год Марса почти вдвое длиннее земного, а значит, дольше длятся и сезоны. Наконец, из-за эксцентриситета орбиты длительность и характер сезонов заметно отличаются в северном и южном полушариях планеты. Таким образом, в северном полушарии лето долгое, но прохладное, а зима короткая и мягкая, тогда как в южном полушарии лето короткое, но тёплое, а зима долгая и суровая.

Основная составляющая атмосферы Марса – углекислый газ (95 %), а среднее давление атмосферы на уровне поверхности около 6,1 мбар. Это в 15 000 раз меньше, чем на Венере, и в 160 раз меньше, чем у поверхности Земли. В самых глубоких впадинах давление достигает 12 мбар. Зимой углекислота замерзает, превращаясь в сухой лёд.

Поверхность Марса имеет красноватый цвет из-за больших примесей окислов железа. Лежащие повсюду каменные глыбы – куски вулканических пород, отколовшиеся во время марсотрясений или падения метеоритов. Время от времени попадают кратеры – остатки метеоритных ударов. Кое-где поверхность покрыта многослойными породами, похожими на земные осадочные породы, оставшиеся после отступления моря.

Марс имеет два спутника – Фобос и Деймос. Спутники покрыты кратерами и изрыты бороздами неясного происхождения. Некоторые ученые полагают, что эти спутники – захваченные Марсом астероиды, возможно даже образовавшиеся раньше, чем большие планеты.

2.3 Планеты-гиганты

Юпитер – самая большая планета Солнечной системы. Его масса составляет $\frac{2}{3}$ от суммарной массы планет Солнечной системы, но этого не хватило для того, чтобы в центре Юпитера начались термоядерные реакции: планета в 80 раз легче самой маленькой звезды. Однако Юпитер обладает собственным источником тепла, связанным с радиоактивным распадом вещества и энергией, высвобождающейся в результате сжатия. Если бы он нагревался только Солнцем, температура верхних слоев была бы равной 100 К, тогда как измерения дают результат 140 К. В тепловом режиме Юпитера большую роль играют потоки внутренней энергии из центра планеты. Планета излучает больше энергии, чем получает от Солнца.

Атмосфера Юпитера состоит на 89 % из водорода и на 11 % гелия и напоминает по химическому составу Солнце. Ее протяженность 6 тысяч километров. Оранжевый цвет атмосфере придают соединения фосфора или серы. Для людей она губительна, так как содержит ядовитый аммиак и ацетилен.

Атмосферы Юпитера и других газовых планет характерны ветрами больших скоростей, дующих в пределах широких полос, параллельных экватору планеты, причем в смежных полосах на Юпитере ветра направлены в противоположные стороны. Эти полосы различимы даже в небольшой

телескоп и находятся в постоянном движении. Ветры на Юпитере достигают скорости 500 км/ч. Изучение атмосферы позволило сказать, что ветры эти также существуют в более низких ее слоях, вплоть до тысячи километров от внешних облаков. Отсюда сделан вывод, что они управляются не энергией излучения Солнца, а внутренним теплом планеты, в то время как на Земле все происходит наоборот.

Согласно модели внутреннего строения Юпитера и Сатурна, давление в центре планет настолько велико (примерно 10^{12} Па у Юпитера), что водород переходит в состояние, которое называют металлическим. Такие условия невозможно создать на Земле, поэтому такое состояние вещества можно изучать только теоретически.

Магнитное поле Юпитера огромно, даже в пропорции с величиной самой планеты – оно простирается на 650 миллионов километров (за орбиту Сатурна!).

2.4 Карликовые планеты и малые тела Солнечной системы

Как уже обсуждалось, все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Наклонение орбит к плоскости эклиптики у 8 планет (их часто называют большими планетами) не превышает 7° (наибольший наклон у орбиты Меркурия). Орбита Плутона наклонена к плоскости эклиптики под углом $17,14^\circ$ (Рис. 2.3). Кроме большого наклона, орбита Плутона вытянута сильнее, чем орбиты планет, хотя отличие от Меркурия по этому параметру невелико.

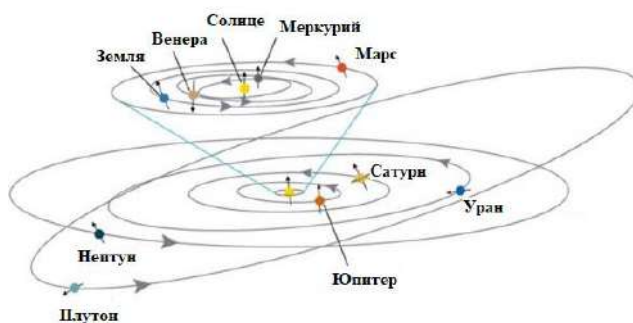


Рисунок 2.3. Орбиты планет Солнечной системы

По физическим характеристикам Плутон отличается и от планет земной группы, и от планет-гигантов. Кроме того, в последние годы было открыто большое количество тел, подобных Плутону, а некоторые превышают его по размерам (Эрида, открыта в 2005 году, находится дальше Плутона). Наконец, благодаря повышению качества наблюдательной техники, было обнаружено, что Плутон и вновь открытые тела, претендующие называться планетами, имеют близких им по массе «соседей» на своей орбите. Так, спутник Плутона Харон имеет радиус 606 км, радиус Плутона – 1188 км.

Учитывая эти причины, Международный астрономический союз (МАС, англ. IAU) в 2006 году определил новый класс объектов: **карликовая планета** – тело, которое движется по орбите вокруг Солнца; обладает достаточной массой для того, чтобы под действием собственной силы гравитации поддерживать гидростатическое равновесие и иметь шарообраз-

ную форму; вблизи своей орбиты не имеет пространства, свободного от других тел; не является спутником. Плутон был «понижен» в карликовые планеты, а астероид Церера – «повышен», и сейчас также относится к карликовым планетам. К 2012 году было известно 5 карликовых планет и более 20 претендентов для включения в эту группу небесных объектов.

Астероиды – малые тела Солнечной системы, значительно меньше планет по массе и размерам, имеют неправильную форму и не имеют атмосферы. Основной метод обнаружения астероидов – фотографический. Эти объекты выглядят как слабые звёзды, но перемещаются на фоне звёзд (отсюда название: астероид – звёздopodobный). У астероидов могут быть спутники. Масса среднего астероида мала, поэтому они не имеют сферической формы, а представляют собой бесформенные образования. Массы астероидов нельзя измерить непосредственно, их вычисляют из соображений, что плотность астероидов мало отличается от плотности крупных метеоритов, упавших на Землю. Размеры астероидов определяют, наблюдая покрытия² ими звёзд.

Астероиды образуют **пояс астероидов**, расположенный между орбитами Марса и Юпитера. Около 40% этих малых тел относится к «семействам» со сходными орбитами. В некоторых семействах один астероид значительно превосходит другие по размерам (Паллада, Веста), но в большинстве случаев все астероиды семейства примерно одинаковы.

Кометы – малые тела Солнечной системы, которые движутся по сильно вытянутым орбитам и резко меняют свой вид по мере приближения к Солнцу. Находясь вдали от Солнца, кометы выглядят как туманные, слабо светящиеся объекты, а с приближением к Солнцу у неё образуется «хвост», направленный в противоположную от Солнца сторону. Название комета происходит от греческого слова *kometes*, которое переводится как длинноволосый.

В Солнечной системе движется множество мелких тел и частиц, потерянных кометами. Космические частицы, которые еще не вошли в атмосферу Земли, называют **метеороидами**. Когда метеороид входит в атмосферу, мы наблюдаем астрономическое явление – **метеор**.

Метеор – это астрономическое явление, вызванное вторжением в атмосферу Земли твёрдых малых по размерам космических тел. Эти тела движутся с большими скоростями (от 11 км/с и выше) в атмосфере Земли, вызывая ионизацию молекул и возбуждение атомов воздуха, что приводит к наблюдаемому яркому метеорному следу. При наблюдении метеоров видно, что все метеоры исходят из одного места (точки) на небе, который называется **радиантом** метеорного потока. Такой вид – это эффект перспективы. Частицы прилетают к Земле издалека, в пространстве они дви-

² Покрытие – это астрономическое явление, заключающееся в наблюдаемом закрывании одного небесного объекта другим.

жуются практически параллельно по направлению к наблюдателю. Подобный эффект мы наблюдаем, глядя на железнодорожные пути или дорогу, уходящую вдаль. Нам кажется, что параллельные рельсы сходятся в одну точку вдали (Рис. 2.4).

Радиянт метеорного потока проецируется в определённое место на небе. Подобно тому, как небесным объектам присваивается «адрес» на небе – созвездие, в котором объект наблюдается, метеорные потоки называют по именам созвездий, в которые проецируются их радианты: Леониды (Лев), Персеиды (Персей) и т.п. Всего в течение года можно наблюдать около 12 метеорных потоков.

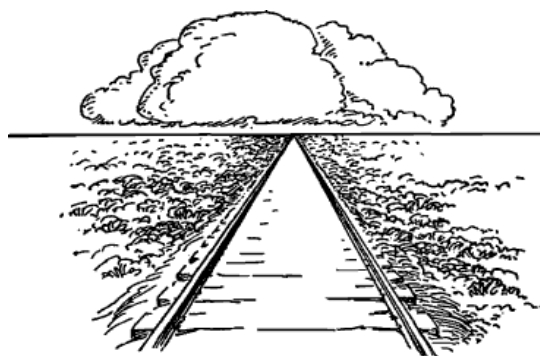


Рисунок 2.4. Эффект перспективы

Очень яркий метеор называют **болидом**. По яркости болид превосходит все наблюдаемые небесные объекты, кроме Луны и Солнца, то есть его звёздная величина -5^m и менее. Это астрономическое явление иногда наблюдается даже днём, часто оставляющий после себя дымный след и сопровождаемый звуковыми явлениями; нередко заканчивается падением **метеорита** – твердого тела естественного происхождения, упавшего на поверхность Земли из космоса.

Проверь себя (задания для самопроверки)

I. Укажите верный, на Ваш взгляд, ответ для каждого вопроса.

1. Расположение планет Солнечной системы в порядке возрастания радиуса их орбит (запишите последовательность соответствующих букв):

- а) Юпитер; б) Плутон; в) Меркурий;
г) Земля; д) Венера; е) Нептун.

2. Характеристики планет земной группы Солнечной системы:

- 2.1. обладают достаточно высокой плотностью (порядка 10^3 кг/м^3);
2.2. наличие колец вокруг планеты;
2.3. обладают мощным магнитным полем;
2.4. светят отраженным от Солнца светом;
2.5. наличие твердой поверхности.

3. Характеристики планет-гигантов Солнечной системы:

- 3.1. обладают достаточно высокой плотностью (порядка 10^3 кг/м^3);
3.2. светят отраженным от Солнца светом;
3.3. обладают мощным магнитным полем;
3.4. отсутствие твердой поверхности;
3.5. наличие колец вокруг планеты.

4. Какова судьба кометы, появление которой в солнечной системе наблюдалось хотя бы один раз?

- 4.1. комета упадет на Солнце;
- 4.2. комета столкнется с планетой Солнечной системы;
- 4.3. комета улетит от Солнца, но через некоторое время снова к нему прилетит;
- 4.4. комета улетит от Солнца и больше никогда к нему не вернется;
- 4.5. комета под действием солнечного притяжения и солнечного излучения разрушится, образуя метеороидный поток.

5. Установите соответствие:

- | | |
|--|--------------|
| 5.1. материальное тело: | а) астероид; |
| 5.2. явление, связанное с пролетом в атмосфере материального тела: | б) метеор; |
| | в) болид; |
| | г) метеорит; |
| | д) комета. |

6. Метеор – это

- 6.1. звезда, падающая на Землю;
- 6.2. явление, которое можно наблюдать в открытом космосе;
- 6.3. упавший на Землю осколок космического тела;
- 6.4. явление в верхних слоях атмосферы, вызванное пролетом и разрушением пылевой частицы;
- 6.5. электрическое явление в атмосфере Земли, похожее на молнию.

7. Средняя плотность планеты Меркурий примерно в 1,5 раза больше, чем средняя плотность Луны, тогда как эти небесные тела имеют почти одинаковые радиусы. Какие выводы о строении и внутреннем составе Меркурия можно сделать на основании этого факта?

- 7.1. Внутренние области Меркурия содержат намного больше железа, чем внутренние области Луны.
- 7.2. Меркурий содержит намного больше каменных пород, чем Луна.
- 7.3. Большая масса Меркурия препятствовала тому, чтобы гравитационные силы сжали его до размеров Луны.
- 7.4. Ядро Меркурия состоит из урана.
- 7.5. У Меркурия есть жидкое водяное ядро.

8. Почему на поверхности Венеры температура выше, чем на поверхности Меркурия?

- 8.1. Венера медленно вращается вокруг оси, поэтому сильнее нагревается Солнцем.
- 8.2. Облака в атмосфере Меркурия отражают солнечный свет назад в космос и сохраняют его поверхность прохладной.
- 8.3. Углекислый газ в атмосфере Венеры улавливает тепло, исходящее от его поверхности, возвращает его на поверхность, таким образом делая её теплее.
- 8.4. Венера ближе к Солнцу, чем Меркурий.
- 8.5. Быстрое вращение Венеры создаёт сильные ветры, которые, дует, нагревают землю трением.

9. Почему нельзя послать космический корабль сесть на поверхность Юпитера?

9.1. У Юпитера нет твёрдой поверхности, на которую можно было бы сесть космическому кораблю.

9.2. Облака Юпитера настолько горячи, что любой космический аппарат сгорел бы в них.

9.3. Сила тяжести на Юпитере столь мала, что космический аппарат не смог бы сесть на поверхность Юпитера и продолжал бы парить.

9.4. Космический аппарат можно послать на Юпитер, и он сядет на его поверхность.

9.5. Юпитер окружён кольцом, сквозь которое космический аппарат не сможет пройти.

10. Сферический рой миллионов или миллиардов отдаленных комет, который окружает Солнечную систему, известен как

10.1. Пояс ван Аллена 10.2. Облако Оорта 10.3. Полость Роша

10.4. Остатки протопланетного облака 10.5. пояс астероидов

II. Правда или ложь. Отметьте правдивые высказывания символом П, неверные высказывания – символом Л.

1. С земли невооружённым глазом можно увидеть все планеты Солнечной системы.

2. На небе Венера не удаляется от Солнца более чем на 48°.

3. Только внешние планеты время от времени движутся среди звёзд попятно.

4. Почти вся масса Солнечной системы сосредоточена в 8 планетах.

Меркурианский день больше меркурианского года.

5. Магнитное поле Венеры такое же, как у Земли.

6. На Марсе находится самый большой вулкан Солнечной системы.

7. Один из спутников Марса больше Луны.

8. Если бы можно было создать гигантский бассейн, наполненный водой, Сатурн плавал бы в нём (не тонул).

9. Большинство астероидов имеют практически круговые орбиты.

10. Кометы являются источниками метеоритных дождей.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. В _____ Земля и внутренняя планета расположены на одной линии с Солнцем, но по разные стороны от него.

2. Меркурий можно наблюдать только сразу после _____ или непосредственно перед _____.

3. _____ – центральное тело Солнечной системы, которое и дало ей название.

4. По физическим характеристикам планеты делятся на планеты _____ и планеты _____.
5. Процесс, в результате которого температура на поверхности Венеры очень высока, называется _____.
6. Множественные кратеры на поверхности Венеры образованы в результате _____.
7. Атмосфера Юпитера состоит из _____ и _____.
8. Пояс астероидов лежит между орбитами _____ и _____.
9. Пояс Койпера – источник _____ комет.
10. Когда метеороид входит в атмосферу Земли, мы видим _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии Учебное пособие. Изд 2-е, испр. - М.: Едиториал, 2004 г. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М, Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Сурдин В.Г. Солнечная система. – М: Физматлит, 2008.
7. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

Задания для самостоятельной работы

1. Полагая, что атмосфера Земли имеет протяжённость 7,5 км с однородной плотностью $1,3 \text{ кг/м}^3$, вычислите массу всей атмосферы. Сравните полученный результат с массой Земли.
2. Полагая, что атмосфера Венеры имеет протяжённость 50 км с однородной плотностью 21 кг/м^3 , вычислите массу всей атмосферы. Сравните полученный результат с массой атмосферы Земли (предыдущее задание) и с массой Венеры.
3. Какова была бы продолжительность солнечного дня на Венере, если бы вращение планеты было прямым, а не ретроградным?
4. Полная масса частиц, образующих кольца Сатурна, составляет приблизительно 10^{15} тонн. Предположим, что частица кольца в среднем имеет радиус 6 см (большой снежок) и плотность 1000 кг/м^3 . Оцените количество частиц в кольцах Сатурна.
5. Вычислите ускорение свободного падения и первую и вторую космические скорости на Марсе.

6. Сколько потребуется пылинке, двигающейся в пылевой буре на Марсе со скоростью 150 км/ч, чтобы облететь Марс по экватору?
7. Объясните разницу между метеороидом, метеором и метеоритом.
8. Астероид Паллада имеет средний диаметр 520 км и массу $3,2 \cdot 10^{20}$ кг. Сколько будет весить на этом астероиде астронавт массой 100 кг? Вычислите первую космическую скорость для этого астероида.
9. Во время звёздного дождя (метеоритного потока) наблюдатели видят все метеоры на участке неба радиусом 250 км. Если они замечают в среднем 20 метеоров ежечасно, то сколько их всего падает на Землю за сутки?
10. Метеор вспыхнул около Веги и потух около Альтаира. Найти длину пути этого метеора в градусах, сняв координаты начала и конца пути по звёздной карте или глобусу. (ВВ, №925)

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Определите дату ближайшего (в будущем) покрытия Солнца Венерой. За сколько дней до и после этого события вы сможете наблюдать планету невооружённым глазом?
2. Сатурн перемещается среди звезд медленнее других видимых планет. На сколько градусов в год он перемещается по своей орбите (считаем орбиту круговой)? Определите (используя астрономический календарь или эфемериды), где планета находится в день выполнения задания (в каком созвездии). Где Сатурн будет находиться через один год?
3. Если бы людей послали на Марс, чтобы жить, какие факторы окружающей среды нужно было бы рассмотреть? Какими ресурсами мог бы Марс обеспечивать колонистов, и что нужно было бы привезти с Земли?
4. Найдите информацию о 6 крупнейших астероидах и занесите данные в таблицу. Есть ли среди этих астероидов такие, орбиты которых пересекают орбиты Земли? Каковы могли бы быть последствия столкновения Земли с крупным астероидом?

Имя	Диаметр	Масса	Период обращения

Проекты (работа в группах)

1. Используя астрономический календарь на текущий год, определите время, когда Марс, Юпитер и Сатурн будут в противостоянии. Охарактеризуйте их видимость на ночном небе в эти моменты. За какое время до противостояния у каждой из этих планет начинается ретроградное движение? Через какое время с момента противостояния оно закончится?
2. Составьте коллективный «портрет» планет земной группы и планет группы Юпитера.

Тема 3 Физика звёзд

Краткий обзор теоретического материала

3.1 Из истории физики звезд

Звезды – огромные пылающие газовые шары, расположенные за пределами земной атмосферы на расстоянии в триллионы километров. Постоянство и непознаваемость звезд наши предки считали неперменными условиями существования мира. Древние египтяне полагали, что, когда люди разгадают природу звезд, наступит конец света. Другие народы связывали конец света с тем моментом, когда созвездие Гончих Псов догонит Большую Медведицу. Жизнь человечества по сравнению с жизнью звезд столь коротка, что мир звезд воспринимается людьми как нечто незыблемое, неизменное. И любые изменения в мире звезд издавна считались предвестниками значительных событий.

Но с течением времени люди стали смотреть на звезды иначе, менее романтично. «Вы проинтегрировали орбиту звезды, о жалкий род исследователей, и звезда перестала быть для вас живым светилом» – так говорил Антуан де Сент-Экзюпери.

Астрономы всегда считали звезды главным населением Вселенной. И хотя внегалактические исследования последних десятилетий убедили нас в существовании гораздо больших масс невидимого и очевидно незвездного вещества, тем не менее, именно звезды и их системы остаются важнейшим предметом астрономических исследований, поскольку играют наиболее динамичную роль на современной космической сцене.

Активное накопление физических данных о звездах началось с того момента, когда в руках у астрономов оказалась фотопластинка (1850г.) и спектроскоп (1860г.), позволившие приступить к созданию «стеклянных библиотек» звездных спектров (1872г.). Оптический телескоп со спектрографом, а позже – компьютер, были и остаются основными инструментами проникновения в недра звезд. Лишь в самом конце 20-го в. к ним добавился нейтринный телескоп.

Теория внутреннего строения и эволюции звезд в основном была создана за 100 лет – с 1870 по 1970 гг.; в эти же годы сформировалась и современная физика, ставшая теоретическим фундаментом науки о звездах. Последние десятилетия 20-го в. были особенно плодотворны для изучения процесса рождения звезд и многообразных финальных стадий звездной эволюции.

Таким образом, за период немногим более двух столетий представление о звездах изменилось кардинально. Из непостижимо далеких и равнодушно светящихся точек на небе они превратились в предмет всестороннего физического исследования. Взгляд ученых на эту проблему выразил Ричард Фейнман: «Поэты утверждают, что наука лишает звезды красо-

ты. Для нее звезды – просто газовые шары. Совсем не просто. Я тоже люблю звезды и чувствую их красоту. Вот только кто из нас видит больше?». Это высказывание можно рассматривать как ответ Сент-Экзюпери.

Итак, что такое звезды, из чего они состоят, как рождаются и умирают, люди начали понимать тогда, когда применили к этим прекрасным, далеким и загадочным объектам физические законы и теории.

Более 250 лет тому назад И. Ньютон создавал на основе астрономических фактов первую научную теорию – классическую физику. Сейчас положение изменилось: на фундаменте новой физики вырастает современная теоретическая астрономия – наука о внутреннем строении звезд. Эта наука навсегда останется теоретической, ибо никогда мы не увидим звездных недр, и потому она должна строиться на прочной основе физических законов. Все содержание новой физики – теория квантов, теория относительности, учение о строении вещества, теория электронов, радиоактивность – бросается на завоевание новой области. Теоретическая астрономия в точном смысле слова – прикладная физика.

3.2 Определение расстояний до звезд методом тригонометрического параллакса

Как далеко от Земли находятся звёзды? Способом измерения расстояний до относительно близких звезд является метод *тригонометрического параллакса*. В его основе лежит изменение направления от Земли на звезду в течение года вследствие движения Земли вокруг Солнца. Подробно измерение расстояний методом параллакса рассматривалось в 1.1.

Первым попытку определить параллактическое смещение звезд предпринял Н. Коперник. Он понимал, что обнаружение этого смещения будет служить доказательством обращения Земли вокруг Солнца, то есть подтверждением гелиоцентрической системы мира. Но точность измерений, доступная в те времена, была слишком низкой для того, чтобы обнаружить этот эффект. Н. Копернику удалось только сделать вывод о том, что звезды находятся от нас по крайней мере в 1000 раз дальше, чем Солнце.

Расстояние до объекта, выраженное в парсеках, обратно пропорционально параллаксу, выраженному в секундах дуги: $D = \frac{a}{\sin \pi}$.

Метод параллакса является на данный момент наиболее точным способом определения расстояний до звезд, однако он не применим к звездам, отстоящим от нас на расстояние больше, чем 300 пк. Слишком малые смещения положения звезд надо измерять – меньше одной сотой доли секунды дуги!

Другие методы определения расстояний до звёзд будут приведены позже.

3.3 Наблюдаемые характеристики звёзд и методы их определения

Какую информацию мы можем получить, наблюдая за звёздами невооружённым глазом? Вспомним, что мы можем увидеть около 3 000

звёзд, одни из них выглядят ярче, другие – более тусклые. Примерно 150 лет до н.э. греческий астроном Гиппарх классифицировал около 850 космических объектов, разделив их по **звёздным величинам**: самые яркие отнесены к 1-й звёздной величине (1^m), самые слабые, различимые на темном небе – 6-й звёздной величине (6^m). Эта классификация получила название «шкала звёздных величин», астрономы используют её по сей день.

Видимая звёздная величина – это безразмерная физическая величина, которая характеризует освещённость, создаваемую небесным объектом в месте наблюдения. Чем больше создаваемая объектом освещённость, тем меньше звёздная величина. Субъективно значение звёздной величины воспринимается как **блеск** (для точечных источников) или **яркость** (для протяжённых). При этом блеск одного источника указывают путем его сравнения с блеском другого, принятого за эталон. (Астронет, <http://www.astronet.ru/db/msg/1174337>)

Глаз воспринимает энергию света, прошедшую через зрачок. Независимой характеристикой (например, от размера зрачка) при этом является **освещённость E** – количество световой энергии, попадающей на поверхность единичной площади за единицу времени. Единица измерения – Вт/м². Мерой освещённости в астрономии является **видимая звёздная величина** источника m .

Таким образом, к истинным размерам звезд понятие **видимая звёздная величина** отношения не имеет, а характеризует световую энергию (**освещённость E**), приходящую на Землю от звезды.

Звёздные величины определяют из непосредственных наблюдений с помощью электрофотометров, в которых энергия фотонов расходуется на «выбивание» свободных электронов из специальной металлизированной плёнки. Опытным путём было установлено, что в видимой области спектра от звезды 0-й звёздной величины приходит примерно 10^{10} фотонов за 1 с на 1 м².

В середине XIX века к астрономии были применены основы научной фотометрии. Оказалось, что привычное астрономам деление звезд на звездные величины основывается на **психофизиологическом законе Вебера-Фехнера**, который заключается в следующем: если раздражающий фактор

меняется в геометрической прогрессии, то соответствующее ему ощущение изменяется в арифметической прогрессии. Таким образом, приблизительную делимость звезд на классы светимости, предложенную Гиппархом, стало возможным обосновать

Таблица 3.1.

Разница звёздных величин	Отношение яркости (освещённости)
1	2,512
2	$2,512^2 = 6,31$
3	$2,512^3 = 15,85$
4	$2,512^4 = 39,82$
5	$2,512^5 = 100$

математически.

Английский астроном Норманн Погсон отметил, что между звездами 1-й и 6-й звездной величины, которые различаются на 5 звездных величин, существует соотношение светимостей 100:1. Тогда различию в 1^m соответствует отношение освещенностей, равное $\sqrt[5]{100} \approx 2,512...$, в m звёздных величин – $(2,512)^m$ (см. таблицу 3.1).

Пусть звезды с относительными звёздными величинами m_1 и m_2 создают соответственно освещенности E_1 и E_2 . Тогда

$$m_1 - m_2 = -2,512 \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \text{ (формула Погсона)}$$

Другие формы записи формулы Погсона:

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

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{-(m_1 - m_2)} = 10^{-0,4(m_1 - m_2)}$$

Таким образом, *шкала звездных величин – это логарифмическая шкала, в которой сравниваются освещенности, создаваемые наблюдаемыми источниками.*

Видимая звёздная величина характеризует световой поток, приходящий на Землю от звезды, следовательно, зависит от расстояния до звезды. Поэтому была введена абсолютная звёздная величина M – независимая от расстояния до Земли характеристика, позволяющая оценить полную энергию, излучаемую звездой.

Абсолютная звездная величина M – видимая звездная величина, которую имела бы звезда на расстоянии 10 парсек.

Относительная и абсолютная звездные величины связаны соотношением:

$$M = m + 5 + 5 \lg p$$

где p – параллакс звезды, выраженный в секундах, или

$$M = m + 5 - 5 \lg D$$

где D – расстояние до звезды, выраженное в парсеках. Таким образом, зная расстояние до звезды, мы можем определить её абсолютную звёздную величину.

По своей кажущейся яркости звезды сильно различаются, а вследствие большой удаленности от Земли нам они представляются светящимися точками. Одни из них видны лучше – они ярче, другие слабее, третьи едва различаются невооруженным глазом, четвертые (их большинство) видны только в телескоп. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, звезды находятся на самых различных расстояниях от нас, чем дальше звезда, тем слабее она нам видится. Во-вторых, одни

звезды являются более мощными, другие – менее мощными источниками энергии. Мощность излучения звезды характеризуется **светимостью L** .

Светимость звезды L – физическая величина, характеризующая полную энергию, излучаемую звездой по всем направлениям в единицу времени.

Светимость звезд можно выразить в ваттах, но чаще всего ее выражают в единицах светимости Солнца. Светимость Солнца измеряется по приходящей от него энергии и составляет $L_{\odot}=3,8 \cdot 10^{26}$ Вт.

Интенсивность излучения I – физическая величина, характеризующая мощность излучения с единицы поверхности звезды, измеряется в Вт/м². Очевидно, что $L = I \cdot S$, где S – площадь поверхности излучаемого тела. Считая звезду шаром, имеем: $L = I \cdot 4\pi R^2$.

Наблюдения показывают, что сплошной спектр излучения звезды близок к излучению абсолютно чёрного тела с температурой, равной температуре её фотосферы. Поэтому для вычисления светимости звезды используют закон Стефана-Больцмана:

$$I = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ кг·с⁻³·К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана, R – радиус, T – температура звезды. Тогда светимость звезды определяется по формуле

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Светимость звезды L и освещенность E , создаваемая ею в месте наблюдения (измеряемая характеристика), связаны законом обратных квадратов: значение некоторой физической величины в данной точке пространства обратно пропорционально квадрату расстояния от источника поля, которое характеризует эта физическая величина. В нашем случае

$$E = \frac{L}{4\pi d^2}$$

где d – расстояние до звезды³.

Интенсивность (мощность) излучения энергии единицей поверхности зависит только от температуры. Полная энергия, излучаемая звездой, пропорционально площади её поверхности, следовательно, зависит от радиуса звезды. Таким образом, светимость звезды зависит от двух её физических характеристик: температуры и радиуса, и, следовательно, изменяется в течение её жизни.

Температура звезды, которая входит в формулу Стефана-Больцмана, называется **эффективной температурой**. Это такая температура, которую имело бы абсолютно черное тело тех же размеров, излучающее ту же общую энергию, что и звезда.

Звёзды, наблюдаемые невооружённым глазом, различаются не только по блеску, но и по цвету. Вспомним физику: любое нагретое тело излу-

³ В действительности формула не так проста, в частности, необходимо учитывать поглощение света в межзвёздной среде.

чает свет, при этом чем выше его температура, тем большая часть световой энергии приходится на синюю (коротковолновую) часть спектра. Следовательно, звезда, которая выглядит голубоватой, имеет более высокую температуру, чем красноватая. Астрономические наблюдения позволяют довольно точно определять цвет звёзд. Используя специальные светофильтры, астрономы определяют длину волны λ_{\max} в нанометрах (нм), на которую приходится максимум излучения энергии звезды, и, используя закон Вина, находят **поверхностную** (или **цветовую**) температуру звезды T (в К):

$$T = \frac{3 \times 10^6}{\lambda_{\max}}.$$

Найденные с помощью закона Вина температуры звезд относятся лишь к их внешним слоям, откуда излучение доходит до нас непосредственно (отсюда и название – поверхностная температура). Температура звёзд повышается с глубиной и в их ядрах составляет миллионы Кельвинов. Невозможно измерить эти температуры непосредственно, но их можно оценить с помощью теоретических расчетов.

Наиболее точно температуру звезд определяют путем анализа их линейчатых спектров (по спектральным линиям).

Итак, мы рассмотрели наблюдательные характеристики звёзд. Подведём итоги:

1. Непосредственно определить расстояние можно только для звёзд, удалённых от Земли не более чем на 300 пк.
2. С помощью специальных приборов можно измерить освещённость, создаваемую звездой на поверхности Земли. Зная расстояние до звезды, определяем её светимость.
3. Определив, на какую длину волны приходится максимум излучения звезды, находим её поверхностную температуру (закон Вина).

3.4 Масса и размеры звёзд

Важнейшей характеристикой звезды является её **масса**. В той или иной степени от массы зависят все остальные свойства звезды и её эволюционный путь. Непосредственно, используя третий уточнённый закон Кеплера, оценить массу можно только для звёзд, входящих в двойные системы:

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G}{a} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$$

здесь M_1 и M_2 – массы компонент системы, G – гравитационная постоянная, a – большая полуось орбиты звезды, T – период обращения. Уравнение дает сумму масс компонент системы. Если к тому же известно отношение орбитальных скоростей, то их массы можно определить отдельно. К сожалению, только для сравнительно небольшого количества двойных систем можно таким образом определить массу каждой из звезд.

Измерения масс для двойных звезд показали, что почти во всех случаях они заключены в пределах от 0,1 до 10 масс Солнца (M_{\odot}). Более массивные звезды, имеющие массу 10 – 50 M_{\odot} , в природе крайне редки.

Звезды массой меньше 0,1 M_{\odot} из-за низкой температуры и малого размера почти не излучают света, обнаружить их достаточно тяжело. Поэтому еще не ясно, как часто они встречаются в природе.

Объекты с массами, меньшими 0,02 M_{\odot} , уже не являются звездами. Именно большой массой звезд и определяется их способность разогреваться и излучать свет. Но и самые малые по массе звезды значительно массивнее любой планеты Солнечной системы. Так, масса Юпитера – самой большой планеты Солнечной системы – составляет около 0,001 M_{\odot} . Если бы можно было в сотни раз увеличить массу этой планеты, Юпитер превратился бы в звезду.

Для звёзд *главной последовательности* диаграммы Герцшпрунга-Рессела (ГР) была установлена зависимость между их массой и светимостью:

$$L \approx L_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4$$

Используя это соотношение, можно по известной светимости примерно оценить массу звезды. Именно этот косвенный метод используется для определения масс изолированных звёзд.

К сожалению, астрономия не располагала и не располагает в настоящее время методом прямого и независимого определения массы изолированной звезды: все способы оценок массы являются косвенными. И это серьезный недостаток науки. Если бы метод определения масс изолированных звезд существовал, прогресс наших знаний был бы значительно более быстрым.

3.5 Спектры звёзд

Спектры звезд непрерывные. На них накладываются абсорбционные спектральные линии поглощения. Спектры некоторых звезд содержат яркие эмиссионные линии.

Наиболее значимые различия в спектрах звезд заключаются в интенсивности и количестве наблюдаемых линий спектра и в распределении энергии в непрерывном спектре.

Спектральный анализ позволяет выяснить, из каких химических элементов состоят звёзды. Определить количественный состав звёзд (доля каждого элемента в общей массе звёздного вещества), температуру, давление, скорость движения газа в атмосфере звезды и многие другие параметры позволяет квантовая механика, появившаяся как раздел физики в первые десятилетия XX века. Квантовая механика способствовала

созданию теории ядерных реакций в недрах звёзд и тем самым помогла выявить источники их энергии и проследить пути звёздной эволюции.

Еще до того, как было объяснено происхождение спектров звезд, начала разрабатываться их спектральная классификация. Эмпирически спектры большинства звезд удалось расположить в виде последовательности, вдоль которой линии одних химических элементов постепенно усиливаются, а других – ослабевают. Сходные между собой спектры объединили в **спектральные классы**, для обозначения которых использовали первые 16 букв латинского алфавита. Эта классификация оказалась неудачной: переходы между спектральными классами оказались непрерывными. Для новой классификации выбрали примерно 1000 ярких звёзд, для которых были получены спектры высокой дисперсии, последовательности классов расположили по убыванию температуры звёзд, хотя ещё не было известно о влиянии температуры на наличие и выраженность линий в спектрах. Эту последовательность спектральных классов используют и в настоящее время: O, B, A, F, G, K, M. Для лучшего запоминания последовательности рекомендуем использовать известные мнемонические фразы: «Один Бритый Англичанин Финики Жевал, Как Морковь» или «О, Борис Александрович, Физики Ждут Конца Мучений» (видимо, имеется в виду Б.А. Воронцов-Вельяминов). Спектральные классы O, B, A часто называют горячими или ранними, классы F и G – солнечными, а классы K и M – холодными или поздними спектральными классами.

По спектральной диаграмме можно определить видимую звёздную величину звезды, а далее, пользуясь формулами, найти абсолютную звёздную величину, светимость, а значит и размер звезды. Поэтому спектры звезд недаром иногда образно называют паспортами звезд.

Смещение спектральных линий в синюю или красную область спектра, вызванное движением звезды (эффект Доплера), позволяет определить ее скорость, наличие спутника, вместе с которым звезда вращается вокруг общего центра масс. При этом иногда только спектральный анализ позволяет определить, что звезда является не одиночной, так как оптические наблюдения такой картины не дают. С помощью спектрального анализа с учетом эффекта Доплера удалось даже открыть тела планетного типа вблизи некоторых звезд.

Эффект, открытый Питером Зееманом в 1896 г. (эффект Зеемана), который заключается в расщеплении некоторых линий в присутствии магнитного поля, позволяет исследовать магнитное поле звезды.

О параметрах звёздной атмосферы и вращении звезды позволяют судить форма и ширина спектральных линий. По ним определяют температуру, ускорение силы тяжести и давление газа в атмосфере звезды, а также её химический состав. Признаком двойной или кратной звездной системы является раздвоение линий или их периодическое смещение.

Так, например, широкие спектральные линии свидетельствуют о достаточной плотности атмосферы, в которой эти линии образуются. Это характерно для звёзд небольшого радиуса и невысокой светимости (звезды-карлики, Солнце). Узкие линии – характерный признак звёзд-гигантов с радиусами во много раз больше солнечного, имеющих огромную светимость (Бетельгейзе – красный гигант, Ригель — голубой сверхгигант). Яркие линии в спектре свидетельствуют о том, что звезда окружена расширяющейся оболочкой из горячего газа. Эта звезда, как правило, очень высокой светимости, быстро теряет массу и не может долго пребывать в таком состоянии.

У красных звёзд (с низкой t°) в спектрах видны широкие полосы – следы молекул: оксида титана, оксида ванадия, оксида циркония, углерода и ядовитого циана.

3.6 Взаимосвязи характеристик звезд. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

Характеристики звёзд взаимосвязаны: температура звезды напрямую связана с её цветом и определяет спектр звезды. Абсолютная звездная величина характеризует блеск звезды, то есть количество световой энергии, испускаемой звездой, и её можно вычислить, если известно расстояние от звезды до нас.

В 1913 году независимо друг от друга голландец Эйнар Герцшпрунг и американец Генри Норис Рессел сопоставили два звездных параметра: спектры звезд и их абсолютную звездную величину. Так появилась диаграмма, названная в честь обоих ученых – **диаграмма Герцшпрунга-Рессела** (ГР). На оси ординат ГР диаграммы откладывают абсолютные звездные величины или соответствующие им светимости, по оси абсцисс – спектральные классы или температуры звезд. Поэтому часто используют названия **диаграмма спектр-светимость** или **температура-светимость**.

Диаграмма ГР связывает две основные характеристики звезды: светимость (или абсолютную звёздную величину) и спектральный класс (температуру). Для большого числа звёзд **только эти** характеристики (**светимость и спектр**) можно получить непосредственно из наблюдений.

Оказалось, что звезды на ГР диаграмме образуют определенные закономерности, названные **последовательностями**, что подтверждает существование зависимости между светимостью звезды и ее температурой (рис. 7.3).

Большинство звезд (около 90 %), располагаются на диаграмме вдоль длинной узкой полосы, называемой **главной последовательностью**. Она протянулась из верхнего левого угла (от голубых сверхгигантов) в нижний правый угол (до красных карликов). К звездам главной последовательности относится Солнце, светимость которого принимают за

единицу. Спектральный класс звезд главной последовательности непрерывно меняется от В до М.

Массивные звёзды главной последовательности обладают большей светимостью, так как температура в их недрах более высокая, что благоприятно для протекания ядерных реакций. С другой стороны, реакции горения протекают интенсивнее, и время пребывания массивной звезды на главной последовательности меньше, чем у менее массивных. При исчерпании «ядерного горючего» светимость звезды значительно меняется, а масса звезды при этом изменяется в гораздо меньшей степени. На диаграмме ГР такие звезды расположены вне главной последовательности.

В нижнем левом углу, под главной последовательностью расположена группа **белых карликов**. Справа над главной последовательностью располагаются звезды высокой светимости, поверхностные температуры которых сравнительно низки (спектральные классы К и М). Отсюда следует, что радиусы этих звезд очень велики, в десятки раз больше солнечного. Они получили названия **красных гигантов**, объекты же наибольшей светимости, принадлежащие к этой группе звезд, называются **сверхгигантами**.

Области на диаграмме ГР «населены» звёздами одинаковых или близких **классов светимости**, которые **отражают индивидуальные зависимости их светимости от температуры**. Всего выделяют 7 классов светимости (Таблица 3.2, составлена по материалам: Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие /Под ред. В.В. Иванова. – М.: Едиториал УРСС, 2001. - С. 377).

Таблица 3.2.

Класс светимости	Звезды	Представители
I	Сверхгиганты	Ригель
II	Яркие гиганты	Мирцам (β Большого Пса)
III	Гиганты	Поллукс (β Близнецов)
IV	Субгиганты	Процион (α Малого Пса)
V	Звезды главной последовательности	Солнце, Сириус А
VI	Субкарлики	Звезда Каптейна (VZ Живописца)
VII	Белые карлики	Сириус В

Принадлежность звезды к определённому классу светимости определяется на основании специальных дополнительных признаков спектральной классификации (Йеркская классификация звёзд, <http://www.astronet.ru/db/msg/1188687>).

В процессе жизни изменяются и спектр звёзд, и их светимость. А так как положение звезды на диаграмме ГР определяется именно этими

характеристиками, то в течение жизни звезда будет «перемещаться» по ней. Именно поэтому можно проследить эволюцию звёзд на диаграмме ГР. *Изменение положения звезды на диаграмме с течением времени связано только с изменением её физических характеристик.*

Большую роль диаграмма ГР имеет для изучения характеристик звёзд в звёздных скоплениях. Звёзды скопления имеют примерно одинаковый возраст, но при этом могут сильно различаться по массам. Вид диаграммы будет различным для различных звёздных скоплений, а её анализ позволит определить физические характеристики скопления в целом, в частности, его возраст и расстояние до него. Подробнее: <http://www.astronet.ru/db/msg/1245721/lec.7.3.html>.

3.7 Эволюция звёзд

Звёзды рождаются, живут и умирают, производя в процессе жизни химические элементы, которые служат строительным материалом для новых звёзд, планет и других небесных тел. Благодаря совершенствованию наблюдательной техники в настоящее время астрофизики имеют возможность наблюдать звёзды на всех этапах их жизни: от рождения до смерти. Конечно, смерть звёзд – это образное выражение, звёзды не являются живыми существами и не исчезают бесследно. Есть звёзды-долгожители, гораздо старше нашего Солнца, а есть и такие, которые проживают короткую, но бурную жизнь, взрываясь и обогащая окружающую среду мириадами молекул различных химических элементов.

Рождение звёзд – процесс, который природа тщательно скрывает от нашего взора. Звёзды формируются внутри плотных областей межзвёздной среды (МЗС) – в гигантских молекулярных облаках. Эти области звездообразования можно наблюдать в различных областях Вселенной. Картинка области активного формирования звёзд в туманности Орёл, полученная космическим телескопом Хаббла в 1995 году, стала хитом, растиражированным средствами массовой информации. С получения этого и следом за ним других фото областей звездообразования сыграло важную роль в становлении теории эволюции звёзд.

Пространство между звёздами получило название *межзвёздная среда*. Оно заполнено межзвёздным газом, пылью (примерно 1% от массы газа), межзвёздными магнитными полями, космическими лучами, а также тёмной материей. Межзвёздный газ состоит преимущественно из водорода (примерно 89%), гелия (около 9%), тяжёлых элементов (примерно 2%). Его плотность составляет от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов частиц в кубическом метре. Именно внутри плотных областей МЗС, в гигантских молекулярных облаках формируются звёзды. Во время своей жизни и смерти звёзды пополняют МЗС материей и энергией, и в этом со-

стоит взаимодействие между звёздами и МЗС.

Образование звёзд начинается при гравитационном сжатии облака. Расчёты показывают, что облако может начать коллапсировать, если его масса превышает 1000 масс Солнца. Но таких тяжелых звезд не наблюдается. Причина этого заключается в том, что звёзды рождаются не единично, а в скоплениях. Действительно, наблюдения показывают, что звёзды в скоплениях имеют примерно одинаковый возраст. Гравитационное сжатие приводит к росту плотности и концентрации частиц в единице объема, дальнейшее увеличение плотности приводит к тому, что вещество, окружающее центральную область фрагмента коллапсирующего облака становится непрозрачным, горячим, начинает излучать в инфракрасной области – образуется *протозвезда*.

Следующий этап – начало термоядерных реакций в ядре звезды. Это самый длительный период ее жизни – около 90% всей жизни звезды типа Солнца. Начало термоядерных реакций приводит к увеличению светового давления, звезда «очищается» («сдувает») лишние газ и пыль. Звезда родилась! В этой стадии эволюции звезда переходит на главную последовательность диаграммы Герцшпрунга-Рессела. Чем тяжелее звезда, тем она горячее, и тем быстрее проходят в её недрах термоядерные реакции. Следовательно, чем тяжелее звезда, тем короче её жизненный цикл.

Остановимся на некоторых важных моментах эволюции звёзд после стадии главной последовательности. Звезда сходит с главной последовательности ГР диаграммы, когда в её недрах заканчивается «ядерное горючее» – водород, и ядро состоит преимущественно из гелия. Ядерные реакции горения гелия (преобразование гелия в углерод) требуют очень высокой температуры – порядка 10^8 К. Поэтому дальнейшее развитие событий зависит от массы звезды, так как она определяет температуру ядра.

У звёзд малой массы ($M < 0,5M_{\odot}$) давление внутри звезды недостаточно для достижения температуры горения гелия, после прекращения реакций преобразования водорода такие звёзды будут медленно остывать.

У звёзд с массами, равными или большими солнечной, температура в недрах достаточна для начала реакций превращения гелия в углерод. При таких реакциях выделяется больше энергии, чем при горении водорода, повышается газовое давление, в результате чего звезда расширяется, а температура фотосферы понижается. Звезды с массами $0,5M_{\odot} < M < 1,5M_{\odot}$ переходят в стадию красного гиганта. У таких звезд небольшой массы температура в недрах не может повыситься настолько, чтобы в ядре начались реакции преобразования углерода, поэтому по мере выгорания гелия оболочка звезды все более расширяется, массы ядра недостаточно, чтобы остановить это расширение, и на последнем этапе жизни звезды

типа Солнца образуется *белый карлик*, окружённый светящейся газовой оболочкой. Система из звезды, называемой ядром туманности, и симметрично окружающей её светящейся газовой оболочки называется *планетарной туманностью*.

Отличительные особенности белого карлика – высокая температура поверхности, малые размеры, большая плотность. Масса типичного белого карлика сравнима с массой Солнца, а радиус примерно в 100 раз меньше солнечного радиуса. Если можно было бы сделать кубик с размером ребра 1 см из вещества белого карлика, он весил бы более 1000 кг! При такой плотности вещество звезды переходит в особое состояние, называемое *вырожденным газом*, частицами которого являются электроны, потерявшие связь с ядрами атомов. Термоядерные реакции в белых карликах не идут, они светят за счёт остывания.

Все наблюдаемые белые карлики имеют массы, меньшие $1,4M_{\odot}$. Эту предельную массу теоретически рассчитал американский астрофизик индийского происхождения С. Чандрасекар. Если масса белого карлика превышает предел Чандрасекара, то он превращается в *нейтронную звезду* – очень маленькую (радиус от 10 до 100 км) и очень плотную звезду, масса которой $1,4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$.

Существование нейтронных звёзд было предсказано теоретически, но эти объекты казались настолько фантастическими, что физики не поверили в возможность их существования. Плотность нейтронной звезды такова, что кубик с ребром 1 см, состоящий из вещества нейтронной звезды, весил бы более 10^{14} кг! То есть больше, чем весит астероид Эрос, размеры которого 34,4 км в диаметре в самом широком месте. Большинство нейтронных звёзд испускают мощные, строго периодические импульсы электромагнитного излучения, и за эту особенность данные объекты были названы *пульсарами*. Отличительная черта пульсаров – высокая стабильность периода сигнала, обусловленная быстрым вращением нейтронной звезды с сильным магнитным полем. В связи с этой особенностью пульсары образно называют космическими маяками.

У звезд с массами $M > 1,5M_{\odot}$ горение гелия начинается сразу же после того, как закончится весь водород. Чем тяжелее звезда, тем выше температура в её недрах. У массивных звёзд возможны термоядерные реакции образования азота, кислорода и других более тяжелых элементов, вплоть до железа. Очень массивные звёзды проходят через стадии неустойчивости (пример: *цефеиды*). Конец жизни у всех тяжёлых звёзд очень бурный – они взрываются как *сверхновые II типа*.

Сверхновыми называют звёзды, блеск которых при вспышке увеличивается на десятки звёздных величин, а затем постепенно спадает в течение нескольких месяцев. Сверхновые звёзды подразделяют на два основных типа. Исторически такое деление было обусловлено различием в их кривых блеска и в спектрах. Позже выяснили, что различна природа

сверхновых разных типов: сверхновые I типа вспыхивают в тесных двойных системах, сверхновые II типа – последний этап эволюции одиночной массивной звезды. Как уже отмечалось, в конце жизни ядро массивной звезды состоит из элементов группы железа. Если масса железного ядра $1,4M_{\odot} < M_{\text{ядра}} < 3M_{\odot}$, то в результате коллапса ядра образуется **нейтронная звезда**, если $M_{\text{ядра}} > 3M_{\odot}$, образуется **чёрная дыра**.

Чёрные дыры были предсказаны П. Лапласом в конце XVIII века. **Чёрные дыры** – это объекты, для которых вторая космическая скорость равна или больше скорости света. Это определение позволяет рассчитать гравитационный радиус: предельный радиус для тела массой M , при котором ни один сигнал не покинет это тело. Так, например, Землю нужно сжать до размеров шарика диаметром 0,9 см, чтобы она превратилась в чёрную дыру.

Сильное гравитационное поле чёрной дыры притягивает вещество находящейся рядом звезды, которое, перетекая на чёрную дыру, образует поток ускоренно движущихся по спирали вокруг компактного объекта частиц. Возникает рентгеновское излучение, которое фиксируется телескопами. Это одна из возможностей обнаружить чёрную дыру, которая реализована на практике.

Проверь себя (задания для самопроверки)

I. Укажите верный, на Ваш взгляд, ответ для каждого вопроса. Некоторые задания имеют более чем 1 верный ответ. Некоторые задания содержат избыток информации.

1. Видимая звёздная величина характеризует:

- 1.1. расстояние до звезды; 1.2. освещенность, создаваемую звездой;
1.3. массу звезды; 1.4. светимость звезды; 1.5. размеры звезды.

2. Для звезд установлен ряд закономерностей между их физическими характеристиками. Какое из следующих утверждений в действительности не является такой закономерностью:

- 2.1. Светимость звезды главной последовательности зависит от её массы;
2.2. Светимость звезды зависит от её радиуса;
2.3. Светимость звезды зависит от её поверхностной температуры;
2.4. Светимость звезды зависит от её видимой звёздной величины;
2.5. Светимость звезды зависит от её цвета.

3. Цвет звезды зависит от:

- 3.1. температуры фотосферы; 3.2. радиуса звезды;
3.3. расстояния от звезды до Земли; 3.4. массы звезды;
3.5. процентного содержания водорода и гелия.

4. Соответствие между осями координат и параметрами звезды на диаграмме Герцшпрунга – Рассела:

- 4.1. ось абсцисс: а) спектральный класс;
4.2. ось ординат: б) температура;

- в) светимость;
- г) абсолютная звездная величина;
- д) радиус;
- е) масса.

5. *От каких параметров зависит положение звезды на главной последовательности?*

- 5.1. температура;
- 5.2. спектральный класс;
- 5.3. масса;
- 5.4. радиус;
- 5.5. возраст.

6. *Какой параметр звезды определяет ее эволюционный путь:*

- 6.1. температура поверхности;
- 6.2. масса;
- 6.3. радиус;
- 6.4. спектральный класс;
- 6.5. светимость.

7. *Последовательности этапов эволюции звезды типа Солнца:*

- 7.1. протозвезда;
- 7.2. белый карлик;
- 7.3. красный гигант;
- 7.4. голубой гигант;
- 7.5. звезда главной последовательности.

8. *Конечными стадиями эволюции звезд являются:*

- 8.1. протозвезда;
- 8.2. белый карлик;
- 8.3. нейтронная звезда;
- 8.4. черная дыра;
- 8.5. планета.

9. *Белые карлики*

- 9.1. являются конечным этапом эволюции звезд большой массы;
- 9.2. являются конечным этапом эволюции звезд типа Солнца;
- 9.3. источником энергии является гравитационное сжатие;
- 9.4. источником энергии являются термоядерные реакции;
- 9.5. вещество белого карлика представляет собой идеальный газ;
- 9.6. вещество белого карлика представляет собой вырожденный газ.

10. *У звезд типа Солнца в процессе эволюции не образуется железное ядро, вероятно, потому что*

- 10.1. все тяжёлые элементы рассеиваются, когда образуется планетарная туманность;
- 10.2. их ядра никогда не становятся достаточно горячими, чтобы образовалось железо;
- 10.3. железо, образовавшееся в результате нуклеосинтеза, превращается в уран;
- 10.4. их сильные магнитные поля удерживают железо в атмосферах;
- 10.5. среди ответов 10.1-10.4 нет правильного.

II. Правда или ложь. Отметьте правдивые высказывания символом П, неверные высказывания – символом Л.

- 1. Разности в 5 звездных величин по шкале Гиппарха соответствует отношение освещенностей 1:100.
- 2. Видимая звёздная величина m не даёт настоящей информации о яркости звезды.
- 3. Красные гиганты очень яркие звёзды, так как они очень горячие.

4. Звёзды имеют различные спектры потому, что они имеют различный химический состав.
5. Когда звезда сходит с главной последовательности, её радиус увеличивается.
6. Положение звезды на диаграмме ГР определяется её экваториальными координатами в пространстве.
7. В звёздном скоплении, возраст которого 500 миллионов лет, преобладают звёзды спектрального класса О.
8. Продолжительность жизни звезды спектрального класса А больше, чем Солнца.
9. Плотность нейтронной звезды сравнима с плотностью атомного ядра.
10. Если масса ядра звезды в конце её жизни больше трёх солнечных масс, то в результате коллапса ядра образуется чёрная дыра.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. Для определения истинного блеска звезды нужно знать её _____.
2. Световой поток, падающий на единичную площадку некоторой поверхности называется _____.
3. Плотность потока излучения, создаваемого небесным объектом в данном направлении, называется _____.
4. Освещенность E _____ квадрату расстояния R до источника.
5. Полная энергия, излучаемая звездой за 1 секунду, называется _____.
6. Маленькие, горячие звезды, расположенные под главной последовательностью диаграммы ГР, это _____.
7. Различные стадии звездной эволюции, предсказанной теорией, могут быть проверены, используя наблюдения за звездами в _____.
8. В конце жизни массивные звёзды вспыхивают как сверхновые типа ____.
9. Чёрные дыры – это объекты, для которых _____ космическая скорость равна или больше скорости света.
10. Область экстремально высокой плотности в центре чёрной дыры называется _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии Учебное пособие. Изд 2-е, испр. - М.: Едиториал, 2004 г. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М, Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с

4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Сурдин В.Г. Рождение звёзд. – М.: УРСС, 2001.
7. Чернин А.Д. Звёзды и физика. – М.: УРСС, 2004.
8. Шкловский И.С. Звёзды: из рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1977.
9. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методическое пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

Задания для самостоятельной работы

1. Светимость звезды в 6 раз больше, чем у Солнца, а освещенность от нее при наблюдении с Земли составляет $6 \cdot 10^{-14}$ Вт/м². Чему равно расстояние до этой звезды?
2. Какую звездную величину имеет Солнце при наблюдении с Сатурна? Радиус орбиты Сатурна составляет 10 а.е.
3. Объясните механизм одновременного протекания двух процессов в красном гиганте: сжатие ядра и расширение внешних слоёв.
4. Что означает фраза астрономов «Звезда перемещается по диаграмме Герцшпрунга-Рессела»?
5. Звезда имеет видимую звёздную величину 10^m и абсолютную звёздную величину $2,5^m$. Как далеко она находится?
6. Чтобы началось сжатие межзвёздного молекулярного облака, средняя скорость его частиц должна быть меньше 0,5 от первой космической скорости для этого облака. Начнёт ли сферическое молекулярное (H_2) облако с массой 1000 солнечных масс, радиусом 10 пк и температурой 10 К коллапсировать? Поясните ваш ответ.
7. Используя закон Стефана-Больцмана, объясните, как изменяется светимость протозвезды в результате её сжатия от состояния с радиусом $2 \cdot 10^8$ км и температурой 3000 К в состояние с радиусом 10^6 км и температурой 4500 К.
8. Вычислите среднюю плотность ядра красного гиганта, если его масса равна 0,25 солнечных масс и радиус 15000 км. Сравните полученный результат со средней плотностью оболочки гиганта, масса которой 0,5 солнечных масс и радиус 0,5 а.е. Сравните оба полученных результата с плотностью ядра Солнца.
9. Голубой гигант с массой, равной 15 солнечных масс, и поверхностной температурой 20000 К перешёл в стадию красного сверхгиганта с такой же светимостью и температурой 4000 К. Во сколько раз изменился радиус звезды?

10. Используя закон Стефана-Больцмана, вычислите светимости нейтронных звёзд одинакового радиуса $R = 10$ км, температуры которых 10^5 К, 10^7 К, 10^9 К. На какие длины волн приходится максимум излучения каждой звезды? Может ли самая яркая из этих звёзд помещена на диаграмму ГР?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Основной характеристикой излучения любого небесного объекта является световой поток или освещенность, единицы измерения которых в СИ – Вт и Вт/м² соответственно. В астрофизике используются также фотометрические характеристики: блеск и звёздная величина. Нужны ли эти величины?
2. Постройте диаграмму спектр-светимость для 30 ярких звёзд. Отметьте на диаграмме главную последовательность, область красных гигантов, белых карликов. Как будут выглядеть на построенной диаграмме линии, вдоль которых располагаются звёзды одинакового радиуса? Постройте эти линии.

Проекты (работа в группах)

1. Предложите метод определения внеатмосферного блеска звезды из фотометрических наблюдений с поверхности Земли.
2. На диаграмме ГР покажите эволюционный путь Солнца; массивной звезды спектрального класса В; маломассивной звезды спектрального класса М. Приведите примеры звёзд указанных трёх типов.
3. Найдите фотометрические данные для какого-либо звёздного скопления. Постройте диаграмму ГР для этого скопления и оцените его возраст.
4. Подготовьте наглядную демонстрацию плотностей различных астрономических объектов: молекулярное облако, звезда, планета земного типа, белый карлик, нейтронная звезда. Для наглядности используйте какой-либо легко доступный объект (яблоко, апельсин, теннисный мяч). Для объектов с малыми плотностями вычислите, до каких размеров нужно увеличить ваш иллюстративный объект, чтобы он имел ту же плотность. Для объектов с большими плотностями вычислите, сколько «мячиков» с такими же плотностями заполнят объем 10 см³. Для ещё большей наглядности приготовьте коробку таких размеров.

Тема 4 История космологических картин мира

Краткий обзор теоретического материала

4.1 Геоцентрическая и гелиоцентрическая системы мира

Планеты, участвуя в общем суточном движении, изменяют своё положение относительно звёзд подобно Солнцу и Луне. Они описывают на фоне звёзд сложные петлеобразные траектории, медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное*

движение). Движения планет мы наблюдаем с Земли, поэтому возникают сложности с объяснением петлеобразных траекторий планет.

По нашим непосредственным ощущениям Земля неподвижна. Именно поэтому возникла **геоцентрическая модель мира**, согласно которой наша планета находится в центре мира (Вселенной), и все небесные тела обращаются вокруг неё.

Геоцентрическая модель мира наиболее полна разработана и описана в трудах греческого учёного Клавдия Птолемея, жившего в Александрии во II веке н.э. В основе его модели лежат четыре допущения:

- 1) Земля имеет сферическую форму и находится в центре мира;
- 2) Земля неподвижна;
- 3) все небесные тела движутся вокруг Земли;
- 4) движения небесных тел по круговым орбитам равномерны.

Согласно теории Птолемея, Солнце и Луна движутся вокруг Земли по окружностям, которые называются **деференты**. Для объяснения попятного движения планет Птолемей ввёл дополнительные окружности – **эпициклы**, по которым планеты движутся равномерно, а центры эпициклов, в свою очередь, равномерно движутся по деферентам (Рис. 4.1). В общем центре всех деферентов находится неподвижная Земля. Вся совокупность деферентов и эпициклов лежит внутри сферы, на поверхности которой расположены «неподвижные» звёзды. Система мира Птолемея учитывала основные особенности действительных движений планет и позволяла предвычислять их положения с точностью, которая удовлетворяла наблюдения невооружённым глазом. Возникающие разногласия теории с наблюдениями, возникающие по мере усовершенствования последних, устранялись посредством усложнения системы, в частности, введением дополнительных эпициклов. В результате к началу XVI века геоцентрическая система Птолемея настолько усложнилась, что уже не могла удовлетворять практическим потребностям, в первую очередь, бурно развивающемуся мореплаванию.

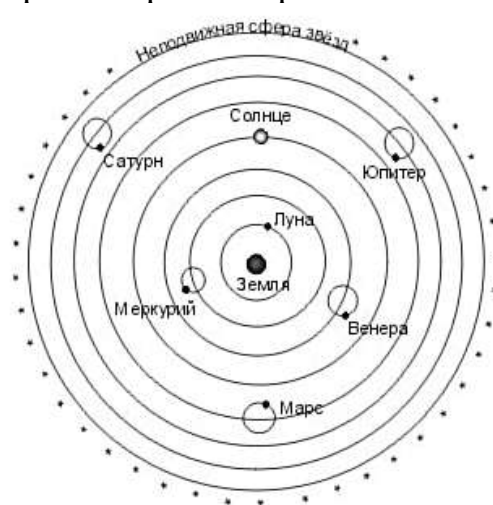


Рисунок 4.1 Геоцентрическая модель мира Птолемея

Революция и в астрономии, и в мировоззрении людей произошла в эпоху Возрождения, и связана она с именем Николая Коперника (1473-1543). Проведя многочисленные наблюдения движений Солнца и планет, глубоко изучив труды Птолемея, Николай Коперник пришёл к выводу, что геоцентрическая модель мира принципиально неверна. Созданная им **гелиоцентрическая** модель мира исходит из следующих основных положений (Рис. 4.2):

- 1) в центре мира находится Солнце;
- 2) Земля имеет форму сферы и вращается вокруг своей оси;
- 3) планеты и Земля обращаются вокруг Солнца по окружностям различных радиусов;
- 4) планеты и Земля движутся по своим орбитам равномерно.

Коперник также утверждал, что Луна движется вокруг Земли вместе с Землёй вокруг Солнца.

Николай Коперник был первым астрономом, описавшим правильное строение Солнечной системы. Он определил относительные расстояния планет от Солнца в единицах расстояния от Земли до Солнца, вычислил периоды обращения планет вокруг Солнца, оценил, что звёзды находятся от Земли гораздо дальше, чем Солнце. Коперник правильно объяснил кажущееся суточное движение всех небесных светил вращением Земли вокруг оси. Годичное перемещение Солнца по эклиптике Коперник объяснял движением Земли по орбите вокруг Солнца: Солнце кажется нам перемещающимся среди неподвижных (в силу своей удалённости) звёзд всегда в одном и том же направлении. Система мира Коперника объясняет сложные видимые прямые и попятные движения планет сочетанием двух действительных движений: движения планеты и движения Земли по своим орбитам вокруг Солнца.

Сама идея – поместить Солнце в центр мира – была не нова. Аристарх Самосский ещё в начале III века до н.э. утверждал, что Земля обращается вокруг Солнца. Его гипотеза подверглась критике. Наиболее весомым аргументом против *гелиоцентрической* (Солнце в центре мира) теории было то, что в этом случае с Земли должен был наблюдаться **параллакс** звёзд, то есть изменение их видимого положения в зависимости от времени наблюдения (Рис. 4.3). Действительно, если наблюдать звезду А с поверхности Земли в январе, то она видна на небе в точке В. Полгода спустя, в июне, наблюдатель должен увидеть ту же самую звезду А в точке С, отстоящей от точки В. Древним астрономам трудно было предположить, что звёзды находятся очень далеко от Земли, и поэтому их параллаксы очень малы. Впервые параллакс звезды Вега (α Лиры) был определён в 1837 году Фридрихом

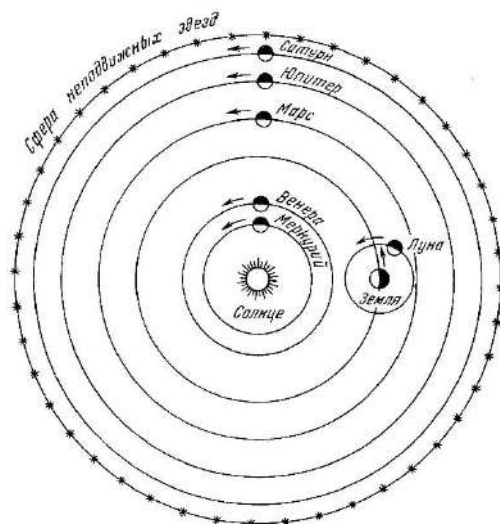


Рисунок 4.2 Гелиоцентрическая модель мира Коперника

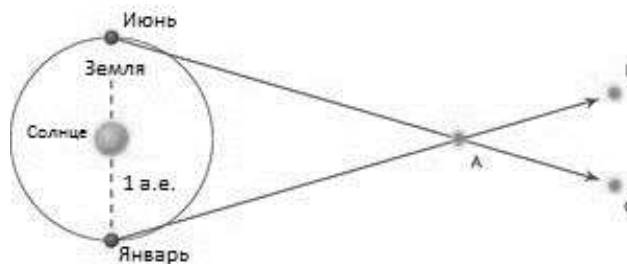


Рисунок 4.3 Объяснение параллакса звезды

Струве в Дерптской обсерватории.

Струве получил результат $0,125'' \pm 0,055''$ (в настоящее время параллакс Веги принимается равным $0,129''$). В 1838 году Фридрих Бессель измерил параллакс звезды 61 Лебеда. Он смог проследить периодическое изменение углового расстояния этой звезды от двух слабых звёзд и установил, что за год 61 Лебеда описывает на небе маленький эллипс, как и требовалось гелиоцентрической теорией. Таким образом, гелиоцентрическая теория стала единственно верной и общепризнанной.

4.2 Развитие космологических моделей

Основная задача космологии – построение такой *космологической модели*, которая, опираясь на физические теории, объясняла бы всю совокупность наблюдаемых фактов.

Первая **научная** космологическая модель была построена И. Ньютоном на основе созданной им физической теории – классической механики. Согласно модели И. Ньютона, Вселенная бесконечна и вечна, заполнена звёздами, вокруг которых вечно обращаются планеты. Бог предоставил материи возможность двигаться согласно законам механики. Пространство, время и материя абсолютны, то есть не зависят друг от друга, пространство представлялось евклидовым – плоским, трехмерным, бесконечным, существующим и без материи (как абсолютная пустота). Физические законы, открытые на Земле, считались абсолютными и универсальными, действующими во всей материальной Вселенной.

К началу XX века стали появляться парадоксы. В опытах по измерению скорости света было установлено её постоянство. Этот факт был постулирован А. Эйнштейном в его специальной теории относительности (СТО): скорость света постоянна, независимо от движения наблюдателя и излучающих тел, и эта скорость является максимальной скоростью физического взаимодействия вообще.

В 1916 году А. Эйнштейн опубликовал новую теорию гравитации – общую теорию относительности (ОТО), в которую вошли СТО и теория гравитации Ньютона как частные случаи. В ОТО утверждалась неразрывная связь между пространством, временем и материей. Наличие материи приводит к искривлению пространства, и тело движется в этом пространстве так, что кажется притягиваемым к месту концентрации материи. Решение уравнений ОТО позволило построить математическую модель Вселенной.

В 1917 году такую модель описал сам А. Эйнштейн. Он исходил из постулируемого принципа стационарности Вселенной и пришёл к выводу, что Вселенная должна быть пространственно конечной, но вечной (бесконечной во времени). Он предложил новую – первую не наглядную – модель Вселенной: в форме четырехмерного цилиндра. Но предложенное Эйнштейном решение уравнений ОТО (эти уравнения называют *мировы-*

ми) не давало однозначной стационарной модели мира. Чтобы преодолеть это, Эйнштейн искусственно ввёл дополнительную постоянную – «космологический член», обозначенный им Λ (греческая заглавная буква «лямбда»). При положительных значениях эта постоянная приобретала физический смысл поля сил отталкивания, или, как стали говорить в дальнейшем, «отрицательного давления». Но полученное решение было нестабильным: при малых возмущениях Вселенная становится нестабильной... Позже А. Эйнштейн посчитал введение этой постоянной чуть едва ли не главным своим заблуждением. Но «космологическому члену» предстояло с триумфом возродиться в конце XX века!

Первым от исходного постулата о стационарности Вселенной отказался Александр Александрович Фридман, петербургский математик и геофизик-теоретик. В 1922 г. он проанализировал сложную систему из 10 мировых уравнений ОТО и пришел к фундаментальному выводу о том, что эти уравнения ни при каких условиях не дают однозначного решения, то есть ответа на вопрос о форме Вселенной, ее конечности или бесконечности в пространстве. Согласно модели А. Фридмана, однородная и изотропная Вселенная нестационарна, она расширяется. Фридман первым высказал мысль, что когда-то Вселенная могла быть сжата до невообразимо больших плотностей (состояние *сингулярности*). Модель расширяющейся Вселенной Фридмана оставалась спорной, так как не было еще достаточных и достоверных наблюдательных фактов. Следует отметить и то, что Вселенная в те времена отождествлялась с Галактикой...

Тем не менее, первые данные о расширении Вселенной были получены ещё в 1912 году астрономом Весто Слайфером из Флагстафской обсерватории в Аризоне (США), который установил: (1) туманность Андромеды и ещё более десятка небесных объектов движутся относительно Солнечной системы с огромными скоростями (порядка 1000 км/с). Это означало, что все они находятся за пределами Галактики. (2) Все исследованные туманности, кроме трёх, удалялись от Солнечной системы. Об удалении свидетельствовало смещение линий в спектрах галактик в «красную» сторону, впоследствии этот эффект был назван *красным смещением*.

Многочисленные наблюдения за галактиками – тогда их называли внегалактическими туманностями – с использованием самого большого на то время 2,5 м телескопа обсерватории Маунт Вилсон в Калифорнии (США) были выполнены Эдвином Хабблом в 1927-1929 годах, в результате наблюдений учёный пришёл к выводу: красное смещение – это следствие взаимного удаления галактик, при этом чем дальше находятся галактики, тем с большей скоростью они удаляются. Оказалось, что скорость удаления галактики v просто определяется умножением расстояния d до нее на некоторую постоянную H , которая и получила название *постоянной Хаббла*: $v = H \cdot d$. Тогда величина, обратная постоянной Хаббла ($1/H$), означает время расширения Вселенной, то есть её возраст, а сам закон Хаббла свидетельствует о конечности Вселенной во времени и о том, что она имела начало!

Таким образом, «невероятное» предположение Фридмана о начальном сверхсжатом состоянии Вселенной получило экспериментальное подтверждение: разбегание галактик свидетельствует о том, что некогда веществу были приданы гигантские скорости разбега, а случится такое могло в результате изначального космического события, названного **Большим взрывом**.

Расширение не означает увеличение размеров всего, что существует во Вселенной. Расширение астрономических объектов (звёзд в процессе эволюции, туманностей и т.п.) вызвано причинами внутреннего, а не космологического, характера. Расширение же собственно Вселенной следует понимать как удаление друг от друга (и от нас) далёких объектов и их совокупностей: галактик, скоплений галактик, квазаров. Наблюдаемое удаление от нас галактик, квазаров не означает, что Земля занимает особое место во Вселенной. Если бы мы смогли переместиться в другую галактику, то и из неё мы бы наблюдали удаление далёких галактик и квазаров. Удаление далёких галактик друг от друга (и от нас) является следствием быстрого расширения той среды, из которой возникли галактики.

Характер расширения Вселенной, как следует из решений Фридмана, зависит от средней плотности вещества в ней: если эта плотность больше критической, то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, если средняя плотность вещества меньше или равна критической, расширение не прекратится. Критическое значение средней

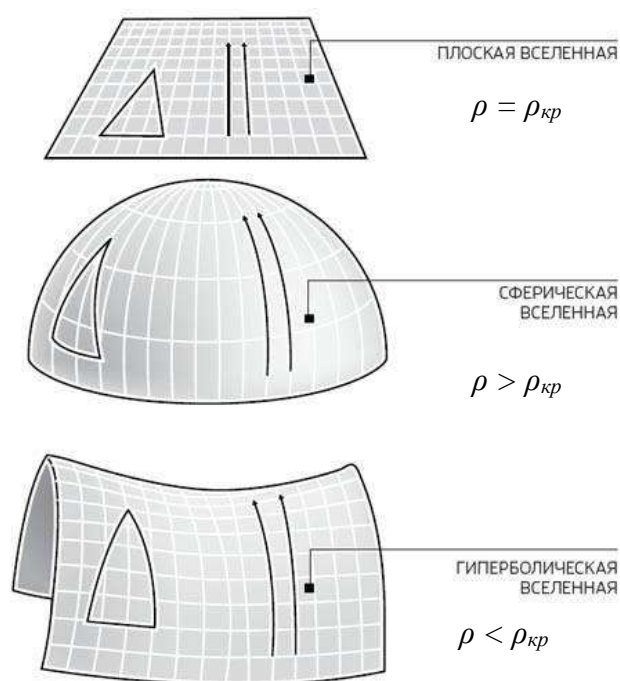


Рисунок 4.4. Геометрия Вселенной

плотности вещества равно $\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G}$, где H – постоянная Хаббла, G – гравитационная постоянная. Оно также определяет и геометрию Вселенной (Рис. 4.4). Можно оценить среднюю плотность вещества в доступной изучению части Вселенной, которую называют **метагалактикой**.

Важное подтверждение правильности нестационарных моделей Вселенной – открытие предсказанного Г. Гамовым⁴ **реликтового излучения**, оставшегося от ранних этапов эволюции Вселенной (отсюда и название –

⁴ Джордж Гамов – выдающийся американский физик-теоретик российского происхождения, был учеником А. Фридмана.

реликтовое). На ранних этапах расширения вещество Вселенной имело огромную плотность и высокую температуру и представляло собой горячий газ, излучавший электромагнитные волны во всех направлениях. Спектр излучения этого газа соответствовал его температуре согласно закону Вина. Вследствие высокой плотности газ был непрозрачным, излучение поглощалось. Вследствие расширения плотность газа уменьшалась, и он стал прозрачным. Перестав поглощаться, связанное с горячим газом излучение со скоростью света распространяется по всем направлениям во Вселенной.

Согласно теоретическим расчётам, изначально реликтовое излучение приходилось на оптическую область спектра, так как было образовано газом, имевшим температуру в тысячи кельвинов. Красное смещение, вызванное расширением Вселенной, сместило этот максимум в радиодиапазон, увеличив длины волн излучения примерно в 1000 раз. Поэтому сейчас спектр реликтового излучения соответствует примерно 3 К (-270°C). Предсказанное Г. Гамовым в 1948 году реликтовое излучение было обнаружено в 1965 году А. Пензиасом и Р. Вильсоном: они зарегистрировали фоновое микроволновое излучение с длиной волны 1 мм, что, согласно закону Вина, соответствует температуре излучения 2,7 К.

Тщательные наблюдения показали, что открытое излучение равномерно заполняет видимую Вселенную и не связано ни с одним из известных небесных тел или их систем. Очевидно, что оно характеризует горячее и сверхплотное состояние вещества в начале расширения.

Модель горячей расширяющейся Вселенной подтверждена наблюдениями и описывает эволюцию Вселенной с момента расширения. Но появляются новые данные, опровергающие или подтверждающие имеющиеся модели. Таким образом, стандартная космологическая модель не является чем-то неизменным, постоянным, она зависит от эпохи. Иными словами, стандартная космологическая модель является эволюционным понятием. Она меняется по мере получения новых данных, вносятся уточнения, немного изменяются параметры. Современная стандартная космологическая модель носит название «космологическая модель Лямбда-CDM», где лямбда – это лямбда-член Λ , отвечающий за темную энергию, CDM – это Cold Dark Matter (холодная темная материя). В этой модели объединились несколько различных космологических моделей, то есть мы можем чуть-чуть менять параметры, делать какие-то добавления и говорить, что все это находится в рамках данного определения. Подробнее об этом смотрите в источнике <https://postnauka.ru/video/50665>.

Проверь себя (задания для самопроверки)

I. Укажите верный, на Ваш взгляд, ответ для каждого вопроса.

1. Книга, в которой была изложена количественная модель движения планет – «Альмагест» была написана во II веке до н.э.

1.1. Аристотелем

1.2. Коперником

1.3. Птолемеом

- 1.4. Гиппархом
- 1.5. Александром Македонским
2. *Научные достижения Коперника состоят в том, что он*
 - 2.1. на основе эмпирических данных доказал движение Земли вокруг Солнца;
 - 2.2. на основе теоретических закономерностей доказал движение Земли вокруг Солнца;
 - 2.3. экспериментально доказал вращение Земли вокруг своей оси;
 - 2.4. создал математическую модель, в принципе объясняющую результаты астрономических наблюдений за планетами;
 - 2.5. разработал гелиоцентрическую модель мира, оспаривающую поддержанную церковью модель геоцентризма.
3. *Скорость разбегания галактик согласно закону Хаббла определяется*
 - 3.1. массой галактик;
 - 3.2. размером галактик;
 - 3.3. типом галактик;
 - 3.4. расстоянием до галактик;
 - 3.5. составом галактик.
4. *Какое открытие полностью опровергло гипотезу о стационарности Вселенной?*
 - 4.1. открытие реликтового излучения;
 - 4.2. открытие квазаров;
 - 4.3. обнаружение «скрытой массы»;
 - 4.4. открытие черных дыр;
 - 4.5. обнаружение красного смещения в спектрах далеких галактик.
5. *Космологическое расширение Метагалактики влияет на расстояние от Земли до*
 - 5.1. Луны;
 - 5.2. центра Галактики;
 - 5.3. ближайшего квазара;
 - 5.4. галактики М31 в созвездии Андромеды;
 - 5.5. центра местного сверхскопления галактик.
6. *Космологическое расширение Вселенной эмпирически подтверждается наблюдением*
 - 6.1. распада галактик;
 - 6.2. разбегания галактик;
 - 6.3. черных дыр в ядрах галактик;
 - 6.4. увеличения межзвездного расстояния в нашей галактике;
 - 6.5. увеличения радиусов орбит объектов Солнечной системы.
7. *Модели эволюции Вселенной Фридмана базируются на:*
 - 7.1. общей теории относительности;
 - 7.2. электродинамике;
 - 7.3. квантовой теории;
 - 7.4. термодинамике;
 - 7.5. ньютоновской динамике.
8. *Реликтовое излучение:*
 - 8.1. изотропно во всей Вселенной;
 - 8.2. изотропно только в системе отсчета, связанной с «разбегающимися» галактиками;
 - 8.3. анизотропно во всей Вселенной;
 - 8.4. анизотропно в системе отсчета, связанной с движущейся Землей.
 - 8.5. среди ответов 8.1-8.4 нет правильного.

II. Правда или ложь. Отметьте правдивые высказывания символом П, неверные высказывания – символом Л.

1. Птолемей утверждал, что в центре мира находится Солнце, а планеты, звёзды и другие тела обращаются вокруг него.
2. Космологическая модель И. Ньютона утверждает, что Вселенная бесконечна и стационарна.
3. Закон Хаббла утверждает, что Вселенная будет расширяться всегда.
4. А. Фридман, решив мировые уравнения ОТО, пришёл к выводу, что Вселенная стационарна.
5. Будущее Вселенной зависит от средней плотности вещества во Вселенной.
6. Солнечная система расположена в центре Вселенной, так как далёкие галактики удаляются от неё.
7. Расширение планетарных туманностей является следствием расширения Вселенной.
8. Обнаруженное в 1965 году фоновое микроволновое излучение является доказательством того, что Вселенная в начале эволюции была горячей.
9. Реликтовое излучение – это излучение, дошедшее до нас от самых первых звёзд.
10. Стандартная космологическая модель зависит от эпохи.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. Основные положения гелиоцентрической системы мира сформулировал _____.
2. Основным аргументом ложности гелиоцентрической модели мира в древние времена являлось то, что невозможно было определить _____ звёзд.
3. Изотропность означает «одинаковое(ая) _____».
4. Однородность означает «одинаковое(ая) _____».
5. А. Эйнштейн ввёл «космологический член» Λ для того, чтобы _____.
6. Красное смещение свидетельствует о _____ Вселенной.
7. Если средняя плотность вещества во Вселенной меньше критической плотности, то в будущем _____.
8. Если средняя плотность вещества во Вселенной больше критической плотности, то в будущем _____.
9. Если средняя плотность вещества во Вселенной равна критической плотности, то в будущем _____.
10. Доступная изучения часть Вселенной называется _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии Учебное пособие. Изд 2-е, испр. - М.: Едиториал, 2004 г. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М, Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Черепашук А.М. Вселенная, жизнь, чёрные дыры // А.М. Черепашук, А.Д. Чернин. – Фрязино: Век 2, 2003.
7. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. – М.: Наука, 1976.
8. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методическое пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

Задания для самостоятельной работы

1. В спектре галактики Андромеды наблюдается сдвиг спектральных линий в фиолетовую (коротковолновую) часть спектра. Какой вывод о движении этой галактики по отношению к нашей следует сделать на основании этого факта?
2. Используя закон Хаббла, определите максимальное расстояние, до которого можно наблюдать небесные тела.
3. Если диаметр галактики Андромеда, равный примерно 34 кпк, изобразить отрезком длиной 1 см, то отрезок какой длины изобразит расстояние до наиболее далёких из наблюдаемых галактик (около 10 млрд. световых лет)?
4. Определите, на каком расстоянии от нас находится галактика, удаляющаяся со скоростью 20 000 км/с.
5. Рассчитайте, какой была критическая плотность, когда Вселенная была втрое меньше?
6. Через какое время масса водорода в нашей галактике в 2 раза превысит массу гелия?
7. В то время, когда произошёл Большой взрыв, галактик ещё не было. Почему мы наблюдаем в настоящее время разбегание галактик?
8. Можем ли мы увидеть прошлое нашей Вселенной?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Какие наблюдения Галилео Галилея были наиболее важны для доказательства правильности гелиоцентрической модели мира? Объясните, почему. Используйте для объяснения рисунки, выполненные Галилеем.

2. Объясните с помощью рисунка прямое и попятное движение планеты с точки зрения гелиоцентрической системы мира. Определите отношение продолжительностей прямого и попятного движений планеты за один синодический период.

Тема 5 Вселенная. "Стандартная" космологическая модель

Краткий обзор теоретического материала

5.1 Современные представления о строении Вселенной

Все наши знания о Вселенной базируются на наблюдениях. По мере накопления данных об окружающем мире и развития наук, в первую очередь – физики, менялись взгляды людей на то, как устроен этот мир. В античности, в средние века мир отождествлялся с Солнечной системой. К началу XX века размеры мира расширились – считалось, что наша галактика Млечный Путь и есть вся Вселенная. Революционные открытия XX - начала XXI веков существенно расширили как размеры наблюдаемой Вселенной, так и наши представления о её устройстве и эволюции. Современные наземные и космические обсерватории регистрируют и анализируют излучения всех длин волн.

Из чего состоит Вселенная и как распределено вещество в ней?

Вселенная материальна. Материя существует вне нашего сознания, но она воспринимается органами чувств и познаваема разумом человека. Известны две формы существования материи: вещество (основное свойство – наличие массы покоя) и физические поля (посредством поля осуществляется взаимодействие).

С астрономическими объектами мы уже знакомились в теме 1. Наблюдения свидетельствуют о том, что основным свойством Вселенной является её **системность**: астрономические объекты объединяются в системы, при этом системообразующим фактором является **гравитация**.

Наиболее изученная космическая система – Солнечная система: все её компоненты обращаются вокруг центральной звезды – Солнца, движения планет, карликовых планет, малых тел подчиняются законам физики (закон всемирного тяготения, законы Кеплера, ОТО).

Звёзды также образуют системы различной степени иерархии: кратные звёздные системы, звёздные скопления, галактики. В целом, галактики расположены на относительно более близких расстояниях друг от друга, чем звёзды. Этот факт подтверждается наблюдениями: найдено большое число взаимодействующих галактик.

Галактики объединяются в **группы, скопления и сверхскопления**. Скопления галактик насчитывают сотни и тысячи членов: гигантское скопление в созвездии Девы содержит несколько тысяч членов. Среднее расстояние между скоплениями галактик составляет 30 Мпк. Если мы мысленно по-

строим куб со стороной 300 Мпк⁵ (что соответствует 10 миллиардам световых лет), в нём будет содержаться примерно 1000 скоплений. В этих масштабах вещество распределено однородно.

Наша Галактика, галактика Андромеды (М31) и еще более сорока мелких галактик входят в *Местную группу*, размер которой около 6 миллионов световых лет в поперечнике.

В свою очередь, Местная группа – это малая часть гигантского *сверхскопления*, насчитывающего порядка ста тысяч различных по форме и размерам галактик. Это сверхскопление получило имя Ланиакеа, что переводится с гавайского языка как «Необъятные небеса».

Сверхскопления образуют в пространстве «стенки» громадных «ячеек» – *войдов* (от английского void – пустота), внутри которых галактик почти нет. Такая ячеистая структура Вселенной (её часто сравнивают с пчелиными сотами) была теоретически предсказана выдающимся советским физиком Я.Б. Зельдовичем и носит название *крупномасштабной структуры Вселенной*.

Еще в 1922 году астрономы Джеймс Джинс и Якобус Каптейн исследовали движение звёзд в нашей Галактике и пришли к выводу, что большая часть вещества в галактике невидима; в этих работах, вероятно, впервые появился термин «тёмная материя» (англ. dark matter).

Американский астроном швейцарского происхождения Фриц Цвикки в 1933 г. проанализировал движение галактик скопления Кома (Coma). Оказалось, что средняя относительная скорость движения галактик составляла более 100 км/с. Расчёты показали, что масса видимого вещества, заключенная в галактиках, не удержит скопление от безудержного расширения. В 1959 году Луиза Волдерс (Louise Volders) показала, что спиральная галактика М33 (Галактика Треугольника) не вращается так, как ожидалось в соответствии с кеплеровской динамикой. Эти наблюдательные данные можно объяснить наличием невидимой материи, которая проявляет себя гравитационным воздействием – *тёмной материи*. Масса тёмной материи в несколько раз превышает суммарную массу всего видимого (барионного) вещества: измеренные массы скоплений галактик согласуются с тем, что тёмная материя вкладывает около 25% в полную плотность энергии во Вселенной.

Наиболее вероятные кандидаты в составляющие тёмной материи – гипотетические слабовазаимодействующие массивные частицы, WIMP (англ. Weakly Interacting Massive Particle). В русском языке специального названия для таких частиц нет, иногда их называют вимп-частицы. Эти частицы, во-первых, чрезвычайно слабо взаимодействуют с нашим веществом, иначе они были бы уже обнаружены в земных экспериментах; во-вторых, не должны распадаться на другие, более легкие частицы, иначе бы

⁵ В некоторых источниках – 200 Мпк.

они распались за время существования Вселенной. Одна из наиболее правдоподобных гипотез предполагает, что частицы темной материи в 100–1000 раз тяжелее протона, и что их взаимодействие с обычным веществом по интенсивности сравнимо с взаимодействием нейтрино. Они интенсивно рождались и аннигилировали в очень ранней Вселенной при сверхвысоких температурах (порядка 10^{15} градусов), и часть их дожила до наших дней. При указанных параметрах этих частиц их современное количество во Вселенной получается как раз соответствующим современной плотности тёмной материи.

Согласно данным наблюдений, тёмная материя распределена по Вселенной неравномерно: в среднем её в пять-шесть раз больше, чем барионного вещества, но есть участки, в которых тёмной материи в шестнадцать раз больше, а в некоторых – только в два. Так, по последним оценкам, в нашей Галактике тёмной материи в два раза больше, чем видимого вещества. Но в любом случае её больше, и видимое вещество является отражением распределения тёмной материи, так как притягивается ею.

Таким образом, по результатам последних наблюдений Вселенная имеет ячеистую структуру: она представляется состоящей из огромных ячеек (войдов) с тонкими стенками, которые образованы галактиками, внутри же ячеек вещество практически отсутствует. В галактиках, кроме видимого – барионного – вещества имеется тёмная материя, не излучающая электромагнитных волн, не участвующая в электромагнитном взаимодействии, слабо проявляющаяся в ядерном и слабом взаимодействиях, и по массе в несколько раз превышающая суммарную массу видимого вещества.

Без добавочной гравитации темной массы невозможно объяснить ни возникновение галактик уже через 1 млрд лет после начала расширения Вселенной, ни наблюдаемую крупномасштабную структуру.

5.2 Эволюция Вселенной

Определённые по результатам наблюдений и с использованием закона Хаббла скорости разбегания галактик получаются огромными, до сотен тысяч километров в секунду, а где-то приближаются к скорости света. Следовательно, на некотором расстоянии, на котором скорость удаления галактик компенсирует скорость света, галактики перестанут быть видны. Это расстояние называли *горизонт Вселенной*. Из совсем современных данных, в том числе о постоянной Хаббла $H = 67,8 \pm 0,77$ км/(с·Мпк), получается, что горизонт отстоит от нас на 13,8 миллиарда лет.

Если считать, что время во Вселенной течёт одинаково, то легко понять, что выбор расстояния – это одновременно и выбор возраста исследуемого объекта. Чем дальше мы смотрим, тем более давние события видим, тем моложе там Вселенная.

Согласно современной космологической модели, 13,8 миллиарда лет назад вся Вселенная находилась в состоянии, которое называют *сингуляр-*

ностью: состояние с бесконечной плотностью, в бесконечно малом объёме сосредоточены всё вещество и вся энергия Вселенной. Фундаментальные взаимодействия в таком состоянии неотличимы друг от друга.

Одна из распространённых на сегодня гипотез гласит, что наша вселенная родилась из **пространственно-временной пены квантовых флуктуаций вакуума**⁶. В этой кипящей пене пространства-времени образовался крошечный пузырёк размером 10^{-35} м, из которого и возникла наша Вселенная в результате его стремительного расширения под действием неизвестных современной науке полей, порождающих **антигравитационные** (отталкивающие) силы.

С какого радиуса Вселенной имеет смысл говорить о применимости известных нам законов физики? Это так называемый **планковский радиус**:

$$R_p = \sqrt{\frac{Gh}{2\pi c^2}}$$
, G – гравитационная постоянная, h – постоянная Планка, c – скорость света. Соответствующее ему время – **планковское время**, равно $t_p = \frac{R_p}{c} = 5 \cdot 10^{-44}$ секунд. Скорее всего, именно в момент времени, соответствующий планковскому, выделилось гравитационное взаимодействие.

Согласно теоретическим расчётам, в течение первых 10^{-36} с, когда температура Вселенной была больше 10^{28} К, энергия в единице объема оставалась постоянной, а Вселенная расширялась со скоростью, значительно превышающей скорость света. Этот факт не противоречит теории относительности, так как с такой скоростью расширялось само пространство, а не вещество. Такое расширение привело к наблюдаемой картине современной Вселенной: она выглядит пространственно очень плоской и с громадным видимым объёмом. Эта стадия эволюции называется **инфляционной**.

Из современных теорий квантовой физики следует, что в это время сильное ядерное взаимодействие отделилось от электромагнитного и слабого. Выделившаяся в результате энергия и явилась причиной катастрофического расширения Вселенной – **Большого взрыва** (этот термин был предложен А. Хойлом и прижился), в результате которого поле, обеспечившее расширение Вселенной, распадается и порождает барионную и тёмную материю. Вещество при этом получило такую кинетическую энергию, что начало разлетаться в разные стороны с огромными скоростями и летит до сих пор.

Итак, за период времени от 10^{-43} до 10^{-35} секунды размеры Вселенной увеличились в 10^{400} раз, а в некоторых моделях инфляции до $10^{100000000000}$ раз. На 10^{-36} секунде эволюции Вселенной образовалось вещество.

В этот момент эволюции Вещество было разогрето до столь высоких

⁶ Физики и раньше и теперь считали и считают, что вакуум космического пространства – самый сложный объект природы.

температур и в нём присутствовало огромное число фотонов, которые разбивали привычную нам материю на элементарные составляющие. Вселенная была похожа на гигантский термоядерный реактор. Не было ни атомов, ни молекул. Атомы ионизировались. Ядра разрушались до самых простейших составляющих – протонов и нейтронов. Таким образом, вещество Вселенной представляло собой простейшую смесь элементарных частиц, поведение и состав которых определяются Стандартной моделью физики элементарных частиц. По мере расширения и остывания Вселенной начал протекать процесс образования из этих элементарных частиц химических элементов таблицы Менделеева. Этот процесс называется **первичным нуклеосинтезом**. Он длился с первой секунды до третьей минуты.

Первым эту модель **горячей Вселенной** и первичный нуклеосинтез описал Г. Гамов. В рамках данной модели удалось объяснить происхождение лёгких элементов и их относительную распространённость: около 75% водорода, примерно 25% гелия, менее 1% приходится на дейтерий, гелий-3 и литий. За это время давление и температура упали настолько, что термоядерные реакции прекратились.

Наблюдения распространённости легких элементов и теория первичного нуклеосинтеза позволяют учёным проследить первые секунды эволюции Вселенной.

Следующий довольно длительный этап эволюции Вселенной – эра **рекомбинации**, в течение которой происходило медленное и спокойное расширение, сопровождающееся остыванием вещества. Примерно за 380 000 лет температура понизилась до 3000 К, при этой температуре произошло объединение электронов и протонов в простейшие атомы водорода, примерно в это же время нейтральным стал гелий. Рекомбинация – это переход вещества из состояния плазмы в состояние нейтрального газа. Плазма непрозрачна: фотоны в ней излучались, поглощались, рассеивались на электронах. В процессе рекомбинации излучение стало свободным и заполнило Вселенную, оно сохранило в себе информацию о состоянии Вселенной в момент перехода плазма-газ. На сегодняшний день это самое далекое от нас и самое близкое к моменту Большого взрыва время, которое мы можем наблюдать как **реликтовое излучение**. Реликтовое излучение непосредственно дает нам информацию об условиях во Вселенной спустя 380 000 лет после Большого взрыва. Его наличие доказывает, что молодая Вселенная была не только плотной, но и горячей.

Примерно через 0,5 миллиона от Большого взрыва Вселенная остыла настолько, что вещество перестало излучать свет. Во Вселенной стало темно, холодно и пусто: не было ни одной звезды, ни одной галактики. Этот период эволюции получил название **Тёмная эпоха (тёмные века)**. Согласно модели, пространство было заполнено тёмной материей, реликтовым излучением, которое в те времена соответствовало примерно 150 К, барионная материя составляла 0,1 тёмной и состояла из атомов водорода и

гелия в пропорции 4:1 по массе. То, что происходило в тёмную эпоху, установлено с помощью достаточно надёжных расчётных моделей, так как оттуда до нас дошло только реликтовое излучение, и больше ничего. Эта эпоха закончилась образованием первых звёзд, возраст Вселенной достиг примерно 1 млрд лет.

Как уже говорилось, вещество – газ в атомарном состоянии – было перемешано с тёмным веществом. Атомарный газ начинал сжиматься под действием гравитационных сил конденсации тёмной материи. Формирование звезды зависит от температуры среды, массы конденсирующегося газового облака и наличия в нем молекулярного водорода, который обладает способностью отводить из конденсации тепло, излучая его в окружающее пространство. Образование молекулярного водорода – довольно сложный процесс, молекула не может сформироваться из атомарного водорода при случайных столкновениях атомов. При сжатии температура газа в областях конденсации повышается до 1000 К и более, при этом доля молекулярного водорода несколько увеличивается. Дальнейшая конденсация невозможна при такой температуре, но, благодаря свойству молекулярного водорода отводить тепло, температура в наиболее плотной части области конденсации снижается до 200-300 К, и сжатие продолжается, преодолевая давление газа. Постепенно барионная материя отделяется от тёмной и концентрируется в центре. Первые звёзды были очень массивными (500-1000 масс Солнца), так как образовывались в областях конденсации с большей, чем в настоящее время, температурой. Первые звёзды были и очень горячими: их температура составляла 100000 – 110000 К, это были ультрафиолетовые звёзды.

В конце эпохи тёмных веков формируются не только звёзды, но и наблюдаемая крупномасштабная структура Вселенной.

Первые звёзды сгорали всего за несколько миллионов лет, но успевали выполнить по крайней мере две функции, которые определили свойства последующего мира. Во первых, в результате термоядерных реакций синтеза происходило образование в их недрах «металлов» (так астрономы называют все элементы тяжелее водорода), а истекающий с них «звездный ветер» обогащал металлами межзвездную среду, облегчая формирование последующих поколений звезд. Главным же источником тяжёлых элементов были взрывы сверхновых: так заканчивали свой жизненный путь некоторые первые звёзды. Наиболее массивная часть их в конце своего жизненного пути, по-видимому, образовала черные дыры. Во-вторых, мощное ультрафиолетовое излучение гигантских звезд вызвало быстро развивающийся разогрев и ионизацию межзвездного и межгалактического газа. Этот процесс называют *реионизацией*, так как он был обратным рекомбинации, завершившейся за 250 миллионов лет до этого.

Тёмная эпоха продолжалась около 900 миллионов лет. Период полной темноты, до появления первых звезд, длился короче, около 250 миллионов лет, причем теоретики считают, что в некоторых, совершенно исключительных случаях отдельные звезды могли появиться и раньше, но веро-

ятность этого была очень низкой.

Первые гигантские ультрафиолетовые звёзды входили в образованные, главным образом, тёмной материей *протогалактики*, размеры которых были небольшими. Расстояния между протогалактиками также были небольшими, что привело к объединению их в галактики под действием гравитационных сил. Размеры первых галактик оцениваются в 20-30 световых лет, что всего в 5 раз больше современного расстояния до ближайшей звезды. Для сравнения диаметр нашей Галактики 100 000 световых лет.

Спустя 8,8 млрд лет от начала, или около 5 млрд лет назад, сформировалась Солнечная система. Примерно 3,7 млрд лет назад на Земле зародилась жизнь.

Согласно более ранним космологическим моделям разбегание галактик должно замедляться под действием сил гравитации. Но в 1998 году две группы астрофизиков – одна в США, а другая в Австралии – почти одновременно обнаружили, что самые далекие сверхновые светят не так ярко, как это ожидалось, исходя из того, что Вселенная заполнена материей, гравитирующей по закону Ньютона, то есть обратно пропорционально квадрату расстояния. Это означало, что они расположены от нас дальше, чем должны были бы находиться, если бы Вселенная расширялась в поле обычных гравитационных сил. Учёные пришли к выводу, что космологическое расширение происходит не с замедлением, а с ускорением. Следовательно, во Вселенной должна быть еще какая-то дополнительная энергия, способная на космологических расстояниях противостоять гравитационному притяжению материи. Она и есть то, что стали понимать под словами *тёмная энергия*.

Зная красные смещения, которые происходили на достаточно ранних этапах эволюции Вселенной, астрономы могут определить скорость разбегания галактик и выяснить темп эволюции Вселенной. В результате наблюдения сверхновых было обнаружено, что, когда размеры Вселенной составляли 2/3 от нынешних её размеров, вместо замедления она начала расширяться ускоренно.

Темная энергия темная, по крайней мере, в двух смыслах: она невидима – не излучает свет, не закрывает и не отражает его; её физическая природа и микроскопическая структура абсолютно неясны. Сейчас принято считать, что темная энергия связана с *космологической постоянной* Λ .

Таким образом, современная космологическая модель – Λ -CDM модель утверждает, что Вселенная пространственно плоская, изотропная и однородная на больших расстояниях (порядка 300 Мпк). Она заполнена тёмной энергией (Λ -параметр) и холодной тёмной материей (CDM). По данным европейской космической обсерватории «Планк» на долю обычной материи приходится 4,9% её массы, на тёмную энергию – 26,8%, а тёмная энергия составляет 68,3%.

Дальнейшая судьба нашей Вселенной теперь полностью определяется тёмной энергией, если ее свойства во времени остаются неизменными. Эра всемирного тяготения в межгалактических масштабах закончена. Когда-то введенный А. Эйнштейном Λ -параметр сейчас определяет закон всемирного анти-тяготения и ускоряющееся расширение Вселенной.

«Расширение заставляет нас предполагать существование многочисленных вселенных», – говорит Алан Гут, один из основоположников инфляционной теории, которая также предполагает, что от нашей Вселенной, возможно, когда-нибудь «отпочкуется» собственная дочерняя вселенная. Возможно, и наша собственная Вселенная обрела свое существование, отпочковавшись от более древней, более ранней вселенной. Внутреннее устройство вселенных, фундаментальные взаимодействия и постоянные могут быть различными в разных вселенных. Является ли данная гипотеза фантастикой или реальностью – покажет будущее.

I. Укажите верный, на Ваш взгляд, ответ для каждого вопроса.

- 1.1. Земля, Млечный Путь, Солнечная система, Местная группа;
- 1.2. Земля, Солнечная система, Местная группа, Млечный Путь;
- 1.3. Солнечная система, Земля, Млечный Путь, Местная группа;
- 1.4. Земля, Солнечная система, Млечный Путь, Местная группа;
- 1.5. Солнечная система, Млечный Путь, Местная группа, Земля.
2. *Иерархия космических систем (в порядке возрастания):*
 - 2.1. скопления галактик;
 - 2.2. планетные системы;
 - 2.3. Метагалактика;
 - 2.4. галактики;
 - 2.5. сверхскопления галактик.
3. *По современным представлениям Метагалактика*
 - 3.1. однородна и изотропна;
 - 3.2. неоднородна, но в ней нельзя выделить упорядоченных структур;
 - 3.3. нет единого мнения о структуре Метагалактики;
 - 3.4. имеет ячеистую структуру, стенки ячеек созданы сверхскоплениями галактик, внутри ячеек галактик мало;

3.5. состоит из галактик, которые распределены равномерно в пространстве.

4. *Расширение Вселенной в настоящее время происходит*

4.1. с постоянной скоростью;

4.2. с нулевой скоростью;

4.3. с увеличивающейся скоростью (с ускорением);

4.4. с уменьшающейся скоростью (с замедлением);

4.5. со скоростью света.

5. *Увеличение скорости расширения Вселенной в настоящее время определяется:*

5.1. уменьшением плотности обычной материи во Вселенной;

5.2. увеличением массы Вселенной;

5.3. влиянием физического вакуума (темной материи);

5.4. увеличением давления света, излучаемого звездами;

5.5. взрывами сверхновых звезд.

6. *Самым распространенным химическим элементом во Вселенной является*

6.1. азот; 6.2. кислород; 6.3. гелий; 6.4. металлы; 19.5. водород.

7. *Тяжелые элементы во Вселенной возникли в результате*

7.1. Большого Взрыва; 7.2. процессов звездной эволюции;

7.3. вспышек сверхновых; 7.4. образования галактик;

7.5. реакций синтеза водорода в первые мгновения существования Вселенной.

8. *Происхождение крупномасштабной структуры Вселенной связывают*

8.1. с анизотропией вакуума;

8.2. с барионной асимметрией Вселенной;

8.3. с очень малыми адиабатическими неоднородностями плотности в первоначально однородной Вселенной;

8.4. с наличием темной материи;

8.5. с флуктуациями реликтового излучения

II. Правда или ложь. Отметьте правдивые высказывания символом П, неверные высказывания – символом Л.

1. Галактики во Вселенной распределены беспорядочно.

2. Среднее расстояние между скоплениями галактик составляет 30 Мпк.

3. Тёмная материя равномерно распределена во Вселенной.

4. Первичный нуклеосинтез длился с первой секунды до третьей минуты.

5. Наша Вселенная родилась из пространственно-временной пены квантовых флуктуаций вакуума.

6. Горизонт событий отстоит от нас на 10 миллиардов лет.

7. В момент времени, соответствующий планковскому, выделилось гравитационное взаимодействие.

8. До Большого взрыва время текло в обратном направлении.

9. Модель инфляционной Вселенной объясняет происхождение чёрных дыр.

10. Существование других вселенных подтверждено наблюдениями далёких объектов.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. _____ ускоряет расширение Вселенной.

2. Барионное (видимое) вещество составляет ____% во Вселенной.

3. Наблюдая удалённые сверхновые, астрономы установили, что Вселенная _____.

4. _____ замедляет расширение Вселенной.

5. _____ ускоряет расширение Вселенной.

6. Если бы у Вселенной был край, это нарушило бы предположение о _____.

7. Если бы у Вселенной был центр, это нарушило бы предположение о _____.

8. Без _____ невозможно объяснить возникновение галактик через 1 млрд лет после начала её расширения.

9. Расстояние, на котором скорость удаления галактик компенсирует скорость света, называют _____.

10. Период, в течение которого происходило медленное и спокойное расширение, сопровождающееся остыванием вещества, называют _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии Учебное пособие. Изд 2-е, испр. - М.: Едиториал, 2004 г. – 544 с.

2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М, Прометей, 2013. – 214 с.

3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с

4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.

5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.

6. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методическое пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

Задания для самостоятельной работы

1. Какие наблюдательные факты указывают на то, что окружающая нас Вселенная медленно меняется со временем? Приведите примеры.
2. Если бы Вселенная не расширялась, а галактики, которые мы наблюдаем сейчас, существовали вечно, то небо бы ночью ярко светило. Объясните, почему.
3. Является ли эволюция вещества во Вселенной обратимой?
4. Какие три фактора ограничивают яркость ночного неба?
5. Почему тяжёлые элементы не образовались в ранней Вселенной, как они образуются в звёздах?
6. Почему наши знания о Вселенной раньше планковского времени сильно ограничены?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Первым значение постоянной Хаббла определил сам Эдвин Хаббл, по его оценке $H = 500 \text{ км/(с·Мпк)}$. Рассчитайте возраст Вселенной, соответствующий этому значению H . Были ли в это время (20-30-е годы XX века) наблюдательные факты, противоречащие определённому таким образом возрасту Вселенной?
2. Опишите историю космологической постоянной Λ . Есть ли в настоящее время какие-либо наблюдательные данные, дающие основания полагать, что $\Lambda > 0$? Каковы теоретические предпосылки включения космологической константы в теории эволюции Вселенной?

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Тема 1. Методы астрофизических исследований	5
Тема 2. Физика Солнечной системы	28
Тема 3. Физика звёзд	42
Тема 4. История космологических картин мира	59
Тема 5. Вселенная. «Стандартная» космологическая модель	69