

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

**Е.В. Кондакова**

**АСТРОНОМИЯ:  
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ,  
ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ**

**Практикум**

Елец – 2019

УДК 524.8  
ББК 22.632  
**К 64**

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина  
от 31.01.2019, протокол № 1*

**Рецензенты:**

*А.С. Расторгуев*, доктор физико-математических наук, профессор  
(Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова)

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

**Е.В. Кондакова**

**К 64** **Астрономия: практические задания, задачи и упражнения:**  
практикум. – Елец: Елецкий государственный университет им.  
И.А. Бунина, 2019. – 75 с.

**ISBN 978-5-00151-050-5**

Учебное пособие предназначено для студентов СПО, изучающих курс астрономии. Тематика практических занятий соответствует программе курса. Практикум содержит восемь разделов, приложение со справочными данными, список литературы. В каждом разделе приводится краткий теоретический материал, включающий определения важнейших терминов и понятий, а также законы и формулы, необходимые для решения задач. Вопросы и задачи сгруппированы по трём уровням сложности: базовый, повышенный и высокий. В пособие также вошли практические работы.

Учебное пособие отвечает требованиям ФГОС среднего профессионального образования в плане усиления роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Пособие будет полезно учащимся, а также учителям и преподавателям для организации учебного процесса.

УДК 524.8  
ББК 22.632

**ISBN 978-5-00151-050-5**

© Елецкий государственный  
университет им. И.А. Бунина, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Астрономия является обязательной дисциплиной для учащихся средних общеобразовательных школ и учреждений среднего профессионального образования. Изучение основ этой науки 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.

Согласно требованиям ФГОС среднего профессионального 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 учащимся на всех этапах их самостоятельной работы: от поиска информации до самооценки уровня сформированности знаний.

Качественному усвоению астрономических знаний способствует решение задач различных типов, выполнение практических заданий. В предлагаемом учебном пособии представлены вопросы, задания, упражнения и задачи по всем изучаемым темам астрономии – от классической астрономии (видимые и действительные движения небесных тел, небесные координаты и т.п.) до внегалактической астрономии и космологии. Практикум содержит семь разделов, приложение со справочными данными, список литературы. В каждом разделе приводится краткий теоретический материал, включающий определения важнейших терминов и понятий, а также законы и формулы, необходимые для решения задач. Целесообразно практическую работу начать с ответов на вопросы, выполнения заданий и упражнений, которые разделены на три группы сложности: базовый, повышенный и высокий. Перед решением задач, которые также сгруппированы по уровням сложности (базовый, повышенный и высокий), рекомендуется рассмотреть приведённые в пособии примеры.

В пособие также вошли практические работы, при выполнении которых учащиеся смогут применить имеющиеся у них теоретические знания на практике. Задания сопровождаются подробной инструкцией по их выполнению, что позволяет студентам работать самостоятельно, в том числе и вне аудиторных занятий.

Многие вопросы, задачи, задания практикума имеют межпредметный характер: для их выполнения учащимся потребуются знания, полученные на уроках физики, географии, биологии, геометрии. Кроме того, большое внимание уделяется формированию и развитию метапредметных умений: использованию различных знаковых систем для решения проблемы, преобразованию моделей из одной знаковой системы в другие, поиску информации, её интерпретации, оцениванию достоверности информации и полученных результатов, анализу результатов и формулировке выводов и т.п. Часть работ предполагает работу в группах из двух-трёх и более человек. Особое внимание рекомендуем уделить обсуждению полученных результатов.

Справочные данные, приведённые в Приложении, могут помочь в решении задач сборника и выполнении практических заданий. При решении некоторых задач требуется использовать различные астрономические величины, которые могут быть не приведены в условии задачи. Предполагается, что учащиеся знают значения этих величин, либо легко могут найти их в Приложении или других источниках. При решении количественных задач ответы рекомендуется округлять. Обратите внимание, что в разных справочниках и учебниках значения некоторых величин имеют несколько различающиеся значения, что может привести к получению вариативных результатов.

Выполнение работ практикума, с одной стороны, способствует успешному усвоению курса астрономии в соответствии с программой, а с другой стороны – более глубокому пониманию изученных фактов, расширяет кругозор студентов, способствует формированию умений и навыков работы в группе.

Пособие будет полезно учащимся, которым оно поможет лучше изучить и понять астрономию, а также учителям и преподавателям для организации учебного процесса.

Желаем успехов в овладении знаниями и в познании безграничной и загадочной Вселенной!

# 1. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

## Основные понятия, законы и формулы

**Астрономические объекты** – это объекты естественного происхождения, которые находятся за пределами атмосферы Земли. К астрономическим объектам относятся: вещество (газ и пыль), небесные, или космические, тела (планеты, спутники планет, астероиды, кометы, метеороиды, звёзды на разных этапах их жизни) и их совокупности.

Вещество (газ, пыль), электромагнитное излучение и магнитные поля, заполняющие пространство между звёздами в галактиках, называют **межзвёздной средой (МЗС)**. Состав вещества МЗС: газ (~89% водорода, ~9% гелия, ~2% составляют более тяжелые элементы); пыль (атомы и молекулы тяжёлых элементов) – не менее 1% от массы газа. Плотность вещества МЗС составляет от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов частиц в кубическом метре.

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

Метагалактикой называют доступную наблюдениям часть Вселенной. **Вселенная** – это весь безгранично простирающийся материальный мир, иными словами – всё, что нас окружает.

«Космический» адрес Земли – Солнечная система, галактика Млечный путь, Местная группа галактик, Сверхскопление Девы, Вселенная.

Основным методом астрономии является **наблюдение**. Развитие астрономии связано с совершенствованием аппаратной базы и техники наблюдений, а также с возможностями интерпретации результатов. Сегодня астрономия стала всеволновой: наблюдения космических объектов проводятся в видимом (оптическом), инфракрасном, радио, рентгеновском и гамма диапазонах. Современная принимающая техника способна «поштучно» регистрировать световые кванты.

**Астрономическая единица (а.е.)** – это среднее расстояние между центрами Земли и Солнца, равное примерно 150 000 000 км.

28-я Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС) в сентябре 2012 года предложила считать:

$$1 \text{ а.е.} = 149\,600\,000 \text{ км.}$$

Также было принято решение стандартизовать международное обозначение астрономической единицы: «au».

**Световой год (св.г.)** – это расстояние, на которое свет от источника удалится за 1 год.  $1 \text{ св.г.} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ км.}$

При одновременном наблюдении космического объекта из двух удалённых на большое расстояние точек возникает кажущееся смещение этого объекта на небе, которое называется **параллактическим**

смещением. Величина параллактического смещения называется **параллаксом**.

**Годичным параллаксом**  $p$  называют угол, под которым с удалённого объекта был бы виден перпендикулярный лучу зрения радиус орбиты Земли (рис. 1.1). Чем дальше от наблюдателя расположен космический объект, тем меньше его годичный параллакс.

Другое название годичного параллакса – **горизонтальный экваториальный параллакс**.

**Парсек** (пк) – расстояние, на котором звезда имела бы параллакс, равный одной угловой секунде. Название «парсек» происходит от «**п**араллакс в **с**екундах».  $1 \text{ пк} = 3,0863 \cdot 10^{13} \text{ км}$ .

Зная параллакс небесного объекта, можно вычислить расстояние  $D$  до него (Рис.1.1):

$$D = \frac{a}{\sin p} \quad [1.1].$$

Параллаксы  $p$  небесных объектов очень малы, поэтому можно считать  $\sin p \approx p$ , где  $p$  выражен в радианах.

Вспомним: радиан – единица измерения плоских углов в Международной системе единиц (СИ). Угол в 1 радиан соответствует дуге, длина которой равна радиусу окружности.

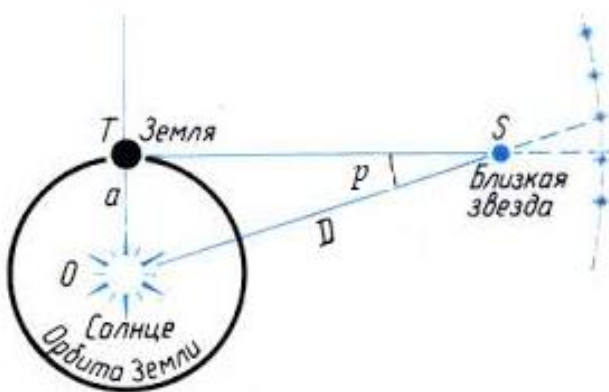


Рисунок 1.1 Схема годичного параллакса

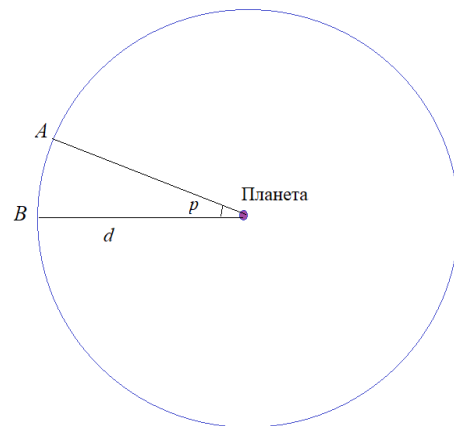


Рисунок 1.2 Вычисление расстояний с использованием параллакса

Формулу [1.1] можно упростить, используя  $\sin p \approx p$  и выразив  $p$  в угловых секундах:

$$D = \frac{206265}{p''} a \quad [1.2]$$

Так как расстояние  $D$ , соответствующее параллаксу  $p = 1''$ , по определению равно 1 парсек, то в парсеках расстояние вычисляется как

$$D = \frac{1}{p''} \quad [1.3]$$

Параллаксы звёзд очень малы: даже для ближайших звёзд параллаксы меньше одной угловой секунды.

Для определения расстояний до тел Солнечной системы используют **метод горизонтального параллакса**, который предложил греческий математик Евклид (около 300 г. до н.э.). Проиллюстрируем этот метод на примере. Пусть требуется найти расстояние до планеты. Для этого производим наблюдение этой планеты из двух мест земной поверхности, находящихся далеко друг от друга (сотни, а лучше тысячи километров). На рис. 1.2 это точки А и В, расстояние между которыми (его называют **базой**) нам известно и равно  $b$ . Через точки А и В построим окружность, в центре которой находится искомая планета. Определяем горизонтальный параллакс планеты  $p$  из наблюдений. 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 ( $360^\circ$ ), т.е.

$$\frac{b}{2\pi d} = \frac{p}{360^\circ},$$

откуда

$$d = \frac{b(360^\circ/2\pi)}{p} \quad [1.4]$$

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

$$d = b \frac{206265}{p} \quad [1.5]$$

Зная расстояние до объекта  $d$  и измерив **угловой диаметр**  $\varphi$  объекта, можно рассчитать его линейный диаметр  $D$  (Рис. 1.3):

$$\frac{D}{2\pi d} = \frac{\varphi}{360^\circ}; \quad D = d \frac{\varphi}{(360^\circ/2\pi)}; \quad D = d \frac{\varphi}{57,3^\circ} \quad [1.6]$$

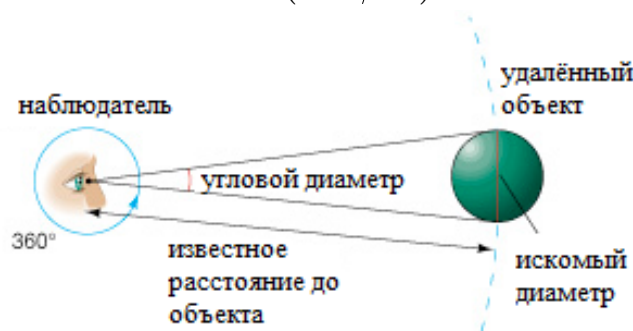


Рисунок 1.3 Определение линейных размеров удалённого объекта

## Вопросы, задания и упражнения

### Базовый уровень сложности

1.1. Перечислите астрономические объекты, которые можно наблюдать невооружённым глазом (не менее 5).

1.2. Для чего древние люди наблюдали за небесными объектами? Приведите примеры практических задач, которые в древние времена решали люди с помощью этих наблюдений.

1.3. Перечислите астрономические явления, которые вы наблюдали специально или невольно хотя бы раз в жизни.

1.4. Дайте определение единицам измерения расстояний в астрономии. Выразите световой год и парсек в астрономических единицах.

1.5. Что больше: световой год или парсек? Выразите световой год в парсеках и парсек в световых годах.

1.6. В каких единицах удобно измерять расстояния: а) в Солнечной системе; б) до звёзд; в) до галактик?

1.7. Назовите основной метод исследования астрономических объектов. Можно ли провести астрономические эксперименты? Ответ обоснуйте.

1.8. Можно ли считать астрологию наукой? Ответ обоснуйте.

1.9. Почему современную астрономию называют всеволновой?

### Повышенный уровень сложности

1.10. В 1675 году учёный из Дании Олаф Ремер наблюдал за затмениями спутников Юпитера. Какие выводы и вычисления сделал учёный по результатам наблюдений?

1.11. Какой химический элемент был впервые обнаружен в конце XIX века в ходе астрономических наблюдений?

1.12. Приведите примеры астрономических открытий, которые используются в а) физике; б) химии; в) геофизике; г) геологии; д) биологии; е) медицине. В каких ещё науках используются результаты астрономических исследований?

1.13. Перечислите задачи астрономии, решения которых имеют практическое применение в конкретных (укажите, каких именно) областях науки, техники и производства.

1.14. Используя Приложение и ресурсы Интернет, заполните таблицу.

Объект	Расстояние от Земли		
	км	св.с/св.мин/св.г.	пк
Луна			
Марс			
Солнце			
Плутон			
Сириус			
Галактика Андромеда			

1.15. Перечислите требования к месту, где можно было бы построить астрономическую обсерваторию.



1.16. Зачем нужны космические обсерватории? Назовите известные вам космические телескопы и диапазоны электромагнитного излучения, в которых они работают.

1.17. С момента своего возникновения астрономия стимулировала развитие других наук. Продолжается ли этот процесс в настоящее время? Приведите примеры.

### Высокий уровень сложности

1.18. Запишите «космический адрес» планеты Марс.

1.19. Наблюдения – основной метод астрономии. Поэтому развитие этой науки связано с совершенствованием техники наблюдений: приборов для наблюдений, методов регистрации излучения, развитием физических теорий. Положив в основу технику наблюдений и их результативность, выделите этапы в истории развития астрономии и укажите их примерную продолжительность.

1.20. В 1 парсеке 206265 астрономических единиц, а 1 радиан равен 206265 угловых минут. Случайно ли это совпадение? Ответ поясните.

### Примеры решения задач

**Пример 1.1.** Расстояние между двумя астрономами 1000 км. Одновременно наблюдая Луну, они определили её параллакс  $p = 9,0'$ . Вычислите расстояние до Луны, приняв, что линия, соединяющая астрономов, перпендикулярна направлению на Луну.

**Решение.** Выразим параллакс в градусах:

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

Используя формулу (1.4), находим

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

Можно использовать формулу (5), но тогда нужно выразить 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 составляет 384000 км.

**Пример 1.2.** Угловой диаметр лунного диска 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.

### **Задачи базового уровня сложности**

1.21. Когда Юпитер находится на расстоянии 628 млн. км от Земли, его угловой диаметр равен  $47''$ ,2. Определите линейный радиус Юпитера. Сравните полученный результат с табличным значением.

1.22. Линейный радиус Венеры равен 0,95 земного радиуса. Когда Венера ближе всего подходит к Земле, её угловой радиус равен  $32''$ ,4. Определите наименьшее расстояние от Земли до Венеры.

1.23. Вычислите горизонтальные экваториальные параллаксы Луны для моментов, когда она находится на ближайшем (356 410 км), наибольшем (406 740 км) и среднем (384 000 км) геоцентрическом расстоянии. Примите экваториальный радиус Земли равным 6 378 км.

1.24. Давайте пофантазируем. На общежития ЕГУ им. И.А. Бунина установили мощнейший источник света. До каких из приведенных ниже пунктов смог распространиться свет за одну минуту: до Москвы ( $\sim 356$  км); до Парижа ( $\sim 2550$  км); до Кейптауна (примерно 10 000 км); до Луны (384 000 км); до Венеры (45 000 000 км)?

### **Задачи повышенного уровня сложности**

1.25. Рассеянное звёздное скопление Плеяды удалено от Земли на 130 пк. Его видимые размеры на небе составляют примерно  $110'$ . Оцените диаметр этого скопления.

1.26. Оцените, во сколько раз Луна меньше Солнца, если их угловые диаметры одинаковы, а горизонтальные параллаксы соответственно равны  $57'$  и  $8,8''$ ?

1.27. Свет от звезды Ригель ( $\beta$  Ориона) идет к Земле 772,9 лет. Определите значение годичного параллакса у звезды Ригель.

1.28. Первая звезда находится от Солнца на расстоянии 60 пк, вторая – на  $2 \cdot 10^8$  а.е., параллакс третьей равен  $0,01''$ , свет от четвертой путешествует до Солнца 200 лет. Расположите звезды от самой ближней к Солнцу до самой далёкой от него.

### **Задачи высокого уровня сложности**

1.29. Измерения показали, что собственное движение звезды равно  $1''$ /год, причем расстояние до звезды не меняется. Какова скорость движения звезды в пространстве, если расстояние до нее равно 10 пк?

1.30. (ВОШ, 2016 г, Муниципальный этап, г. Липецк) 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?

## 2. АСТРОМЕТРИЯ

### Основные понятия, законы и формулы

Наблюдения показывают, что взаимное расположение звёзд на небе меняется очень медленно, а поэтому их положение можно считать неизменным. Для удобства ориентирования с древних времен люди объединяли яркие звёзды в **созвездия**.

В 1928 году Международный астрономический союз (МАС) определили 88 официально различимых созвездий. Таким образом, в настоящее время **созвездия** – это участки, на которые разделена небесная сфера для удобства ориентирования на звёздном небе. То, что ранее называли созвездием – хорошо различимую на ночном небе группу звезд, имеющую исторически сложившееся устойчивое имя – сейчас правильно называть **астеризм**. Астеризм могут составлять звёзды как одного, так и нескольких соседних созвездий.

Небесная сфера вращается вокруг **оси мира** – воображаемой линии, пересекающей сферу в точках, называемых **северным  $P$**  и **южным  $P'$  полюсами мира**. Вблизи северного полюса мира находится Полярная звезда. Ось мира параллельна оси вращения Земли. По аналогии с земным экватором определяют **небесный экватор**.

Видимое вращение небесной сферы является отражением суточного вращения Земли. Земля вращается с запада на восток (против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса Земли), видимое вращение небесной сферы происходит с востока на запад (по часовой стрелке для наблюдателя, находящегося в Северном полушарии Земли).

В течение года Солнце смещается относительно звёзд с запада на восток, двигаясь вдоль линии **эклиптики**. Это видимое годичное движение является отражением обращения Земли вокруг Солнца. Эклиптика является проекцией земной орбиты на небесную сферу. За каждые сутки Солнце проходит около  $1^\circ$ , перемещаясь по **зодиакальным созвездиям** (Рис. 2.1), большинство из которых названы в честь различных животных.

Плоскость эклиптики пересекается с плоскостью небесного экватора под углом  $23,4^\circ$ , точки пересечения называют **точками весеннего ( $\Upsilon$ ) и осеннего ( $\Omega$ ) равноденствий** (Рис. 2.2, б).

Движение Луны на фоне звёзд происходит противоположно суточному вращению небесной сферы – с запада на восток. Оно является следствием действительного движения Луны вокруг Земли. Фазы Луны – изменение её внешнего вида – происходят из-за перемещения Луны относительно Земли и Солнца.

Точки восхода и захода Солнца и Луны изменяют своё положение в течение года, и только дважды в год Солнце восходит и заходит точно в точках востока и запада. Меняется и время восхода и захода, то есть

продолжительность суток. Единицы счёта времени – сутки, год – связаны с видимым движением Солнца.

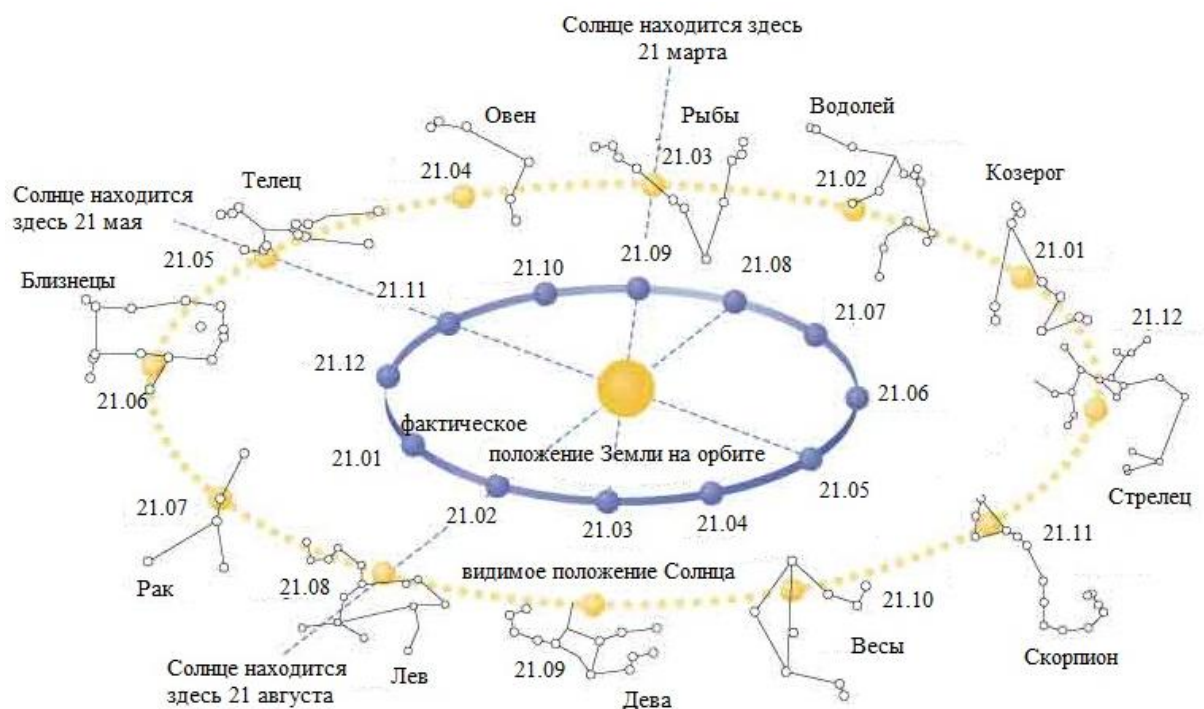


Рисунок 2.1 Видимое годичное движение Солнца

Для изучения видимого расположения и движения небесных объектов используют **системы координат**.

Основной плоскостью **горизонтальной системы координат** (Рис. 2.2, а) является **плоскость математического горизонта**. Координаты: **высота  $h$**  светила над горизонтом (подобна географической широте) и **азимут  $A$**  (аналогична географической долготе).

В **экваториальной системе координат** (Рис. 2.2, б) основная плоскость определяется **небесным экватором**. Координаты: **склонение  $\delta$**  (аналог географической широты) и **прямое восхождение  $\alpha$**  (аналогична географической долготе).

**Высота  $h_p$  полюса мира над горизонтом равна географической широте места наблюдения  $\varphi$ .**

В своём суточном движении светило движется с востока на запад, постепенно поднимаясь над горизонтом, пока не достигнет максимальной высоты – **кульминации**. Для наблюдателя, находящего в Северном полушарии Земли, светила кульминируют точно над точкой юга, а жители южного полушария наблюдают кульминации над точкой севера.

Зная широту места наблюдения  $\varphi$  и склонение  $\delta$  небесного объекта, можно определить его высоту над горизонтом в момент кульминаций. Если  $\delta < \varphi$ , объект кульминирует к югу от зенита, его высота в верхней кульминации

$$h_v = 90^\circ - \varphi + \delta \quad [2.1]$$

Если  $\delta > \varphi$ , объект кульминирует к северу от зенита, его высота

$$h_с = 90^\circ + \varphi - \delta \quad [2.2]$$

В нижней кульминации

$$h_n = -90^\circ + \varphi + \delta \quad [2.3]$$

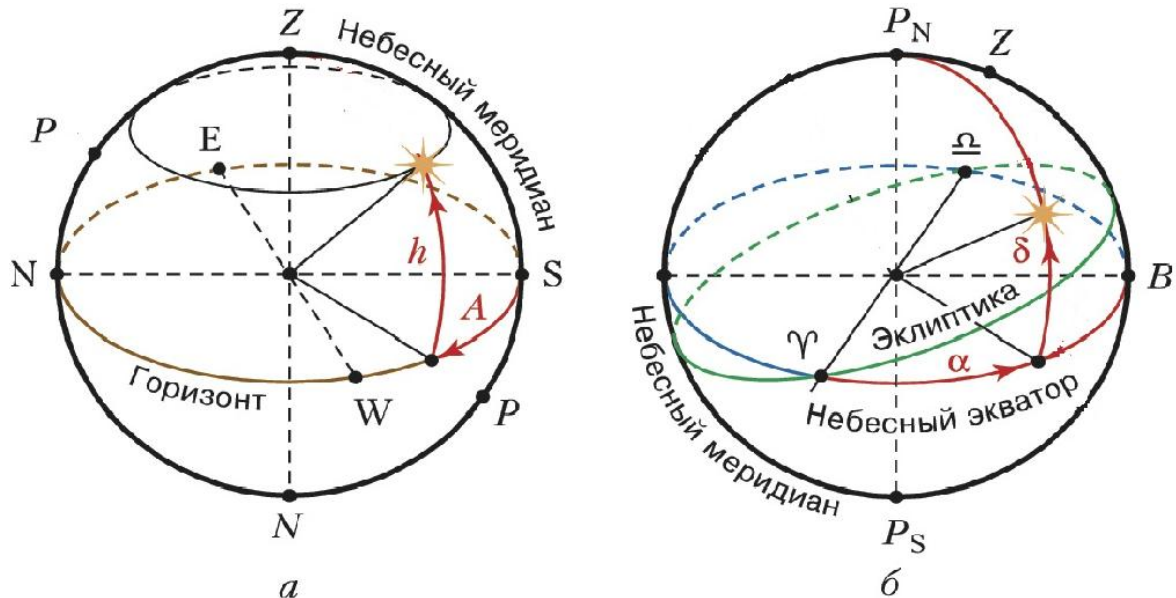


Рисунок 2.2. Системы небесных координат: *a* – горизонтальная, *б* – экваториальная.

В зависимости от склонения светила можно разделить на три группы: *незаходящие, невосходящие, восходящие и заходящие* звезды.

На данной широте  $\varphi$  каждая звезда всегда кульминирует на одной и той же высоте. Измерив высоту светила в верхней  $h_с$  и в нижней  $h_n$  кульминациях, можно вычислить широту места наблюдения:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{h_с - h_n}{2} \quad [2.4]$$

Для нахождения склонения светила при известной широте места наблюдения используем формулу:

$$\delta = \frac{h_с + h_n}{2} \quad [2.5]$$

Не только вид звёздного неба, но и высота Солнца в кульминации в заданную дату зависят от широты места наблюдения.

Полуденную высоту Солнца можно определить по формуле:

$$h_\odot = 90^\circ - \varphi + \delta_\odot \quad [2.6]$$

где  $\varphi$  – географическая широта места наблюдения,  $\delta_\odot$  – склонение Солнца. В течение года склонение Солнца меняется, следовательно, меняется его полуденная высота. Склонение Солнца на нужную дату можно найти в астрономическом календаре, либо в Интернет, например, на сайте Солнечный калькулятор <http://www.hmn.ru/index.php?index=41&value=1>.

Две основные единицы счёта времени – **сутки** и **год** – установлены из астрономических наблюдений. Время можно определять по звёздам –

это **звёздное время**, либо по Солнцу – **солнечное время**. В повседневной жизни используют солнечное время. Звёздные сутки короче солнечных суток примерно на 4 минуты.

**Местное время** для любой точки земного шара определяется по положению Солнца или звёзд. В двух пунктах Земли местное время отличается в точности настолько, насколько отличается их географическая долгота:

$$T_1 - T_2 = \lambda_1 - \lambda_2 \quad [2.7]$$

Долготу отсчитывают от выбранного по договорённости начального (нулевого) меридиана: он проходит через обсерваторию в Гринвиче (Великобритания). Местное время нулевого меридиана называют **всемирным временем** – Universal Time (UT).

Местное время любого пункта на Земле равно сумме всемирного времени в этот момент и долготы данного пункта, отсчитанной от нулевого меридиана и выраженной в часовой мере:

$$T_1 = UT + \lambda_1 \quad [2.8]$$

Пользоваться в повседневной жизни местным временем неудобно, поэтому было введено **поясное время**. Земной шар разделили вдоль меридианов на 24 часовых пояса – по числу часов в сутках. Каждый пояс занимает примерно  $15^\circ$ , в каждой точке внутри часового пояса время одинаково. Таким образом, счёт времени ведётся на 24 основных меридианах, которые отстоят друг от друга на  $15^\circ$  по долготе и располагаются примерно посередине каждого часового пояса. Время соседних часовых поясов отличается на 1 час. Поясное время  $T$  определяется по формуле:

$$T = UT + n \quad [2.9],$$

где UT – всемирное время,  $n$  – номер часового пояса.

**При пересечении границы двух соседних поясов с востока на запад часы надо переставить на 1 час назад, а с запада на восток – на 1 час вперед.**

В России действует **декретное время**, которое на 1 час опережает местное. Разница между московским и всемирным временем составляет 3 часа.

Луна движется на фоне звёзд с запада на восток, т.е. противоположно суточному вращению небесной сферы. Это видимое движение объясняется действительным обращением Луны вокруг Земли с линейной скоростью примерно 1 км/с.

Перемещаясь относительно Земли и Солнца, Луна изменяет также внешний вид. Это явление называют **сменой фаз** или просто **фазами Луны** (Рис. 2.3). В **новолуние** Луна находится между Солнцем и Землёй и поэтому не видна с Земли. Примерно через 7 дней, когда угловое расстояние между Солнцем и Луной достигает  $90^\circ$ , мы видим на небе половину диска Луны, обращенную выпуклостью к западу. Эта фаза называется

**первой четвертью.** Ещё через примерно 7 дней (14 дней от новолуния) Луна находится на своей орбите противоположно Солнцу, мы видим на небе весь диск Луны – это фаза **полнолуния**. Спустя примерно 21 день от новолуния мы вновь видим на небе половину диска Луны, но обращённую выпуклостью на восток. Эта фаза – **последняя (третья) четверть**.

Время, за которое происходит полная смена фаз Луны, называют **синодическим** месяцем. Его продолжительность составляет около 29,5 дней. Период обращения Луны вокруг Земли относительно звёзд называют **сидерическим** месяцем. Его длительность – примерно  $27\frac{1}{3}$  дней.

Период вращения Луны вокруг своей оси равен также  $27\frac{1}{3}$  суток, то есть сутки на Луне продолжаются почти месяц. Из-за этого Луна всегда повернута к Земле одной и той же стороной.

Орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом около  $5^\circ$  и пересекается с ней в двух точках – **узлах орбиты Луны**.

Видимые угловые диаметры Луны и Солнца очень близки и равны примерно  $0,5^\circ$  (Рис. 2.4). В фазе новолуния Луна может закрыть собою Солнце, и наступит **солнечное затмение**. В полнолуние, когда Земля оказывается между Луной и Солнцем, может произойти **лунное затмение**. Для наступления затмений необходимо, чтобы Солнце и Луна оказались вблизи узла орбиты Луны. При этом если Солнце оказывается вблизи того же узла, где и Луна, то наблюдается солнечное затмение, если около противоположного, то лунное. Соотношения между видимыми угловыми размерами Луны и Солнца и наклоном лунной орбиты к эклиптике таковы, что солнечные затмения могут возникнуть в течение 17 суток, а лунные – в течение 11 суток до и после момента прохождения Солнца через узел.

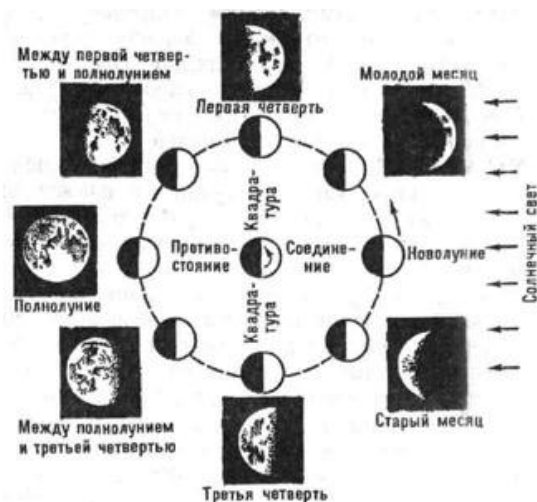


Рисунок 2.3 Фазы Луны

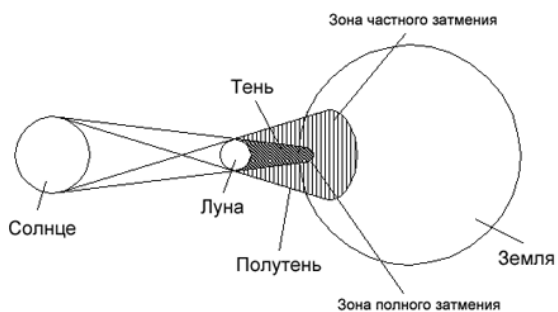


Рисунок 2.4 Схема солнечного затмения

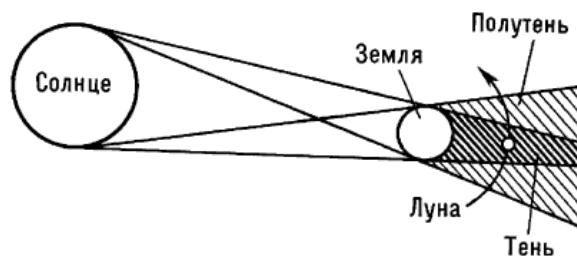


Рисунок 2.5 Схема лунного затмения

Лунное затмение видно из любой точки Земли, где в это время можно наблюдать Луну. Если Луна полностью попадает в конус земной тени, наблюдается **полное** затмение, если частично – **частное** (Рис. 2.5).

**Полное солнечное затмение** (Рис. 2.4) наблюдается в тех местах на поверхности Земли, куда падает тень Луны. Вследствие движения Луны по орбите и вращения Земли лунная тень прочерчивает на поверхности Земли **полосу полного солнечного затмения** – путь длиной в несколько тысяч километров. Продолжительность солнечного затмения наибольшая в центре этой полосы, она может достигать 8 минут (на экваторе). В местах, далёких от экватора, продолжительность затмения составляет всего 2-2,5 минуты. В зоне **полутени** наблюдается **частное солнечное затмение**.

Видимые угловые диаметры Земли и Луны меняются вследствие эллиптичности орбит. Когда в момент затмения Земля оказывается в самой близкой к Солнцу, а Луна – в самой далёкой от Земли точках их орбит, то диск Луны не может полностью закрыть собой диск Солнца, и на Земле наблюдается **кольцеобразное солнечное затмение**.

## Вопросы, задания и упражнения

### Базовый уровень сложности

- 2.1. Можно ли долететь до какого-либо созвездия на ракете? Ответ поясните.
- 2.2. Изменяются ли очертания созвездий, если мы будем наблюдать их с Марса?
- 2.3. Выберите из списка и запишите в столбцы (1) названия созвездий; (2) астеризмы; (3) имена звёзд.  
Скорпион, Капелла, Микроскоп, Летний Треугольник, Пояс Ориона, Ригель, Большой Ковш, Сириус, Малый Пёс, Орёл, Канопус.
- 2.4. Как называются точки пересечения небесного меридиана с математическим горизонтом?
- 2.5. Где на небесной сфере находятся точки востока и запада?
- 2.6. Почему высота Солнца над горизонтом меняется в течение года?
- 2.7. Перечислите созвездия, через которые проходит видимый годичный путь Солнца.
- 2.8. Какие координаты – экваториальные или горизонтальные – используются при составлении звёздных карт?
- 2.9. Перечислите условия, необходимые для возникновения солнечного затмения.
- 2.10. Астронавт на Луне наблюдает «полноземелие». Какую фазу Луны видит наблюдатель на Земле в этот день?
- 2.11. Объясните, почему во время полного лунного затмения мы видим Луну, окрашенную в тёмно-красный цвет?
- 2.12. Сколько раз в течение года можно наблюдать все фазы Луны?
- 2.13. Какие затмения – солнечные или лунные – происходят чаще? Почему?



2.14. В какой момент по местному времени должно начаться лунное затмение в пункте с географической долготой  $3^{\text{ч}} 32^{\text{м}}$ , если известно, что по мировому времени оно должно состояться в 1 ч 51 мин?

### Повышенный уровень сложности

2.15. Назовите самое большое по площади созвездие.

2.16. Может ли небесный экватор совпадать с линией математического горизонта? Ответ поясните.

2.17. Может ли Солнце наблюдаться в зените на широте города, в котором вы живёте?

2.18. Почему на звёздных картах нет планет?

2.19. Объясните, почему созвездия, видимые в южной части неба в средних широтах России в августе, не видны в феврале.

2.20. В каких созвездиях в настоящее время находятся точки весеннего и осеннего равноденствий?

2.21. Чему будет равен период суточного вращения небесной сферы для наблюдателя, находящегося на поверхности Марса?

2.22. Можно ли наблюдать полную Луну вечером в лучах заходящего Солнца (в западной части неба)? Ответ поясните.

2.23. Изобразите на чертеже небесную сферу в проекции на плоскость (а) небесного меридиана; (б) небесного экватора.

2.24. Как располагается эклиптика по отношению к горизонту на Северном полюсе? Ответ проиллюстрируйте рисунком.

2.25. Назовите естественные небесные объекты, у которых остаются неизменными: (а) прямое восхождение и склонение; (б) азимут и высота.

2.26. Определите интервал склонений звёзд, которые на широте города Ельца ( $\varphi \approx 53^\circ$ ) (а) никогда не заходят; (б) никогда не восходят; (в) могут восходить и заходить.

2.27. Правда ли, что на экваторе Солнце ежедневно кульминирует в зените?

2.28. Почему на звёздных картах изображена эклиптика, но не показана линия, вдоль которой движется Луна?

2.29. Есть на Земле места, жители которых наблюдать солнечные и лунные затмения чаще? Ответ поясните.

2.30. Опишите, как движется Земля на звёздном небе Луны.

2.31. Сколько дат одновременно может быть на Земле?

2.32. Определите при помощи географической карты, к какому поясу относится ваш город; определите, сколько должны показывать часы у вас сегодня в Гринвичский полдень по поясному времени, и что они показывают в действительности.

2.33. В июне 2019 года было 5 воскресных дней. Когда был такой же случай раньше?

### Высокий уровень сложности

- 2.34. Справедливы ли формулы (2.1), (2.2), (2.3) для наблюдателя, находящегося в Южном полушарии Земли? Ответ обоснуйте.
- 2.35. Звезда вошла в 00 часов 01 мин по местному времени. Сколько еще раз она пересечет горизонт в данном пункте в эти сутки?
- 2.36. Звезда кульминирует в г. Елец в зените. Определите её склонение. Широта г. Елец  $\varphi \approx 53^\circ$ .
- 2.37. Опишите видимое суточное движение звёзд Денеб ( $\delta = 45^\circ$ ), Антарес ( $\delta = -26^\circ$ ) и Альдебаран ( $\delta = 16^\circ$ ) для наблюдателя, находящегося (1) на экваторе, (2) в г. Ельце, (3) в г. Аделаида, (4) на северном полюсе Земли.
- 2.38. Опишите, как изменится климат на Земле, если ось вращения Земли будет перпендикулярна плоскости ее орбиты.
- 2.39. Изменяются ли границы тепловых поясов, если угол наклона оси вращения Земли к плоскости ее орбиты уменьшится? Если да, опишите изменения.
- 2.40. Вдоль какой параллели на Земле можно идти пешком так, чтобы Солнце «остановилось»?
- 2.41. Игорь Дмитриевич, находясь в поезде «Москва – Петербург», видит в окне своего купе Венеру, а в окне напротив – Луну. В какой примерно фазе была Луна?
- 2.42. Когда световой день в Ельце был (или будет) продолжительнее: 23 сентября 2019 года или 23 сентября 2020 года? Ответ обоснуйте.
- 2.43. По заданию классного руководителя Аня составляет генеалогическое древо своей семьи. Поговорив с родственниками, девочка узнала, что её дедушка в 2016 году отметил свой день рождения в восемнадцатый раз. А тётя Света рассказала Ане, что её бабушка впервые смогла отметить день своего рождения только когда ей исполнилось 8 лет. Укажите точные даты рождения дедушки Ани и бабушки тёти Светы.

### Примеры решения задач

**Пример 2.1.** Найти высоту звезды, склонение которой  $\delta = +48^\circ$ , в верхней и нижней кульминации в г. Елец ( $52^\circ$  с.ш.).

<i>Дано:</i> $\varphi = +52^\circ$ $\delta = +48^\circ$ <hr/> $h_e - ?$ $h_{вн} - ?$	<i>Решение:</i> Для решения задач практической астрономии используют проекции небесной сферы на плоскость меридиана. Небесный меридиан изображается окружностью, отвесная линия и математический горизонт – вертикальным и горизонтальным диаметрами окружности (Рис. 2.6).
--	---

Наблюдатель находится в центре небесной сферы. На линии небесного меридиана отмечены точки: зенита  $Z$ , Северного полюса мира, севера  $N$  и юга  $S$ , верхней  $A$  и нижней  $B$  кульминации звезды. Высота Северного полюса мира над горизонтом равна широте места наблюдения  $\varphi$ . Он располагается над точкой севера  $N$ . Проекция небесного экватора – линия,

перпендикулярная оси мира (ось мира на рисунке проходит через центр окружности и северный полюс мира).

Склонение звезды  $\delta$  – это угол между направлением на неё и плоскостью экватора.

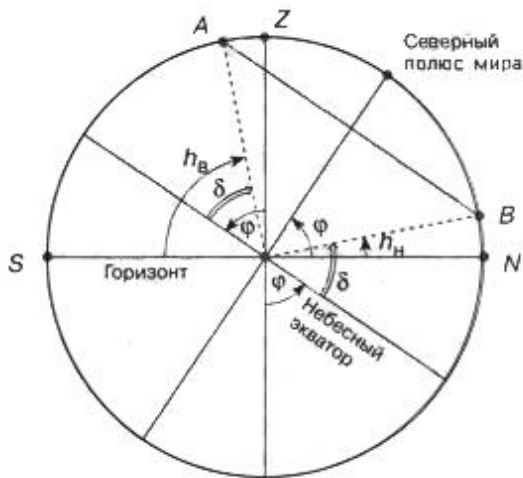


Рисунок 2.6. Проекция небесной сферы на плоскость меридиана

Проекция суточного пути звезды изображается на рисунке отрезком  $AB$ . Найдём угловые расстояния точек  $A$  и  $B$  от зенита (рис. 2.6), т.е. углы  $ZOA$  (соответствует верхней кульминации звезды) и  $ZOB$  (соответствует верхней кульминации звезды):

$$\angle ZOA = |\delta - \varphi|; \angle ZOB = -|\delta + \varphi|.$$

Если величина под знаком модуля положительна, то верхняя кульминация происходит к северу от зенита, если получаем отрицательное значение, то к югу от зенита.

Отсюда мы можем получить универсальные выражения для высоты светила в верхней и нижней кульминации:

$$h_g = 90^\circ - \angle ZOA = 90^\circ - |\delta - \varphi|$$

$$h_n = 90^\circ - \angle ZOB = -90^\circ + |\delta + \varphi|$$

Полученные формулы аналогичны формулам (2.1), (2.2), (2.3), но они более универсальны, так как их можно использовать для любых светил в Северном и Южном полушариях Земли, т.е. для любых значений широты и склонения.

Подставляем данные задачи:

$$h_g = 90^\circ - |48^\circ - 52^\circ| = 86^\circ$$

$$h_n = -90^\circ + |48^\circ + 52^\circ| = 10^\circ$$

Верхняя кульминация звезды со склонением  $+48^\circ$  в г. Ельце происходит на высоте  $86^\circ$  над точкой юга, нижняя кульминация – на высоте  $10^\circ$  над точкой севера. Таким образом, звезда является незаходящей для широты города Ельца.

Ответ:  $86^\circ$ ;  $10^\circ$ .

**Пример 2.2.** Мурманск расположен на широте  $69^\circ$ , Елец –  $52^\circ$  с.ш. Верхняя кульминация некоторой звезды происходит в этих городах на одинаковой высоте. Определите эту высоту и склонение звезды.

Дано:

$$\varphi_1 = +52^\circ$$

$$\varphi_2 = +69^\circ$$

$$h_g = ?$$

$$\delta = ?$$

*Решение:* Описанная в задаче ситуация возможна в том случае, если в одном городе звезда кульминирует над точкой севера, а в другом – над точкой юга. Тогда склонение звезды  $\delta$  удовлетворяет условию:

$$\varphi_1 < \delta < \varphi_2, \quad 52^\circ < \delta < 69^\circ.$$

Таким образом, в Мурманске звезда кульминирует в южной части горизонта, в Ельце – в северной.

Для Мурманска:

$$h_{\epsilon} = 90^{\circ} - \varphi_2 + \delta.$$

Для Ельца:

$$h_{\epsilon} = 90^{\circ} + \varphi_1 - \delta.$$

По условию задачи высоты одинаковы. Решая систему уравнений, находим

$$\delta = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

$$\delta = \frac{52^{\circ} + 69^{\circ}}{2} = 60,5^{\circ}$$

Высота в кульминации:

$$h_{\epsilon} = 90^{\circ} + 52^{\circ} - 60,5^{\circ} = 81,5^{\circ}.$$

Ответ:  $81,5^{\circ}$ ,  $60,5^{\circ}$ .

**Пример 2.3.** Определите полуденную высоту Солнца в Норильске и в Дербенте в дни летнего и зимнего солнцестояний.

<p>Дано:</p> <p><math>\varphi_1 = +69^{\circ}</math></p> <p><math>\varphi_2 = +42^{\circ}</math></p> <p><math>h_{\odot} - ?</math></p>	<p><i>Решение:</i> По карте (или используя Интернет) определяем широты Норильска <math>\varphi_1 = +69^{\circ}</math> и Дербента <math>\varphi_2 = +42^{\circ}</math>.</p> <p><math>\varphi_1 &lt; \delta &lt; \varphi_2</math>, <math>52^{\circ} &lt; \delta &lt; 59^{\circ}</math>.</p> <p>Для нахождения полуденной высоты Солнца используем формулу (2.6):</p>
--	--

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

В день летнего солнцестояния  $\delta_{\odot} = 23,5^{\circ}$ , зимнего  $\delta_{\odot} = -23,5^{\circ}$ .

Подставляя данные в формулу, находим:

В день летнего солнцестояния высота Солнца:

в Норильске  $44,5^{\circ}$ , в Дербенте  $71,5^{\circ}$ .

В день зимнего солнцестояния высота Солнца:

в Норильске  $-2,5^{\circ}$ , в Дербенте  $24,5^{\circ}$ .

Таким образом, в Норильске Солнце в день зимнего солнцестояния находится ниже горизонта, там в это время *полярная ночь*.

Ответ:  $44,5^{\circ}$ ,  $-2,5^{\circ}$ ;  $71,5^{\circ}$ ,  $24,5^{\circ}$ .

Найдём разность географических широт мест наблюдения:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 69^{\circ} - 42^{\circ} = 27^{\circ}$$

Разность полуденной высоты Солнца в день летнего солнцестояния

$$71,5^{\circ} - 44,5^{\circ}$$

Для зимнего солнцестояния

$$24,5^{\circ} - (-2,5^{\circ}) = 27^{\circ}$$

Таким образом, мы установили закономерность: *разность полуденной высоты Солнца в двух пунктах Земли, находящихся в одном полушарии, равна разности географических широт этих пунктов.*

**Пример 2.4.** Самолёт-перехватчик МиГ 31 может развивать скорость 3 000 км/ч. Самолёт вылетел из Хабаровска в Москву 1 сентября в 2 часа 30 минут по местному времени. Какое время должен выставить пилот на своих часах по прибытию в Москву? Расстояние между Москвой и Хабаровском примите равным 6 150 км.

*Дано:*  
 $T_{\text{Хаб}} = 2 \text{ ч } 30 \text{ мин}$   
 $S = 6\,150 \text{ км}$   
 $v = 3\,000 \text{ км/ч}$   
 $T_{\text{М}} = ?$

*Решение:* Самолёт находился в пути

$$t = S/v; t = 2,05 \text{ часа} = 2 \text{ ч } 3 \text{ мин.}$$

По прилёту в Москву часы пилота показывают 4 часа 33 минуты по времени Хабаровска. Москва расположена во 2-м часовом поясе, Хабаровск – в 9-м.

Разница во времени составляет 7 часов. Так как самолет летел с востока на запад, от местного времени Хабаровска (4 часа 33 минуты) нужно отнять 7 часов. Искомое время: 21 час 33 минуты 31 августа!

### Задачи базового уровня сложности

2.44. На какой высоте в городе, где вы проживаете, происходит верхняя кульминация звезды Антарес ( $\delta = -26^\circ$ )?

2.45. На какой высоте в Кромвеле (Новая Зеландия) ( $\varphi = 45^\circ$  ю.ш.) происходит верхняя кульминация звезды Сириус ( $\delta = -16^\circ$ )?

2.46. Высота звезды Альтаир в верхней кульминации  $12^\circ$ , склонение Альтаира равно  $+9^\circ$ . Какова географическая широта места наблюдения?

2.47. Верхняя кульминация некоторой звезды происходит на одной и той же высоте в Санкт-Петербурге и в Воронеже. Определите склонение этой звезды и её высоту в кульминации.

2.48. Определите полуденную высоту Солнца в месте вашего проживания в дни летнего и зимнего солнцестояний.

2.49. Часы в Москве (UT+3) показывают 6 ч 40 мин. Какое время показывают часы в Калининграде (UT+2), Иркутске (UT+8), Екатеринбурге (UT+5), Вашингтоне (UT-4), Токио (UT+9), Лиме (Перу, UT-5)? UT – всемирное время.

### Задачи повышенного уровня сложности

2.50. Определите, жители каких стран могут наблюдать созвездие Южного Креста, расположенное в пределах южного склонения от  $-55^\circ$  до  $-64^\circ$ .

2.51. Самолёт вылетел из Москвы в 21 час 30 минут и прибыл в Иркутск в 5 часов 35 минут. Сколько времени самолёт был в пути?

2.52. Некоторая незаходящая звезда имеет высоту  $50^\circ$  в верхней кульминации и  $20^\circ$  в нижней. Найдите склонение этой звезды и широту места наблюдения. *Указание:* для решения задачи выполните чертёж и рассмотрите случаи верхней кульминации к югу и к северу от зенита.

2.53. Географическая широта Москвы  $+56^\circ$ , Аддис-Абебы  $+9^\circ$ . Эти города находятся почти на одном меридиане. Определите разность высот, на которых в них виден Сириус в момент верхней кульминации.

2.54. Время захода Солнца в Москве (широта  $+56^\circ$ , долгота  $+38^\circ$ ) 19 ч 30 мин. Какое время показывают часы в Москве, когда Солнце заходит в Екатеринбурге (широта  $+56^\circ$ , долгота  $+61^\circ$ )?

### Задачи высокого уровня сложности

2.55. В настоящее время Северный полюс мира расположен рядом с Полярной звездой. Если бы ось вращения Земли была перпендикулярна плоскости её орбиты, в каком созвездии оказался бы Северный полюс мира?

2.56. Где и насколько выше Солнце поднимется над горизонтом в день летнего солнцестояния: в Сочи ( $\varphi = 44^\circ$  с.ш.) или в столице Руанды Кигали ( $\varphi = 2^\circ$  ю.ш.)?

2.57. Немецкий астроном Иоганн Генрих фон Медлер в (1794 - 1874) более 25 лет провёл в России, где он был руководителем Дерптской обсерватории (г. Юрьев, сейчас – Тарту в Эстонии). Он предложил ввести календарь, по которому следует в 128 лет выбрасывать из счета 1 сутки. Определить продолжительность года в летоисчислении Медлера и величину ошибки его летоисчисления.

2.58. А.С. Пушкин родился 26 мая 1799 года. Всем известно, что разница между старым и новым стилем составляет 13 дней. Однако мы празднуем день рождения Пушкина (по новому стилю) 6 июня, хотя разница между 26 мая и 6 июня – всего 11 дней. Правильно ли мы празднуем день рождения А.С. Пушкина? Обоснуйте свой ответ.

## Практическая работа № 1

### Графические модели небесной сферы

*Цель работы:* изучить основные элементы небесной сферы и построить её графические модели для различных пунктов наблюдения.

*Приборы и материалы:* карандаш, циркуль, линейка, цветные карандаши или ручки, транспортир.

### Ход работы

**Задание 1.** На рис. 2.7 вы видите модель небесной сферы. Сделайте подобный рисунок в тетради. Чтобы удобнее было выполнять задание, сделайте рисунок в тетради с большим радиусом (на всю страницу). Отметьте на вашей модели небесной сферы следующие точки и линии:

- точки зенита и надира;
- линию математического горизонта;
- небесный меридиан;
- точки северного и южного полюсов мира;
- ось мира;
- небесный экватор;
- эклиптику;
- точки востока, запада, севера и юга.

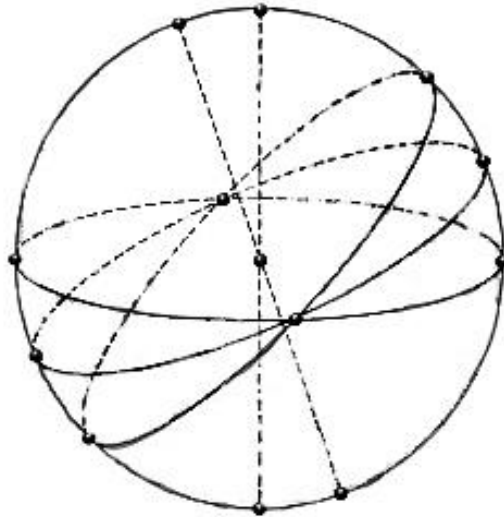


Рисунок 2.7. Модель небесной сферы

**Задание 2.** Наблюдатель находится в месте земной поверхности, где в зените наблюдается одна из следующих звёзд: Полярная, Альдебаран, Сириус, Канопус, Альфа Центавра, Альтаир.

- Используя астрономический календарь или Интернет, определите склонение  $\delta$  каждой из звёзд.
- Определите высоту  $h$  для каждой звезды в зените.
- Определите широту  $\varphi$  мест наблюдения, в которых данные звёзды наблюдаются в зените.

➤ *Указание: используйте формулы (2.1) или (2.2).*

**Задание 3.** Постройте графические модели небесной сферы в проекции на плоскость небесного меридиана для двух звёзд, одна из которых имеет положительное значение склонения  $\delta$ , а другая – отрицательное. Для этого:

- нарисуйте окружность произвольного радиуса, она будет изображать небесный меридиан;
- обозначьте центр окружности;
- проведите линию математического горизонта (горизонтальная линия, проходящая через центр окружности);
- отметьте точки зенита и надира и проведите отвесную линию;
- на линии горизонта обозначьте точки севера  $N$  и юга  $S$ ;
- на линии небесного меридиана отметьте положения северного  $P$  и южного  $P'$  полюсов мира;

➤ **Подсказка:** воспользуйтесь теоремой о высоте полюса мира над горизонтом

➤ **Обратите внимание:** для наблюдателя в северном полушарии Земли над горизонтом расположен северный полюс мира, в южном – южный полюс мира.

- проведите линию  $POP'$ , изображающую ось мира;
- постройте изображение небесного экватора  $QQ'$ .

**Задание 4.** Изобразите на построенных моделях суточные параллели звезды, которая в данной точке наблюдения является: незаходящей, невосходящей, восходит и заходит. Используйте карандаши разного цвета.

**Задание 5.** Ответьте на вопросы.

- Можно ли однозначно определить, какова широта места наблюдения, где небесная сфера имеет вид, изображённый на рис. 2.6?
- Звезда кульминирует в зените на широте вашего города. Определите её склонение.
- Как можно определить широту места наблюдения по звездам?

## **Практическая работа № 2**

### **Определение видимости светил с помощью подвижной карты звёздного неба**

*Цель работы:* познакомится с подвижной картой звёздного неба и научиться использовать её для решения различных задач.

*Приборы и материалы:* подвижная карта звёздного неба, карандаш, циркуль, линейка.

### **Дополнительная информация**

Подвижная карта звёздного неба (ПКЗН) состоит из двух частей, вращающихся друг относительно друга. Первая – собственно карта наиболее ярких звезд с обозначениями созвездий и сетки координат. Можно ориентироваться, пользуясь только этой частью. Но мы как правило не знаем, какие созвездия видны над горизонтом в то или иное время. Для того чтобы это определить, существует накладной круг – вторая часть карты.

В накладном круге нужно сделать вырез в соответствии с географической широтой места наблюдения должен быть вырезан меньший круг. Наложив накладной круг на карту, мы увидим в вырезанной части расположение звезд относительно сторон горизонта. На границе вырезанной части, которая соответствует горизонту, нанесены точки севера, юга, востока и запада. *Обратите внимание, что это именно точки на линии горизонта!*

При вращении карты будет понятно, каким образом движутся светила относительно горизонта. Правильным будет то направление, при котором звезды восходят в восточной стороне и заходят в западной.

***Как выставить карту на заданные дату и время?*** Вначале следует обратить внимание на шкалу дат на карте и шкалу времени на накладном круге. Правила использования карты простое, ***нужно совместить между собой заданную дату и заданное время.*** Следует помнить, что ничто не мешает выставить карту на дневное время суток. Что ж, карта не виновата,



что свет Солнца, рассеиваясь в атмосфере, не позволяет нам видеть звёзды днём.

Многие закономерности видимости и движения светил, особенностей пользования можно выявить, экспериментируя с подвижной картой. Например, если положить карту на горизонтальную поверхность (стол, например) то, совместив отметки севера и юга, мы увидим, что отметки запада и востока поменялись местами друг с другом. Почему так произошло? Поразмыслив, мы спросим себя, можем ли мы видеть звёзды не на небе, а под ногами? Необходимо разместить карту над головой («вверх ногами») и смотреть на нее снизу, как на настоящее звездное небо. ПКЗН следует распечатать, наклеить на плотную бумагу и вырезать. Шаблон карты есть в Приложении, также его можно взять с сайтов Интернет, например, <https://lslsm.jimdo.com> › астрономия › пкзн.

### Ход работы

**Задание 1.** Установите подвижную карту звездного неба на текущую дату. Установите время 21.00, а затем на 2.00 следующего дня. В отчете запишите дату, время, названия хорошо видимых созвездий. Для первого случая зарисуйте несколько созвездий так, чтобы впоследствии вы их могли найти самостоятельно на вечернем небе.

**Задание 2.** Сравните списки. Пометьте, из каких групп (полярных, летне-осенних, осенне-зимних, весенних) у вас перечислены созвездия в первом и втором случае.

**Задание 3.** Установите на ПКЗН дату на три месяца вперед, время 21.00. Выпишите хорошо видимые созвездия.

**Задание 4.** Сравните список с двумя предыдущими. Сделайте подробный вывод о закономерностях видимости созвездий в разное время суток и разные даты.

**Задание 5.** Выпишите объекты вечернего неба (названия звёзд, планет, туманностей, галактик и созвездия, в которых они находятся), которые вы могли бы наблюдать невооружённым глазом или в небольшой телескоп.

➤ *Примечание.* Карту неба могут показывать программы-планетарии. Рекомендуем использовать свободно распространяемую программу-планетарий Stellarium. Используя эту программу (или любой другой виртуальный планетарий), можно узнать условия видимости не только звёзд и созвездий, но и Луны и планет. Последние, как известно, нельзя нанести на обычные карты, потому что они меняют со временем свое положение относительно звезд, как говорят, они «блуждают».

**Задание 6.** Найдите на подвижной карте одно из следующих созвездий: Лира, Персей, Близнецы, Волопас. Установите созвездие в зенит вращением накладного круга (примерно в его центр). Пользуясь шкалами дат и времени суток, выпишите время, для которого данное созвездие

будет видно в таком положении на середину каждого из 12 месяцев. Подпишите, видно ли это созвездие для каждого месяца на вечернее время или не видно (не забудьте: время захода Солнца меняется в течение года!). Сделайте вывод в видимости восходящие-заходящих созвездий в течение года.

**Задание 7.** Ответьте на вопросы.

- Если телескоп закрепить в определенном положении с видимостью на какой-либо участок неба, то постепенно картинка будет смещаться. Чем это обусловлено, и в какую сторону будет происходить это смещение при условии прямой видимости в телескоп?
- Если наблюдатель видит какое-либо созвездие перед рассветом в зените, то в какое время суток он увидит его также в зените через четыре месяца?

### **Задания для самостоятельной работы**

C2.1. 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 предварительно потренируйтесь самостоятельно находить наиболее известные созвездия на этих картах.

C2.2. Обоснуйте теоретически, в какие фазы Луны высота приливов океанов Земли наибольшая и когда наименьшая. Проверьте Вашу гипотезу, сопоставив таблицы фаз Луны и высоты приливов и отливов в каком-либо прибрежном месте.

C2.3. Используя материалы сайта <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>, составьте календарь солнечных и лунных затмений на текущий учебный год с указанием места, где будут наблюдаться солнечные затмения.

C2.4. Исследуйте, начиная с какой географической широты вечерние и утренние астрономические сумерки ночью сливаются друг с другом.

C2.5. Представьте себе, что вы находитесь в одном из следующих мест: на полярной станции Мир, в городах Макапа, Абу-Даби, Сан-Паулу, Мурманске. Опишите, как движется Солнце в этом месте в дни весеннего и осеннего равноденствий, в дни солнцестояний.

C2.6. Сделайте уменьшенную копию системы Земля-Луна. Пусть Земля в этой модели представлена надувным мячом диаметра 1 м. Определите размеры модели Луны и её удаление от Земли в этом масштабе.

C2.7. Используя программу-планетарий (например, Stellarium) определите, какие небесные объекты можно будет наблюдать вечером в день занятия. Составьте план и проведите самостоятельно вечерние наблюдения. Какие из небесных объектов вы нашли легко, какие не смогли найти на небе?

### 3. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

#### Основные понятия, законы и формулы

Планеты, подобно Солнцу и Луне, участвуют в общем суточном движении, перемещаясь относительно звёзд по сложным петлеобразным траекториям то с запада на восток (**прямое движение**), то с востока на запад (**попятное движение**) (Рис. 3.1).

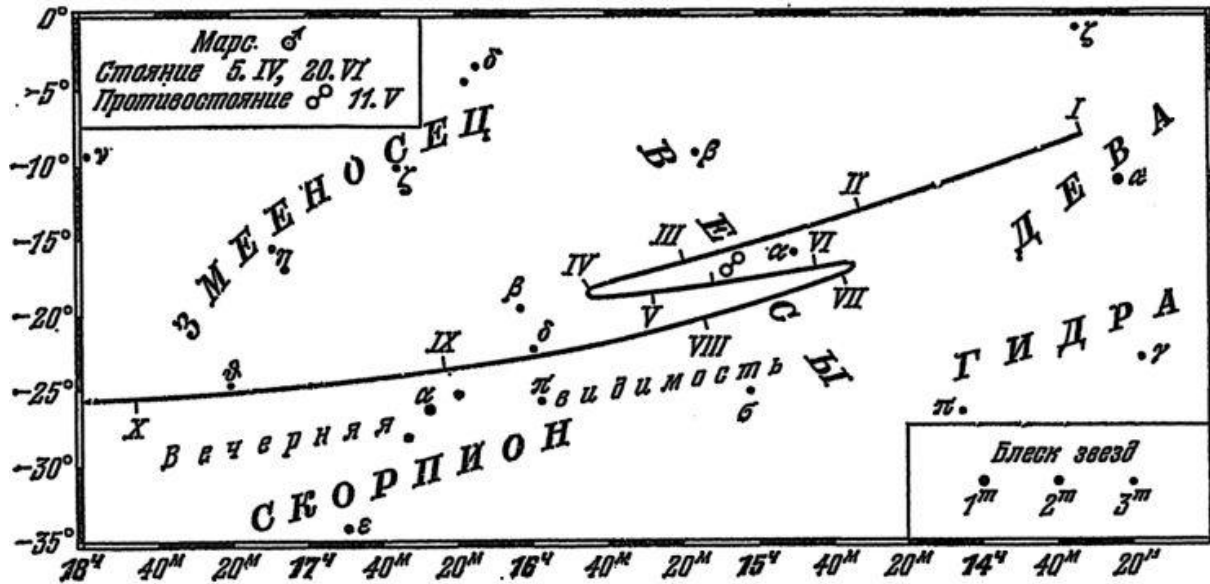


Рисунок 3.1 Видимый путь Марса на фоне звёзд в январе-сентябре 1984 г.

По положению относительно Солнца и Земли планеты разделили на **внутренние** (Меркурий и Венера) и **внешние** (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Характерные взаимные положения планет, Земли и Солнца называют **конфигурациями**.

**Конфигурации внутренних планет** (Рис. 3.2):

- **верхнее соединение** – планета, Земля и Солнце расположены на одной линии, Солнце находится между планетой и Землёй;
- **нижнее соединение** – планета, Земля и Солнце 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 определяется расстоянием от Земли до планеты и Солнца. Для Меркурия этот угол лежит в пределах от  $17^{\circ}30'$  до  $27^{\circ}45'$ , для Венеры – от  $43^{\circ}$  до  $48^{\circ}$ .

**Конфигурации внешних планет** (Рис. 3.3):

- **противостояние** – Солнце, Земля и планета расположены на одной линии, планета находится между Землёй и Солнцем (планета «противостоит» Солнцу);

- **соединение** – планета и Земля расположены на одной линии с Солнцем, но по разные стороны от него;
- **квадратура (восточная и западная)** – Солнце, Земля и планета образуют прямоугольный треугольник.



Рисунок 3.2 Конфигурации внутренних планет: 1 – верхнее соединение; 2 – нижнее соединение; 3 – восточная элонгация; 4 – западная элонгация.

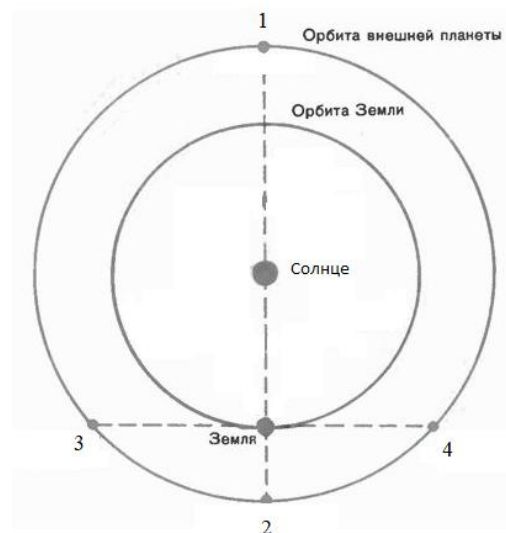


Рисунок 3.3 Конфигурации внешних планет: 1 –соединение; 2 – противостояние; 3 – восточная квадратура; 4 – западная квадратура.

Многие века люди считали, что Земля неподвижна и является центром мира, а все небесные тела обращаются вокруг неё. Такое мироустройство носит название **геоцентрической модели мира**. Наиболее полна эта модель описана в трудах греческого учёного Клавдия Птолемея, жившего в Александрии во II веке н.э., поэтому часто её называют **системой мира Птолемея**. Сложный характер видимого движения планет на фоне звёзд Птолемей объяснял их одновременным движением вокруг Земли по окружностям разного диаметра: **деферентам** и **эпициклам** (Рис. 3.4). Планеты равномерно движутся по эпициклам. Центры эпициклов, в свою очередь, движутся по деферентам.

В эпоху Возрождения произошла революция и в астрономии, и в мировоззрении людей, и связана она с именем Николая Коперника (1473-1543), предложившего и обосновавшего **гелиоцентрическую** модель мира (Рис. 3.5): в центре мира находится Солнце, планеты, в том числе и Земля, движутся вокруг Солнца по круговым орбитам. Земля обращается вокруг своей оси за одни звёздные сутки, следствием чего является видимое вращение небесной сферы. Обращение Земли вокруг Солнца за один звёздный год является причиной видимого годового перемещения Солнца среди звёзд по эклиптике.

Промежуток времени  $T$ , за который светило совершает полный оборот относительно звёзд вокруг другого небесного тела, принятого за главное, называют **сидерическим периодом обращения** светила. Название произошло от латинского слова *sidus* – звезда (*sideris* – род. падеж). Сидерический период также называют годом. Сидерический период обращения Земли называют **звёздным годом** ( $T_3$ ).

Промежуток времени  $S$  между двумя последовательными одноимёнными конфигурациями светила называют **синодическим периодом обращения** светила. Название произошло от древнегреческого слова, означающего сближение, соединение.

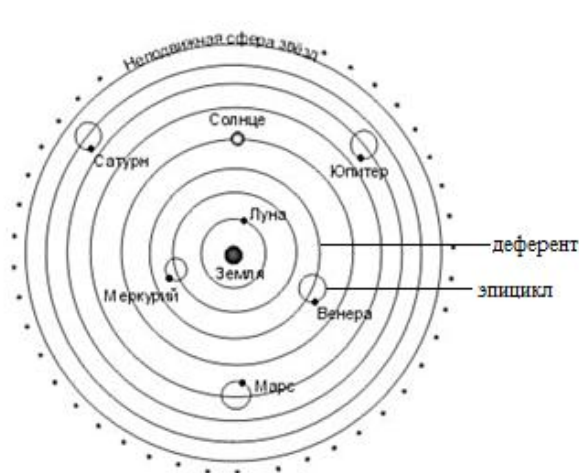


Рисунок 3.4 Геоцентрическая модель мира Птолемея

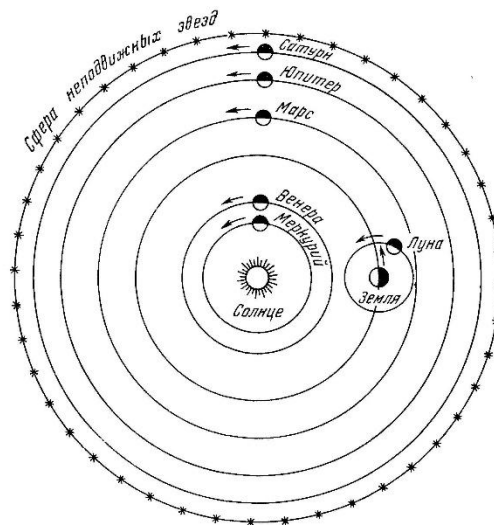


Рисунок 3.5 Гелиоцентрическая модель мира Коперника

Для любой планеты справедливо **уравнение синодического движения**:

$$\frac{1}{S} = \left| \frac{1}{T} - \frac{1}{T_3} \right| \quad [3.1]$$

где  $T$  – сидерический период и  $S$  – синодический период планеты,  $T_3$  – сидерический (звёздный) год Земли, равный 365,2564 средних солнечных суток.

Иоганн Кеплер, опираясь на систему мира Коперника и используя результаты 20-летних наблюдений датского астронома Тихо Браге (1546-1601) и своих наблюдений за видимым движением Марса, сформулировал три эмпирических закона движения планет, которые носят его имя.

**Законы Кеплера** (в современной формулировке):

1. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых, общем для всех планет, находится Солнце.
2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

3. Квадраты сидерических периодов обращений ( $T$ ) планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей ( $a$ ) их эллиптических орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad [3.2]$$

Орбиты планет Солнечной системы в первом приближении можно считать окружностями.

Наиболее близкая к Солнцу точка орбиты планеты называется **перигелием**, наиболее удаленная – **афелием**. Земля проходит перигелий своей орбиты 6 января.

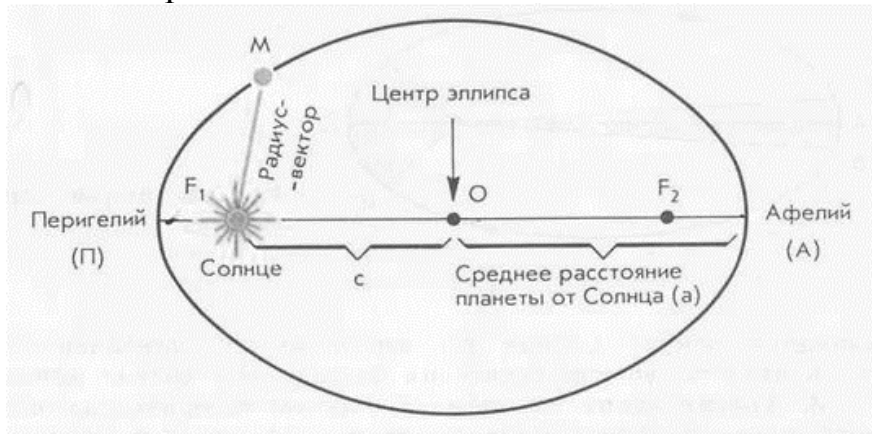


Рисунок 3.7 Эллиптическая орбита планеты

Вектор, соединяющий Солнце и планету на её орбите называется **радиус-вектором** планеты (Рис. 3.7). Расстояние от планеты до Солнца равно:

$$\begin{aligned} \text{в перигелии} \quad q &= a(1 - e), \\ \text{в афелии} \quad Q &= a(1 + e), \end{aligned}$$

где  $a$  – большая полуось орбиты,  $e$  – эксцентриситет.

Эксцентриситет характеризует отклонение эллипса от окружности: чем больше эксцентриситет, тем более вытянут эллипс (или сплющена окружность). У окружности  $e = 0$ .

За среднее расстояние планеты от Солнца принимается большая полуось орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2}.$$

Позднее Исаак Ньютон показал, что законы Кеплера являются следствием закона всемирного тяготения: сила притяжения, действующая на планеты со стороны Солнца, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между этими телами.

**Закон всемирного тяготения:**

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad [3.3]$$

где  $M_1, M_2$  – массы тел,  $r$  – расстояние между их центрами,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$  – **гравитационная постоянная**.

И. Ньютон обобщил и уточнил законы Кеплера. Законы Кеплера в формулировке Ньютона приведены ниже:

1-й уточнённый закон Кеплера: В гравитационно связанной системе тело В движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится тело А. Эксцентриситет эллипса определяется значением полной механической энергии  $E$  системы. В гравитационно несвязанной системе тело движется по параболе ( $E = 0$ ) или гиперболе ( $E > 0$ ), в фокусе которых находится тело А.

3-й уточнённый закон Кеплера: Отношение куба большой полуоси планетной орбиты к квадрату периода обращения планеты вокруг Солнца равно сумме масс Солнца и планеты:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_0 + m) \quad [3.4]$$

Третий уточнённый закон Кеплера позволяет непосредственно определять массу небесных тел.

Закон всемирного тяготения позволяет рассчитать **траектории движения космических аппаратов.**

Для запуска космического аппарата на околопланетную круговую орбиту ему нужно сообщить **первую космическую скорость**

$$V_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad [3.5]$$

Для Земли  $V_1 = 7900 \text{ м/с} \approx 8 \text{ км/с}$ .

Для того, чтобы космический аппарат преодолел гравитационное притяжение небесного тела и навсегда покинул его, ему нужно сообщить **вторую космическую скорость:**

$$V_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}V_1 \quad [3.6]$$

Для Земли  $V_2 = 11,2 \text{ км/с}$ .

### Вопросы, задания и упражнения

#### Базовый уровень сложности

- 3.1. Сформулируйте основные положения системы мира Коперника.
- 3.2. Как геоцентрическая система мира объясняет, почему Меркурий и Венера не могут удаляться от Солнца на небе более чем на  $28^\circ$  и  $48^\circ$  соответственно?
- 3.3. Мир – Вселенная – не ограничивается Солнечной системой. Почему мы говорим «геоцентрическая (или гелиоцентрическая) *система мира*»?
- 3.4. Дайте определение синодическому и сидерическому периодам обращения.
- 3.5. Сравните скорости движения планет в афелии и в перигелии.
- 3.6. Почему Меркурий трудно наблюдать?

3.7. Какие наблюдения Галилео Галилея были наиболее важны для доказательства правильности гелиоцентрической модели мира? Объясните, почему.

3.8. Объясните, используя рисунки, прямое и попятное движение внутренней и внешней планеты с точки зрения гелиоцентрической системы мира.

### Повышенный уровень сложности

3.9. Идея гелиоцентризма высказывались учёными и философами Древней Греции, в частности, Аристархом Самосским. Почему гелиоцентрическая система мира не получила поддержки и признания в те давние времена?

3.10. Какие научные открытия были бы невозможны, если бы не была признана гелиоцентрическая система?

3.11. Почему говорят, что система мира Коперника совершила революцию в естествознании?

3.12. Какие движения включаются в понятие «синодический период»?

3.13. Составьте список важнейших событий в освоении космоса.

3.14. Действует ли на космонавтов сила тяжести?

### Высокий уровень сложности

3.15. По данным наблюдений за Венерой в элонгации Николай Коперник определил относительные расстояния Земли и Венеры от Солнца. Повторите его вычисления.

3.16. Найдите отношение продолжительностей прямого и попятного движений внутренней планеты за один синодический период. Будет ли это отношение таким же для внешней планеты?

3.17. Представьте, что сила тяготения перестала действовать. Будут ли выполняться законы Кеплера? Как в этом случае будут двигаться планеты?

3.18. Требуется перевести искусственный спутник Земли на более высокую орбиту. Как для этого нужно изменить его скорость: увеличить или уменьшить?

3.19. Что такое геостационарный спутник и для чего он предназначен?

3.20. Постройте кеплеровскую траекторию (часть эллипса) полёта космического аппарата к Луне, внутренней и внешней планетам.

### Примеры решения задач

**Пример 3.1.** От Солнца до Сатурна в 9,5 раз дальше, чем до Земли. Определите продолжительность года на Сатурне, считая орбиты планет круговыми.

Дано:

$$a_3 = 1 \text{ а.е.}$$

$$a = 9,5 \text{ а.е.}$$

$$T_3 = 1 \text{ год}$$

$$T = ?$$

Решение: Используем формулу 3 закона Кеплера

$$\frac{T_3^2}{T^2} = \frac{a_3^3}{a^3}; \frac{1}{T^2} = \frac{1}{(9,5)^3}; T = \sqrt{(9,5)^3} = \sqrt{857,375} \approx 29,28$$

Ответ: продолжительность года на Сатурне составляет 29,28 земных лет.



Полученный в задаче результат отличается от табличного, так как мы использовали приближённое значение относительного расстояния до Сатурна.

**Пример 3.2.** Сидерический (звёздный) период обращения Сатурна составляет 29,5 лет. Определите, через какой промежуток времени повторятся его противостояния.

<p><i>Дано:</i>  <math>T_3 = 1</math> год  <math>T = 29,5</math> лет  <math>S = ?</math></p>	<p><i>Решение:</i> Используем уравнение синодического движения, учитывая, что <math>T &gt; T_3</math>.</p>
--	--

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T}; \quad S = \frac{T_3 T}{T - T_3}$$

$$S = \frac{1 \cdot 29,5}{29,5 - 1} = 1,035 \text{ года} = 378 \text{ дней}$$

Ответ: противостояния Сатурна повторяются через 378 дней.

**Пример 3.3.** Вычислим массу Солнца, используя данные о Луне и Земле и третий уточнённый закон Кеплера.

<p><i>Дано:</i>  <math>a_3 = 1,5 \cdot 10^8</math> км  <math>a_L = 3,84 \cdot 10^5</math> км  <math>T_3 = 365</math> суток  <math>T_L = 27,5</math> суток  <math>M_3 = 6 \cdot 10^{24}</math> кг  <math>M_\odot = ?</math></p>	<p><i>Решение:</i> Запишем третий закон Кеплера применительно к системе Солнце – Земля и к системе Земля – Луна.</p>
--	--

$$\frac{a_3^3}{T_3^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_\odot + M_3); \quad \frac{a_L^3}{T_L^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_3 + M_L)$$

Масса Солнца много больше массы Земли, а масса Земли, в свою очередь, много больше массы Луны. Поэтому в

первом выражении можно пренебречь массой Земли, а во втором – массой Луны. Поделим первое выражение на второе и получим:

$$M_\odot = \left( \frac{a_3}{a_L} \right)^3 \left( \frac{T_L}{T_3} \right)^2 M_3$$

$$M_\odot = \left( \frac{1,5 \cdot 10^8}{3,84 \cdot 10^5} \right)^3 \left( \frac{27,5}{365} \right)^2 \cdot 6 \cdot 10^{24} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$$

Ответ: Масса Солнца составляет  $2 \cdot 10^{30}$  кг, что в 330 000 раз превышает массу Земли.

### Задачи базового уровня сложности

3.21. Определите синодический период обращения планеты, звездный период которой составляет 370 дней.

3.22. Противостояния некоторой планеты повторяются через 1,5 года. Вычислите сидерический период этой планеты.

3.23. Вычислите звёздный период обращения Венеры вокруг Солнца, если верхние соединения её с Солнцем повторяются каждые 1,6 года.

3.24. Искусственный спутник Земли движется по эллиптической орбите. В каких точках орбиты потенциальная энергия ИСЗ (а) максимальна, (б) минимальна? Ответ поясните.

3.25. В каких точках эллиптической орбиты кинетическая энергия искусственного спутника Земли (а) минимальна, (б) максимальна? Ответ поясните.

3.26. Определите период обращения ИСЗ, большая полуось орбиты которого равна 7400 км.

### **Задачи повышенного уровня сложности**

3.27. Олаф Рёмер определил скорость света, наблюдая затмения спутников Юпитера. Он определил, что промежуток времени между двумя последовательными затмениями Ио в течение года изменяется от минимального значения  $t_1 = 42^{\text{ч}}28^{\text{м}}21^{\text{с}}$  до максимального  $t_2 = 42^{\text{ч}}28^{\text{м}}51^{\text{с}}$ . Определите по этим данным скорость света.

3.28. Период обращения вокруг Сатурна его спутника Энцелад составляет 1,4 земных суток, а большая полуось его орбиты равна 4 радиусам Сатурна. Оцените среднюю плотность Сатурна.

3.29. Гуманоиды с планеты, обращающейся вокруг солнцеподобной звезды, узнали, что радиус орбиты их планеты в 4 раза больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Какова длина года на этой планете в земных годах?

3.30. Орбитальный период кометы Галлея равен 76 лет, расстояние до неё в перигелии равно 0,6 а.е. Каково расстояние до кометы Галлея в афелии?

### **Задачи высокого уровня сложности**

3.31. Цивилизация обитает на планете, обращающейся вокруг звезды по круговой орбите радиуса  $3,6 \cdot 10^8$  км. Угловой диаметр диска звезды на небе планеты равен  $1^\circ$ , а год на этой планете продолжается 200 земных суток. Оцените среднюю плотность звезды. Средняя плотность Солнца равна  $1,4 \text{ г/см}^3$ .

3.32. Солнце движется по почти круговой орбите вокруг центра Галактики на расстоянии 26000 световых лет от него с орбитальной скоростью около 240 км/с. Вычислите центростремительное ускорение и орбитальный период Солнца. Используя полученные данные, оцените массу Галактики.

3.33. Путешествуя по Вселенной, космонавты совершили вынужденную посадку на планете, масса и размеры которой в 5 раз меньше земных. После окончания ремонтных работ бортовой компьютер сообщил, что оставшегося топлива достаточно, чтобы развить скорость 8,1 км/с. Смогут ли космонавты покинуть планету?

3.34. Искусственный спутник обращается вокруг некоторой планеты по круговой орбите. Во сколько нужно увеличить скорость его движения для перевода на эллиптическую орбиту с эксцентриситетом 0,3? Точка изменения скорости должна стать перигеем новой орбиты.

## Задания для самостоятельной работы

СЗ.1. Довольно часто в научно-фантастических произведениях неправильно используют физические законы. Приведите примеры таких ошибок, используя данные NASA: <https://er.jsc.nasa.gov/seh/lawerr.html>.

СЗ.2. Используя астрономический календарь на текущий год, определите даты, когда Марс, Юпитер и Сатурн будут в противостоянии. Можно ли будет наблюдать планеты 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?

## 4. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

### Основные понятия, законы и формулы

Солнечная система включает в себя центральную звезду – Солнце, и небесные тела, которые движутся вокруг него. Солнце – самое массивное тело Солнечной системы, в нём сосредоточено 99,866% всей её массы, именно оно дало ей название и определяет происхождение, эволюцию, законы движения всех тел, входящих в 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 тел<sup>1</sup>. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Наклонение их орбит к плоскости эклиптики не превышает 7° (наибольший наклон у орбиты Меркурия).

Планеты подразделяют на (1) **планеты земной группы** и (2) **планеты группы Юпитера** (другое название – **планеты-гиганты**). Планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля, Марс: расположены внутри пояса астероидов; имеют большую среднюю плотность вещества (от  $3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $5,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), сравнительно (относительно планет-гигантов) медленное вращение, обладают сходным строением.

Планеты группы Юпитера – Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун; массивнее планет земной группы в десятки и сотни раз, но их плотности значительно меньше, чем у планет земной группы; 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.

---

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

**Карликовые планеты** – класс объектов, который был выделен Международным астрономическим союзом (МАС) в 2006 году. В эту группу входят тела, которые движутся по орбите вокруг Солнца; обладают достаточной массой для того, чтобы под действием собственной силы гравитации поддерживать гидростатическое равновесие и иметь шарообразную форму; вблизи своей орбиты не имеют пространства, свободного от других тел; не являются спутником. К карликовым планетам относятся Плутон, который до 2006 года считался планетой, Церера (до 2006 года – астероид), Эрида, Хаумеа, Макемаке и другие. Число карликовых планет постоянно увеличивается, так как в далёких областях Солнечной системы находят новые объекты.

К **малым телам** Солнечной системы относятся 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 (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.

**Астероиды** – малые тела Солнечной системы, массы и размеры которых значительно меньше, чем у планет и карликовых планет. Масса среднего астероида мала, поэтому они не имеют сферической формы. Основным методом обнаружения астероидов – фотографический. Эти объекты выглядят как слабые звёзды (отсюда название: астероид – звёздopodobный), но движутся на фоне звёзд. Некоторые астероиды имеют спутники. Размеры астероидов определяют, наблюдая покрытия<sup>2</sup> ими звёзд.

Солнце удерживает своим тяготением все компоненты Солнечной системы, их движение описывается законами Кеплера. Между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс **астероидов**.

**Пояс Койпера** – дискообразная область расположена за орбитой Нептуна и простирается примерно от 30 до 100 а.е. В ней находятся карликовые планеты (по крайней мере, четыре: Плутон, Хаумеа, Макемаке, Эрида), содержится множество небольших ледяных тел.

Солнечная система окружено гипотетическим **облаком Оорта**, которое имеет сферическую форму и является источником долгопериодических комет. На настоящий момент нет убедительных доказательств существования облака Оорта, как нет и фактов, доказывающих его отсутствие. Считается, что Солнечная система заканчивается там, где притяжение Солнца

---

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

перестает быть доминирующим и становится сравнимым с притяжением других звёзд. Астрономы оценивают размеры Солнечной системы в пределах 100-300 а.е.

**Кометы** – малые тела Солнечной системы, которые движутся по сильно вытянутым орбитам и резко меняют свой вид от туманных, слабо светящихся объектов до ярких «хвостатых звёзд» по мере приближения к Солнцу. 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**. Это явление вызвано вторжением в атмосферу Земли твёрдых малых по размерам космических тел, которые движутся с большими скоростями (от 11 км/с и выше) в атмосфере Земли, вызывая ионизацию молекул и возбуждение атомов воздуха, что, в свою очередь, приводит к наблюдаемому яркому метеорному следу. При наблюдении метеоров видно, что все они исходят из одного места (точки) на небе, который называется **радиантом** метеорного потока.

Радиант метеорного потока проецируется в определённое место на небе. Подобно тому, как небесным объектам присваивается «адрес» – 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.

Очень яркий метеор называют **болидом**. По яркости болид превосходит все наблюдаемые небесные объекты, кроме Луны и Солнца, и иногда наблюдается даже днём, часто оставляя после себя дымный след и шум. Часть метеорных тел сгорает в атмосфере Земли, но нередко их движение заканчивается падением, и тогда на Земле находят **метеориты** – твердые тела естественного происхождения, упавшие на поверхность Земли из космоса.

Солнечная система не является уникальной: планеты существуют и у других звёзд. Эти «несолнечные» планеты называют **экзопланетами**. К настоящему времени их обнаружено свыше 4000. Сегодня учёные могут определять массы экзопланет, расстояния до звёзд, вокруг которых они обращаются. Часть открытых экзопланет похожи на нашу Землю, на них могут быть условия для возникновения жизни. Основным условием возникновения жизни земного типа считается наличие на поверхности планеты большого количества воды. Про такие планеты говорят, что они находятся в **зоне обитаемости**.

Человек не теряет надежды обнаружить внеземную жизнь. Космические аппараты исследуют тела Солнечной системы, проводится прослушивание космического пространства, посылаются закодированные послания в те области Галактики, где наиболее вероятна жизнь.

## Вопросы, задания и упражнения

### Базовый уровень сложности

- 4.1. Перечислите планеты Солнечной системы в порядке возрастания радиуса их орбит.
- 4.2. Почему на поверхности Венеры температура выше, чем на поверхности Меркурия?
- 4.3. Может ли космический корабль сесть на поверхность Урана?
- 4.4. Объясните разницу между метеороидом, метеором и метеоритом.
- 4.5. Перечислите отличия планет-гигантов от планет земной группы.
- 4.6. Дайте определение карликовой планеты. Почему Плутон «понижали» в карликовую планету?
- 4.7. Можно ли на Меркурии наблюдать метеоры? Ответ поясните.
- 4.8. Опишите, как выглядит планета при приближении к Солнцу. Почему хвост кометы направлен от Солнца?

### Повышенный уровень сложности

- 4.9. Какие выводы о строении и внутреннем составе Меркурия можно сделать на основании следующего факта: средняя плотность Меркурия примерно в 1,5 раза больше, чем средняя плотность Луны, тогда как радиусы этих небесных тела почти одинаковы.
- 4.10. Какие наблюдательные данные позволили сделать вывод о том, что планеты-гиганты состоят из газа?
- 4.11. Какая из планет Солнечной системы могла бы плавать в воображаемом гигантском океане?
- 4.12. Почему планеты и большинство спутников планет имеют сферическую форму, тогда как многие астероиды выглядят как огромные камни?
- 4.13. На каких планетах Солнечной системы наблюдаются полярные сияния?
- 4.14. Какова связь комет с метеорными дождями?
- 4.15. Почему метеорные потоки наблюдаются ежегодно примерно в одни и те же даты?

### Высокий уровень сложности

- 4.15. Какова была бы продолжительность солнечного дня на Венере, если бы вращение планеты было прямым, а не ретроградным?
- 4.16. 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?
- 4.17. Ось вращения Урана расположена почти в плоскости его орбиты. Говорят, что Уран вращается вокруг оси «лёжа на боку». Опишите смену дня и ночи, времён года на Уране.
- 4.18. Известно, что Юпитер излучает больше тепловой энергии, чем получает от Солнца. Что является причиной такого нагрева планеты?

4.19 Температура метеорного тела, движущегося в атмосфере Земли, растёт тем быстрее, чем выше скорость движения тела. Какое из двух одинаковых метеорных тел опаснее – движущееся по орбите навстречу Земле или догоняющее Землю?

4.20. Некоторые учёные и исследователи считают, что в Солнечной системе имеется еще одна (или несколько) больших планет, движущихся по очень вытянутым орбитам. Приведите аргументы за и против такой гипотезы.

### Примеры решения задач

**Пример 4.1.** Одинаковые маятниковые часы установили: (1) на поверхности Земли, (2) на поверхности Марса, (3) на марсианской станции с плотностью искусственной атмосферы, идентичной земной. Какие из этих трёх часов будут идти быстрее, а какие – медленнее?

<p><i>Дано:</i>  <math>l_1 = l_2 = l_3</math>  <math>R_M \approx 6\,400</math> км  <math>R_3 \approx 3\,400</math> км</p>	<p><i>Решение:</i> Период колебаний маятника <math>T</math> без учёта влияния атмосферы <math>T \propto \sqrt{\frac{l}{g}}</math>,</p>
<p>Сравнить <math>T_1, T_2, T_3</math>.</p>	<p>где <math>l</math> – длина маятника, <math>g</math> – ускорение свободного падения на планете.</p>

Ускорение свободного падения на небесных телах определяется по формуле  $g = G \frac{M}{R^2}$ , где  $M$  и  $R$  – масса и радиус планеты соответственно.

Очевидно, что  $g_M < g_3$ . Поэтому быстрее всего идут часы на Земле.

Наличие атмосферы приводит к увеличению периода колебаний маятника. Поэтому самыми медленными будут часы на марсианской станции.

Ответ: Быстрее всех идут часы на Земле, медленнее – на марсианской станции с искусственной атмосферой.

### Задачи базового уровня сложности

4.21. Полагая, что атмосфера Земли имеет протяжённость 7,5 км с однородной плотностью 1,3 кг/м<sup>3</sup>, вычислите массу всей атмосферы. Сравните полученный результат с массой Земли.

4.22. Полагая, что атмосфера Венеры имеет протяжённость 50 км с однородной плотностью 21 кг/м<sup>3</sup>, вычислите массу всей атмосферы. Сравните полученный результат с массой атмосферы Земли (предыдущее задание) и с массой Венеры.

4.23. Вычислите ускорение свободного падения и первую и вторую космические скорости на Марсе.

4.24. Маятниковые часы доставлены с Земли на поверхность Луны. Как они будут идти на Луне – быстрее или медленнее, чем на Земле? Ответ подтвердите расчетами.

### Задачи повышенного уровня сложности

- 4.25. Какая планета с момента своего открытия совершила примерно один оборот вокруг Солнца?
- 4.26. В поясе Койпера на расстоянии 45 а.е. от Солнца столкнулись два астероида, после чего один из осколков стал падать на Солнце. Приняв начальную скорость осколка равной нулю, определите, сколько времени займёт падение.
- 4.27. Сколько потребуется пылинке, двигающейся в пылевой буре на Марсе со скоростью 150 км/ч, чтобы облететь Марс по экватору?
- 4.28. 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.

### Задачи высокого уровня сложности

- 4.29. 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?
- 4.30. 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  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Оцените количество частиц в кольцах Сатурна.
- 4.31. Экспедиция, выполняя поиски пригодного для жизни людей мира, обнаружила планету радиусом 2000 км. Средняя температура на поверхности планеты оказалась равной  $14^\circ\text{C}$ . Какие выводы о возможности колонизации планеты могла сделать экспедиция, узнав, что маятник длиной 1 м имеет период колебаний 6 с?
- 4.32. Путешествуя по Вселенной, космонавты совершили вынужденную посадку на планете, масса и размеры которой в 5 раз меньше земных. После окончания ремонтных работ бортовой компьютер сообщил, что оставшегося топлива достаточно, чтобы развить скорость 8,1 км/с. Смогут ли космонавты покинуть планету?
- 4.33. Астрономы определили, что на землеподобной экзопланете атмосфера не пропускает видимый свет, но прозрачна для инфракрасного излучения. Как такая атмосфера повлияет на температуру планеты? Сравните с парниковым эффектом.
- 4.34. Где человеку будет легче плавать: на Земле или на Марсе?
- 4.35. Определите период обращения вокруг Солнца астероида, который движется по круговой орбите со скоростью 25 км/с.



## Практическая работа № 3

### Построение линейной модели Солнечной системы

*Цель работы:* оценить размеры Солнечной системы, наглядно представить соотношения между расстояниями от Солнца до планет.

*Приборы и материалы:* калькулятор или компьютер с электронной таблицей (Excel, OpenOffice.org Calc или подобная), рулетка, небольшие макеты планет или таблички с их названиями.

Работа выполняется в классе или в коридоре.

#### Дополнительные сведения

Среднее расстояние от Земли до Солнца равно примерно 150 миллионов километров, а от Солнца до Нептуна – 4490 миллионов километров. Это столь большие величины, что их трудно себе представить! Чтобы наглядно оценить размеры Солнечной системы и расстояния между планетами в ней, построим её уменьшенную модель. В модели за точку отсчета выберем центр Солнца и расположим планеты от Меркурия до Нептуна на прямой линии. Будем полагать, что планеты изображаются точками.

Для построения модели нужно выбрать её размер и вычислить масштабный коэффициент. Например, если размер нашей модели 2 метра, то расстояние от Солнца до Нептуна в нашей модели равно 2 метрам. Масштабный коэффициент  $k$  вычислим по формуле:

$$k = \frac{\text{размер\_модели}}{\text{размер\_объекта}} \quad (1)$$

где размер объекта – это среднее расстояние от Солнца до Нептуна:

$$k = \frac{2}{4,49 \cdot 10^{12}} = 4,45 \cdot 10^{-13}$$

При таком коэффициенте расстояние от Солнца до Земли в модели будет равно

$$(1,5 \cdot 10^{13}) \text{ см} \cdot (4,45 \cdot 10^{-13}) \approx 6,7 \text{ см}$$

#### Ход работы

**Задание 1.** В таблице 1 приведены расстояния от Солнца до планет Солнечной системы (данные взяты из [10]). Рассчитайте приведенные расстояния в м и запишите (в нормальной форме записи чисел) в столбец 3 таблицы 1.

**Задание 2.** Выберите размер модели. Если вы будете конструировать модель в классе, измерьте расстояние от стены до стены на свободном пространстве между столами. Если вы планируете построить модель в коридоре – выберите подходящий (на ваш взгляд) размер модели. Если вы используете лист ватмана, измерьте его. Можно разрезать лист вдоль и склеить так, чтобы получился узкая длинная лента. Рассчитайте масштабный коэффициент по формуле (1) и запишите его значение в столбец 4.

Таблица 1

Планета	Действительное расстояние от Солнца, млн. км	Действительное расстояние от Солнца, м	Масштабный коэффициент, $k$	Расстояние от Солнца в модели, м	Действительное расстояние от Солнца, а.е.
1	2	3	4	5	6
Меркурий	57,9				
Венера	108,2				
Земля	150				
Марс	228				
Юпитер	779				
Сатурн	1430				
Уран	2870				
Нептун	4490				

**Задание 3.** Вычислите расстояния (в м) до изображений планет в модели, результаты занесите в столбец 5 таблицы.

**Задание 4.** Постойте модель Солнечной системы. Для этого отметьте положение Солнца и положения планет.

- Примечание: Если вы будете конструировать модель в классе, то для повышения её наглядности выберите 9 добровольцев, которые будут изображать Солнце и планеты (используя фотографии или таблички с названиями Солнца и планет). Наши импровизированные «Солнце» и восемь «планет» занимают свои места в отмеченных положениях.

**Задание 5.** Используя тот же самый масштабный коэффициент, рассчитайте размеры Солнца и планет в модели, используя данные таблицы 2. Для удобства сначала переведите данные в см и результаты (в нормальной форме записи чисел) запишите в столбец 3. Окончательные результаты занесите в столбец 5 таблицы 2.

Таблица 2

Объект Солнечной системы	Средний экваториальный диаметр, км	Средний экваториальный диаметр, см	Масштабный коэффициент	Средний экваториальный диаметр в модели, см
1	2	3	4	5
Солнце	1 391 400			
Меркурий	4 878			
Венера	12 104			
Земля	12 756			
Марс	6 794			
Юпитер	142 800			
Сатурн	119 900			
Уран	51 108			
Нептун	49 493			

**Задание 6.** Ответьте на вопросы.

- Справедливо ли было наше допущение о том, что Солнце и планеты в модели мы будем изображать точками?

- Если в модели Солнечной системы изобразить Солнце теннисным мячиком (диаметр 6,7 см), то каким будет расстояние от Солнца до Земли? До Нептуна?
- Вычислите размеры модели Земли, если модель Солнца имеет диаметр 6,7 см (как в предыдущем задании).
- Среднее расстояние от Земли до Солнца равно 1 астрономической единице (а.е.), равной приблизительно 150 миллионов километров. Вычислите расстояния от Солнца до планет в а.е. Результаты занесите в таблицу 1 (столбец б). Какая единица длины является более удобной для измерения расстояний в Солнечной системе? Аргументируйте ваш ответ.

### **Задания для самостоятельной работы**

С4.1. Определите дату ближайшего (в будущем) покрытия Солнца Венерой. За сколько дней до и после этого события вы сможете наблюдать планету невооружённым глазом?

С4.2. 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?

С4.3. 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

С4.4. 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?

С4.5. Составьте коллективный «портрет» планет земной группы и планет группы Юпитера.

С4.6. Используя программу-планетарий (например, Stellarium) определите, какие метеорные потоки можно наблюдать в ближайшее время. В каких созвездиях находятся радианты этих потоков? Оцените, насколько благоприятны будут условия наблюдения.

## 5. АСТРОФИЗИКА И ЗВЁЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

### Основные понятия, законы и формулы

Астрономия с момента своего возникновения и по сегодняшний день использует различные типы измерений для исследования космических объектов. Основным методом исследования является наблюдение.

До начала XX века учёным были доступны только наблюдения в видимой части спектра, которая составляет малую часть спектра электромагнитных волн: от 0,4 мкм до 0,7 мкм. На рис. 5.1 приведена **шкала электромагнитных волн** – непрерывная последовательность длин волн (частот) электромагнитных излучений, характеризующих распространяющееся в пространстве электромагнитное поле.

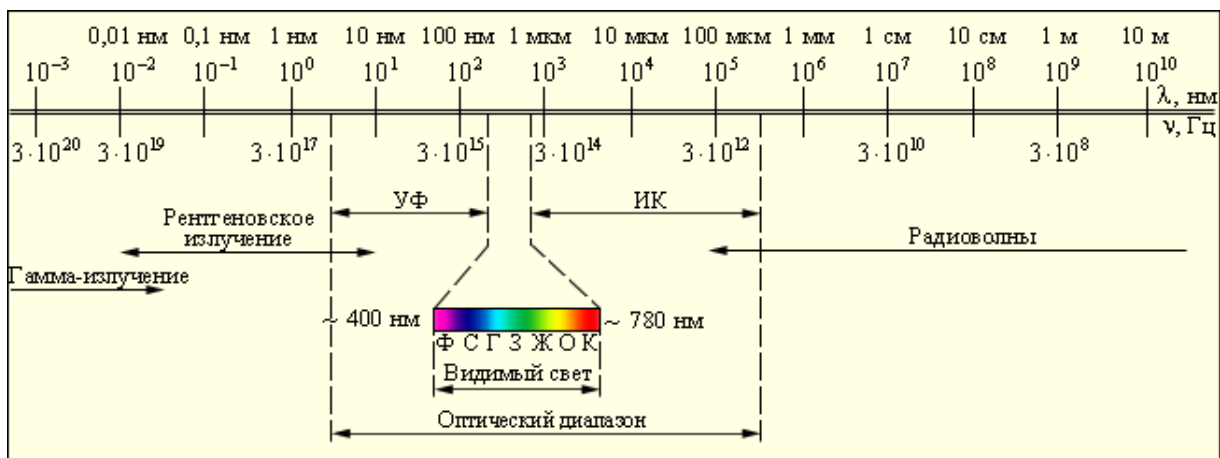


Рисунок 5.1 Шкала электромагнитных волн

В настоящее время астрономия стала всеволновой: наблюдения астрономических объектов производят во всех длинах волн излучения (Таблица 5.1). Не всё излучение проникает через атмосферу Земли, поэтому современная астрономия использует специализированные космические обсерватории.

Свет, который мы видим как белый, сложен по своему составу: с помощью призмы его можно разложить в цветную полоску **спектра**. Спектр в переводе с латыни означает «видимое».

**Спектральный анализ** является важнейшим средством исследования Вселенной. С его помощью можно определить химический состав небесных тел, их температуру, строение, размеры, расстояние до небесных тел и скорость их движения. Для спектрального анализа используют специальные приборы: **спектрограф** и **спектроскоп**.

Основным инструментом астрономов является **телескоп**, который в течение долгого времени оставался *оптическим* инструментом, позволяющим изучать небесные объекты в оптическом (видимом) диапазоне электромагнитного излучения.

Таблица 5.1 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 <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> 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 <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> и другими молекулами воздуха	В основном, внеатмосферные (космические ракеты, искусственные спутники).	Счетчики фотонов, ионизационные камеры, фотоэмульсии, люминофоры
Далекый ультрафиолет	10-310 нм	Сильное поглощение O, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> 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
Ближнее инфракрасное излучение	0,76 – 5 мкм	Частые полосы поглощения H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> и другими	Частично с поверхности Земли	Болометры, термпары, фотоспротивления, специальные фотокатоды и фотоэмульсии, полупроводниковые приёмники
Среднее инфракрасное излучение	5 мкм – 20 мкм	Сильное молекулярное поглощение	Внеатмосферные	Болометры, термпары, фотоспротивления, специальные фотокатоды и фотоэмульсии
Дальнее инфракрасное излучение	20 – 300 мкм			
Радиоволны	> 1 мм	Пропускается излучение с длиной волны около 1 мм, 4,5 мм, 8 мм и от 1 см до 20 м	С поверхности Земли, внеатмосферные	Радиотелескопы

Современные приёмники излучения способны проводить исследования во всех длинах волн – от гамма-излучения до радиоволн, и хотя многие из них мало похожи на своих прародителей, их по-прежнему называют телескопами, добавляя к этому слову характеристику по виду регистрируемого излучения: оптические, инфракрасные, ультрафиолетовые, радиотелескопы и т.п.

Основные задачи телескопа:

- 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.

Важнейшие элементы любого телескопа – **объектив**, собирающий излучение и создающий изображение, и **приёмник излучения** (глаз, фотопластинка, фотоэлектрический приёмник излучения, ПЗС-матрица, и т.п.).

Оптические телескопы бывают **рефракторами** (объектив – линза или система линз) или **рефлекторами** (объектив – зеркало или система зеркал).

Качество изображения в телескопах характеризуется его **угловым разрешением**, которое определяется как минимальное угловое расстояние  $\beta$  между двумя звёздами, при котором их изображения не сливаются в одно.

**Светосила** телескопа  $\Phi$  характеризует освещённость, создаваемую объективом в фокальной плоскости:  $\Phi = (D/F)^2$ , где  $D$  – диаметр объектива,  $F$  – фокусное расстояние объектива. Чем меньше  $\Phi$ , тем лучше телескоп подходит для наблюдения галактик и туманностей.

**Угловое увеличение** телескопа определяется отношением фокусного расстояния  $F$  объектива к фокусному расстоянию  $f$  окуляра:  $G = \frac{F}{f}$ , либо отношением диаметров входного и выходного зрачков телескопа:  $G = \frac{D}{d}$ .

Разрешение телескопа можно улучшить, используя интерференцию света. Если два телескопа с расстоянием между ними  $L$  одновременно наблюдают один и тот же объект (источник излучения), то зарегистрированные ими электромагнитные излучения можно «сложить». В результате получают изображение наблюдаемого объекта, эквивалентное создаваемому объективом диаметром  $L$ . Такая система телескопов называется **интерферометром**,  $L$  – **база интерферометра**.

Звёзды – огромные пылающие газовые шары. Самая близкая к нам звезда – Солнце, главный источник света и тепла, без которого жизнь на Земле была бы невозможна. Изучение Солнца позволяет лучше понять, что представляют собой звёзды.

Солнце, как и другие звёзды, состоит преимущественно из водорода (более 70%) и гелия (примерно 27%), окружено горячей атмосферой. На поверхности Солнца наблюдаются **пятна**, а в атмосфере – **солнечные вспышки**, число пятен и интенсивность вспышек характеризуют **солнечную активность**, оказывающую влияние на физические процессы на Земле. Всю Солнечную систему заполняет расширяющийся поток солнечного газа – **солнечный ветер**.

В центральных горячих областях Солнца и звёзд идут термоядерные реакции, поддерживающие высокую температуру, благодаря которой звёзды излучают свет.

Звёзды различаются по яркости: одни из них выглядят ярче, другие – более тусклые. Примерно 150 лет до н.э. греческий астроном Гиппарх предложил оценивать яркость звёзд по **звёздным величинам**: самые яркие звёзды он отнёс 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**  $m$  характеризует световой поток, проходящий на Землю от звезды. Это безразмерная физическая величина, которая не имеет отношения к истинным размерам звезд. Субъективно значение звёздной величины воспринимается как **блеск** (для точечных источников) или **яркость** (для протяжённых).

Звёзды, меняющие свой видимый блеск, называют **переменными**. Переменность блеска может быть вызвана изменением светимости звезды: пульсации (**цефеиды**), взрывы на поверхности (**новые**) или в недрах (**сверхновые**). Другая причина – затмение одной звезды другой (**затменно-переменные звёзды**).

Энергия, излучаемая звездой, в астрономии характеризуется **светимостью**  $L$ , **интенсивностью излучения**  $I$  и **освещенностью**  $E$ .

**Освещенность**  $E$  – количество световой энергии, попадающей на поверхность единичной площади за единицу времени. Единица измерения –  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Мерой освещенности в астрономии является видимая звездная величина источника  $m$ .

Разности в 5 звёздных величин соответствует отношение освещённостей в 100 раз. Различию в  $1^m$  соответствует отношение освещенностей, равное  $\sqrt[5]{100} \approx 2,512\dots$ , а в  $m$  звёздных величин –  $(2,512)^m$ .

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

$$m_1 - m_2 = -2,512 \cdot \lg \left( \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [5.1] \text{ (формула Погсона)}$$

$$\lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = -0,4(m_1 - m_2) \quad [5.2]$$

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{-(m_1 - m_2)} = 10^{-0,4(m_1 - m_2)} \quad [5.3]$$

Так как видимая звёздная величина характеризует световой поток, приходящий на Землю от звезды, она зависит от расстояния до звезды. Полную энергию, излучаемую звездой, позволяет оценить независимая от расстояния до Земли характеристика – абсолютная звёздная величина  $M$ .

**Абсолютная звёздная величина  $M$**  – видимая звёздная величина, которую имела бы звезда на расстоянии 10 парсек.

Относительная и абсолютная звёздные величины связаны соотношением:

$$M = m + 5 + 5 \lg p \quad [5.4]$$

где  $p$  – параллакс звезды, выраженный в секундах, или

$$M = m + 5 - 5 \lg D \quad [5.5]$$

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

Мощность излучения звезды характеризуется **светимостью  $L$** , которая характеризует полную энергию, излучаемую звездой по всем направлениям в единицу времени. Единица измерения светимости такая же, как у мощности – ватт, но в астрономии чаще всего светимость объекта выражают в единицах светимости Солнца:  $L_{\odot} = 3,8 \cdot 10^{26}$  Вт.

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

Для вычисления светимости звезды используют закон Стефана-Больцмана, согласно которому интенсивность излучения

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

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  кг·с<sup>-3</sup>·К<sup>-4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура звезды. Тогда светимость звезды определяется по формуле

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad [5.6]$$

где  $R$  – радиус звезды.

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



$$E = \frac{L}{4\pi d^2} \quad [5.7]$$

где  $d$  – расстояние до звезды<sup>3</sup>.

Интенсивность (мощность) излучения энергии единицей поверхности зависит только от температуры. Полная энергия, излучаемая звездой, пропорциональна 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.

Звёзды различаются по цвету. Любое нагретое тело излучает свет, при этом чем выше его температура, тем большая часть световой энергии приходится на синюю (коротковолновую) часть спектра. Следовательно, звезда, которая выглядит белой или голубоватой, имеет более высокую температуру, чем оранжевая или красноватая. Астрономические наблюдения позволяют довольно точно определять цвет звёзд. Используя специальные светофильтры, астрономы определяют длину волны  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимум излучения энергии звезды. Температуру поверхности звезды  $T$  (в К) определяют, используя закон Вина:

$$T = \frac{3 \times 10^6}{\lambda_{\max}} \quad [5.8]$$

где  $\lambda_{\max}$  выражена в нанометрах (нм).

От температуры поверхности звезды зависит не только её цвет, но и спектр. Изучение спектров звёзд даёт возможность определить физические свойства объекта, его химический состав, скорость, с которой объект приближается или удаляется от наблюдателя.

Сходные между собой по спектру звёзды объединили в **спектральные классы**: O, B, A, F, G, K, M. Для лучшего запоминания последовательности рекомендуем использовать известную мнемоническую фразу: «Один Бритый Англичанин Финики Жевал, Как Морковь». Спектральные классы O, B, A также называют горячими, классы F и G – солнечными, а классы K и M – холодными спектральными классами.

Характеристики звёзд взаимосвязаны. В 1913 году независимо друг от друга голландец Эйнар Герцшпрунг и американец Генри Норрис Рессел сопоставили на диаграмме два звездных параметра: спектры звезд и их абсолютную звездную величину. По горизонтальной оси откладывают спектральные классы (или температуры звезд), по вертикальной – абсолютные звездные величины или соответствующие им светимости. Астрономы используют названия **диаграмма спектр-светимость** или **температура-светимость**, но гораздо чаще – **диаграмма Герцшпрунга-Рессела (ГР)** по имени учёных, впервые построивших её.

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

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.

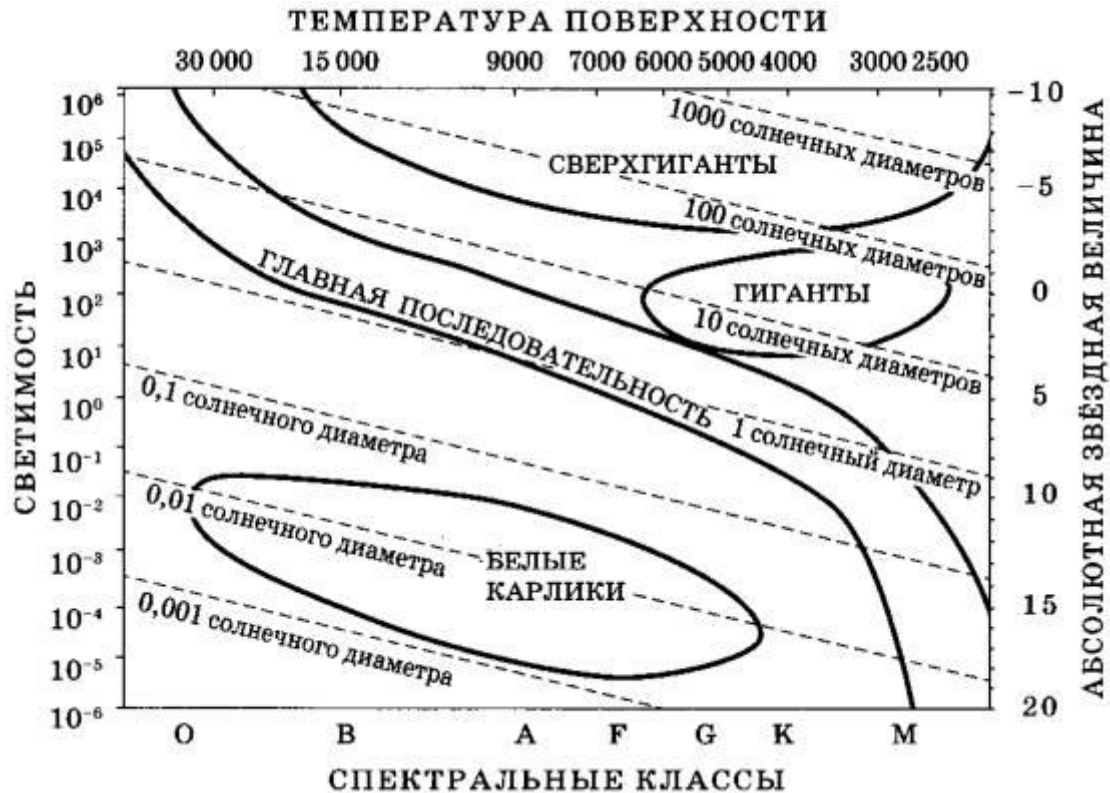


Рисунок 5.2. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

Звезды на диаграмме ГР образуют **последовательности**. Большинство звезд (около 90 %), располагаются на диаграмме вдоль длинной узкой полосы – **главной последовательности**. 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.

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**. В нижнем левом углу, под главной последовательностью расположена группа **белых карликов**.

В процессе жизни изменяются и спектр звёзд, и их светимость. Следовательно, в течение жизни звезда будет «перемещаться» по диаграмме ГР, что позволяет проследить эволюцию звёзд. *Изменение*

положения звезды на диаграмме с течением времени связано только с изменением её физических характеристик.

Звёзды рождаются внутри плотных областей МЗС, в гигантских молекулярных облаках, в которых по разным причинам начинается гравитационное сжатие. Как правило, звёзды рождаются не единично, а в скоплениях. В разных областях Вселенной астрономы наблюдают **протозвёзды**, которые излучают в инфракрасном диапазоне.

С началом термоядерных реакций в ядре звезды увеличивается световое давление, звезда «очищается» («сдувает») лишние газ и пыль и «переходит» на главную последовательность диаграммы Герцшпрунга-Рессела, где проводит большую часть своей жизни.

Жизненный цикл звезды зависит от её массы: чем тяжелее звезда, тем быстрее проходят в её недрах термоядерные реакции, и тем короче её жизненный цикл.

Звёзды, подобные Солнцу (с массами  $0,5M_{\odot} < M < 1,5M_{\odot}$ ), находятся на главной последовательности около 10 млрд лет. Когда водородное топливо в ядре звезды будет исчерпано, термоядерные реакции начнутся в областях, более далёких от центра, звезда увеличится в размерах и перейдёт в стадию **красного гиганта**.

Последняя стадия жизни звезды типа Солнца – **белый карлик**, окружённый **планетарной туманностью** – ионизированной газовой оболочкой, образованной при сбросе внешних слоёв красного гиганта. 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. Термоядерные реакции в белых карликах не идут, они светят за счёт остывания.

Все белые карлики, наблюдаемые астрономами, имеют массы, меньшие  $1,4M_{\odot}$ . Теоретически эту предельную массу рассчитал американский астрофизик индийского происхождения С. Чандрасекар.

Эволюция звезды, масса которой в несколько раз превышает массу Солнца, может привести к тому, что их центральные области

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**).

Когда массивная звезда исчерпает запасы ядерного горючего, её центральная область сильно сжимается, и масса может превысить предел Чандрасекара для белых карликов. Существовать в таком состоянии центральные области звезды долго не могут, в результате очень быстро (от нескольких секунд до доли секунды) центральные области звезды

сжимаются – образуется **нейтронная звезда**, очень маленькая (радиус от 10 до 100 км) и очень плотная (средняя плотность в несколько раз превышает плотность атомного ядра, то есть более  $2,8 \cdot 10^7$  кг/м<sup>3</sup>).

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 типа Ia вспыхивают в тесных двойных системах, сверхновые типа Ib, Ic и II – последний этап эволюции одиночной очень массивной звезды. 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** – это объекты, для которых вторая космическая скорость равна 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. Чёрные дыры были предсказаны П. Лапласом в конце XVIII века.

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, что позволяет обнаружить чёрную дыру. Такой метод реализован на практике.

## Вопросы, задания и упражнения

### Базовый уровень сложности

- 5.1. Какие из областей спектров излучения космических тел недоступны для наблюдения с Земли?
- 5.2. Сравните разрешающую способность современных наземных телескопов и космических телескопов, работающих в том же диапазоне длин волн. Сделайте вывод.
- 5.3. Укажите отличия радиотелескопов от оптических телескопов.
- 5.4. Какие характеристики звёзд можно определить с помощью спектрального анализа?

- 5.5. От каких параметров зависит положение звезды на главной последовательности?
- 5.6. Какая физическая характеристика звезды определяет ее эволюционный путь?
- 5.7. Почему термоядерные реакции не могут происходить в недрах планет, но происходят в недрах звёзд?
- 5.8. Запишите последовательность этапов эволюции Солнца.
- 5.9. Перечислите виды переменных звёзд.
- 5.10. Опишите строение Солнца.

### **Повышенный уровень сложности**

- 5.11. Составьте список самых больших телескопов мира, приведите их характеристики.
- 5.12. Звезда Вега ( $\alpha$  Лиры) имеет видимую звездную величину +0,14; Дубхе ( $\alpha$  Большой Медведицы) +1,95. Можем ли мы на основании этих данных утверждать, что Вега расположена к Земле ближе, чем Дубхе?
- 5.13. Назовите главную причину различия спектров звёзд.
- 5.14. Почему спектр звезды можно назвать её паспортом?
- 5.15. Почему газ, образующий звёзды, не разлетается?
- 5.16. Что означает фраза астрономов «Звезда перемещается по диаграмме Герцшпрунга-Рессела»?
- 5.17. Как видели бы жители Земли белый карлик, если бы он находился на месте Солнца?
- 5.18. Может ли Солнце вспыхнуть как сверхновая? Почему?
- 5.19. Укажите причины изменения блеска цефеид.
- 5.20. Равенство каких сил обеспечивает равновесие Солнца?
- 5.21. Какая область Солнца имеет самую высокую температуру?
- 5.22. Опишите, как происходит передача энергии из недр Солнца к его поверхности.
- 5.23. Есть ли различия во внутреннем строении звёзд типа Солнца и массивных звёзд? Опишите их.

### **Высокий уровень сложности**

- 5.24. В оптических телескопах для визуальных наблюдений задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра, и из окуляра выходит параллельный пучок лучей. Каким образом наблюдатель видит изображение небесного объекта?
- 5.25. Оказывает ли свет космических объектов давление на объектив и окуляр оптических телескопов? Ответ поясните.
- 5.26. Можно ли наблюдать интерферометрическую картину от одной звезды; от двух звёзд?
- 5.27. Звёзды каких спектральных классов имеют наименьшие массы?

- 5.28. Почему у звёзд типа Солнца в процессе эволюции не образуется железное ядро?
- 5.29. Объясните механизм одновременного протекания двух процессов в красном гиганте: сжатие ядра и расширение внешних слоёв.
- 5.30. Цефеиды и сверхновые типа Ia называют стандартными свечами. Почему?
- 5.31. Все ли нейтронные звёзды являются пульсарами?
- 5.32. Какие физические характеристики звёздного скопления можно установить по его диаграмме «спектр-светимость»?

### Примеры решения задач

**Пример 5.1.** Любитель астрономии купил вместо своего старого 6-сантиметрового телескопа новый с зеркалом диаметром 12 см. Оцените, во сколько раз более слабые звезды он теперь сможет наблюдать, если остальные параметры телескопа остались прежними. Что еще можно сказать о возможностях нового телескопа?

*Решение.* Новый телескоп имеет площадь объектива в 4 раза больше старого. Значит и света он соберет в 4 раза больше. Значит примерно в 4 раза более слабые звезды мы сможем в него наблюдать. Помимо этого, увеличение диаметра объектива повысит в 2 раза разрешающую способность телескопа и ему станут доступны более тесные двойные звезды, больше деталей на поверхности Луны и планет, можно будет использовать большие увеличения и т.п.

**Пример 5.2.** Сравните освещённости, создаваемые на Земле звездой Альдебаран ( $0,8^m$ ) и планетой Венера ( $-4,2^m$ ).

<p><i>Дано:</i>  <math>m_1 = -4,2</math>  <math>m_2 = 0,8</math></p>	<p><i>Решение:</i> Определим разность звёздных величин Венеры и Альдебарана:</p> $0,8 - (-4,2) = 5,0.$
<p><math>\frac{E_1}{E_2} = ?</math></p>	<p>Разнице в 5 звёздных величин соответствует изменение освещённости в 100 раз.</p>

Ответ: Освещённость, создаваемая Венерой, в 100 раз превышает освещённость, создаваемую Альдебараном.

**Пример 5.3.** Какое количество звёзд 16-й звёздной величины могут дать столько же света, сколько даёт одна звезда 1-й величины?

<p><i>Дано:</i>  <math>m_1 = 1</math>  <math>m_2 = 16</math>  <math>N = ?</math></p>	<p><i>Решение:</i> Обозначим <math>E_1</math> и <math>E_{16}</math> – освещённости, создаваемые звёздами 1-й и 16-й звёздных величин. Тогда</p> $E_1 = N \cdot E_{16},$ <p>где <math>N</math> – искомая величина.</p>
--	---

Воспользуемся формулой:  $\lg\left(\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}}\right) = -0,4(m_1 - m_2)$

$$\lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \lg\frac{N \cdot E_{16}}{E_{16}} = \lg N = -0,4(1^m - 16^m) = 6$$

Ответ:  $N = 10^6$  звёзд.

### Задачи базового уровня сложности

5.33. 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?

5.34. Определите максимальное разрешение Большого Канарского телескопа, (диаметр зеркала 10,4 м), работающего в оптическом диапазоне на длине волны  $\lambda = 6 \times 10^{-7}$  м.

5.35. Во сколько раз Сириус ярче Полярной звезды?

5.36. Одна звезда ярче другой в 20 раз. Определите разность их видимых звёздных величин.

5.37. Видимая звёздная величина Ригеля +0,1, абсолютная -7,0. Определите расстояние до Ригеля.

### Задачи повышенного уровня сложности

5.38. Космический радиointерферометр работает в сантиметровом диапазоне длин радиоволн, одна из антенн находится на Земле, а вторая в космосе на расстоянии 326 000 км от планеты. Определите разрешающую способность радиointерферометра.

5.39. Во сколько раз освещённость, создаваемая звездой с видимой звёздной величиной  $3,4^m$ , слабее, чем освещённость, создаваемая Сириусом ( $-1,6^m$ )? Определите абсолютные звёздные величины этих звёзд, если расстояние до каждой из них составляет 3 пк.

5.40. Светимость звезды в 6 раз больше, чем у Солнца, а освещённость от нее при наблюдении с Земли составляет  $6 \cdot 10^{-14}$  Вт/м<sup>2</sup>. Чему равно расстояние до этой звезды?

5.41. Звездой какой величины будет выглядеть Солнце с орбиты Урана?

5.42. Протозвезда сжимается от состояния с радиусом  $2 \cdot 10^8$  км и температурой 3000 К в состояние с радиусом  $10^6$  км и температурой 4500 К. Используя закон Стефана-Больцмана, объясните, как изменяется её светимость.

5.43. Масса ядра красного гиганта в 4 раза меньше массы Солнца, а его радиус равен 15 000 км. Оболочка гиганта имеет в 2 раза большую массу, чем ядро, и радиус, равный 0,5 а.е. Вычислите среднюю плотность ядра и оболочки гиганта и найдите их отношение. Сравните оба полученных результата с плотностью ядра Солнца.

5.44. Голубой гигант имел массу, равную 15 солнечным массам, и поверхностную температуру 20 000 К. Когда он перешёл в стадию красного сверхгиганта, его светимость не изменилась, а температура понизилась до 4 000 К. Во сколько раз изменился радиус звезды?

5.45. Светимость Альдебарана в 518 раз превышает светимость Солнца, а температура его поверхности около 4 000 К. Во сколько раз Альдебаран больше Солнца?

### **Задачи высокого уровня сложности**

5.46. Астрономы Древнего Китая, используя только визуальные наблюдения, открыли наличие пятен на Солнце в IV в до н.э. Каковы были размеры этих пятен?

5.47. Две одинаковые звезды, расстояние между которыми 2 а.е., обращаются вокруг друг друга по круговой орбите. Система удалена от Земли на 200 световых лет и расположена перпендикулярно лучу зрения. Телескоп с зеркалом какого диаметра нужно использовать, чтобы наблюдать эти звёзды как отдельные источники на длине волны  $\lambda = 2$  мкм?

5.48. 1,7-метровый телескоп проводит наблюдения небесного объекта в течение 1 часа. Какое время при тех же условиях наблюдения потребуется 5,6-метровому телескопу, чтобы выполнить то же самое задание (получить аналогичную фотографию)?

5.49. 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?

5.50. Сжатие межзвёздного молекулярного облака начинается, если средняя скорость его частиц в 2 раза меньше первой космической скорости для этого облака. Сферическое молекулярное облако, состоящее преимущественно из водорода, имеет массу 1 000 солнечных масс, радиус 10 пк и температуру 10 К. Будет ли это облако коллапсировать?

## **Практическая работа № 4**

### **Диаграмма Герцшпрунга-Рессела и её анализ**

*Цель работы:* построить диаграмму температура-светимость и установить взаимосвязь между наблюдаемыми характеристиками звёзд.

*Приборы и материалы:* миллиметровая бумага, карандаш, цветные карандаши или ручки, линейка.

### **Ход работы**

В таблице 5.1 даны характеристики звёзд: температура  $T$  (в К), светимость, выраженная в светимостях Солнца (светимость Солнца принята за 1).



**Задание 1.** На миллиметровой бумаге постройте диаграмму Герцшпрунга-Рессела для приведенных в таблице звёзд. По горизонтальной оси откладывайте температуру, по вертикальной – светимость (в светимостях Солнца).

**Задание 2.** На горизонтальной оси укажите спектральные классы звёзд.

**Задание 3.** Отметьте на диаграмме главную последовательность и области красных гигантов, белых карликов, сверхгигантов.

**Задание 4.** Постройте на диаграмме вертикальные цветные полосы, соответствующие цвету звёзд

Таблица 5.1. Температура и светимость звёзд

№	Звезда	$T$	$L/L_{\odot}$
1.	Солнце	5300	1
2.	$\alpha$ Центавр А	5500	1,3
3.	$\alpha$ Центавр В	3900	0,36
4.	Барнарда	2500	0,0004
5.	LALANDE 2118	2900	0,005
6.	Сириус А	10100	23
7.	Сириус В	10400	0,008
8.	Росс 248	2400	0,0001
9.	61 Лебедя А	3900	0,08
10.	61 Лебедя В	3600	0,04
11.	Процион А	6200	7,6
12.	Процион В	7100	0,0005
13.	Эпсилон Индейца	3900	0,13
14.	Канопус	7100	1500
15.	Арктур	4200	90
16.	Вега	10400	60
17.	Капелла	5600	150
18.	Ригель	11500	40000
19.	Бетельгейзе	2900	17000
20.	Ахернар	14000	200
21.	Бета Кентавра	21000	3300
22.	Альтаир	7700	10
23.	Альдебаран	3900	90
24.	Спика	21000	1900
25.	Антарес	3100	4400
26.	Денеб	9900	40000
27.	Бекрукс, или Мимоза	22000	6000

**Задание 4.** Постройте на диаграмме вертикальные цветные полосы, соответствующие цвету звёзд

**Задание 5.** На диаграмме проведите линии, вдоль которых располагаются звёзды одинакового радиуса.

**Задание 6.** Приведите примеры звезды типа Солнца, массивной звезды спектрального класса В; маломассивной звезды спектрального класса М. Постройте их эволюционные треки на диаграмме.

**Задание 7.** Ответьте на вопросы:

- Как связаны температура звезды и её цвет?
- К какому спектральному классу относится наше Солнце?
- Каков физический смысл диаграммы Герцшпрунга-Рессела?

## 6. ГАЛАКТИКИ

### Основные понятия, законы и формулы

Наша Солнечная система находится внутри гигантского звёздного острова, который мы видим изнутри как полосу Млечного Пути. В переводе с древнегреческого *galaxias* означает молочный (млечный), что и дало название звёздным системам – **галактикам**. Наш звёздный остров имеет два названия: Млечный Путь и Галактика (обязательно с заглавной буквы).

В Галактике кроме звёзд содержится много тел (планеты, спутники, астероиды и т.п.), а также неоднородная по плотности межзвёздная среда (газ, пыль, космические лучи).

Расстояния между соседними звёздами в галактиках (в том числе и в нашей), как правило, в миллионы раз превышает их размеры, и чем дальше звезда от центра галактики, тем дальше от неё находятся звёзды-соседи.

Свет не проникает сквозь плотные межзвёздные облака газа и пыли, которых особенно много в направлении к центру Галактики, поэтому для её исследования используют инфракрасные и радиотелескопы, а в последнее время – гамма-телескопы. Наблюдения показали, что звёзды и газ в галактическом диске движутся вокруг центра Галактики со скоростью около 250 км/с. Наше Солнце вместе с планетами тоже движется с такой скоростью, совершая один оборот вокруг галактического центра примерно за 200 млн. лет.

Диаметр Галактики составляет по крайней мере 100 000 св. лет., а её центр находится приблизительно на расстоянии 27 000 св. лет от Земли. В Галактике более 200 млрд. звёзд самой разной светимости и цвета, которые образуют **звёздные скопления**.

**Шаровые звездные скопления** – старейшие объекты нашей Галактики: они образовались одновременно с ней. Они компактны, хотя содержат сотни тысяч звёзд, в них нет массивных горячих звёзд, мало газа и пыли.

**Рассеянные звездные скопления** обычно содержат несколько сотен звёзд, в них много молодых горячих звёзд. Возраст скоплений и входящих в них звёзд определяют по диаграмме ГР.

В центре Галактики находится сверхмассивная (примерно 2 млн солнечных масс) чёрная дыра.

Млечный Путь – одна из бесчисленного количества галактик, обнаруженных во Вселенной с помощью крупных телескопов. Галактики принято разделять по форме на **спиральные, эллиптические и неправильные**, но все они содержат (хотя и в разных пропорциях) звёзды различных типов и возраста, межзвёздную среду и невидимую **тёмную материю**.

Тёмная материя не излучает электромагнитных волн, не участвует в электромагнитном взаимодействии, согласно теории, слабо проявляется в ядерном и слабом взаимодействиях, и по массе в несколько раз превышает суммарную массу видимого вещества.

Наиболее вероятные кандидаты в составляющие тёмной материи – гипотетические слабодействующие массивные частицы, WIMP (англ. Weakly Interacting Massive Particle). В русском языке специального названия для таких частиц нет, иногда их называют вимп-частицы.

Галактики удаляются друг от друга: об этом свидетельствует смещение линий в спектрах галактик в «красную» сторону, этот эффект был назван **красным смещением**. При этом чем дальше находятся галактики, тем с большей скоростью они удаляются. Количественно красное смещение  $z$  характеризуется относительным изменением длины волны спектральных линий

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

где  $\lambda_0$  – длина волны спектральной линии в лаборатории,  $\lambda$  – в наблюдаемом спектре.

По известному красному смещению можно определить скорость удаления (или приближения) галактики:

$$z = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = c \cdot z$$

где  $c = 3 \cdot 10^5$  км/с – скорость света.

Эдвин Хаббл установил, что скорость удаления галактики  $v$  просто определяется умножением расстояния  $d$  до неё на некоторую постоянную  $H$ , которая 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.

У части галактик в центре наблюдается мощный источник энергии – **активное ядро**, светимость которого в ряде случаев больше суммарной светимости всех звёзд галактики, подобной нашей. Активность ядра объ-

ясняют падением (аккрецией) газа на сверхмассивные чёрные дыры. К активным галактикам относятся **квazarы**.

Как и звёзды, галактики образуют **скопления**, основную массу которых составляет невидимая **тёмная материя** – форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним, что затрудняет и на настоящий момент делает невозможным её прямое наблюдение. Сейчас принято считать, что темная энергия связана с **космологической постоянной  $\Lambda$** .

### **Вопросы, задания и упражнения**

#### **Базовый уровень сложности**

- 6.1. Постройте схему Галактики и укажите её структурные элементы.
- 6.2. Перечислите объекты, входящие в состав Галактики.
- 6.3. Почему наша галактика имеет два названия?
- 6.4. Укажите отличия шаровых звёздных скоплений от рассеянных.
- 6.5. Где в Галактике находятся рассеянные скопления, а где – шаровые?
- 6.6. Можно ли увидеть на небе другие галактики невооружённым глазом?
- 6.7. Если да, то приведите примеры таких галактик.
- 6.8. Что такое межзвёздная среда и из чего она состоит?
- 6.9. Укажите отличия диффузных туманностей от планетарных.
- 6.10. Эдвин Хаббл предложил классификацию галактик по их форме. Какие основные типы галактик он выделил?
- 6.11. К какому типу галактик относится Млечный Путь?
- 6.12. Какой физический смысл имеет постоянная Хаббла?

#### **Повышенный уровень сложности**

- 6.13. Почему звёзды шаровых скоплений имеют низкую металличность?
- 6.14. Почему рождение звёзд начинается в холодных газопылевых облаках, а не в областях горячего разреженного атомарного и ионизированного газа?
- 6.15. Может ли в планетарной туманности начаться звездообразование? Ответ поясните.
- 6.16. Есть ли отличия в составе спиральных и эллиптических галактик? Если да, то какие?
- 6.17. Как проявляется активность ядер галактик?
- 6.18. Что называют красным смещением?
- 6.19. 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?
- 6.20. Сергей навёл свой телескоп на область неба в окрестностях звезды Денеб, а Матвей – на область в созвездии Большой Медведицы. Кто из них увидит больше звёзд, а кто – больше галактик?

## Высокий уровень сложности

- 6.21. Почему в Галактике не наблюдается молодых шаровых скоплений?
- 6.22. Астрономы используют красное смещение для измерения расстояний до далёких объектов. Установите соответствие между красным смещением и световым годом.
- 6.23. Мы видим галактику Андромеды такой, какой она была 2 млн лет назад. Если бы смогли увидеть её сейчас, то какие изменения мы бы могли заметить?
- 6.24. На рис. 6.1 приведена наблюдательная ГР-диаграмма скопления NGC 1261. Какие звёзды преобладают в этом скоплении? К какому типу – шаровое или рассеянное – относится это скопление? Что можно сказать о возрасте этого скопления?

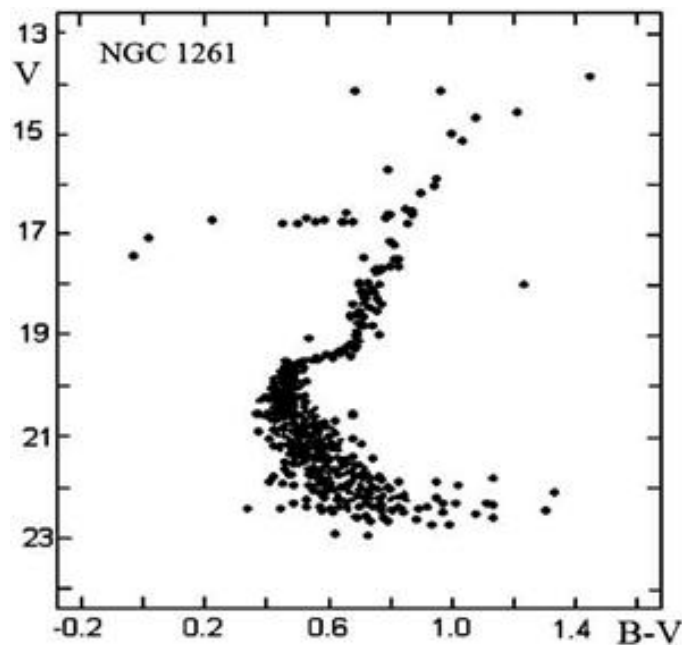


Рисунок 6.1. ГР диаграмма скопления NGC 1261.

- 6.25. Какова будет скорость удаления объекта, красное смещение которого  $z > 1$ ?
- 6.26. Как можно отличить квазары от звёзд по данным наблюдений?

### Примеры решения задач

**Пример 6.1.** На каком расстоянии от Земли находится галактика, скорость удаления которой равна 18 000 км/с?

*Дано:*

$$v = 18\,000 \text{ км/с}$$

$$H = 68 \text{ км/(с·Мпс)}$$

$d = ?$

Ответ: 264,7 Мпс.

*Решение:* Используем закон Хаббла  $v = H \cdot d$ , откуда

$$d = \frac{v}{H}; \quad d = \frac{18000 \text{ км/с}}{68 \text{ км/(с·Мпс)}} = 264,7 \text{ Мпс}$$

**Пример 6.2.** На пути космических путешественников оказалось межзвёздное облако размером 100 а.е., в котором на  $1 \text{ см}^3$  приходится в среднем  $10^6$  частиц. Выяснив, что концентрация молекул воды в этом облаке составляет  $10^{-5}$  от средней, экипаж корабля решил пополнить запасы воды. Для этого космонавты используют специальную ловушку диаметром 10 м, расположенную снаружи корабля. Успеют ли они собрать этой ловушкой тонну воды, пролетая через облако со скоростью 50 км/с? Масса молекулы воды  $3 \cdot 10^{-23}$  г.

*Дано:*

$$l = 100 \text{ а.е.}$$

$$r = 10 \text{ м}$$

$$m_g = 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$$

$$v = 50 \text{ км/с}$$

$$n = 10^6$$

$$M = 1 \text{ т}$$

$$M_{\text{собр}} - ?$$

*Решение:* При пролёте сквозь облако ловушка заметает часть этого облака в форме цилиндра, объем которого равен длине пути корабля сквозь облако

$$V = \pi r^2 l = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ м}^3,$$

$r$  – радиус ловушки,  $l$  – размер облака.

Всего в одном кубическом сантиметре облака содержится  $10^6$  частиц, из них только  $10^6/10^5 = 10$  молекул воды. В одном кубическом метре содержится  $10^7$  молекул воды.

В 1 тонне воды –  $3.3 \cdot 10^{28}$  молекул. При такой концентрации тонна воды содержится в объеме  $3.3 \cdot 10^{21} \text{ м}^3$ . Пролёт через это облако будет продолжаться в течение 9.5 лет. Таким образом, при пролете космонавты не успеют собрать 1 тонну воды.

### Задачи базового уровня сложности

6.26. Используя закон Хаббла, определите максимальное расстояние, до которого можно наблюдать небесные тела.

6.27. 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)?

6.28. Определите, на каком расстоянии от нас находится галактика, удаляющаяся со скоростью 20 000 км/с.

### Задачи повышенного уровня сложности

6.29. Сколько лет идёт к нам свет от галактики, удаляющейся от нас со скоростью  $7,1 \cdot 10^3$  км/с?

6.30. Представим Солнце мячом для настольного тенниса диаметром 4 см. В этом масштабе вычислите: а) расстояние от Земли до Солнца, б) размеры Солнечной системы, в) расстояние до ближайшей звезды, г) размеры Галактики, в) расстояние до квазара, отстоящего от Земли на 2 млрд лет.

6.31. В галактике, которая удаляется от Земли со скоростью  $10^4$  км/с, произошла вспышка сверхновой, видимая звёздная величина которой  $+16^m$ .

6.32. Каково расстояние до этой галактики? Определите абсолютную звёздную величину и светимость сверхновой. Межзвёздным поглощением света пренебречь.

## Задачи высокого уровня сложности

6.33. Согласно гипотезе, источником энергии квазара является падение вещества на чёрную дыру, сопровождающееся выделением энергии  $0,2mc^2$ . Оцените расход массы, если мощность квазара  $10^{41}$  Вт.

6.34. При радионаблюдениях внегалактического водородного облака было обнаружено, что оно излучает на длине волны 28 см, причем ширина линии излучения составляет 0.1 мм. Известно также, что угловые размеры облака на небе составляют 4". Оцените массу этого облака.

6.35. Удаленная галактика имеет видимую звёздную величину  $+15,2^m$ . В спектре галактики красное смещение линии водорода ( $\Delta\lambda = 656,3$  нм) составляет  $\Delta\lambda = 21,9$  нм. Определите скорость удаления галактики, расстояние до неё, абсолютную звёздную величину и светимость галактики.

## Практическая работа № 5

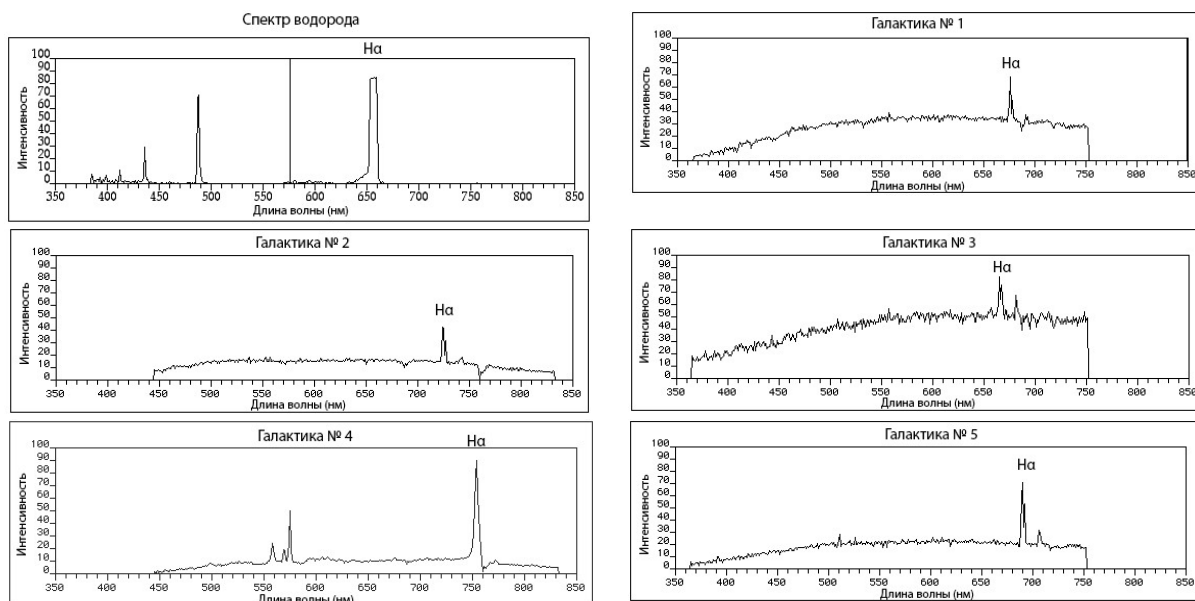
### Определение скорости удаления галактик по спектрам

*Цель работы:* вычислить скорости удаления галактик по красному смещению линии  $H_\alpha$  в их спектрах, построить график зависимости скорости удаления от расстояния до галактики и проанализировать его.

*Приборы и материалы:* лабораторные спектры линии  $H_\alpha$ , спектры 5 галактик, карандаш, линейка, калькулятор.

### Ход работы

В этой работе используются спектры галактик, полученные с помощью виртуального спектроскопа <https://www.cfa.harvard.edu/seuforum/galSpeed/>. Ниже приведены лабораторный спектр водорода (H) и спектры галактик. Для каждого объекта спектры представлены в виде графика изменения интенсивности излучения от длины волны. Линия водорода  $H_\alpha$  смещена относительно лабораторного значения  $\lambda_{H\alpha} \approx 656$  нм.



**Задание 1.** Найдите линию водорода  $H_{\alpha}$  в спектре каждой галактики и определите соответствующую длину волны  $\lambda$ . Результат занесите в таблицу.

**Задание 2.** Посчитайте смещение спектральной линии  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_H$  и запишите результат в соответствующий столбец таблицы.

**Задание 3.** Вычислите красное смещение  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_H}$ , результат занесите в таблицу.

**Задание 4.** Вычислите скорость удаления галактики  $v = c \cdot z$  и запишите результат в последний столбец таблицы.

Галактика	Длина волны $\lambda$ водорода в спектре галактики, нм	Смещение спектральной линии $\Delta\lambda$	Красное смещение $z$	Скорость удаления галактики $v$ , км/с	Расстояние до галактики, млн. св. лет
1					
2					
3					
4					
5					

**Задание 5.** Постройте график зависимости скорости удаления галактик от расстояния до Земли.

**Задание 6.** Проанализируйте полученный график и сделайте вывод о соотношении расстояния до галактики и скорости её удаления.

## 7. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

### Основные понятия, законы и формулы

Все наши знания о Вселенной базируются на наблюдениях. По мере углубления знаний об окружающем мире и развития наук, в первую очередь – физики, менялись взгляды людей на то, как устроен этот мир. В античности и в средние века люди отождествляли мир 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. Кроме того, наблюдения показывают, что Вселенная меняется со временем.

**Расширение Вселенной** является проявлением этих изменений. Начало расширения условно принимают за момент «рождения» Вселенной, которое произошло примерно 14 млрд лет назад. Открытие **реликтового излучения**, представляющего собой **фоновое электромагнитное излучение** всего неба, также подтверждает теорию расширяющейся Вселенной и свидетельствует о том, что вначале Вселенная была заполнена почти однородной и очень горячей средой. В процессе расширения эта среда остывала, в ней возникли уплотнения, из которых сформировались галактики.



Наблюдения показали, что галактики объединяются в **группы, скопления и сверхскопления**. Скопления галактик насчитывают сотни и тысячи членов. Среднее расстояние между скоплениями галактик составляет 30 Мпк. Если мы мысленно построим куб со стороной 300 Мпк<sup>4</sup> (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».

По результатам последних наблюдений Вселенная имеет ячеистую структуру: она представляется состоящей из огромных ячеек – **войдов** (от английского void – пустота) с тонкими стенками, которые образованы галактиками, внутри же ячеек вещество практически отсутствует. 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**.

В галактиках и скоплениях галактик преобладает тёмное вещество, по массе в несколько раз превышающее суммарную массу видимого вещества. Без добавочной гравитации тёмной массы невозможно объяснить ни возникновение галактик уже через 1 млрд лет после начала расширения Вселенной, ни наблюдаемую крупномасштабную структуру.

Наблюдение вспышек далёких сверхновых и анализ данных наблюдений позволили сделать вывод об **ускоренном расширении Вселенной**. Следовательно, наряду с силой всемирного тяготения во Вселенной действует сила всемирного отталкивания. Существует гипотеза, что эта сила отталкивания является проявлением особой формы материи – **тёмной энергии**.

Понимание механизма «рождения» Вселенной и её эволюции – актуальная задача современной науки.

## **Вопросы, задания и упражнения**

### **Базовый уровень сложности**

- 7.1. Какие наблюдательные факты указывают на то, что окружающая нас Вселенная медленно меняется со временем? Приведите примеры.
- 7.2. Можем ли мы увидеть прошлое нашей Вселенной?
- 7.3. Какие химические элементы наиболее распространены во Вселенной?
- 7.4. Что такое критическая плотность?

---

<sup>4</sup> В некоторых источниках – 200 Мпк.

7.5. Участвует ли Солнечная система в космологическом расширении Вселенной?

7.6. Какова роль тёмной энергии в ранней Вселенной?

### Повышенный уровень сложности

7.7. В то время, когда произошёл Большой взрыв, галактик ещё не было. Почему мы наблюдаем в настоящее время разбегание галактик?

7.8. На каком расстоянии находятся самые удалённые объекты, доступные наблюдениям с использованием современных телескопов?

7.9. Является ли эволюция вещества во Вселенной обратимой?

7.10. Какие три фактора ограничивают яркость ночного неба?

7.11. К каким выводам о характере расширения Вселенной привело наблюдение далёких сверхновых?

### Высокий уровень сложности

7.12. Если бы Вселенная не расширялась, а галактики, которые мы наблюдаем сейчас, существовали вечно, то небо бы ночью ярко светилось. Объясните, почему.

7.13. Почему тяжёлые элементы не образовались в ранней Вселенной подобно тому, как они образуются в звёздах?

7.14. Почему наши знания о Вселенной раньше планковского времени сильно ограничены?

7.15. Согласно моделям расширяющейся Вселенной постоянная Хаббла меняется со временем. Почему её продолжают называть «постоянная»?

7.16. Далёкие галактики (красное смещение  $z > 3$ ) в среднем выглядят ярче галактик таких же типов в окрестностях нашей галактики. Объясните, почему.

7.17. Если бы Вселенная остывала значительно медленнее, первые атомы образовались бы быстрее или медленнее?

### Примеры решения задач

**Пример 7.1.** Определение точного значения постоянной Хаббла – сложная и до сих пор актуальная задача современной астрономии. Оцените, каков максимально возможный возраст Вселенной для различных значений постоянной Хаббла  $H$ : а) 50 км/(с·Мпк); б) 100 км/(с·Мпк); в) 75 км/(с·Мпк)?

*Дано:*

$$H_1 = 50 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$$

$$H_2 = 100 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$$

$$H_3 = 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$$

$$t_1 - ?$$

$$t_2 - ?$$

$$t_3 - ?$$

*Решение:* Согласно теории Большого взрыва время, прошедшее с начала этого взрыва и есть возраст Вселенной  $t$ :  $t = \frac{1}{H}$ .  $H$  нужно выразить в  $\text{с}^{-1}$ . Тогда

$$H = H_0 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}} = H_0 \frac{1 \text{ км}}{3,09 \cdot 10^{19} \text{ км} \text{ с}} \frac{1}{\text{с}} = \frac{H_0}{3,09 \cdot 10^{19}} \text{ с}^{-1}$$

$$t = \frac{1}{H} = \frac{3,09 \cdot 10^{19}}{H_0} \text{ с.}$$

Учитывая, что 1 год  $\approx 3,2 \cdot 10^7$  с, получаем формулу для оценки возраста Вселенной в годах:

$$t = \frac{3,09 \cdot 10^{19}}{3,2 \cdot 10^7} \frac{1}{H_0} \text{ лет} \approx \frac{9,7 \cdot 10^{11}}{H_0} \text{ лет} = \frac{970}{H_0} \text{ млрд.лет}$$

а)  $t_1 = \frac{970}{50} \approx 19,4 \text{ млрд.лет}$

б)  $t_1 = \frac{970}{100} \approx 9,7 \text{ млрд.лет}$

в)  $t_1 = \frac{970}{75} \approx 12,9 \text{ млрд.лет}$

Ответ: 19, 4 млрд лет; 9,7 млрд лет; 12,9 млрд лет.

### Задачи базового уровня сложности

7.18. Представьте, что постоянная Хаббла имеет значение, в 5 раз превышающее современное значение. Как это повлияет на нашу оценку возраста Вселенной?

7.19. Первым значение постоянной Хаббла определил сам Эдвин Хаббл, согласно его оценке  $H = 500$  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?

### Задачи повышенного уровня сложности

7.20. Рассчитайте, какой была критическая плотность, когда Вселенная была втрое меньше?

7.21. Через какое время масса водорода в нашей галактике в 2 раза превысит массу гелия?

7.22. Опишите историю космологической постоянной  $\Lambda$ . 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?

### Задачи высокого уровня сложности

7.23. Оцените температуру, необходимую для получения электронно-позитронной пары. Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

7.24. В настоящее время максимум в спектре реликтового излучения приходится на миллиметровый диапазон волн (примерно 2 мм). Определите, какой размер имела Вселенная относительно её размера в настоящем, когда максимум реликтового излучения приходился на а) 10 мкм (инфракрасный диапазон); б) 100 нм (ультрафиолетовый); в) 1 нм (гамма-диапазон).

## СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### Основные физические и астрономические постоянные

Гравитационная постоянная  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$

Скорость света в вакууме  $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-4}$

Астрономическая единица 1 а.е. =  $1.496 \cdot 10^{11} \text{ м}$

Парсек 1 пк = 206265 а.е. =  $3.086 \cdot 10^{16} \text{ м}$

### Данные о Солнце

Радиус 695 000 км

Масса  $1.989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

Светимость  $3.88 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$

Поток солнечной энергии на расстоянии Земли 1360 Вт/м<sup>2</sup>

Видимая звездная величина  $-26.8^{\text{m}}$

Абсолютная визуальная звездная величина  $+4.8^{\text{m}}$

Абсолютная болометрическая звездная величина  $+4.7^{\text{m}}$

Показатель цвета (B-V)  $+0.67^{\text{m}}$

Температура поверхности около 6000К

Средний горизонтальный параллакс 8.794"

### Данные о Земле

Эксцентриситет орбиты 0.017

Тропический год 365.24219 суток

Период вращения 23 часа 56 минут 04 секунды

Наклон экватора к эклиптике на эпоху 2000 года:  $23^\circ 26' 21.45''$

Экваториальный радиус 6378.14 км

Полярный радиус 6356.77 км

Масса  $5.974 \cdot 10^{24} \text{ кг}$

Средняя плотность  $5.52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$

### Данные о Луне

Среднее расстояние от Земли 384 400 км

Горизонтальный экваториальный параллакс 57,3'

Эксцентриситет орбиты 0.055

Наклон плоскости орбиты к эклиптике  $5^\circ 09'$

Сидерический (звездный) период обращения 27.321662 суток.

Синодический период обращения 29.530589 суток

Радиус 1738 км

Масса  $7.348 \cdot 10^{22} \text{ кг}$  или 1/81.3 массы Земли

Средняя плотность  $3.34 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$

Визуальное геометрическое альbedo 0.12

Видимая звездная величина в полнолуние  $-12.7^m$

### Физические характеристики солнца и планет

Планета	Масса		Радиус		Плотность $\text{Г}\cdot\text{СМ}^{-3}$	Период вращения вокруг оси -	Наклон экватора к плоскости орбиты градусы
	кг	массы Земли	км	радиусы Земли			
Солнце	$1.989 \cdot 10^{30}$	332946	695000	108.97	1.41	25.380сут	7.25
Меркурий	$3.302 \cdot 10^{23}$	0.05271	2439.7	0.3825	5.42	58.646 сут	0.00
Венера	$4.869 \cdot 10^{24}$	0.81476	6051.8	0.9488	5.20	243.019 сут*	177.36
Земля	$5.974 \cdot 10^{24}$	1.00000	6378.1	1.0000	5.52	23.934 час	23.45
Марс	$6.419 \cdot 10^{23}$	0.10745	3397.2	0.5326	3.93	24.623 час	25.19
Юпитер	$1.899 \cdot 10^{27}$	317.94	71492	11.209	1.33	9.924 час	3.13
Сатурн	$5.685 \cdot 10^{26}$	95.181	60268	9.4494	0.69	10.656 час	25.33
Уран	$8.683 \cdot 10^{25}$	14.535	25559	4.0073	1.32	17.24 час*	97.86
Нептун	$1.024 \cdot 10^{26}$	17.135	24746	3.8799	1.64	16.11 час	28.31

\* - обратное вращение.

### Характеристики орбит планет

Планета	Большая полуось		Эксцентриситет	Наклон к плоскости эклиптики градусы	Период обращения	Синодический период сут
	млн. км	a.e.				
Меркурий	57.9	0.3871	0.2056	7.004	87.97 сут	115.9
Венера	108.2	0.7233	0.0068	3.394	224.70 сут	583.9
Земля	149.6	1.0000	0.0167	0.000	365.26 сут	—
Марс	227.9	1.5237	0.0934	1.850	686.98 сут	780.0
Юпитер	778.3	5.2028	0.0483	1.308	11.862 лет	398.9
Сатурн	1429.4	9.5388	0.0560	2.488	29.458 лет	378.1
Уран	2871.0	19.1914	0.0461	0.774	84.01 лет	369.7
Нептун	4504.3	30.0611	0.0097	1.774	164.79 лет	367.5

## Характеристики некоторых спутников планет

Спутник	Масса	Радиус	Плотность	Радиус орбиты	Период обращения	Геометрич. альбедо	Видимая звездная величина*
	кг	км	г/см <sup>3</sup>	км	сут		m
<b>Земля</b>							
Луна	$7.348 \cdot 10^{22}$	1738	3.34	384400	27.32166	0.12	-12.7
<b>Марс</b>							
Фобос	$1.08 \cdot 10^{16}$	~10	2.0	9380	0.31910	0.06	11.3
Деймос	$1.8 \cdot 10^{15}$	~6	1.7	23460	1.26244	0.07	12.4
<b>Юпитер</b>							
Ио	$8.94 \cdot 10^{22}$	1815	3.55	421800	1.769138	0.61	5.0
Европа	$4.8 \cdot 10^{22}$	1569	3.01	671100	3.551181	0.64	5.3
Ганимед	$1.48 \cdot 10^{23}$	2631	1.94	1070400	7.154553	0.42	4.6
Каллисто	$1.08 \cdot 10^{23}$	2400	1.86	1882800	16.68902	0.20	5.7
<b>Сатурн</b>							
Тефия	$7.55 \cdot 10^{20}$	530	1.21	294660	1.887802	0.9	10.2
Диона	$1.05 \cdot 10^{21}$	560	1.43	377400	2.736915	0.7	10.4
Рея	$2.49 \cdot 10^{21}$	765	1.33	527040	4.517500	0.7	9.7
Титан	$1.35 \cdot 10^{23}$	2575	1.88	1221850	15.94542	0.21	8.2
Япет	$1.88 \cdot 10^{21}$	730	1.21	3560800	79.33018	0.2	~11.0
<b>Уран</b>							
Миранда	$6.33 \cdot 10^{19}$	235.8	1.15	129900	1.413479	0.27	16.3
Ариэль	$1.7 \cdot 10^{21}$	578.9	1.56	190900	2.520379	0.34	14.2
Умбриэль	$1.27 \cdot 10^{21}$	584.7	1.52	266000	4.144177	0.18	14.8
Титания	$3.49 \cdot 10^{21}$	788.9	1.70	436300	8.705872	0.27	13.7
Оберон	$3.03 \cdot 10^{21}$	761.4	1.64	583500	13.46324	0.24	13.9
<b>Нептун</b>							
Тритон	$2.14 \cdot 10^{22}$	1350	2.07	354800	5.87685**	0.7	13.5

\* – для полнолуния или среднего противостояния внешних планет.

\*\* – обратное направление вращения.



# Накладной круг для ПКЗН





## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015.
2. Воронцов-Вельяминов, Б.А. Астрономия. Базовый уровень. 11 класс: учебник. / Б.А. Воронцов-Вельяминов, Е.К. Страут. – 5-е изд., пересмотр. – М.: Дрофа, 2018.
3. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 / Б.А. Воронцов-Вельяминов. – М.: Наука, 1977.
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач по астрономии: пособие для учащихся / Б.А. Воронцов-Вельяминов. – М.: Просвещение, 1980.
5. Гусев Е.Б. Качественные задачи по астрономии: учебно-метод. пособие для учителей физики и астрономии, студентов физико-математических факультетов педагогических вузов и учащихся 9-11 кл. / Е.Б. Гусев. – Рязань: РГПУ, 1996.
6. Гусев Е.Б. Расширяя границы Вселенной. История астрономии в задачах / Е.Б. Гусев, В.Г. Сурдин – М.: МЦНМО, 2003.
7. Засов, А.В. Астрономия: 10-11 классы / А.В. Засов, В.Г. Сурдин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019.
8. Зигель Ф.Ю. Сокровища звёздного неба: путеводитель по созвездиям и Луне / Ф.Ю. Зигель. – М.: Наука, 1986.
9. Кондакова Е.В. Астрономия. Тетрадь-практикум. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень // Е.В. Кондакова, В.М. Чаругин. – М.: Просвещение, 2018.
10. Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии / Под ред. В.Г Сурдина – М.: Эдиториал УРСС, 2009
11. Левитан, Е.П. Астрономия. 11 класс: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.
12. Малахова Г.И. Дидактический материал по астрономии: пособие для учителя / Г.И. Малахова, Е. К. Страут. – М.: Просвещение, 1989.
13. Орлов В. Ф. 300 вопросов по астрономии / В.Ф. Орлов. – М.: Просвещение, 1967.
14. Перельман Я.И. Занимательная астрономия / Я. И. Перельман. – Д.: ВАП, 1994.
15. Романов А.М. Занимательные вопросы по астрономии и не только / А.М. Романов. – М.: МЦНМО, 2005.

16. Субботин Г. П. Сборник задач по астрономии: задания, упражнения, тесты / Г. П. Субботин. – М.: Аквариум, 1997.
17. Сурдин В.Г. Астрономические задачи с решениями (задачник) / В.Г. Сурдин. – М.: УРСС, 2002.
18. Сурдин В.Г. Астрономические олимпиады. Задачи с решениями / В.Г. Сурдин. – М.: Учебно-научный центр довузовского образования МГУ, 1995.
19. Сурдин В.Г. Вселенная в вопросах и ответах. Задачи и тесты по астрономии и космонавтике / В.Г. Сурдин. – М.: Альпина нон-фикшн, 2017.
20. Татарников А.М. Астрономия. Сборник задач и упражнений. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. / А.М. Татарников, О.С. Угольников, Е.Н. Фадеев. – М.: Просвещение, 2018.
21. Угольников О.С. Астрономия. Задачник. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. / О.С. Угольников. – М.: Просвещение, 2018.
22. Угольников О.С. Всероссийская олимпиада школьников по астрономии / О.С. Угольников. – М.: АПКиППРО, 2007.
23. Чаругин, В.М. Астрономия. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Введение в астрономию .....	5
2. Астрометрия .....	11
3. Небесная механика .....	27
4. Солнечная система .....	35
5. Астрофизика и звёздная астрономия .....	44
6. Галактики .....	58
7. Строение и эволюция Вселенной .....	64
Справочная информация .....	68
Список литературы .....	73

Учебное издание

**Елена Владимировна Кондакова**

**АСТРОНОМИЯ:  
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ,  
ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ**

**Практикум**

*Технический редактор – О. А. Ядыкина*

*Техническое исполнение – В. М. Гришин*

*Книга печатается в авторской редакции*

Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.

Печ.л. 4,8 Уч.-изд.л. 4,6

Тираж 300 экз. Заказ 97

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии  
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»

399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1