

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

Е.В. Кондакова

АСТРОФИЗИКА

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Часть I.

Учебное пособие

Елец – 2016

УДК 52
ББК 22.63
К 64

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета им. И.А.Бунина
от 29.01.2016, протокол № 1

Рецензенты:

А.С. Расторгуев, доктор физико-математических наук, профессор
(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова);

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

Е.В. Кондакова

К 64 Астрофизика: подготовка к практическим занятиям. – Ч. I: учебное пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2016. – 78 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих курс астрофизики. Тематика практических занятий в целом соответствует лекционному курсу, но не дублирует его. В книгу вошли темы, рассмотрение которых предполагается в первом семестре изучения курса «Астрономия и космология». Помимо краткого обзора основных понятий и терминов, для каждой темы приводятся информационные источники для самостоятельной работы, примеры решения задач. Учебное пособие отвечает требованиям ФГОС высшего образования в плане усиления роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Структурирование учебного материала призвано помочь студентам на всех этапах их самостоятельной работы: от поиска информации до самооценки уровня сформированности знаний. Задания, предлагаемые учащимся, весьма разнообразны: расчётные и качественные задачи, мини-исследования, поиск информации в различных источниках и её обработка, создание моделей, проектная деятельность. Часть заданий предполагает, что студенты работают совместно, в малых группах, с последующим обсуждением полученных результатов.

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

УДК 52
ББК 22.63

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2016

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

работы весьма разнообразны: расчётные и качественные задачи, мини-исследования, поиск информации в различных источниках и её обработка, создание моделей, проектная деятельность. Часть заданий предполагает, что студенты работают совместно, в малых группах, с последующим обсуждением полученных результатов.

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

В пособии имеются типичные задачи, заимствованные из книги Б.А. Воронцова-Вельяминова «Сборник задач и практических упражнений по астрономии», их номера по этому задачнику приведены в скобках после текущего номера задачи.

Все темы, представленные в пособии, имеют одинаковую структуру:

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

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

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

Тема 1. Астрономия и Вселенная

Краткий обзор теоретического материала

1.1. Астрономия – наука о Вселенной.

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

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

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

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

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

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

Чёткого и единого деления астрономии на разделы нет. Статус самостоятельных наук получили следующие разделы астрономии: астрометрия, небесная механика, космогония, космология, астрофизика.

1.2. Становление науки астрономии. Астрономия и мировоззрение

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

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

Древние астрономы не только наблюдали и описывали небесные тела, но и пытались установить взаимосвязи между ними и своей жизнью,

предсказать небесные явления и объяснить их. Развитие астрономии стимулировали практические потребности человека: необходимость вести счет времени, ориентироваться на поверхности Земли, давать объяснение наблюдаемым явлениям. Астрономия, в свою очередь, стимулировала развитие математики, а позднее – физики.

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

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

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

1.3. Звездное небо и созвездия

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

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

дают звёздам обозначения, основанные на тех или иных физических характеристиках.

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

Звезды, которые входят в одно и то же созвездие, расположены на различных расстояниях друг от друга. Они выглядят для нас одинаково далекими в силу особенностей зрения.

1.4. Методы астрономии

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

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

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

В сентябре 2012 года 28-я Генеральная ассамблея Международного астрономического союза (МАС) приняла решение привязать астрономическую единицу к Международной системе единиц (СИ). Астрономическая единица по определению равна в точности 149 597 870 700 метрам. Кроме того, МАС принял решение стандартизовать международное обозначение астрономической единицы: «аи».

Астрономическая единица применяется для измерения расстояний в Солнечной системе, в других планетных системах, между компонентами двойных и кратных систем. Но эта единица оказывается неудобной для

измерения расстояний уже на уровне Галактики. Поэтому была введена единица измерения, называемая **световым годом**.

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

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

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

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

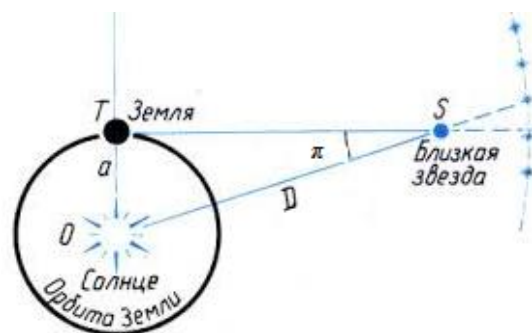


Рисунок 1.1 Годичный параллакс звезды

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

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

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

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

Так как параллаксы π небесных объектов очень малы $\sin \pi \approx \pi$. Выразив π в единицах дуги, получим
$$D = \frac{206265}{\pi''} a \quad [1].$$
 Так как

расстояние, соответствующее $\pi = 1''$ – это 1 парсек, то в парсеках расстояние вычисляется как $D = \frac{1}{\pi''}$ [2].

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

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

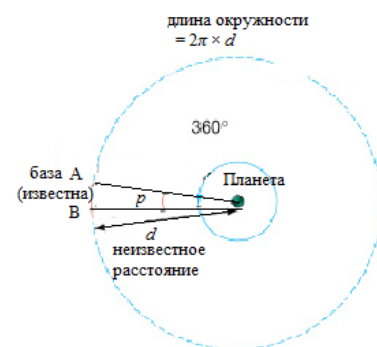


Рисунок 1.2 Вычисление расстояний с использованием параллакса

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Более точные измерения диаметра Луны дали результат 3476 км.

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



Рисунок 1.3 Определение линейных размеров удалённого объекта

1.5. Наш адрес во Вселенной

Подобно тому, как любой человек может указать свой адрес (страна, город, улица, дом), так и для нашей планеты Земля мы можем указать её «космический» адрес. Земля – третья планета от Солнца в Солнечной системе. Солнечная система расположена в галактике Млечный путь, которая, в свою очередь, входит в состав Местной группы галактик. Группы галактик объединяются в сверхскопления галактик. Так, наша Галактика входит в Сверхскопление Девы. Совокупность сверхскоплений – это Метагалактика, или Вселенная.

Проверь себя (задания для самопроверки)

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

1. Созвездие – это

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

2. Звезды в созвездиях:

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

3. Звезды принадлежат одному созвездию, если они:

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

4. Астрономическая единица – это

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

5. Вы пишете Ваш домашний адрес в следующем порядке: улица, город, область, страна. Допустим, Вам надо написать космический адрес по такому же образцу. Какой из последующих вариантов соответствует указанному порядку?

- 5.1. Земля, Млечный Путь, Солнечная система, Локальная группа;

- 5.2. Земля, Солнечная система, Локальная группа, Млечный Путь;
- 5.3. Солнечная система, Земля, Млечный Путь, Локальная группа;
- 5.4. Земля, Солнечная система, Млечный Путь, Локальная группа;
- 5.5. Солнечная система, Млечный Путь, Локальная группа, Земля.

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

1. Световой год – единица измерения расстояний.
2. Угловое расстояние между небесными объектами измеряют в парсеках.
3. Звёзды в созвездиях расположены недалеко друг от друга в пространстве.
4. Понятие «созвездие» не используется сейчас в современной астрономии.
5. Параллакс небесного объекта обратно пропорционален расстоянию до него.
6. Межзвёздная среда – это вакуум.
7. Млечный Путь входит в состав сверхскопления Великий Аттрактор.
8. Вселенная – это часть Метагалактики.
9. Астрология – это раздел науки астрономии, изучающий влияние небесных тел на жизнь людей.
10. Современные астрономы могут вести наблюдения во всех длинах волн.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. _____ – единица измерения расстояний в астрономии, равная примерно 150 млн км.
2. _____ – это характерная, легко различимая на ночном небе группа звезд, которая имеет исторически сложившееся устойчивое имя.
3. Самая яркая звезда в созвездии обозначается _____.
4. Основным методом в астрономии является _____.
5. Изменение видимого положение объекта по отношению к удаленному фону в зависимости от нахождения наблюдателя называется _____.
6. Земля – _____ от Солнца в Солнечной системе.
7. Парсек равен _____ световых года, _____ астрономических единицам, или _____ км.
8. Зная _____ и _____ небесного объекта, можно вычислить его линейный диаметр.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.

2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. Изд. 7 – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.
7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>
8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>
9. Новости космоса, астрономии и астрофизики. <http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

1. С помощью вычислений обоснуйте, какую единицу измерения расстояний удобнее всего использовать для тел Солнечной системы.
2. Представьте, что на крыше научной библиотеки ЕГУ им. И.А. Бунина установили сверхмощный источник света. До какого из приведенных ниже мест смог распространился свет за 1 минуту: до Москвы (354 км); до Парижа (2550 км); до Кейптауна (примерно 10 000 км); до Луны (384 000 км); до Венеры (45 000 000 км)?
3. Экспедиция отправляется в космическое путешествие. Изменятся ли очертания знакомых нам созвездий, если путешествие происходит в Солнечной системе? Будут ли очертания созвездий такими же, как при наблюдении с Земли, если экспедиция достигнет ближайшей звезды? Каким будет вид звёздного неба, когда экспедиция достигнет центра Галактики? Смогут ли путешественники увидеть известные им созвездия?
4. 1 парсек равен 206265 астрономических единицам. 1 радиан равен 206265". Случайно ли это совпадение? Ответ поясните.
5. Расстояние от Земли до Юпитера в момент его противостояния равно 628 млн. км, его угловой диаметр – 47", 2. Определить линейный радиус Юпитера. Сравните полученный результат с табличным значением.
6. В момент, когда Венера ближе всего подходит к Земле, её угловой радиус равен 32", 4. Линейный радиус Венеры равен 0,95 земного радиуса. Определить наименьшее расстояние от Земли до Венеры.
7. Можно ли вычислить расстояние от Земли до Солнца, измерив параллакс одной из больших планет? Если да, то оцените точность этих расчётов.

8. Два любителя астрономии одновременно наблюдают Солнце из разных мест. Каково максимальное различие в видимом положении Солнца для этих наблюдателей?

9. Линейный размер звездного скопления равен 1 парсек (. Скопление состоит из солнцеподобных звезд, средняя плотность одной звезды $\rho \approx 1,4 \text{ г/см}^3$, радиус $R \approx 5 \times 10^5 \text{ км}$. Считая скопление шарообразным, оцените количество звезд в нем.

10. 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?

11. Параллакс одной звезды равен $0,02''$, другая звезда находится от Солнца на расстоянии 40 пк, третья – на $2 \cdot 10^8 \text{ а.е.}$, а свет от четвертой путешествует до Солнца 100 лет. Расположите звезды в порядке увеличения их расстояния от Солнца.

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

13. Свет от звезды Ригель (β Ориона) идет к Земле 772,9 лет. Определите значение годового параллакса у звезды Ригель.

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Изучите список 88 созвездий. Как Вы считаете, есть ли в этом списке созвездия, имена которым были даны в недавнее время? Поясните, почему названия этих созвездий не являются архаическими с Вашей точки зрения. Где располагаются эти созвездия?

2. В астрономии используют понятия: Вселенная, космос, Метагалактика, мегамир. Дайте определение этим понятиям. Укажите различия между ними.

3. Приведите примеры практического и фундаментального значения астрономии.

4. Общеизвестно, что астрономия стимулировала развитие других наук в прошлом. Характерно ли это явление для современной науки? Приведите примеры.

Тема 2. Описание видимых движений небесных объектов

Краткий обзор теоретического материала

2.1. Видимое движение небесных тел

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

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

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

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

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

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

2.2. Небесная сфера и ее основные элементы

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

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

Прямая линия, которая совпадает в данной точке с направлением действия силы тяжести, называется *отвесной линией*. Направление отвесной линии можно определить с помощью простейшего отвеса – грузика на тонкой нити. Отвесная линия пересекает небесную сферу в двух точках: верхняя (над головой наблюдателя) Z называется *зенитом*, нижняя Z' – *надиром* (рис. 2.1).

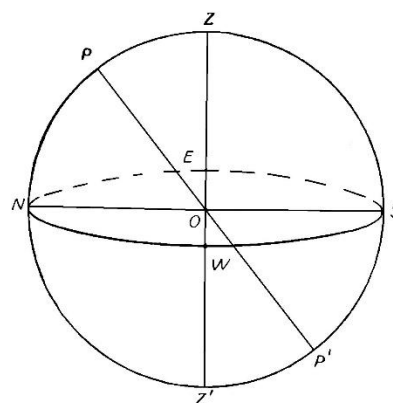


Рисунок 2.1. Схематическое изображение небесной сферы

Мысленно продолжим ось вращения Земли до её пересечения с небесной сферой в точках P и P' (рис. 2.1), которые называются *Северным* (P) и *Южным* (P') *полюсами* мира. Небесная сфера вращается вокруг диаметра PP' , который называют *осью мира*. *Северным полюсом мира считают тот, при наблюдении с которого вращение небесной сферы происходит по часовой стрелке, если смотреть на сферу извне.*

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

Ось вращения Земли вследствие гравитационного воздействия Солнца и Луны периодически изменяет направление в пространстве и испытывает колебания. Очень медленное движение оси вращения Земли, которая для поддержания постоянного наклона по отношению к плоскости эклиптики меняет свое направление в пространстве, описывая при этом коническую поверхность, называется *прецессией*. В результате прецессии земная ось описывает в пространстве конус. Период прецессии составляет примерно 26 000 лет (Рис. 2.2).

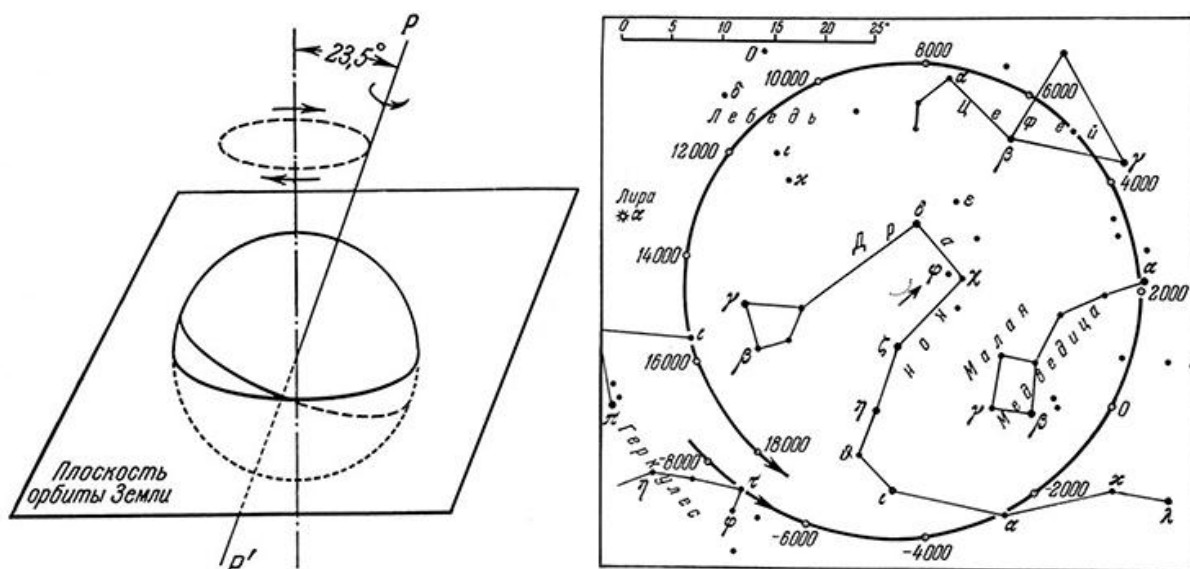


Рисунок 2.2 Прецессия и нутации земной оси

Нутации – это небольшие колебания земной оси, которые накладываются на прецессию. Наиболее вероятное объяснение нутации – гравитационное действие Луны. Из-за наличия нутации движение земной оси происходит по двойной “волнистой” конической поверхности (Рис. 2.2).

Для определения основных элементов небесной сферы в астрономии используют понятие большого и малого кругов. **Большим кругом** называют окружность, которая получается при пересечении небесной сферы плоскостью, проходящей через её центр. Если плоскость не проходит через центр, то получается *малый круг*.

Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется *небесным экватором* (Рис. 2.3).

По аналогии с моделью Земли (глобусом) в астрономии используют небесные меридианы и параллели. Параллели – это линии, условно проведённые по поверхности небесной сферы параллельно

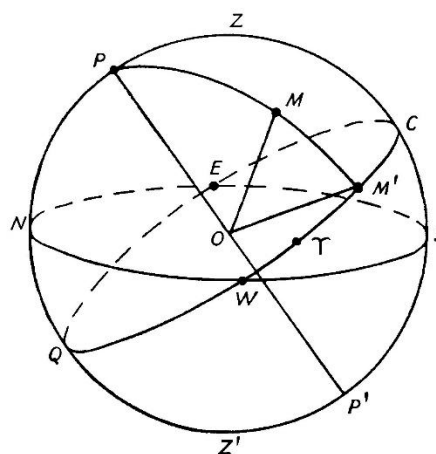


Рисунок 2.3 Небесная сфера и её основные элементы

небесному экватору. По форме параллели – это окружности, радиус которых уменьшается к полюсам. Таким образом, параллели – это малые круги небесной сферы.

Небесным меридианом называется большой круг небесной сферы, проходящий через зенит Z , надир Z' и полюсы мира P и P' (Рис. 2.3).

На небесной сфере проведём диаметр, перпендикулярный отвесной линии, и построим на нём большой круг. Построенный таким образом большой круг называется **математическим** (истинным) **горизонтом**. Математический горизонт пересекается с небесным меридианом в точках севера N (находится ближе к северному полюсу мира) и юга S , а с небесным экватором – в точках востока E и запада W (Рис. 2.3).

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

Солнце перемещается по небесной сфере как в течение суток, так и в течение года, изменяя свое положение среди звезд. В действительности видимое движение Солнца есть не что иное, как отражение движения Земли вокруг Солнца. Плоскость земной орбиты называют **плоскостью эклиптики**. Тогда на небесной сфере большой круг, по которому перемещается центр солнечного диска в течение года (видимое движение Солнца), называется **эклиптикой** (Рис. 2.4).

Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках: **точке весеннего равноденствия**, в которой Солнце переходит из южного полушария неба в северное, и в противоположной ей точке – **точке осеннего равноденствия**.

Принято обозначать эти точки знаками Овна Υ для весеннего и Весов $\var�$ для

осенних равноденствий. Эти обозначения пришли к нам из античности: в то время точка весеннего равноденствия находилась в созвездии Овна, а осеннего – в созвездии Весов. Причиной смещения точек весеннего и осеннего равноденствия является **прецессия**. В настоящее время точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыб, точка осеннего равноденствия – в созвездии Девы.

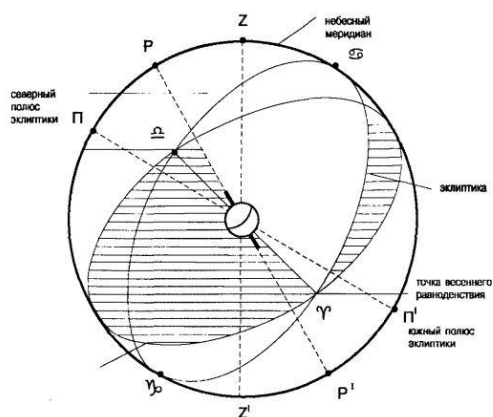


Рисунок 2.4 Положение эклиптики на небесной сфере

2.3. Системы небесных координат

Для определения системы координат необходимо задать её начало, направления осей и выделить её основную плоскость. В древности наиболее используемой была эклиптическая система координат, в которой плоскость эклиптики является основной. Такой выбор обусловлен тем, что изу-

чались, в основном, движения Солнца и Луны, планет, которые располагаются вблизи эклиптики. В средние века, когда появились астрономические инструменты с экваториальной установкой, стала использоваться экваториальная система координат, которая задается плоскостью среднего экватора и точкой весеннего равноденствия. Несколько позже стали использоваться горизонтальная и галактическая системы координат, основными плоскостями которых являются плоскость математического горизонта и плоскость экватора Галактики. Все вышеуказанные системы координат являются сферическими.

Рассмотрим подробнее две системы небесных координат.

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

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

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

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

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

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

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

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

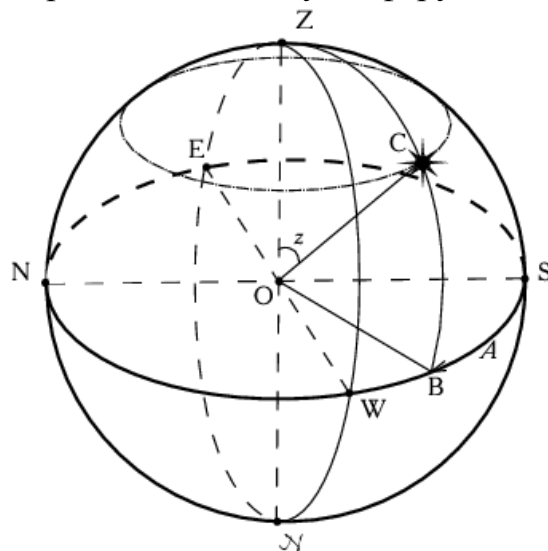


Рисунок 2.5. горизонтальная система координат

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

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

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

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

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

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

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

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

Прямое восхождение α определяется как дуга небесного экватора, отсчитываемая от точки весеннего равноденствия Υ до круга склонения, проходящего через светило. Прямое восхождение отсчитывается в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы, и выражается в единицах времени: 1 час (1^h) соответствует 15° , 1 минута (1^m) – $15'$, 1 секунда (1^s) – $15''$. Так как точки экватора, от которых отсчитываются экваториальные координаты светил, жёстко связаны с небесной сферой, экваториальные координаты не изменяются вследствие вращения небесной сферы и одинаковы для любого наблюдателя на Земле.

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

2.4. Видимые движения звёзд

Для наблюдателя на Земле небесный свод со звездами, находящимися на нем, обращается как единое целое вокруг некоторой воображаемой оси, проходящей через место наблюдения, – *оси мира*. Если внимательно наблюдать за перемещением звёзд, можно заметить, что они описывают на небе замкнутые окружности с центром в некоторой точке, расположенной вблизи Полярной звезды. Именно здесь находится Северный полюс мира. Это кажущееся вращение светил вокруг оси мира, происходящее *с востока на запад* – следствие действительного вращения Земли вокруг своей оси, происходящего с запада на восток. Видимое движение светил, вызываемое вращением Земли вокруг оси, называют *суточным движением светил*.

В течение суток светило совершает полный оборот по малому кругу небесной сферы, который называется *суточной параллелью светила*. Она пересекает небесный меридиан в двух точках.

Явление пересечения светилом небесного меридиана называется *кульминацией*. Ближайшая к зениту кульминация t_1 является *верхней*, а более удаленная t_2 – *нижней*. Соответственно в верхней кульминации светило имеет наибольшую высоту над горизонтом, а в нижней – наименьшую. Промежуток времени между точками t_1 и t_2 равен 12^h (или 180° в угловой мере).

Видимость небесных тел зависит от: (1) места наблюдения; (2) небесных координат наблюдаемых тел; (3) времени наблюдения.

На **полюсах** Земли суточные параллели небесных тел (исключая Луну и Солнце) параллельны математическому горизонту. Поэтому все небесные тела (кроме Солнца и Луны) являются либо незаходящими, либо невосходящими.

В **средних широтах** Земли небесный экватор пересекается с математическим горизонтом под углом $90^\circ - \varphi$, где φ – широта места наблюдения.

В верхней кульминации к югу от зенита высота светила

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta; z = \varphi - \delta.$$

В нижней кульминации $z = 180^\circ - (\varphi + \delta)$.

В зависимости от склонения светила можно разделить на три группы.

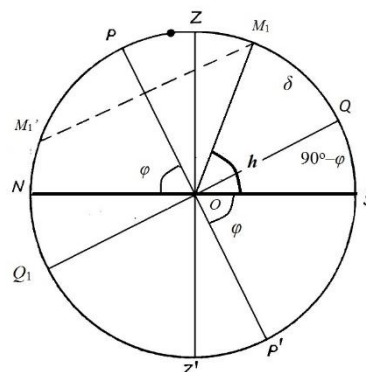


Рисунок 2.7 Проекция небесной сферы на плоскость меридиана: QQ_1 – проекция плоскости экватора; NS – проекция плоскости горизонта.

- 1) Незаходящие звезды, для которых в нижней кульминации $z < 90^\circ$. Для незаходящих звезд в северном полушарии выполняется соотношение: $\delta > 90^\circ - \varphi$. Эти звезды видны над горизонтом всегда.
- 2) Невосходящие звезды в верхней кульминации имеют зенитное расстояние $z > 90^\circ$. Для них справедливо соотношение: $\varphi - \delta > 90^\circ$ или $\delta < -(90^\circ - \varphi)$. Эти звезды невидимы для наблюдателя.
- 3) Восходящие и заходящие звезды, склонение δ которых удовлетворяет условию: $-(90^\circ - \varphi) < \delta < 90^\circ - \varphi$, восходят в восточной части горизонта и заходят в западной.

Из наблюдений известно, что на данной широте φ каждая звезда всегда кульминирует на одной и той же высоте. Поэтому часто наблюдения звезды в верхней и нижней кульминациях используют для определения широты местонахождения или склонения звезды. Действительно, если при помощи наблюдений определены зенитные расстояния в точках верхней z_v и нижней z_n кульминации, то:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{z_v + z_n}{2}.$$

Для нахождения склонения при известной широте места наблюдения используем формулу:

$$\delta = 90^\circ + \frac{z_v - z_n}{2}.$$

На экваторе Земли суточные параллели небесных светил перпендикулярны математическому горизонту. Все светила восходят и заходят. Наблюдатель на экваторе в течение года сможет увидеть все светила и северного, и южного полушарий неба.

Проверь себя (задания для самопроверки)

Укажите верные, на Ваш взгляд, ответы.

1. Небесная сфера – это

- 1.1. воображаемая сфера, радиус которой равен радиусу Вселенной, а центр совпадает с центром Земли;
- 1.2. воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой совпадает с центром Земли;
- 1.3. воображаемая сфера определенного радиуса с центром в точке наблюдения;
- 1.4. воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в точке наблюдения.

2. Установите соответствие между системой небесных координат и основными кругами небесной сферы:

- | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------|
| 2.1: горизонтальная СК | а) небесный экватор | б) круг склонения |
| 2.2: 1-я экваториальная СК | в) вертикальный круг (круг высоты) | |

2.3: 2-я экваториальная СК

г) небесный меридиан

д) эклиптика

е) параллель

ж) круг широты

з) математический горизонт и) альмукутантарат

3. Установите соответствие между системой небесных координат и координатами:

3.1: горизонтальная СК

а) прямое восхождение α

б) зенитное

расстояние z

3.2: 1-я экваториальная СК

в) часовой угол t

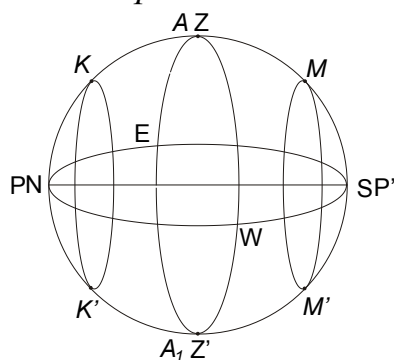
г) склонение δ

3.3: 2-я экваториальная СК

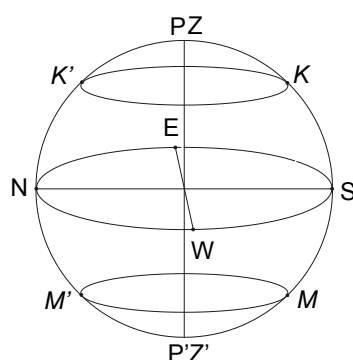
д) высота h

е) азимут A

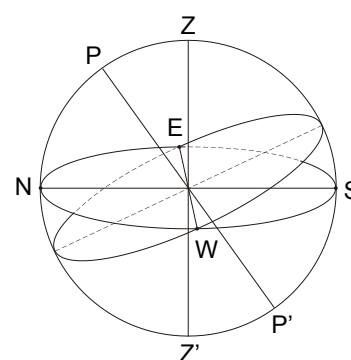
4. Какой вид будет иметь небесная сфера для наблюдателя, находящегося на северном полюсе Земли?



4.1.



4.2.



4.3.

2.4. среди ответов 4.1 – 4.3. нет правильного.

5. Широта г. Елец $\varphi=52,5^{\circ}$. Установите соответствие между видимостью звезды и ее координатами.

5.1: никогда не видна

а) $\alpha=13^{\text{h}}25^{\text{m}}$; $\delta=+54^{\circ}59'$

5.2: видна над горизонтом всегда

б) $\alpha=14^{\text{h}}15^{\text{m}}$; $\delta=+19^{\circ}10'$

5.3: восходит и заходит

в) $\alpha=14^{\text{h}}03^{\text{m}}$; $\delta=-60^{\circ}22'$

г) $\alpha=5^{\text{h}}16^{\text{m}}$; $\delta=+45^{\circ}59'$

д) $\alpha=13^{\text{h}}25^{\text{m}}$; $\delta=-11^{\circ}09'$

е) $\alpha=8^{\text{h}}03^{\text{m}}$; $\delta=-40^{\circ}00'$

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

1. Вид звёздного неба не изменяется в течение года.

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

3. При наблюдении с южного полюса мира вращение небесной сферы происходит против часовой стрелки, если смотреть на сферу извне.

4. Северный полюс мира в настоящее время находится на расстоянии менее 1° от Полярной звезды.

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

6. Эклиптика пересекает небесный экватор в точках востока и запада.

7. Причиной смещения точек весеннего и осеннего равноденствия является прецессия.
8. В настоящее время точка весеннего равноденствия находится в созвездии Овна, точка осеннего равноденствия – в созвездии Весы.
9. Основной плоскостью горизонтальной системы координат является плоскость небесного экватора.
10. На экваторе Земли суточные параллели небесных светил перпендикулярны математическому горизонту.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. Большой круг небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется _____.
2. Прямая линия, которая совпадает в данной точке с направлением действия силы тяжести, называется _____.
3. Наиболее вероятное объяснение нутации – гравитационное действие _____.
4. Линия, вдоль которой происходит видимое движение Солнца в течение года, называется _____.
5. Высота h_p северного полюса мира над горизонтом равна _____.
6. Большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира и через светило, называется _____ светила.
7. Явление пересечения светилом небесного меридиана называется _____.
8. На полюсах Земли суточные параллели небесных тел (исключая Луну и Солнце) _____ математическому горизонту.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с.
4. Жаров В.Е. Сферическая астрономия: учебник/ Гос. астрономич. ин-т. – Фрязино: Век 2, 2006.
5. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977.
6. Гусев Е.Б., Сурдин В.Г. Расширяя границы Вселенной: история астрономии в задачах: Учебно-методические пособие для учителей

астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – М.: МЦНМО, 2003. – 176 с.

7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>

8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>

9. Новости космоса, астрономии и астрофизики.

<http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

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

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

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

4. Определите интервал склонений звёзд, которые на широте Ельца (52°) (а) никогда не заходят; (б) никогда не восходят; (в) могут восходить и заходить.

5. Звезда взошла в 00 часов 01 мин по местному времени. Сколько еще раз она пересечет горизонт в данном пункте в эти сутки?

6. Какое склонение должна иметь звезда, кульминирующая в Ельце в зените?

7. Звезда, описывающая над горизонтом дугу в 180° от восхода до захода, во время верхней кульминации отстоит от зенита на 55° . Под каким углом небесный экватор наклонен к горизонту данной местности? (ВВ 116)

8. Незаходящая звезда имеет высоту 20° в нижней кульминации и 50° в верхней. Найти склонение этой звезды и широту места наблюдения. *Указание:* Сделать чертеж и рассмотреть случаи верхней кульминации к югу и к северу от зенита. (ВВ 135)

9. Опишите видимое суточное движение звёзд Вега ($\delta = 39^\circ$), Спика ($\delta = -11^\circ$) и Арктур ($\delta = 19^\circ$) на экваторе, в Ельце и на северном полюсе Земли.

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

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Представьте, что Вы находитесь в таком месте земной поверхности, где в зените наблюдается одна из следующих звёзд: Полярная, Вега, Спика, Канопус, Антарес, Мира. Определите широту места наблюдения для каждого случая. Изобразите небесную сферу для 3 любых (на Ваш выбор) мест наблюдения.

2. Определите, в каких местах Земли можно наблюдать созвездие Южного Креста, расположенное в пределах южного склонения от -55° до -64° . Жители каких стран могут наблюдать это созвездие?

Проекты (работа в группах)

Подготовьте рассказ о полярных созвездиях и созвездиях, которые видны в данное время вечером. Используйте мифы и легенды, образы созвездий из атласа Яна Гевелия. Представьте, что вы рассказываете во время вечерних наблюдений. Для показа созвездий пользуйтесь немymi картами (на которых нанесены только звезды и ничего не подписано). Но вначале вы должны сами уметь находить наиболее известные созвездия на этих картах.

Тема 3. Движения Солнца и Луны

Краткий обзор теоретического материала

3.1. Видимое движение и фазы Луны

Из наблюдений было установлено, что звёзды не меняют своего взаимного расположения, а планеты, Солнце и Луна движутся относительно них.

Движение Луны на фоне звёзд происходит с запада на восток, т.е. противоположно суточному вращению небесной сферы. Оно объясняется действительным движением Луны вокруг Земли, при этом линейная скорость Луны составляет примерно 1 км/с.

Перемещаясь относительно Земли и Солнца, Луна изменяет также внешний вид. Это явление называют *сменой фаз* Луны (или просто *фазами Луны*).

В *новолуние* Луна проходит на небе между Солнцем и Землёй и поэтому не видна с Земли (Рис. 3.1). Примерно через 7 дней угловое расстояние между Солнцем и Луной достигает 90° , эта фаза называется *первой четвертью* (Рис. 3.1). На небе мы видим половину диска Луны, обращенную выпуклостью к западу. Примерно через 14 дней от новолуния Луна находится на своей орбите противоположно Солнцу, на небе виден весь диск Луны – это фаза *полнолуния* (Рис. 3.1). Спустя примерно 21 день от новолуния мы видим на небе половину диска Луны, но обращенную выпуклостью на восток. Эта фаза называется *последней (третьей) четвертью* (Рис. 3.1). 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.

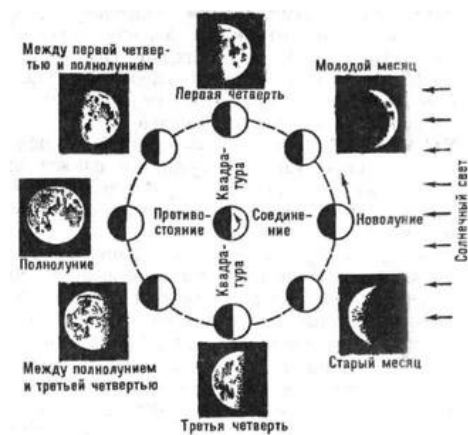


Рисунок 3.1 Фазы Луны

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.

3.2. Движение Солнца на небесной сфере

В течение года Солнце перемещается по небесной сфере по *эклиптике* (рис. 2.4), изменяя свое положение среди звезд. Название «эклиптика» (ecliptic) возникло потому, что только тогда, когда Луна (будучи в фазе новолуния или полнолуния) пересекает эклиптику, мы можем наблюдать *затмения* (eclipse) Солнца или Луны.

Двигаясь по эклиптике с запада к востоку, Солнце проходит за каждые сутки около 1° , перемещаясь по *зодиакальным созвездиям* (Рис. 3.2). Большинство этих созвездий названы в честь различных животных, что и дало название «зодиакальный», так как по-гречески «зоос» означает «животное».

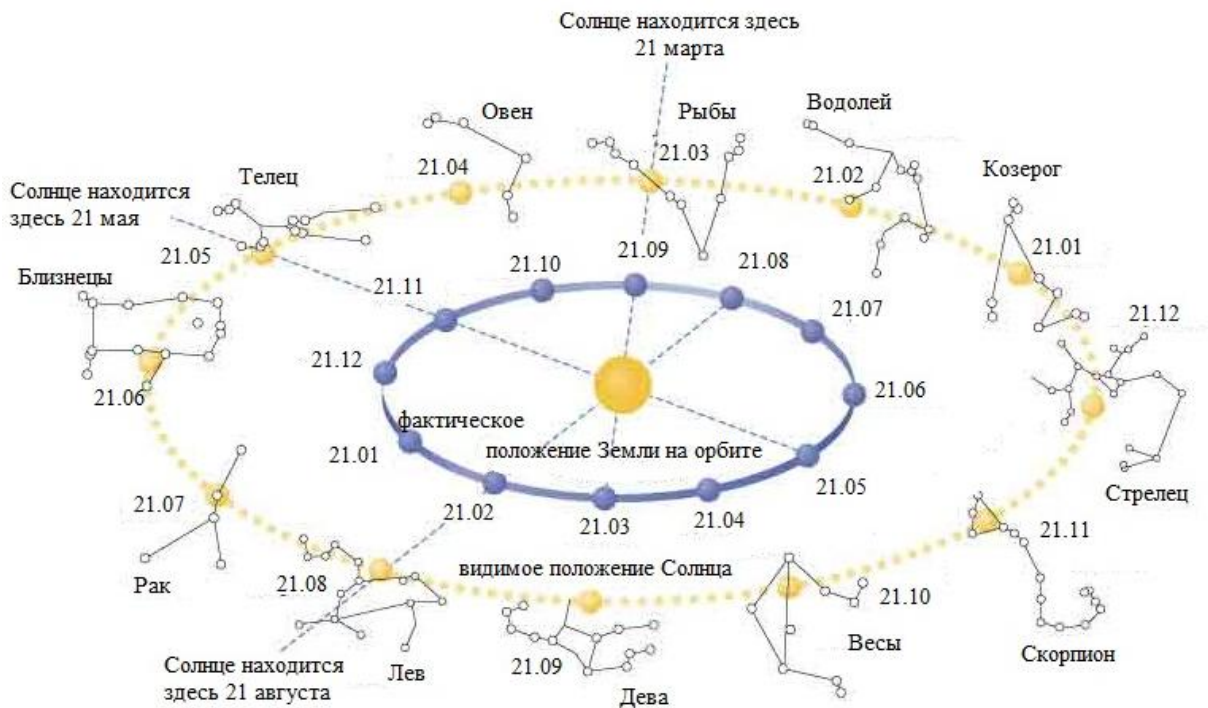


Рисунок 3.2 Видимое годичное движение Солнца

Плоскость эклиптики наклонена под углом $23,5^\circ$ к земному и небесному экваторам. Это объясняется тем, что наклон оси вращения Земли к плоскости её орбиты составляет $66,5^\circ$. Именно по этой причине высота Солнца над горизонтом меняется в течение года (Рис. 3.3).

В точке весеннего равноденствия (Υ) Солнце бывает 20-21 марта, а в точке осеннего равноденствия (ϖ) – около 23 сентября. В этих точках склонение Солнца $\delta_{\odot} = 0^\circ$, и оно восходит точно на востоке и заходит точно на западе.

Наиболее удалённая от небесного экватора точка эклиптики называется точкой **летнего солнцестояния**, в этой точке склонение Солнца достигает своего максимального значения: $\delta_{\odot} = +23,5^{\circ}$. Солнце бывает в этой точке 21-22 июня. Полгода спустя, 21-22 декабря, Солнце проходит через точку **зимнего солнцестояния**, в которой склонение Солнца достигает наименьшего значения: $\delta_{\odot} = -23,5^{\circ}$.

Полуденную высоту Солнца можно определить по формуле:

$$h = 90^{\circ} - \varphi + \delta_{\odot},$$

где φ – географическая широта места наблюдения, δ_{\odot} – склонение Солнца.

В течение года склонение Солнца меняется, следовательно, меняется его полуденная высота, а также точки восхода и захода.

Обращение Земли вокруг Солнца, а также вращение её вокруг оси, имеющей практически постоянные наклон и ориентацию в пространстве, являются причинами трёх взаимосвязанных явлений: (1) изменение длительности дня и ночи; (2) смена времён года; (3) изменение климата. Напомним, что **климат** – это метеорологические условия, свойственные данной местности. В переводе с древнегреческого климат означает наклон, имеется в виду наклон солнечных лучей к поверхности Земли.

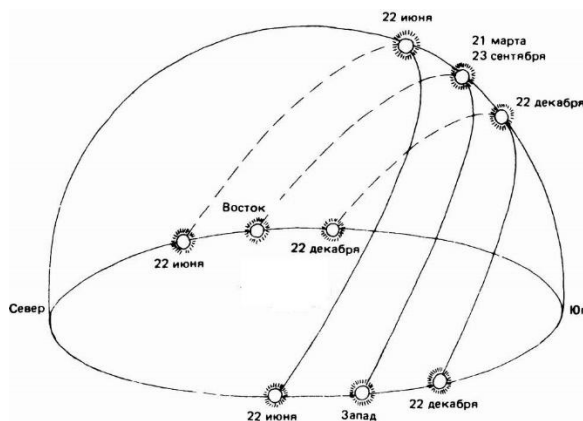


Рисунок 3.3 Видимый путь Солнца на небе в разные времена года

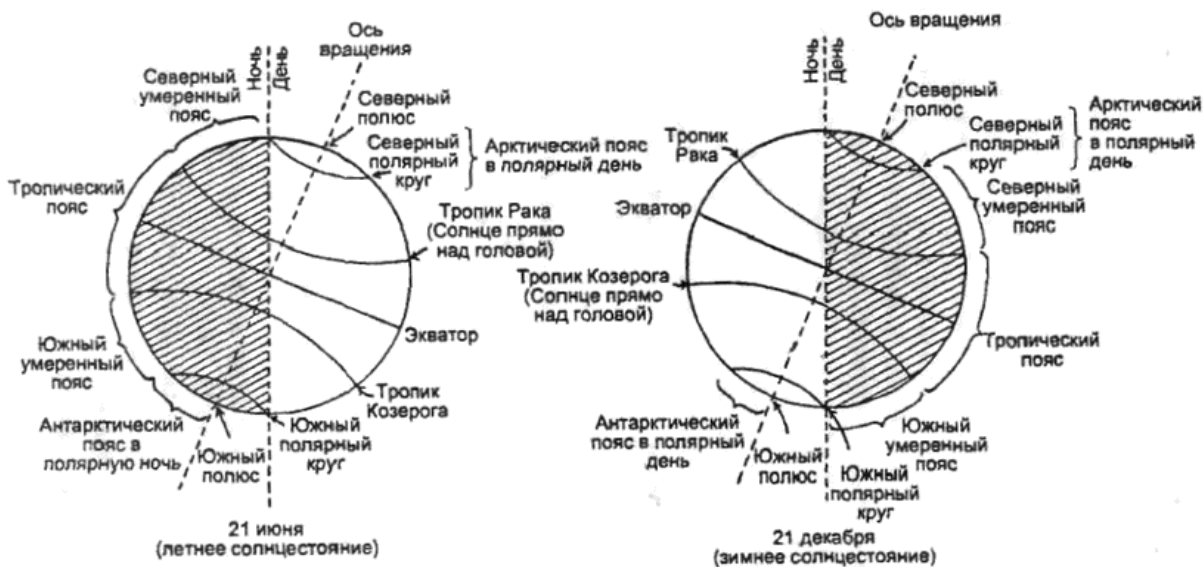


Рисунок 3.4 Пояса Земли

Продолжительность дня (или ночи) и смена времён года зависят от широты места наблюдения (Рис. 3.4). Параллели, соответствующие $66,5^{\circ}$ северной и южной широтам, называются **северным** и **южным полярными кругами**. Выше этих широт ($|\varphi| > 66,5^{\circ}$) можно наблюдать явление, когда

Солнце в течение дня не заходит за горизонт (полярный день) или не поднимается из-за горизонта (полярная ночь).

Параллели, соответствующие $23,5^\circ$ северной и южной широт, называют *тропиком Рака* ($\varphi = 23,5^\circ$) и *тропиком Козерога* ($\varphi = -23,5^\circ$). Названия тропиков произошли от названий созвездий, в которых Солнце наблюдалось в дни солнцестояний более чем 2000 лет назад. В настоящее время в результате прецессии положения этих точек сместились, и в день летнего солнцестояния Солнце на небесной сфере находится в созвездии Близнецов, а в день зимнего солнцестояния – в созвездии Стрельца. На широтах, для которых $|\varphi| < 23,5^\circ$, дважды в год Солнце кульминирует вблизи зенита.

3.3. Солнечные и лунные затмения

Луна движется вокруг Земли по почти круговой орбите, которая наклонена к плоскости эклиптики под углом около 5° и пересекается с эклиптической в двух точках – *узлах орбиты Луны*.

Проходя между Землёй и Солнцем, Луна может закрыть собою Солнце, и наступит *солнечное затмение*. Когда же Земля оказывается между Луной и Солнцем, может произойти *лунное затмение*.

Затмения возможны потому, что видимые угловые диаметры Луны и Солнца очень близки и равны примерно $0,5^\circ$ (Рис. 3.5). Таким образом, Луна может закрыть собой Солнце. Для наступления солнечного затмения необходимо, чтобы Солнце и Луна оказались вблизи одного узла орбиты Луны в новолуние. Лунное затмение наступит, если Солнце и Луна окажутся вблизи противоположных узлов орбиты Луны в полнолуние. При этом 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. В году может произойти от двух и до пяти солнечных затмений и не более трёх лунных. Общее число лунных и солнечных затмений вместе в один год – не более семи.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Луны через один и тот же узел орбиты при её движении вокруг Земли называется *драконическим месяцем*. Такое название возникло потому, что, согласно представлениям древних народов, дракон пожирает Солнце и Луну, и поэтому происходят затмения. Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Солнца через один и тот же узел ор-



Рисунок 3.5 Угловые диаметры Солнца и Луны при наблюдении с Земли

биты Луны называют **драконическим годом**. Продолжительность драконического месяца составляет 27,21 суток; драконического года – 346,53 суток.

Промежуток времени, через который последовательность лунных и солнечных затмений повторяется почти точно, называется **сарос**. Его продолжительность составляет примерно 6585,3213 дня. В течение сароса происходит 70 затмений – 41 солнечное (из них 10 полных) и 29 лунных.

Время, место и условия наблюдения затмений рассчитываются с довольно высокой точностью на много лет вперёд. Самую достоверную и подробную информацию о предстоящих и состоявшихся затмениях можно найти на сайте NASA: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>.

Лунное затмение может быть **полным** (Луна полностью попадает в конус земной тени) или **частным** (Луна частично попадает в конус земной тени). Лунное затмение видно из любой точки Земли, где в это время можно наблюдать Луну (Рис. 3.7). Продолжительность его может достигать 2 часов.

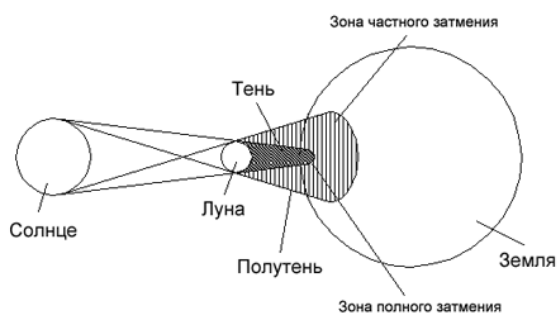


Рисунок 3.6 Схема солнечного затмения

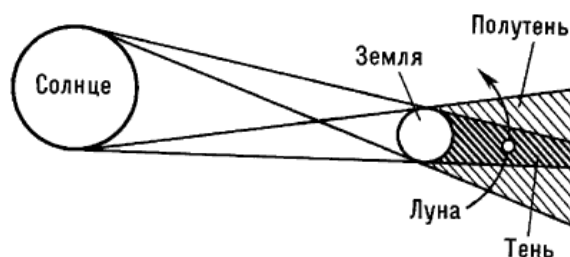


Рисунок 3.7 Схема лунного затмения

Солнечные затмения (Рис. 3.6) наблюдаются в тех местах на поверхности Земли, куда падает тень Луны (**полное солнечное затмение**) или полутень (**частное солнечное затмение**). Во время полного солнечного затмения конус лунной тени пересекается с поверхностью Земли по эллипсу, размеры которого не превышают 270 км. 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.

Из-за эллиптичности орбит Земли и Луны их видимые угловые диаметры меняются. Если в момент затмения Земля оказывается в самой близкой к Солнцу точке своей орбиты, а Луна – в самой далёкой от Земли точке своей орбиты, то диск Луны не может полностью закрыть собой диск Солнца, и на Земле наблюдается **кольцеобразное солнечное затмение**.

Проверь себя (задания для самопроверки)

I. Укажите верные, на Ваш взгляд, ответы.

1. Что произойдет с тепловым режимом на Земле, если ось вращения Земли будет перпендикулярна плоскости ее орбиты?

- 1.1. Тепловой режим не изменится.
- 1.2. Перестанут существовать границы тепловых поясов.
- 1.3. Произойдет глобальное потепление.
- 1.4. Произойдет глобальное похолодание.
- 1.5. Среди ответов 1.1. – 1.4. нет правильного.

2. Как изменятся границы тепловых поясов, если угол наклона оси вращения Земли к плоскости ее орбиты уменьшится?

- 2.1. Не изменятся.
- 2.2. Жаркий и холодный пояса уменьшатся, а умеренные увеличатся.
- 2.3. Жаркий и холодный пояса увеличатся, а умеренные уменьшатся.
- 2.4. Не будет умеренных поясов.
- 2.5. Среди ответов 2.1. – 2.4. нет правильного.

3. Затмения не происходят каждый месяц, так как

- 3.1. Орбита Луны – сильно вытянутый эллипс.
- 3.2. Ось вращения Земли наклонена к плоскости её орбиты.
- 3.3. Период обращения Луны вокруг Земли равен 6 месяцам.
- 3.4. Плоскость орбиты Луны наклонена к плоскости орбиты Земли.
- 3.5. Утверждение неверно. Затмения происходят каждый месяц, но они могут наблюдаться только в очень отдалённых областях Земли.

4. На рисунке 3.8 показано затмение Солнца.

Чёрный круг в центре – это

- 4.1. тень Земли на Солнце;
- 4.2. тень Солнца на Луне;
- 4.3. Луна, закрывающая Солнце;
- 4.4. тень Земли на Луне;
- 4.5. тёмное облако в атмосфере Земли.

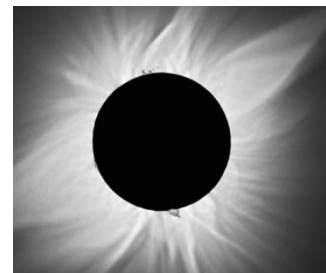


Рисунок 3.8

5. Красный цвет Луны во время полного лунного затмения обусловлен

- 5.1. солнечным светом, прошедшим через атмосферу Земли;
- 5.2. солнечным светом, отражённым от Земли на Луну;
- 5.3. солнечным светом, рассеянным частицами в межпланетном пространстве;
- 5.4. солнечными вспышками;
- 5.5. солнечными протуберанцами.

6. Установите соответствие между фазами Луны, наблюдаемыми на Земле, и фазами Земли, наблюдаемыми на Луне:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 6.1: новолуние | а) последняя четверть |
| 6.2: первая четверть | б) новоземелие |
| 6.3: полнолуние | в) полноземелие |
| 6.4: последняя четверть | г) первая четверть |

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

1. В новолуние Луна проходит на небе между Солнцем и Землёй.
2. Сутки на Луне продолжаются почти месяц.
3. Сидерический месяц продолжительнее синодического.
4. На экваторе Солнце ежедневно кульминирует в зените.
5. Продолжительность дня (или ночи) зависит от широты места наблюдения.
6. Орбита Луны наклонена к плоскости эклиптики под углом около 5° .
7. В году может произойти от двух и до пяти солнечных затмений.
8. Число лунных затмений в году постоянно.
9. Солнечное затмение видно из любой точки Земли, где в это время день.
10. В будущем с Земли невозможно будет наблюдать полные солнечные затмения.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. Время, за которое происходит полная смена фаз Луны, называют _____ месяцем.
2. Период обращения Луны вокруг Земли относительно звёзд называют _____ месяцем.
3. Промежуток времени между двумя последовательными прохождением Луны через один и тот же узел орбиты при её движении вокруг Земли называется _____ месяцем.
4. Промежуток времени, через который последовательность лунных и солнечных затмений повторяется почти точно, называется _____.
5. Если в момент затмения Земля оказывается в самой близкой к Солнцу точке своей орбиты, а Луна – в самой далёкой от Земли точке своей орбиты, то на Земле наблюдается _____.
6. Когда на Земле полнолуние, на Луне _____.
7. Для наступления солнечного затмения необходимо, чтобы Солнце и Луна оказались вблизи одного узла орбиты Луны в _____.
8. Параллели, соответствующие $23,5^\circ$ северной и южной широт, называют _____ и _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с.
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Гусев Е.Б. Сборник качественных задач по астрофизике: Учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – Рязань, 2001. – 176 с.
7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>
8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>
9. Новости космоса, астрономии и астрофизики. <http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

1. Вдоль какой параллели на Земле можно идти пешком так, чтобы Солнце «остановилось»?
2. Школьнице Алисе очень нравится наблюдать заход Солнца в её родном городе Анапе. В августе Алиса побывала в Санкт-Петербурге и смогла увидеть заход Солнца над Финским заливом. Где – в Анапе или в Санкт-Петербурге – Алиса любовалась закатом Солнца дольше? Объясните, почему.
3. Испытывая новый способ нуль-транспортировки ранним утром 23 сентября 2116 года, аспирант Валерий оказался на необитаемом атолле в чём был – в шортах и футболке. Солнце только-только показалось над бескрайним океаном. Сможет ли Валерий определить, в каком полушарии Земли – южном или северном – находится этот остров?
4. Площадь Липецкой области составляет 24100 км^2 . Приблизительно оцените: на сколько минут восход Солнца на восточной окраине происходит раньше, чем на западной. Широта Липецка $\varphi = 52,6^\circ$.
5. На звёздных картах изображена эклиптика, но не показан лунный путь. Почему?
6. Сколько раз в течение года можно увидеть все фазы Луны? Ответ поясните.
7. Вчера наблюдалось лунное затмение. Когда может произойти ближайшее Солнечное затмение?

8. Какие затмения – солнечные или лунные – происходят чаще? Почему?
9. Зависит ли время полного солнечного затмения от широты места наблюдения? Если да, то где затмение будет более продолжительным? Ответ поясните.
10. Жители каких областей Земли чаще могут наблюдать солнечные и лунные затмения чаще? Почему?
11. Где на поверхности Луны находится наблюдатель, если он видит Землю в зените в день, когда на Земле полнолуние?
12. Студент Василий, путешествуя на поезде из Петербурга в Москву, видит в одном окне Венеру, а в противоположном – Луну. В какой примерно фазе была Луна?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Опишите движение Земли на звёздном небе Луны.
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.
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.

Проекты (работа в группах)

1. Сконструируйте горизонтальные солнечные часы для установки их в г. Ельце.
2. Исследуйте, начиная с какой географической широты вечерние и утренние астрономические сумерки ночью сливаются друг с другом.
3. 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.
4. 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.

Тема 4. Измерение времени.

Краткий обзор теоретического материала

4.1. Принципы измерения времени

Согласно классической механике И. Ньютона существует абсолютная, не зависящая от пространственных координат шкала времени, в которой течение времени предполагается равномерным. Современная физика придерживается иного взгляда на свойства времени.

Измерение времени, то есть практическая реализация шкалы времени, является важной задачей не только астрономии, но и физики. Обычно течение наблюдаемого явления связывают с каким-либо периодическим процессом, который можно считать равномерным. Известно, что в природе строго периодических явлений нет. Именно поэтому все реализованные до сих пор шкалы времени не являются идеальными и содержат некоторую ошибку, для выявления которой требуется более равномерный процесс, позволяющий уточнить метки времени прежнего процесса.

Выбирая единицы времени, мы сталкиваемся с серьёзными противоречиями практического характера. За основную единицу времени удобно принять период вращения Земли вокруг своей оси, который мы можем определить с большой точностью (он равен периоду вращения небесной сферы). С другой стороны, наша жизнь определяется Солнцем: в светлое время суток человек бодрствует, в темное – отдыхает. Смену дня и ночи вызывает видимое суточное движение Солнца, являющееся отражением истинного вращения Земли вокруг своей оси. Период суточного вращения Солнца отличается от периода суточного вращения небесной сферы вследствие движения Солнца относительно звезд. Это движение происходит в направлении, обратном вращению небесной сферы, поэтому период суточного вращения Солнца длиннее периода вращения Земли на 3 минуты 56 секунд.

В астрономии используют единицы как звёздного, так и солнечного времени. Длительность традиционно используемого интервала времени называется *сутками*. В зависимости от выбранной точки на небе различают *звёздные, истинные солнечные* и *средние солнечные сутки*. Соответственно время, ими измеряемое, называют *звёздным, истинным солнечным* и *средним солнечным*.

Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же географическом меридиане называют *звёздными сутками*.

Началом звёздных суток считается момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия. В любой другой момент звёздное время равно часовому углу точки весеннего равноденствия в этот момент. Таким образом, на данном меридиане звёздное время s численно равно часовому

углу точки весеннего равноденствия t_{γ} , выраженному в часовой мере:

$$s = t_{\gamma}.$$

Звёздное время определяется периодом осевого вращения Земли. Вместо точки весеннего равноденствия при определении звёздных суток можно использовать любую звезду. Тогда звездное время в любой момент равно прямому восхождению какого-либо светила плюс его часовой угол (Рис. 4.1):

$$s = t + \alpha.$$

Звёздное время используется для решения практических задач, в повседневной жизни оно неудобно. Так как взаимное расположение Солнца и точки весеннего равноденствия в течение года меняется, верхняя кульминация Солнца в разные дни года происходит в разные моменты звёздных суток (Рис. 4.2).

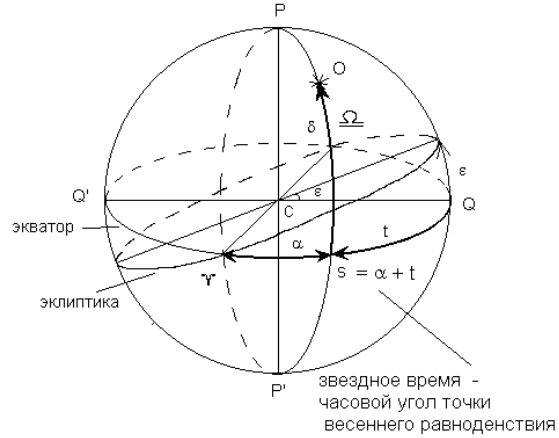


Рисунок 4.1 Связь звездного времени s с прямым восхождением α и часовым углом t светила¹

Солнечные сутки определяют аналогично звёздным: промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра солнечного диска на одном и том же географическом меридиане называется **истинными солнечными сутками**.

За начало истинных солнечных суток на данном меридиане принимается **истинная полночь** – момент нижней кульминации центра солнечного диска.

Время, прошедшее от истинной полночи до любого другого положения Солнца, выраженное в долях истинных солнечных суток (истинные солнечные часы, минуты и секунды), называется **истинным солнечным временем** T_{\odot} . В любой момент времени на данном меридиане оно численно равно часовому углу Солнца t_{\odot} , выраженному в часовой мере, плюс 12 часов: $T_{\odot} = t_{\odot} + 12^{\text{ч}}$.

Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите, вследствие чего угловая скорость

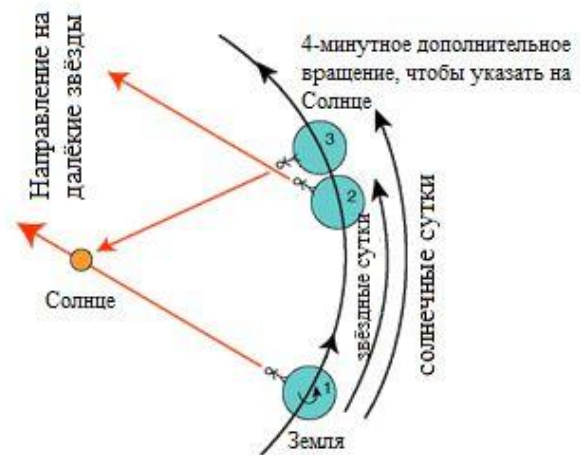


Рисунок 4.2 Разница между солнечными и звёздными сутками

¹ Рисунок из <http://www.astronet.ru/db/msg/1175352/node10.html>

обращения Земли вокруг Солнца в течение года меняется в пределах нескольких процентов. Из-за этого продолжительность истинных солнечных суток изменяется в течение года. Например, истинные солнечные сутки 22 декабря длиннее на 50-51 секунду, чем 23 сентября. Поэтому в качестве единицы измерения времени используют среднюю в году продолжительность солнечных суток. Соответствующее время, измеряемое в таких «средних» сутках, называют **средним солнечным временем**.

Введённое таким образом среднее солнечное время согласовано с движением Солнца за год. Для более точного его определения в астрономии вводят понятие среднего эклиптического и среднего экваториального солнца.

За **среднее эклиптическое солнце** принимают фиктивную точку, равномерно движущуюся по эклиптике со средней скоростью Солнца и совпадающую с ним около 3 января и 4 июля. За **среднее экваториальное солнце** – фиктивную точку, которая равномерно движется по небесному экватору со скоростью среднего эклиптического солнца и одновременно с ним проходит точку весеннего равноденствия.

Таким образом, в каждый момент времени прямое восхождение среднего экваториального солнца равно долготе среднего эклиптического солнца. В моменты прохождения ими дней равноденствия, а также в моменты прохождения средним эклиптическим солнцем точек солнцестояния прямые восхождения среднего эклиптического и среднего экваториального солнца равны.

Введение среднего экваториального солнца, имеющего одинаковые суточные приращения $\Delta\alpha$ прямого восхождения, устраняет непостоянство продолжительности солнечных суток и неравномерность истинного солнечного времени.

Средними солнечными сутками или просто **средними сутками** называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего экваториального солнца на одном и том же географическом меридиане.

Началом средних солнечных суток на данном меридиане считается момент нижней кульминации среднего экваториального солнца (средняя полночь). Соответственно **средним солнечным временем** или просто **средним временем** T_m называется промежуток времени от нижней кульминации среднего экваториального солнца до любого другого его положения, выраженный в долях средних солнечных суток (средние часы, минуты, секунды).

В любой момент на данном меридиане среднее время T_m равно часовому углу t_m среднего экваториального солнца, выраженному в часовой мере, плюс 12 часов: $T_m = t_m + 12^h$.

Так как среднее экваториальное солнце – это абстрактная точка, которая никак на небе не выделена, измерить его часовой угол нельзя. Среднее солнечное время получают вычислением по определенному из наблюдений истинному солнечному или звездному времени.

Уравнением времени η называется разность между средним временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент:

$$\eta = T_m + T_{\odot}$$

Среднее солнечное время в любой момент, как следует из последнего выражения, равно сумме истинного солнечного времени и уравнения времени:

$$T_m = T_{\odot} + \eta$$

Таким образом, среднее солнечное время определяют следующим образом: измерив непосредственно часовой угол Солнца t_{\odot} , определяют истинное солнечное время $T_{\odot} = t_{\odot} + 12^h$, и, зная уравнение времени η в этот момент, находят среднее солнечное время:

$$T_m = t_{\odot} + 12^h + \eta.$$

Среднее экваториальное солнце проходит через меридиан то раньше, то позже истинного Солнца. Поэтому уравнение времени (разность их часовых углов) может быть как положительной, так и отрицательной величиной.

Уравнение времени можно вычислить для любого момента. Оно публикуется в астрономических календарях и ежегодниках для каждой средней полуночи на меридиане Гринвича. Так как под уравнением времени иногда понимают разность между истинным и средним временем, смысл уравнения времени обычно поясняется в календарях и ежегодниках.

Положенная в основу измерения времени продолжительность средних солнечных суток определяется и контролируется астрономическими наблюдениями. Выяснилось, что и эта величина медленно меняется, так как Земля вращается не строго равномерно. В связи с этим, для очень точного определения времени требуются часы, ход которых не связан с вращением Земли. В основу таких часов положены известные свойства излучения атомов, сами часы называют **атомными**, а измеренное ими время – **атомным**. Сигналы атомного времени транслируются по радио по всей планете, именно по ним проверяются все часы.

Основная единица времени – секунда – определялась в соответствии с экспериментальными возможностями. До того, как была установлена неравномерность обращения Земли, секунда считалась равной 1/86400 долей периода вращения Земли. С появлением атомных часов секунду определяют с их помощью. Атомная секунда равна 9192631770 периодам

колебаний электромагнитной волны, излучаемой атомом ^{133}Cs , находящимся в основном состоянии.

Хотя самое точное время определяют теперь не астрономическим способом, его всегда согласуют с «астрономическим» средним солнечным временем, зависящим от вращения Земли. Когда различие между атомным и средним солнечным временем, отслеживаемое специальными службами времени, приближается к 1 с, решением Международного бюро времени атомное время согласуют с «астрономическим», меняя показания атомных часов.

4.2. Системы счета времени

Местным временем называется время, измеренное на данном географическом меридиане.

Часовой угол точки весеннего равноденствия для всех мест на одном и том же географическом меридиане в какой-либо момент один и тот же. Поэтому местное время (звездное или солнечное) на всем географическом меридиане в один и тот же момент одинаково.

Рассмотрим два географических пункта с долготами λ_1 и λ_2 , при этом пункт с долготой λ_1 находится восточнее пункта с долготой λ_2 . Часовой угол светила в пункте с долготой λ_1 будет на $\Delta\lambda$ больше, чем часовой угол того же светила в пункте с долготой λ_2 (расположенном западнее пункта λ_1). Из этого следует, что в один и тот же физический момент разность любых местных времен на двух меридианах равна разности долгот этих меридианов, выраженной в часовой мере (то есть в единицах времени):

$$s_1 - s_2 = \lambda_1 - \lambda_2, \quad T_{\odot 1} - T_{\odot 2} = \lambda_1 - \lambda_2, \quad T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2 \quad [1]$$

Местное время меридиана можно определить с помощью астрономических наблюдений, проводимых на этом меридиане.

Всемирным временем T_0 называется местное среднее солнечное время гринвичского (нулевого) меридиана.

Полагая в формуле (1) $T_{m2} = T_0$ и $\lambda_2 = 0$, $T_{m1} = T_m$ и $\lambda_1 = \lambda$, получим

$$T_m = T_0 + \lambda \quad [2]$$

Таким образом, местное среднее время любого пункта на Земле находится как сумма всемирного времени в этот момент и долготы данного пункта, выраженной в часовой мере и считаемой положительной к востоку от Гринвича.

Моменты большинства явлений в астрономических календарях указаны по всемирному времени T_0 . С помощью формулы (2) легко определить моменты этих явлений по местному времени T_m .

Так как местных систем счета времени может быть столько же, сколько и географических меридианов, пользоваться местным солнечным временем неудобно. Действительно, для установления последовательности событий или явлений, отмеченных по местному времени, необходимо

знать моменты, в которые эти события произошли, и разность долгот тех меридианов, на которых эти события или явления имели место.

Легко устанавливается последовательность событий, отмеченных по всемирному времени. Но большое различие между всемирным временем и местным временем меридианов, удаленных от гринвичского на значительные расстояния, приводит к неудобствам использования всемирного времени в повседневной жизни.

В 1884 году была предложена поясная система счета среднего времени. Суть ее заключается в следующем. Земная поверхность условно делится на участки линиями, идущими от северного до южного полюса Земли и отстоящими приблизительно на $7,5^{\circ}$ от основных меридианов. Эти линии называются **границами часовых поясов**. Они точно следуют по географическим меридианам лишь в открытых морях и океанах и в ненаселенных местах суши, а в остальных местах идут по государственным, административно-хозяйственным или географическим границам, отступая от соответствующего меридиана в ту или иную сторону. Часовые пояса нумеруются от 0 до 23. Гринвичский меридиан принят за основной меридиан нулевого пояса. Основным меридиан первого часового пояса расположен от гринвичского точно на 15° к востоку, второго – на 30° и т.д. Основным меридиан 23 часового пояса имеет восточную долготу от Гринвича 345° (или 15° западной долготы). Счет времени, таким образом, ведется на этих 24 основных географических меридианах, расположенных друг от друга по долготе точно через 15° (или через 1^h), приблизительно посередине каждого часового пояса.

Поясным временем T_n называется местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса.

По поясному времени ведется счет времени на всей территории, лежащей в данном часовом поясе. Разность между местным временем какого либо пункта и его поясным временем T_n равна

$$T_m - T_n = \lambda - n^h,$$

где λ – восточная долгота пункта от Гринвича, а n^h – число целых часов, равное номеру часового пояса, в котором данный пункт находится (долгота основного меридиана часового пояса).

Связь поясного времени со всемирным выражается соотношением:

$$T_n = T_0 + n^h.$$

Очевидно, что разность поясных времен двух пунктов есть целое число часов, равное разности номеров их часовых поясов.

Поясное время было введено в СССР с 1 июля 1919 года. С 1980 года границы часовых поясов на территории СССР были пересмотрены в связи с изменившимися условиями экономического развития страны.

16 июня 1930 года в СССР по декрету правительства стрелки часов во всех часовых поясах страны были переведены на один час вперед

относительно поясного времени. С этого момента население страны живет по так называемому декретному времени. Связь декретного времени T_D какого-либо пункта с его поясным временем T_n , с всемирным временем и местным средним солнечным временем выражается соотношениями:

$$T_D = T_n + 1^ч, \quad T_D = T_0 + n^ч + 1^ч, \quad T_D = T_m - \lambda^ч + n^ч + 1^ч.$$

В 2011 году в России был принят закон «Об исчислении времени», в котором понятия «часовой пояс» и «поясное время» не используются, в официальном обращении вводятся понятия «часовая зона» и «местное время». Законом установлено определение: «местное время – время часовой зоны, в которой расположена соответствующая территория». Часовая зона определяется как часть территории Российской Федерации, на которой действует единое время, установленное законом «Об исчислении времени».

Более длительные промежутки времени принято считать сутками, месяцами, годами.

При счете времени календарными сутками определяют, на каком меридиане начинается новая дата. По международному соглашению **линия перемены даты (демаркационная линия)** проходит в большей своей части по меридиану, отстоящему от гринвичского на 180^0 , отступая от него к западу у островов Врангеля и Алеутских, к востоку – у оконечности Азии, островов Фиджи, Самоа, Тонгатабу, Кермадек, Чатам.

Необходимость установления линии перемены даты вызвана следующими соображениями. Представим себе путешественника, следующего с запада на восток. При таком движении путешественник проходит пункты, где часы, идущие по местному (или поясному) времени, показывают все большее время по сравнению с местным (поясным) временем пункта, где началось путешествие. Путешественник, постепенно переводя стрелки своих часов вперед, к концу своего кругосветного путешествия насчитывает одни лишние сутки. А при кругосветном путешествии с востока на запад одни сутки наоборот теряются. Поэтому для устранения недоразумений и установлена линия перемены даты. К западу от нее число месяца на единицу больше, чем к востоку. После пересечения линии перемены дат с запада на восток календарное число необходимо уменьшить, а при пересечении ее с востока на запад – увеличить на единицу. Например, если корабль, следуя с запада на восток, пересекает демаркационную линию 4 сентября, то в полночь, следующую после пересечения этой линии, дата на корабле не меняется (два дня подряд датируются как 4 сентября). И обратно, если идущий с востока на запад корабль пересекает эту линию 4 сентября, то в полночь, следующую после перехода через линию, дата меняется сразу на 6 сентября.

Впервые ошибку в счете дней допустили участники первой кругосветной экспедиции Магеллана в XVI веке. Соблюдение описанного правила исключает подобные ошибки.

4.3. Календарь

Продолжительность года (*тропический год*) составляет 365 дней 5 часов 48 минут 46 секунд, или 365,2422 средних солнечных суток. Из соображений удобства календарный год должен содержать целое число суток. Достичь этого можно чередованием календарных лет с разным числом суток.

Юлианский календарь (старый стиль) был разработан группой астрономов из Александрии и введён Юлием Цезарем с 1 января 45 г до н.э. Обычный год в этом календаре состоит из 365 суток, каждый четвёртый год является *високосным* и содержит 366 суток. Средняя продолжительность года в юлианском календаре составляла $365\frac{1}{4}$, или 365,25 года, что больше на 0,0078 года (или на 11 минут) продолжительности тропического года. В результате каждые 128 лет накапливается 1 лишний день. К XVI веку накопилась уже достаточно заметная разница, которая стала заметна не только астрономам, но и духовенству. Дело в том, что во многих храмах в день весеннего равноденствия Солнце должно было попадать в определённое место. В результате несовершенства календаря день весеннего равноденствия по календарю не совпадал с истинным равноденствием. В 1582 году устаревший юлианский календарь был заменён на более точный *григорианский календарь (или новый стиль)*. Чтобы ликвидировать запаздывание календаря, следующий после 4 октября день был объявлен 15 октября. Этот календарь используется в настоящее время. В России он был введен 14 февраля 1918 г. Русская православная церковь до сих пор использует юлианский календарь (старый стиль).

Средняя продолжительность года в григорианском календаре составляет 365,2425 средних солнечных суток. Выделяя целое число суток, это число можно представить в виде: $365,2425 = 365 + \frac{1}{4} - \frac{3}{400}$. Для обеспечения такой средней продолжительности года вводят *високосные* года: в каждом году, номер которого делится на 4, насчитывается 366 дней. Продолжительность *простого* года – 365 дней. Средняя продолжительность года получается равной $365\frac{1}{4}$ года. Для уменьшения её на $\frac{3}{400}$ суток три раза каждые 400 лет високосные годы делают простыми. Договорились, что такими годами будут те, которые оканчиваются на 00 и не делятся на 400. Это года: 1700, 1800, 1900, они считаются простыми. Года 1600, 2000, 2400 – високосные. Всего за 400 лет набирается 303 года по 365 дней и 97 лет по 366 дней. В среднем:

$$\frac{365 \cdot 3 + 366 \cdot 97}{400} = 365,2425.$$

Это значение превышает истинную продолжительность года на 0,0003 суток. Расхождение в 1 сутки набирается за 3300 лет.

Проверь себя (задания для самопроверки)

Укажите верные, на Ваш взгляд, ответы.

1. Самолет летит со скоростью 500 км/ч из Магадана в Монреаль, расстояние между которыми равно 8000 км. Когда он прибудет в Монреаль, если вылетел из Магадана 28 мая в 23 часа?

- 1.1. 28 мая в 15 часов по времени Магадана;
- 1.2. 29 мая в 15 часов по времени Магадана;
- 1.3. 29 мая в 7 часов по времени Магадана;
- 1.4. Среди ответов 1.1. – 1.3. нет правильного.

2. Представьте себе, что Вы совершаете кругосветное путешествие на самолете, следующим из Москвы. Вам предстоит совершить посадку, в частности, в Париже, Нью-Йорке, Токио, Новосибирске. По мере движения Вы переводите свои часы так, чтобы они показывали время того пункта, куда Вы прибываете. В результате в конечном пункте вашего путешествия (г. Москва) принадлежащие Вам часы

- 2.1. показывают верную дату;
- 2.2. насчитывают одни лишние сутки;
- 2.3. теряют одни сутки;
- 2.4. Среди ответов 2.1. – 2.4 нет правильного.

3. Какое из приведенных ниже высказываний не относится к юлианскому календарю?

- 3.1. Обычный год в календаре состоит из 365 суток, високосный год содержит 366 суток.
- 3.2. Каждый четвёртый год является високосным.
- 3.3. Года, которые оканчиваются на 00 и не делятся на 400, не являются високосными.
- 3.4. Средняя продолжительность года в юлианском календаре на 11 минут больше продолжительности тропического года.

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

1. При определении звёздных суток можно использовать любую звезду.
2. За начало истинных солнечных суток на данном меридиане принимается истинная полночь – момент нижней кульминации центра солнечного диска.
3. Продолжительность истинных солнечных суток изменяется в течение года.
4. Истинные солнечные сутки 22 декабря короче на 50-51 секунду, чем 23 сентября.
5. Уравнение времени может быть как положительной, так и отрицательной величиной.
6. Поясное время всегда равно местному времени.

7. 1582 год содержал 354 дня.
8. Григорианский календарь набирает ошибку в 1 сутки за 3300 лет.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же географическом меридиане называют _____ сутками.
2. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями центра солнечного диска на одном и том же географическом меридиане называется _____ сутками.
3. В каждый момент времени прямое восхождение среднего экваториального солнца равно _____ среднего эклиптического солнца.
4. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями среднего экваториального солнца на одном и том же географическом меридиане, называется _____.
5. Разность между средним временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется _____.
6. Время, измеренное на данном географическом меридиане называется _____.
7. После пересечения линии перемены дат с запада на восток календарное число необходимо _____, а при пересечении ее с востока на запад – _____ на единицу.
8. _____ составляет 365 дней 5 часов 48 минут 46 секунд, или 365,2422 средних солнечных суток.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с.
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.

6. Гусев Е.Б. Сборник качественных задач по астрофизике: Учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – Рязань, 2001. – 176 с.

7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>

8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>

9. Новости космоса, астрономии и астрофизики.

<http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

1. Когда световой день в Ельце был (или будет) длиннее: 23 сентября 2016 года или 23 сентября 2017 года? Ответ обоснуйте.

2. Сколько дат одновременно может быть на Земле?

3. Найдите звёздное время в Ельце на момент 11^ч солнечного времени.

4. В какой момент по среднему времени должно начаться лунное затмение в пункте с географической долготой 1^ч 22^м, если известно, что по мировому времени оно должно состояться в 3 ч 51 мин?

5. В Орле по часам, идущим по звездному времени Александрии, в 4^ч 48^м наблюдалась верхняя кульминация Капеллы ($\alpha = 5^{\text{ч}}10^{\text{м}}$). Какова разность долгот этих двух городов?

6. Путешественники заметили, что по местному времени затмение Луны началось в 5^ч13^м, тогда как по астрономическому календарю это затмение должно было состояться в 3^ч51^м по гринвичскому времени. Какова их долгота? (ВВ 232)

7. 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.

8. Какова неточность мусульманского лунного календаря, содержащего на каждые 30 лет 19 лет по 354 дня и 11 лет по 355 дней? (ВВ 317)

9. В мае 2016 года было 5 воскресных дней. Когда был такой же случай раньше?

10. 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.

11. В дни летних каникул Василий решил составить генеалогическое древо своей семьи. Опрашивая родственников, он выяснил, что его бабушка в этом году (2016) отметила свой день рождения в восемнадцатый раз. А тётя Марина рассказала Василию, что её дедушка впервые смог отметить день своего рождения только когда ему исполнилось 8 лет. Укажите точные даты рождения бабушки Василия и дедушки тёти Марины.

12. По постановлению Никейского собора (325 г.) православная церковь празднует пасху в первое воскресенье после первого весеннего полнолуния, т.е. после первого полнолуния, которое придется после 21-го марта. Карл Фридрих Гаусс дал следующее простое правило для вычисления пасхи в юлианском календаре: разделив номер года на 19, 4 и 7, обозначим остатки через a , b , c ; остаток $\frac{19a + 15}{60}$ обозначим через d ; остаток $\frac{2b + 4c + 6d + 6}{7}$ через e ; тогда получим, что пасха в юлианском календаре будет $(22 + d + e)$ марта. Пользуясь этим правилом Гаусса, найти, когда будет пасха в 10 последующих лет; в 2100 году.

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Объясните, какими факторами вызваны неравномерности движения истинного Солнца.

2. 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, по среднему времени и по истинному солнечному времени.

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

Проекты (работа в группах)

Определите, наблюдая длину кратчайшей тени от шеста, показание часов по поясному времени в вашем городе в момент истинного полдня. Проверьте это наблюдение при помощи вычислений, зная долготу вашего города от гринвичского меридиана.

Тема 5. Видимые и действительные движения планет

Краткий обзор теоретического материала

5.1 Видимые движения планет

Планеты, участвуя в общем суточном движении, изменяют своё положение относительно звёзд подобно Солнцу и Луне. Они описывают на фоне звёзд сложные петлеобразные траектории (Рис. 5.1), медленно перемещаясь то с запада на восток (*прямое движение*), то с востока на запад (*попятное движение*).

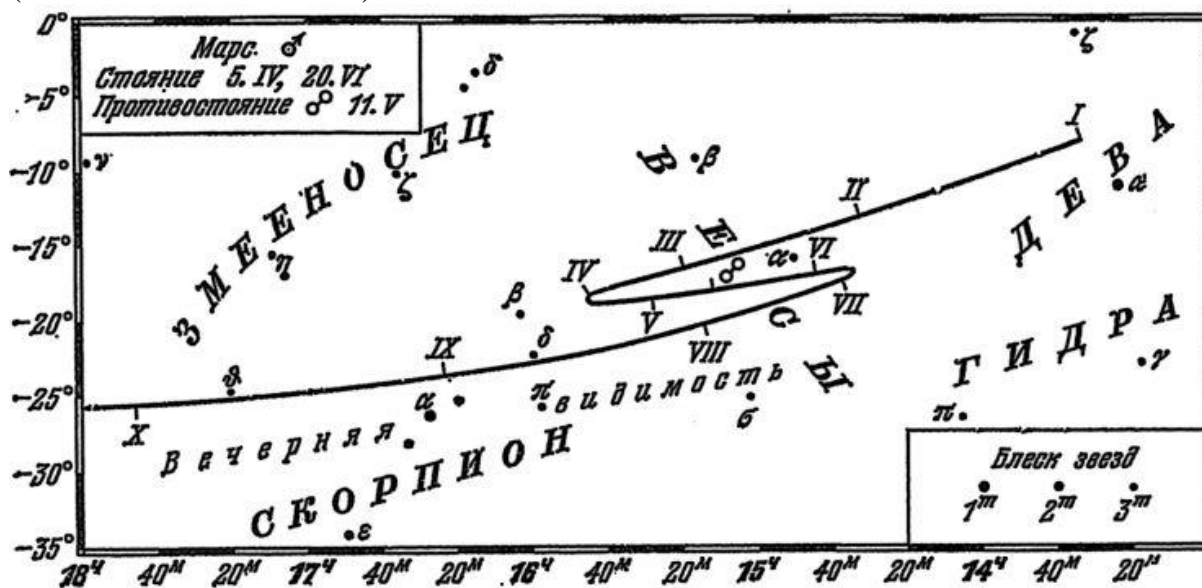


Рисунок 5.1 Видимый путь Марса на фоне звёзд в январе-сентябре 1984 г.

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

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

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

Конфигурации внутренних планет (Рис. 5.2):

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

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

Конфигурации внешних планет (Рис. 5.3):

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



Рисунок 5.2 Конфигурации внутренних планет: 1 – верхнее соединение; 2 – нижнее соединение; 3 – восточная элонгация; 4 – западная элонгация.



Рисунок 5.3 Конфигурации внешних планет.

Движения планет мы наблюдаем с Земли, поэтому возникают сложности с объяснением их видимого движения. По нашим непосредственным ощущениям Земля неподвижна. Именно поэтому возникла **геоцентрическая модель мира**, согласно которой наша планета находится в центре мира (Вселенной), и все небесные тела обращаются вокруг неё.

5.2. Геоцентрическая и гелиоцентрическая системы мира

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

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

Согласно теории Птолемея, Солнце и Луна движутся вокруг Земли по окружностям, которые называются **деференты**. Для объяснения попятного движения планет Птолемей ввёл дополнительные окружности – **эпициклы**, по которым планеты движутся равномерно, а центры эпициклов, в свою очередь, равномерно движутся по деферентам (Рис. 5.4). В общем центре всех деферентов находится неподвижная Земля. Вся совокупность деферентов и эпициклов лежит внутри сферы, на поверхности которой расположены «неподвижные» звёзды. Система мира Птолемея учитывала основные особенности действительных движений планет и позволяла предвычислять их положения с точностью, которая удовлетворяла наблюдения невооружённым глазом. Возникающие разногласия теории с наблюдениями, возникающие по мере усовершенствования последних, устранялись посредством усложнения системы, в частности, введением дополнительных эпициклов. В результате к началу XVI века геоцентрическая система Птолемея настолько усложнилась, что уже не могла удовлетворять практическим потребностям, в первую очередь, бурно развивающемуся мореплаванию.

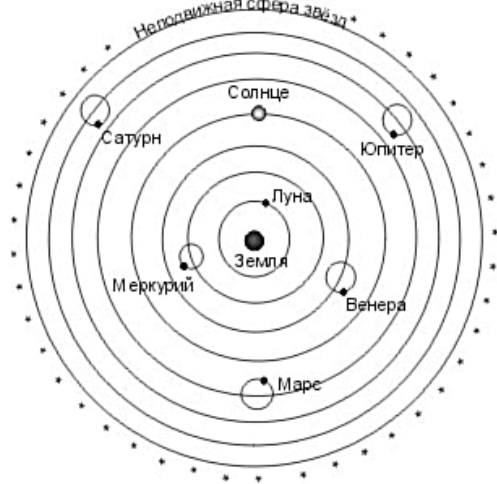


Рисунок 5.4 Геоцентрическая модель мира Птолемея

Система мира Птолемея учитывала основные особенности действительных движений планет и позволяла предвычислять их положения с точностью, которая удовлетворяла наблюдения невооружённым глазом. Возникающие разногласия теории с наблюдениями, возникающие по мере усовершенствования последних, устранялись посредством усложнения системы, в частности, введением дополнительных эпициклов. В результате к началу XVI века геоцентрическая система Птолемея настолько усложнилась, что уже не могла удовлетворять практическим потребностям, в первую очередь, бурно развивающемуся мореплаванию.

Революция и в астрономии, и в мировоззрении людей произошла в эпоху Возрождения, и связана она с именем Николая Коперника (1473-1543). Проведя многочисленные наблюдения движений Солнца и планет, глубоко изучив труды Птолемея, Николай Коперник пришёл к выводу, что геоцентрическая модель мира принципиально неверна. Созданная им **гелиоцентрическая** модель мира исходит из следующих основных положений (Рис. 5.5):

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

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

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

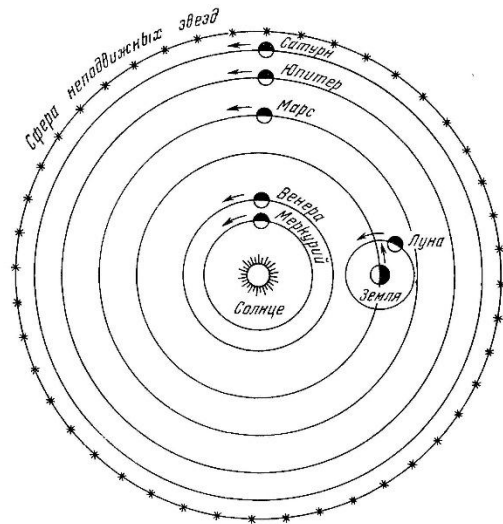


Рисунок 5.5 Гелиоцентрическая модель мира Коперника

Сама идея – поместить Солнце в центр мира – была не нова. Аристарх Самосский ещё в начале III века до н.э. утверждал, что Земля обращается вокруг Солнца. Его гипотеза подверглась критике. Наиболее весомым аргументом против *гелиоцентрической* (Солнце в центре мира) теории было то, что в этом случае с Земли должен был наблюдаться *параллакс* звёзд, то есть изменение их видимого положения в зависимости от времени наблюдения (Рис. 5.6).

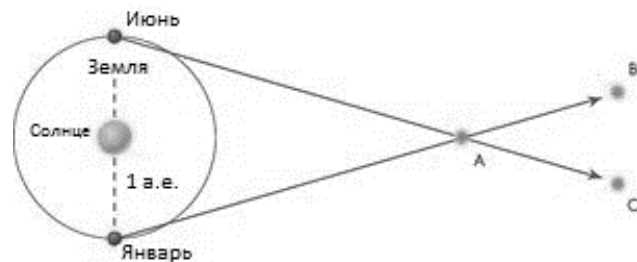


Рисунок 5.6 Объяснение параллакса звезды

Действительно, если наблюдать звезду А с поверхности Земли в январе, то она видна на небе в точке В. Полгода спустя, в июне, наблюдатель должен увидеть ту же самую звезду А в точке С, отстоящей от точки В. Древним астрономам трудно было предположить, что звёзды находятся очень далеко от Земли, и поэтому их параллаксы очень малы. Впервые параллакс звезды Вега (α Лиры) был определён в 1837 году Фридрихом Струве в Дерптской обсерватории.

Струве получил результат $0,125'' \pm 0,055''$ (в настоящее время параллакс Веги принимается равным $0,129''$). В 1838 году Фридрих Бессель измерил параллакс звезды 61 Лебеда. Он смог проследить периодическое изменение углового расстояния этой звезды от двух слабых звёзд и устано-

вил, что за год 61 Лебеда описывает на небе маленький эллипс, как и требовалось гелиоцентрической теорией. Таким образом, гелиоцентрическая теория стала единственно верной и общепризнанной.

5.3. Синодический и сидерический периоды обращения

Сидерическим, или **звездным, периодом обращения** планеты называется промежуток времени T , в течение которого планета совершает один полный оборот по своей орбите вокруг Солнца.

Синодическим периодом обращения планеты называется промежуток времени S между её двумя последовательными одинаковыми конфигурациями.

Обобщим понятия сидерического и синодического периодов обращения.

Сидерический период обращения светила (обычно обозначается T) – это промежуток времени, за который светило совершает полный оборот относительно звёзд вокруг другого небесного тела, принятого за главное. Название произошло от латинского слова *sidus* – звезда (*sideris* – род. падеж). Сидерический период также называют годом. Так, сидерический период обращения Земли называется **звездным годом** (T_3).

Синодический период обращения светила (обычно обозначается S) – это промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными конфигурациями светила. Название произошло от древнегреческого слова, означающего сближение, соединение.

Понятия сидерического и синодического периодов применяется к небесным телам, обращающимся как вокруг Солнца, так и вокруг какой-либо из планет.

Так как синодические периоды обращения планет и Луны определяются при непосредственных наблюдениях за их видимыми движениями, они были установлены еще в глубокой древности. Система мира Коперника позволила установить соотношения между сидерическим и синодическим периодами обращения.

Угловое перемещение планеты по орбите за сутки равно $\frac{360^\circ}{T}$, Земли – $\frac{360^\circ}{T_3}$. Известно, что чем ближе планета к Солнцу, тем больше ее орбитальная угловая скорость. Видимое смещение планеты за сутки, то есть $\frac{360^\circ}{S}$, равно **разности суточных угловых перемещений** планеты и Земли для нижних планет и Земли и планеты для верхних планет. Таким образом, для любой планеты справедливо соотношение:

$$\frac{1}{S} = \left| \frac{1}{T} - \frac{1}{T_3} \right|.$$

Это равенство называется *уравнением синодического движения*. Оно позволяет по известному из наблюдений синодическому периоду обращения планеты вычислить ее сидерический период. Продолжительность звездного года определяется из наблюдений и равна 365,2564 средних солнечных суток.

5.4. Эмпирические законы Кеплера.

Иоганн Кеплер, являясь сторонником системы мира Коперника, поставил перед собой задачу усовершенствовать эту теорию. Для этого он использовал результаты наблюдений за видимым движением Марса, которые на протяжении 20 лет производил датский астроном Тихо Браге (1546-1601), и в течение нескольких лет – сам Кеплер.

Знатный датский дворянин Тихо Браге провел довольно бурную молодость – был участником многих дуэлей и даже лишился носа, поэтому был вынужден носить на переносице протез из золота и серебра. Заинтересовался астрономией с 14 лет. Становление и известность Тихо Браге как астронома связаны, в частности, с его наблюдениями за новой звездой, появившейся в 1572 году на небе в созвездии Кассиопеи. В 1573 году была опубликована его книга, в которой приводились изменения яркости и цвета новой звезды, описывалось ее положение. Датский король Фредерик отдал в распоряжение Тихо Браге небольшой островок Хвен неподалеку от Копенгагена. Там и расположилась обсерватория – «Дворец Урании», оборудованная изобретенными Браге инструментами для определения положений светил на небе и расстояний между ними.

После смерти короля Фредерика Тихо Браге был вынужден покинуть Данию и поселился в Праге. В последний год своей жизни он взял себе в помощники молодого И. Кеплера, который и получил в 1601 году (после смерти своего наставника) пост директора императорской обсерватории.

Иоганна Кеплера по праву можно назвать основоположником теоретической астрономии. Первоначально, разделяя традиционное убеждение, Кеплер потратил много времени, подбирая для Марса круговую орбиту. Но в 1618 году вышла его книга «Краткое изложение коперниковой астрономии», которая может считаться первым учебником астрономии. Именно там впервые и были сформулированы эмпирические законы движения планет, установленные Кеплером.

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:

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

Орбиты планет незначительно отличаются от окружностей. Наименьший эксцентриситет имеет орбита Венеры (0,007), наибольший – орбита Меркурия (0,206). У земной орбиты $e = 0,017$.

Наиболее близкая к Солнцу точка орбиты планеты называется **перигелием**, наиболее удаленная – **афелием**. Большая ось орбит называется линией апсид. Вектор, соединяющий Солнце и планету на ее орбите называется **радиус-вектором** планеты (Рис. 5.7).

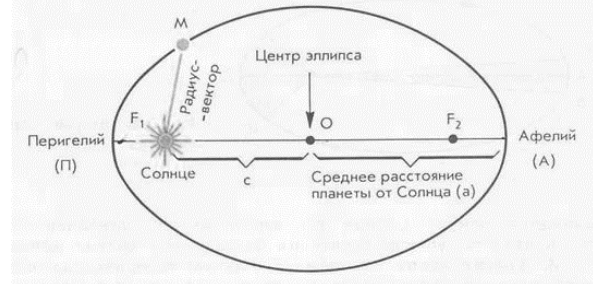


Рисунок 5.7 Эллиптическая орбита планеты.

В перигелии расстояние планеты от Солнца равно $q = a(1 - e)$, в афелии $Q = a(1 + e)$.

За среднее расстояние планеты от Солнца принимается большая полуось орбиты $a = \frac{q + Q}{2}$.

Из второго закона Кеплера следует, что скорость движения планеты уменьшается по мере удаления от Солнца.

Период от 21 марта до 23 сентября (между весенним и осенним равноденствиями) на 7 суток длиннее периода от 23 сентября до 21 марта. Это означает, что зимой (для северного полушария) Земля движется быстрее, чем летом. Следовательно, зимой Земля находится ближе к Солнцу, чем летом. Перигелий своей орбиты Земля проходит 6 января.

Обратимся к третьему закону Кеплера. Если большие полуоси орбит выражать в единицах среднего расстояния Земли от Солнца (т.е. в астрономических единицах), а периоды обращения планет – в годах, то для Земли $a = 1$ и $T = 1$. Тогда период обращения вокруг Солнца любой планеты $T = \sqrt{a^3}$. Таким образом, третий закон Кеплера устанавливает зависимость между расстояниями планет от Солнца и периодами их обращения.

5.5 Закон всемирного тяготения

Идея гравитационного взаимодействия существовала очень давно. Так, в Древней Греции ученые считали, что части целого стремятся к воссоединению. Анаксагор, в частности, утверждал, что если бы Луна не двигалась, она упала бы на Землю, как падает камень, выпущенный из пращи. Формулируя законы движения планет, И. Кеплер высказал предположение о существовании силы, обратно пропорциональной расстоянию, а тяжесть он

рассматривал как стремление всех тел друг к другу. Современник Ньютона Р. Гук интуитивно предположил, что притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. Это послужило причиной длительного спора за приоритет открытия закона всемирного тяготения. Известный архитектор К. Рен во время одной из встреч с Гуком и Галлеем предложил приз тому, кто покажет, что под действием сил притяжения планеты должны двигаться по эллиптической траектории. Заслуга Ньютона состоит в том, что он количественно определил силу взаимного тяготения тел, показал, что эта сила убывает пропорционально квадрату расстояния между телами, и доказал ее универсальность в природе.

Анализ астрономических наблюдений явился основой формулировки и доказательства закона всемирного тяготения. Этот закон справедлив для материальных точек и для тел конечного размера, внутри которых вещество распределено сферически симметрично. Для астрономических объектов такие условия почти всегда выполняются. Исключение составляет система Земля-Луна.

Итак, если M_1, M_2 – массы тел, r – расстояние между их центрами, то закон всемирного тяготения записывается в виде: $F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$,

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ – *гравитационная постоянная*.

Каждая планета подвергается гравитационному воздействию не только со стороны Солнца, но со стороны других планет Солнечной системы. Однако, так как масса Солнца более чем в 700 раз превосходит суммарную массу планет и всех других тел Солнечной системы, Солнце является основным телом, управляющим движением планет. Законы Кеплера можно вывести из закона всемирного тяготения Ньютона, предположив, что единственной силой, действующей на планету, является гравитационное притяжение Солнца, то есть решить задачу для системы из двух тел: Солнца и планеты. Исходя из этого, следует отметить, что законы Кеплера являются приближенными законами, не учитывающими гравитационное воздействие остальных тел Солнечной системы.

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

1-й 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:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_0 + m).$$

Третий уточнённый закон Кеплера позволяет непосредственно определять массу небесных тел.

В качестве примера вычислим массу Солнца. Запишем третий закон Кеплера применительно к системе Солнце – Земля и к системе Земля – Луна.

$$\frac{a_3^3}{T_3^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_0 + M_3), \quad \frac{a_{Л}^3}{T_{Л}^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_3 + M_{Л}).$$

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:

$$M_0 = \left(\frac{a_3}{a_{Л}}\right)^3 \left(\frac{T_{Л}}{T_3}\right)^2 M_3.$$

Подставляя в полученную формулу значения больших полуосей орбит Земли и Луны (150 000 000 и 384 000 км соответственно) и их периодов обращения (365 и 27,5 суток соответственно), получаем, что масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг, что в 330 000 раз превышает массу Земли, равную $6 \cdot 10^{24}$ кг.

Триумфом закона всемирного тяготения считаются открытие планеты Нептуна на основании теоретических расчётов. Использование этого закона позволяет обнаружить, например, невидимые спутники звезд. Расчет движения в системе двух тел относительно их общего центра масс показывает, что оба тела описывают эллипсы, большие полуоси которых обратно пропорциональны их массам. Наблюдатель, находящийся вне системы, видит, что наблюдаемое тело движется не прямолинейно, а по сложной траектории. Такой характер движения свидетельствует о наличии объектов, которые невозможно непосредственно наблюдать, но положение которых можно рассчитать. Такой метод был использован при поисках спутника Сириуса, с его помощью было открыто множество тесных двойных систем, а в настоящее время его используют для поиска планетных систем.

Используя закон всемирного тяготения, можно объяснить явление прецессии. Земля не является правильным шаром, она несколько сплюснута у полюсов. Поэтому ее можно представить как шар, имеющий небольшие утолщения на экваторе. Закон всемирного тяготения сформулирован для материальных точек либо сфер с равномерно распределенной массой. Воображаемый шар с утолщениями испытывает притяжение со стороны Солнца и Луны, при чем на утолщения действуют разные силы притяжения, которые создают момент сил, стремящийся повернуть ось вращения Земли так, чтобы она стала перпендикулярна плоскости эклиптики. Так как Земля вращается, такое воздействие приводит к тому, что ось вращения Земли (ось мира) начинает описывать конус.

Проверь себя (задания для самопроверки)

Укажите верные, на Ваш взгляд, ответы. Некоторые задания имеют более чем 1 верный ответ. Некоторые задания содержат избыток информации.

1. Какой будет звездный период обращения внешней планеты вокруг Солнца, если ее противостояния будут повторяться через 1,5 года?

- 1.1. 12/3 года
- 1.2. 3 года
- 1.3. 1,5 года
- 1.4. 0,5 года

2. Чему равнялся бы синодический период обращения планеты, звездный период обращения которой вокруг Солнца составлял бы 370 дней?

Принять звездное обращение Земли 365 суток.

- 2.1. 183,7 суток
- 2.2. 1 год
- 2.3. 74 года
- 2.4. 2 года

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

- 3.1. Аристотелем
- 3.2. Коперником
- 3.3. Птолемеем
- 3.4. Гиппархом

4. Научные достижения Коперника состоят в том, что он

- 4.1. на основе эмпирических данных доказал движение Земли вокруг Солнца;
- 4.2. на основе теоретических закономерностей доказал движение Земли вокруг Солнца;
- 4.3. экспериментально доказал вращение Земли вокруг своей оси;
- 4.4. создал математическую модель, в принципе объясняющую результаты астрономических наблюдений за планетами;
- 4.5. разработал гелиоцентрическую модель мира, оспаривающую поддержанную церковью модель геоцентризма

5. Законы Кеплера

- 5.1. были выведены из закона всемирного тяготения;
- 5.2. были сформулированы как эмпирические законы, выведенные на основе многолетних наблюдений за движением планет;
- 5.3. были известны задолго до И.Кеплера, но впервые сформулированы и обобщены им;
- 5.4. среди ответов 5.1. – 5.3. нет правильного.

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

1. С земли невооружённым глазом можно увидеть все планеты Солнечной системы.
2. На небе Венера не удаляется от Солнца более чем на 48° .
3. Только внешние планеты время от времени движутся среди звёзд попятно.
4. Меркурий можно наблюдать сразу после захода Солнца в восточной части горизонта.
5. Продолжительность дня (или ночи) зависит от широты места наблюдения.
6. Птолемей утверждал, что в центре мира находится Солнце, а планеты, звёзды и другие тела обращаются вокруг него.
7. Скорость планет, обращающихся вокруг Солнца, не зависит от их положения на орбите.
8. И. Кеплер не знал истинных расстояний между планетами и Солнцем, ему были известны только относительные расстояния.
9. Используя сформулированные им законы движения и всемирного тяготения, И. Ньютон уточнил законы Кеплера.
10. Вы бросили теннисный мяч своему товарищу. До того, как мяч будет пойман, он обращается вокруг центра Земли.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. В _____ Земля и внутренняя планета расположены на одной линии с Солнцем, но по разные стороны от него.
2. Основные положения гелиоцентрической системы мира сформулировал _____.
3. Основным аргументом ложности гелиоцентрической модели мира в древние времена являлось то, что невозможно было определить _____ звёзд.
4. Промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот по своей орбите вокруг Солнца, называется _____.
5. Промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми конфигурациями планеты называется _____.
6. При непосредственных наблюдениях за видимыми движениями планет можно определить их _____ период.
7. Наиболее близкая к Солнцу точка орбиты планеты называется _____, наиболее удаленная – _____.
8. Массу небесных тел можно определить, используя _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с.
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Гусев Е.Б. Сборник качественных задач по астрофизике: Учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – Рязань, 2001. – 176 с.
7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>
8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>
9. Новости космоса, астрономии и астрофизики. <http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

1. Верхние соединения Венеры с Солнцем повторяются каждые 1,6 года. Вычислите звёздный период обращения Венеры вокруг Солнца.
2. В каких точках эллиптической орбиты потенциальная энергия искусственного спутника Земли (а) минимальна, (б) максимальна? Ответ поясните.
3. В каких точках эллиптической орбиты кинетическая энергия искусственного спутника Земли (а) минимальна, (б) максимальна? Ответ поясните.
4. Расстояние до кометы Галлея в перигелии равно 0,6 а.е. Её орбитальный период – 76 лет. Определить расстояние до кометы Галлея в афелии.
5. Промежуток времени между двумя последовательными затмениями спутника Юпитера 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.
6. Цивилизация закатан обитает на планете, обращающейся вокруг звезды Закулан по круговой орбите радиуса 10^8 км. Угловой диаметр диска Закулана на небе планеты Закатан равен 1° , а год на этой планете продолжается 180 земных суток. Оцените среднюю плотность звезды Закулан. Средняя плотность Солнца равна $1,4 \text{ г/см}^3$.
7. Спутник Сатурна Энцелад имеет период обращения вокруг Сатурна 1,4 земных суток, а большая полуось его орбиты в 4 раза больше

радиуса Сатурна. На основании этих данных оцените среднюю плотность Сатурна.

8. Представьте, что Вы получили письмо от обитателей планеты, обращающейся вокруг звезды, идентичной Солнцу. Они сообщили, что расстояние от их планеты до звезды в 4 раза больше, чем от Земли до Солнца. Какова длина года на этой планете по сравнению с земным?

9. Солнце движется по почти круговой орбите вокруг центра Галактики на расстоянии 26000 световых лет от него. Орбитальная скорость составляет около 220 км/с. Вычислите орбитальный период Солнца и центростремительное ускорение. Используйте полученные данные для оценки массы Галактики.

10. 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?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Проверьте третий закон Кеплера для Венеры и Урана. Все необходимые данные найдите в Интернет.

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

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

4. Перечислите, какие из физических законов обычно неправильно используют в научно-фантастических произведениях. Используйте данные NASA: <https://er.jsc.nasa.gov/seh/lawerr.html>.

Проекты (работа в группах)

1. Напишите план (не больше страницы) наблюдения с помощью телескопа двойной звёздной системы. Объясните, что такое двойная звёздная система и опишите точно, какие измерения каждый член группы должен выполнить, чтобы определить суммарную массу этой системы.

2. 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?

Тема 6. Методы астрофизических исследований

Краткий обзор теоретического материала

6.1. Шкала электромагнитных волн

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

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

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

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

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

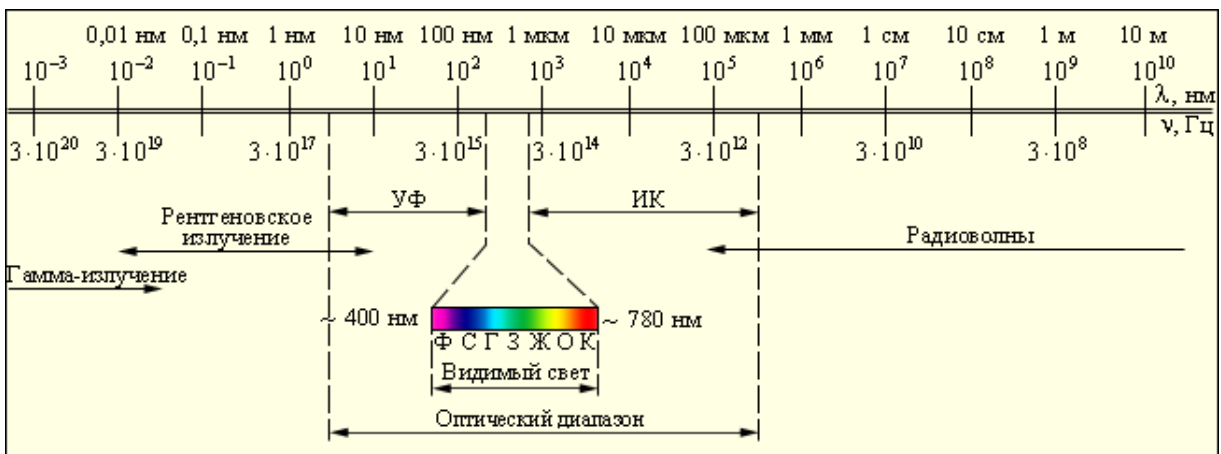


Рисунок 6.1 Шкала электромагнитных волн

Видимое излучение – всего лишь узкая часть спектра электромагнитных волн: от 0,4 мкм до 0,7 мкм. Цвет видимого излучения определяется его длиной волны (или частотой). Непрерывная последовательность

длин волн (или частот) электромагнитных излучений, характеризующих распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, называется *шкалой электромагнитных волн* (Рис. 6.1).

До начала 20 века основным методом наблюдений в астрономии были оптические наблюдения. В настоящее время астрономам доступны наблюдения во всех длинах волн излучения (Таблица 6.1). Развитие наблюдательной техники (как инструментов, так и методов) позволяют астрономам «увидеть» такие важные с точки зрения астрономии явления как формирование звёзд и планетных систем, то, что остаётся после смерти звёзд, а также чёрные дыры по их косвенным проявлениям.

Таким образом, астрономы получают информацию о космических объектах, изучая

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

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

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

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

6.2. Фотометрические характеристики небесных объектов

Астрофотометрия – область астрономии, которая занимается измерением количества энергии, приходящей к наблюдателю от небесных тел.

Для характеристики мощности светового излучения используется понятие *светового потока* (*потока излучения*).

Поток излучения Φ – энергия электромагнитных волн, проходящая за единицу времени через площадку облучаемой поверхности. Измеряется в ваттах. Очевидно, что поток зависит от ориентации площадки.

Освещённостью E называется световой поток, падающий на единичную площадку некоторой поверхности. Единица измерения освещённости в физике – люкс (лк).

Таблица 6.1 Электромагнитный спектр, исследуемый в астрофизике

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

Пусть световой поток Φ равномерно освещает площадь S , тогда освещенность равна $E = \frac{\Phi}{S}$.

Интенсивность I – это плотность потока излучения, создаваемого небесным объектом в данном направлении.

В астрофизике используют аналогичную интенсивности фотометрическую характеристику объекта – **яркость B** , характеризующую излучательную способность протяжённых тел в данном направлении. Если яркость излучающего тела всюду одинакова (или можно использовать среднее её значение), то это тело создаёт в месте наблюдения на нормальной площадке освещённость, равную его средней яркости, умноженной на телесный угол, под которым оно видно на небе: $E = B \Omega$.

Понятие яркости составляет основу астротометрии, так как позволяет определять излучательные свойства космических объектов и, в конечном счёте, температуру. Величины E и Ω устанавливаются в результате наблюдений при помощи телескопа. Освещенность E равна отношению прошедшего через объектив потока излучения к площади отверстия телескопа, с учётом поглощения света в его оптике. Телесный угол Ω равен площади изображения объекта S , получающегося в фокальной плоскости телескопа, делённый на квадрат его фокусного расстояния F : $\Omega = \frac{S}{F^2}$.

Лучи света, выходящие из точечного источника, образуют в пространстве конус, вершиной которого является этот точечный источник. При этом все испускаемые источником лучи света будут оставаться в конусе, так что через любое его сечение пройдет один и тот же поток излучения. Если рассмотреть сечения, перпендикулярные оси конуса (Рис. 6.2), то можно показать, что из постоянства потока следует **закон обратных квадратов**: освещенность E обратно пропорциональна квадрату расстояния R до источника. Кроме того, на одном и том же расстоянии от вершины конуса освещенность пропорциональна косинусу угла между осью конуса и нормалью к сечению.

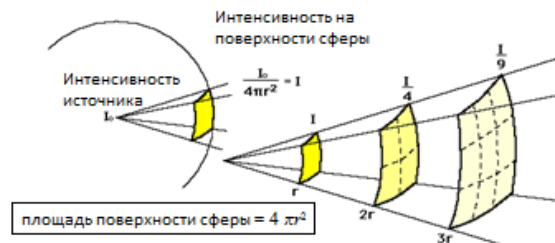


Рисунок 6.2 Иллюстрация закона обратных квадратов.

В астрономии примером точечных источников являются звезды. Но свет звезд частично поглощается в газопылевой среде между звездами, в земной атмосфере. Это следует учитывать при использовании закона обратных квадратов.

Очень часто создаваемая звездами освещенность является единственной фотометрической информацией о них. Во II веке до нашей эры древнегреческий астроном Гиппарх составил каталог звезд, видимых

невооруженным глазом, и ввел специальную *шкалу звездных величин*. Все видимые звезды Гиппарх разделил на шесть классов. Самые яркие из них он назвал звездами *первой звездной величины*, самые слабые звезды – звездами *шестой звездной величины*.

Световая энергия, прошедшая через отверстие зрачка глаза, пропорциональна освещенности. Известен психофизический закон Вебера-Фехнера, согласно которому при изменении внешнего раздражения в геометрической прогрессии органы чувств передают соответствующие ощущения в арифметической прогрессии. Поэтому в веденной Гиппархом шкале освещенности от звезд 1, 2, ..., 6-й величин должны составлять геометрическую прогрессию. По аналогии со звуковыми ощущениями, в основе которых лежит октава, знаменатель этой прогрессии приняли равным $\frac{1}{2}$ ($q = \frac{1}{2}$). Тогда освещенность E_m от звезды звездной величины m можно выразить через освещенность E_1 от звезды первой звездной величины по формуле:

$$E_m = E_1 q^{m-1}.$$

Выполненные Гиппархом оценки звездных величин были очень грубыми. В середине XIX века были проведены измерения, которые показали, что разности в 5 звездных величин по шкале Гиппарха соответствует отношению освещенностей почти 1:100.

Английский астроном Норман Погсон в 1857 г. предложил для шкалы звездных величин принять значение

$$q = \frac{1}{\sqrt[5]{100}} = 10^{-0,4} \approx \frac{1}{2,512},$$

при котором разность в 5 звездных величин соответствует отношению освещенностей ровно в 100 раз.

Так как $\lg 2,512 \approx 0,4$, освещенности, создаваемые двумя объектами со звездными величинами m_1 и m_2 связаны соотношением, называемым формулой Погсона:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}}.$$

Эта формула и принята сейчас за определение звездной величины.

По формуле Погсона можно определять звездные величины объектов, яркость которых больше первой звездной величины: их звездная величина может принимать отрицательные значения.

Так как звёзды находятся на разных расстояниях от Земли, видимая звёздная величина m не даёт настоящей информации о яркости звезды. Очень яркая звезда может иметь большую светимость, но находиться очень далеко, а потому иметь очень большую звездную величину. Для определения истинного блеска звезды вводят понятие *абсолютной звездной величины*.

Абсолютная звездная величина M – это видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась на стандартном расстоянии в 10 пк или 32,6 светового года от наблюдателя.

Связь абсолютной звездной величины M , видимой звездной величины m и расстояния до звезды R в парсеках выражается формулой:

$$M = m + 5 - 5 \lg R.$$

Мощность излучения звезды называется **светимостью**. **Светимость L** – это полная энергия, излучаемая звездой за 1 секунду.

Светимость звезды характеризует поток энергии, излучаемой звездой по всем направлениям, и имеет размерность мощности Дж/с или Вт.

Светимость определяется, если известны видимая величина и расстояние до звезды. Если для определения видимой величины астрономия располагает вполне надежными инструментальными методами, то расстояние до звезд определить не так просто.

Светимости других звезд определяют в относительных единицах, сравнивая со светимостью Солнца. Абсолютная звездная величина Солнца во всем диапазоне излучения (боллометрическая величина) $M_{\odot} = 4,72$; его светимость $L_{\odot} = 3,86 \cdot 10^{26}$ Вт. Зная абсолютную звездную величину звезды, можно найти её светимость:

$$\lg (L/L_{\odot}) = 0,4(M_{\odot} - M).$$

Известны звезды, излучающие в десятки тысяч раз меньше, чем Солнце. А звезда S Золотой Рыбы, видимая только в странах южного полушария Земли как звездочка 8-й звездной величины и не видимая невооруженным глазом, в миллион раз ярче Солнца, ее абсолютная звездная величина $M = -10,6$. По светимости звезды могут отличаться в миллиард раз. Среди звезд очень высокой светимости выделяют **гиганты** и **сверхгиганты**. Звезды, имеющие маленькую светимость, называются **карликами**.

6.3. Спектральный анализ видимого света

Могучим оружием в исследовании Вселенной в видимом диапазоне стал для астрономов спектральный анализ – изучение интенсивности излучения в отдельных спектральных линиях, в отдельных участках спектра. Спектральный анализ является важнейшим средством для исследования вселенной. Спектральный анализ является методом, с помощью которого определяется химический состав небесных тел, их температура, размеры, строение, расстояние до них и скорость их движения. Спектральный анализ проводится с использованием приборов **спектрографа** и **спектроскопа**.

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

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

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

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

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

Исследуя спектры различных химических элементов, можно определить положения их спектральных линий. Зная положение линий, можно найти их в спектре Солнца и других звёзд и тем самым выявить их химический состав.

Исследования спектров Солнца и звёзд установили принципиальное единство химического состава звёзд и Земли.

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

Спектральный анализ позволяет выяснить, из каких химических элементов состоят звёзды. Определить количественный состав звёзд (доля каждого элемента в общей массе звёздного вещества), температуру, давление, скорость движения газа в атмосфере звезды и многие другие параметры позволяет квантовая механика, появившаяся как раздел физики в первые десятилетия XX века. Квантовая механика способствовала созданию теории ядерных реакций в недрах звёзд и тем самым помогла выявить источники их энергии и проследить пути звёздной эволюции.

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

звезды, а далее, пользуясь формулами, найти абсолютную звёздную величину, светимость, а значит и размер звезды. Поэтому спектры звезд недаром иногда образно называют паспортами звезд.

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

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

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

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

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

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

6.4. Телескопы

Впервые астрономические наблюдения с помощью телескопа-рефрактора провел итальянский ученый Галилео Галилей (1564-1642). В 1609 году он сконструировал зрительную трубу из свинца с двумя стеклянными линзами и впервые применил этот прибор для наблюдения за небесными объектами. В течение долгого времени телескоп оставался опти-

ческим инструментом, регистрирующим свет от небесных источников. Современные телескопы способны принимать излучения во всех длинах волн электромагнитного излучения – от гамма-излучения до радиоволн.

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

Но при все эти разнообразные телескопы решают две основные задачи:

1) собрать как можно больше энергии излучения данного вида от объекта наблюдения;

2) создать возможно резкое изображение объекта, позволяющее выделять излучение от его отдельных деталей и измерять расстояние между ними.

Важнейшими элементами любого телескопа являются:

1) объектив, собирающий излучение и создающий изображение;

2) приёмник излучения (глаз, фотопластинка, фотоэлектрический приёмник излучения, ПЗС-матрица, и т.п.).

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

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

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

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

1. Проницающая сила телескопа

Проницающая сила телескопа определяется предельной звёздной вели-

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

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

2. Угловое разрешение (разрешающая способность) β

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

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

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

3. Светосила телескопа Φ

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

4. Угловое увеличение G

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

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

Основная задача **приёмника** излучения – преобразование электромагнитной энергии света в другие формы (например, в механическую, электрическую или тепловую), которые могут быть измерены лабораторными физическими методами, и на этой основе можно делать выводы о характеристиках

принимаемого телескопом светового сигнала. В разное время в астрономии для регистрации излучения использовались: фотопластинки, фотоэмульсии, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), электронно-оптические преобразователи (ЭОП). Современные приёмники излучения – приборы с зарядовой связью (ПЗС), обладают компактными размерами: самые большие из них не превосходят по размеру почтовую марку. Их чувствительность близка к абсолютному пределу, поставленному природой: хорошие ПЗС могут регистрировать «поштучно» большую часть падающих на них квантов света.

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

Проверь себя (задания для самопроверки)

1. Укажите верные, на Ваш взгляд, ответы. Некоторые задания имеют более чем 1 верный ответ. Некоторые задания содержат избыток информации.

1. Галилей открыл при наблюдении в телескоп

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1.1. пятна на Солнце; | 1.2. фазы Венеры; |
| 1.3. спутники Юпитера; | 1.4. другие галактики; |
| 1.5. планеты у других звезд. | |

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

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 2.1. гамма-излучение; | 2.2. далекий ультрафиолет; |
| 2.3. радиоволны; | 2.4. близкий ультрафиолет; |
| 2.5. рентгеновское излучение. | |

3. Вега (α Лиры) имеет видимую звездную величину 0,14; Дубхе (α Большой Медведицы) 1,95. На основании этого мы можем утверждать, что:

- 3.1. Вега расположена к Земле ближе, чем Дубхе;
- 3.2. Дубхе расположена к Земле ближе, чем Вега;
- 3.3. при наблюдениях с Земли Дубхе ярче Веги;
- 3.4. при наблюдениях с Земли Вега ярче Дубхе;
- 3.5. светимость Дубхе больше светимости Веги;
- 3.6. светимость Веги больше светимости Дубхе.

4. С помощью спектрального анализа звезды можно определить ее:

- 4.1. массу;
- 4.2. температуру;

- 4.3. химический состав;
- 4.4. абсолютную звездную величину;
- 4.5. скорость.

5. *Какие характеристики определяют качество оптического телескопа?*

- 5.1. площадь объектива;
- 5.2. светосила телескопа;
- 5.3. поле зрения;
- 5.4. угловое разрешение;
- 5.5. фокусное расстояние объектива.

6. *Укажите отличия радиотелескопов от оптических телескопов:*

- 6.1. угловое разрешение радиотелескопа хуже, чем у оптического телескопа;
- 6.2. изготовление зеркал не требует большой точности;
- 6.3. угловое разрешение оптического телескопа хуже, чем у радиотелескопа;
- 6.4. можно проводить наблюдения в течение суток;
- 6.5. можно проводить наблюдения только днем.

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

1. Свет – сложное физическое явление, имеющее двойственную природу.
2. Разности в 5 звездных величин по шкале Гиппарха соответствует отношение освещенностей 1:100.
3. Видимая звездная величина m не даёт настоящей информации о яркости звезды.
4. Исследования спектров Солнца и звезд установили принципиальные различия химического состава звёзд и Земли
5. Впервые астрономические наблюдения с помощью телескопа-рефрактора провел И. Ньютон.
6. Все современные наземные оптические телескопы являются рефракторами.
7. Разрешение телескопа тем лучше, чем спокойнее земная атмосфера.
8. Разрешение телескопа можно улучшить, используя дифракцию света.
9. Современные приёмники излучения (ПЗС) обладают компактными размерами: самые большие из них не превосходят по размеру почтовую марку.
10. Хорошие ПЗС могут регистрировать «поштучно» большую часть падающих на них квантов света.

III. Заполните пропуски в следующих высказываниях

1. _____ – это детальное изучение электромагнитного излучения.

2. _____ рассматривает энергетические характеристики оптического излучения, испускаемого источниками, распространяющегося в различных средах и взаимодействующего с другими объектами.
3. Световой поток, падающий на единичную площадку некоторой поверхности называется _____.
4. Плотность потока излучения, создаваемого небесным объектом в данном направлении, называется _____.
5. Освещенность E _____ квадрату расстояния R до источника.
6. Для определения истинного блеска звезды нужно знать её _____.
7. Полная энергия, излучаемая звездой за 1 секунду, называется _____.
8. Угловое разрешение всех наземных оптических телескопов ограничено _____ телескопа и _____ исследуемого излучения.
9. Угловое разрешение наземных оптических телескопов гораздо сильнее ограничено _____, чем дифракцией.
10. Система двух или более телескопов, одновременно наблюдающих один и тот же объект, называется _____.

Информационные источники для самостоятельной работы

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: учебное пособие. – М.: Едиториал, 2004. – 544 с.
2. Чаругин В.М. Классическая астрономия. – М.: Прометей, 2013. – 214 с.
3. Засов, А. В. Астрономия: учебное пособие / А. В. Засов, Э. В. Кононович. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 260 с.
4. Воронцов-Вельяминов Б.А. Сборник задач и практических упражнений по астрономии. – М.: Наука, 1977.
5. Астрономия. Век XXI. Под ред. В.Г. Сурдина. – М.: Век-2, 2015. – 608 с.
6. Гусев Е.Б. Сборник качественных задач по астрофизике: Учебно-методические пособие для учителей астрономии и физики и студентов физико-математических факультетов вузов. – Рязань, 2001. – 176 с.
7. Российская астрономическая сеть Astronet <http://www.astronet.ru/>
8. Вечера под звёздным небом. Сайт для любителей астрономии. <http://starry-sky.ru/>
9. Новости космоса, астрономии и астрофизики. <http://www.astronews.space/>

Задания для самостоятельной работы

1. Светимость звезды в 6 раз больше, чем у Солнца, а освещенность от нее при наблюдении с Земли составляет $6 \cdot 10^{-14}$ Вт/м². Чему равно расстояние до этой звезды?

2. Звездой какой величины будет выглядеть Солнце с орбиты Нептуна? Нептун совершает полный оборот вокруг Солнца за $T = 164,8$ лет. С Земли Солнце выглядит как звезда величины $m = -26,8^m$.

3. Какую звездную величину имеет Солнце при наблюдении с Сатурна? Радиус орбиты Сатурна составляет 10 а.е.

4. 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?

5. 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?

6. Оказывает ли свет космических объектов давление на объектив и окуляр оптических телескопов? Ответ поясните.

7. Можно ли наблюдать интерферометрическую картину от одной звезды; от двух звёзд?

8. Определите разрешающую способность космического радиоинтерферометра, работающего в метровом диапазоне длин радиоволн, если одна из антенн находится на Земле, а вторая в космосе на расстоянии 326000 км от планеты.

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

10. 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?

11. 1,7-метровый телескоп проводит наблюдения небесного объекта в течение 1 часа. При тех же условиях наблюдения какое время потребуется 5,6-метровому телескопу, чтобы выполнить то же самое задание (получить аналогичную фотографию)?

Для выполнения следующих заданий воспользуйтесь Интернет

1. Основной характеристикой излучения любого небесного объекта является световой поток или освещенность, единицы измерения которых в

СИ – Вт и Вт/м² соответственно. В астрофизике используются также фотометрические характеристики: блеск и звёздная величина. Нужны ли эти величины?

2. На свету зрачок человеческого глаза сужается до 2 мм, а в полной темноте может расширяться до 6 мм. Как при этом изменятся оптические характеристики глаза? Почему это происходит? Астрономы Древнего Китая, используя только визуальные наблюдения, открыли наличие пятен на Солнце в IV в до н.э. Каковы были размеры этих пятен?

3. Найдите информацию о характеристиках телескопа Чандра (Chandra).

4. Составьте список самых больших телескопов мира, приведите их характеристики. Сравните разрешающую способность современных наземных телескопов и космических телескопов, работающих в том же диапазоне длин волн. Сделайте вывод.

Проекты (работа в группах)

1. Предложите метод определения внеатмосферного блеска звезды из фотометрических наблюдений с поверхности Земли.

2. Организуйте 2 группы и проведите исследование, как адаптивная (группа 1) и активная (группа 2) оптика позволила улучшить наблюдения с наземных телескопов. Сравните эти два метода. В чём их различия и сходства? Сделайте выводы о разрешающей способности современного наземных телескопа.

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^2

Видимая звездная величина -26.8^{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 ³	км	сут		m
Земля							
Луна	$7.348 \cdot 10^{22}$	1738	3.34	384400	27.32166	0.12	-12.7
Марс							
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
Юпитер							
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
Сатурн							
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
Уран							
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
Нептун							
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.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Тема 1. Астрономия и Вселенная	5
Тема 2. Описание видимых движений небесных объектов	15
Тема 3. Движения Солнца и Луны	26
Тема 4. Измерение времени	35
Тема 5. Видимые и действительные движения планет	47
Тема 6. Методы астрофизических исследований	60
Справочная информация	75

Учебное издание

Елена Владимировна Кондакова

АСТРОФИЗИКА

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Часть первая

Учебное пособие

Техническое исполнение – В.М. Гришин

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

Печ.л. 4,9 Уч.-изд.л. 4,5

Тираж 300 экз. (1-й завод 1-20 экз.). Заказ 132

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