

Учреждение образования
«Белорусский государственный педагогический
университет имени Максима Танка»

Физико-математический факультет

Кафедра физики и методики преподавания физики

рег. № УМ24-3-42-2017 дата 25.05.2017

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

[подпись] В. Р. Соболев
25.05 2017 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

[подпись] С. И. Василец
25.05 2017 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

АСТРОНОМИЯ

для специальностей:

1-02 05 02 Физика и информатика;

1-02 05 04 Физика и техническое творчество

Составители:

Шимбалев А.А., старший преподаватель

Белая О.Н., кандидат физико-математических наук, доцент

Рассмотрено и утверждено

на заседании Совета БГПУ 26 июня 2017 г.,

протокол № 10

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.....	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	6
Тема 1 Астрономия как наука и учебный предмет.....	6
Тема 2 Общие понятия о звёздном небе	7
Тема 3 Годовое движение Солнца и измерение времени	13
Тема 4 Гео- и гелиоцентрические системы мира.....	23
Тема 5 Движение Луны	30
Тема 6 Начала небесной механики.....	36
Тема 7 Влияние масс небесных тел на их движение	40
Тема 8 Основы космонавтики.....	48
Тема 9 Яркость небесных тел. Астрофотометрия	53
Тема 10 Астрономические инструменты.....	59
Тема 11 Система Земля – Луна и ее характеристика.....	72
Тема 12 Физические условия на Марсе, Меркурии, Венере	80
Тема 13 Физические условия на Юпитере и Сатурне	91
Тема 14 Рельеф, атмосфера и спутники Урана, Нептуна. Плутон и его спутник Харон	99
Тема 15. Малые тела Солнечной системы.....	103
Тема 16 Основные параметры Солнца.....	110
Тема 17 Внутреннее строение Солнца.....	116
Тема 18 Звезды и расстояния в межзвездной среде	127
Тема 19 Диаграмма Герцшпрунга – Рэссела	135
Тема 20 Переменные звёзды	144
Тема 21 Внутреннее строение звёзд. Условия существования материи в недрах звёзд	154
Тема 22 Эволюция звезд.....	154
Тема 23 Млечный Путь и его составляющие	161
Тема 24 Структура Галактики.....	166
Тема 25 Внегалактическая астрономия	172
Тема 26 Элементы космологии и космогонии	183
Тема 27 Современные представления о происхождении Вселенной.....	197
Тема 28 Наблюдения и практические работы по астрономии в школе.....	205
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	209
Тематика лабораторного практикума	209
Задания лабораторного практикума.....	209
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ.....	223
Тесты для промежуточного контроля.....	223
Вопросы к экзамену по астрономии.....	236
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ.....	238
Литература	238
Учебно-тематический план дисциплины «Астрономия»	239

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебно-методический комплекс (УМК) «Астрономия» составлена в соответствии с требованиями Образовательного стандарта Республики Беларусь высшего образования I ступени по специальности 1 – 02 05 02 Физика и информатика.

Учебно-методический комплекс составлен на новой концептуальной основе с учетом социальных требований общества к системе высшего педагогического образования, современных взглядов на роль и место физического образования и учебной дисциплины «Астрономия».

Учебно-методический комплекс (УМК) «Астрономия» предназначен для формирования у студентов представления о строении космических тел, их систем и всей Вселенной в целом, изучения динамики идущих в ней эволюционных процессов. Значительное место отводится раскрытию роли методов и инструментов астрономических исследований.

Основное внимание при изучении астрономии должно быть сконцентрировано на формировании у студентов научного мировоззрения. С этой целью материал планируется излагать в исторической последовательности, чтобы показать, как человек постепенно с помощью все более совершенных приборов, познает Космос.

Целью учебно-методического комплекса «Астрономия» является подготовка будущего преподавателя для обучения астрономии в учреждениях общего среднего образования. В процессе изучения учебной дисциплины студенты должны овладеть знаниями об основных экспериментальных фактах, понятиях и законах астрономии – науки и астрономии как учебного предмета; о методах астрономических исследований и их роли в познании строения и динамики эволюционных процессов во Вселенной; освоить методику преподавания дисциплины учреждениях общего среднего образования.

Главными задачами учебно-методического комплекса «Астрономия» являются:

- изучение основных разделов астрономии;
- развитие навыков простейших астрономических наблюдений и самостоятельного решения астрономических;
- освоение методики преподавания астрономии в учреждениях общего среднего образования.

Раздел УМК и его характеристика	Структурные элементы УМК
Теоретический Содержит материалы для теоретического и изучения учебной дисциплины в объеме, установленном типовым учебным планом по специальности	1. Лекционный материал по учебной дисциплине «Астрономия»

Практический Содержит материалы для проведения лабораторных работ в объеме, установленном типовым учебным планом по специальности	1. Тематика лабораторного практикума 2. Задания лабораторного практикума (образцы заданий, примеры выполнения некоторых заданий)
Контроля знаний Содержит материалы итоговой аттестации, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации образовательных программ высшего образования	1. Тесты для промежуточного контроля 2. Вопросы к экзамену по астрономии
Вспомогательный Содержит элементы учебно-программной документации образовательной программы высшего образования, программно-планирующей документации воспитания, учебно-методической документации, перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины	1. Список литературы 2. Учебно-тематический план дисциплины

Для изучения учебной дисциплины «Астрономия» студентам необходимо освоить следующие дисциплины: «Общая физика», «Математический анализ». Учет межпредметных связей при изучении учебной дисциплины «Астрономия» поможет решить задачу научно-теоретической и профессиональной подготовки будущих учителей. Использование межпредметных связей будет содействовать применению приобретенных знаний студентами при изучении закономерностей, формированию тех умений, которые будут нужны им для дальнейшей успешной профессиональной работы.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен знать:

- историю становления и развития астрономии, структуру, динамику и эволюцию методологических идей и взглядов на строение и развитие Вселенной;
- экспериментальные и теоретические методы научного и учебного астрофизического исследования;
- математический аппарат астрономии;
- методологию и мировоззренческий потенциал астрономии, ее философские и методологические основы и проблемы;

- основные цели и задачи практической астрономии;
- принципы работы приборов и оборудования для проведения астрофизических исследований;
- методику проведения астрономических наблюдений в средних общеобразовательных учреждениях.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен уметь:

- анализировать структуру, особенности и динамику развития астрономии;
- осуществлять научно-методологический анализ системы астрономических знаний;
- использовать научную, справочную и научно-популярную литературу по астрономии и истории ее развития в профессиональной деятельности;
- применять сведения из истории астрономии для решения задач обучения, развития и воспитания.
- применять в профессиональной деятельности методы математического и компьютерного моделирования астрофизических процессов;
- пользоваться астрономическими инструментами, астрономическими атласами, картами, ежегодниками;
- проводить простые наблюдения за объектами звездного неба.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен владеть:

- знаниями о строении и эволюции небесных тел и их систем;
- навыками работы с подвижной картой звездного неба, астрономическими картами и справочниками;
- учебными методами астрономических исследований;
- методикой преподавания астрономии в средних общеобразовательных учреждениях;
- навыками свободного применения соответствующего математического аппарата и использования математических методов при решении конкретных астрономических задач;
- приемами практического применения критериев оценки уровня усвоения знаний и сформированности умений учащихся по астрономии, способов их диагностики, коррекции и контроля.

Учебная дисциплина рассчитана на 186 часов, из них аудиторных 88 часов. Примерное распределение аудиторного времени по видам занятий: 50 часов лекций, 38 часов лабораторных занятий. Итоговая форма контроля – экзамен.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Тема 1 Астрономия как наука и учебный предмет

1.1 Предмет астрономии, объекты изучения

Астрономия – наука о Вселенной, изучающая движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем.

Объекты изучения: звёзды, планеты, кометы, метеоры, туманности, галактики, материя, находящаяся в межзвёздном пространстве.

Изучение происходит в разных диапазонах электромагнитных волн, оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском, и т.д.

Астрономия имеет три основные задачи:

- Изучение видимых и действительных положений и движения небесных тел в пространстве, определение их размеров и формы.
- Изучение физического строения небесных тел, т.е. химического состава и физических условий на поверхности и в недрах небесных тел.
- Исследование происхождения и развития, предсказание дальнейших судеб отдельных небесных тел и их систем.

Астрономия очень взаимосвязана с математикой, физикой, химией, философией, биологией.

Нынешний вид астрономия приобрела лишь в 19–20-х веках. До этого она неразрывно включала в себя ряд других отраслей знания и была теснее связана с философией и теологией.

1.2 Разделы астрономии

Множество объектов и методов астрономии приводит к многочисленности разделов и отдельных направлений в астрономии.

По характеру используемой информации выделяются три основных раздела:

- астрометрия,
- небесная механика,
- астрофизика.

Астрометрия – изучает положение небесных тел и вращение Земли, опираясь на теоретические и практические методы измерений углов на небе, для чего организуются позиционные наблюдения небесных светил.

Важнейшие цели астрометрии:

- установление систем небесных координат,
- получение параметров, характеризующих наиболее полно закономерности вращения Земли.

Небесная механика – изучает движение небесных тел под действием тяготения, разрабатывает методы определения их траекторий на основании наблюдаемых положений на небе, позволяет рассчитать таблицы их координат на дальнейшее время (эфемериды), изучает взаимное влияние тел на их

движение, рассматривает движение и устойчивость систем небесных и искусственных тел.

Астрофизика – изучает происхождение (космогония), строение, хим. состав, физические свойства и эволюцию отдельных небесных тел и систем вплоть до всей Вселенной в целом (космология).

Основы сферической и практической астрономии.

Тема 2 Общие понятия о звёздном небе

2.1 Созвездия, их число и история возникновения

Звёзды были объединены в группы с целью ориентировки. Эти группы называются созвездия.

Созвездия носят различные названия, полученные в разное время, от глубокой древности до 18 века.

Все зодиакальные созвездия были названы очень давно и затруднительно сказать какими народами. Скорее всего, египтянами и халдеями. А может быть народом, жившим раньше их.

Большинство ярких созвездий Северного неба названы в честь древнегреческих героев или мифических персонажей ещё древними народами.

Созвездия менее яркие названы европейскими астрономами в 16–18 вв.

Все невидимые в Европе созвездия Южного полушария названы в эпоху Великих географических открытий.

Клавдий Птолемей приводит в своём списке 48 созвездий. Звёздный каталог Птолемея содержит 1026 звёзд.

Невооружённым глазом на небе в Северном полушарии видно около 5000 звёзд. В телескоп от 1-й до 14-й величин видно около 77 млн звёзд.

Созвездия, приведённые Птолемеем:

12 зодиакальных:

Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы.

36 остальных:

Большая Медведица, Малая Медведица, Дракон, Цефей, Волопас, Северная Корона, Геркулес, Лира, Лебедь, Кассиопея, Персей, Возничий, Змееносец, Змея, Стрела, Орёл, Дельфин, Малый Конь, Пегас, Андромеда, Треугольник, Кит, Орион, Эридан, Заяц, Большой Пёс, Малый Пёс, Корабль Арго (Корма, Киль, Паруса), Гидра, Чаша, Ворон, Жертвенник, Центавр, Волк, Южный Венец, Южная Рыба.

Волосы Вероники присоединены Кононом в эпоху Птолемея. Вероника – жена короля Птолемея Эвергета.

Жан Байе прибавил 12 новых созвездий Южного неба – Павлин, Тукан, Журавль, Феникс, Рыба-Меч, Летучая Рыба, Южный Змей, Хамелеон, Муха, Райская Птица, Южный Треугольник, Индеец.

Ян Гевелий в 1690 году добавил 11 созвездий: Жираф, Единорог, Гончие Псы, Лисичка, Ящерица, Секстант, Малый Лев, Рысь, Щит Собесского.

Августин Ройе в 1679 году добавил 5 созвездий: Голубь, Южный Крест, Малое Облако, Большое Облако и Муха.

Лакайль в 1752 году пытался заполнить пустые места в южном полушарии и создал 14 новых созвездий: Скульптор, Печь, Часы, Сетка, Резец, Живописец, Компас, Телескоп, Микроскоп, Столовая Гора, Насос, Октант.

Почобут – Одляницкий поместил в 1777 году Королевского Тельца Понятовского между Орлом и Змееносцем.

Боду ввёл созвездие Регалии Фридриха (подвинув руку Андромеды) и Бранденбургский Скипетр.

Лаланд – созвездие Домашней Кошки.

Окончательное число и границы созвездий определены на астрономическом съезде, который проходил в 1922 году. всё небо было условно разделено на 88 частей.

С 17 столетия отдельные звёзды в созвездиях стали обозначать буквами греческого алфавита.

С VIII века Беда Достопочтенный и другие теологи пытались заменить языческие названия созвездий и вставить христианские. Существуют календари, где Святой Пётр вместо Овна, Святой Андрей вместо Тельца и др. Большая Медведица – лодка Св. Петра, Малая Медведица – Св. Михаил, Мария Магдалина вместо Кассиопеи, Андромеда – Гроб Господень.

Солнце – Иисус Христос, Луна – Дева Мария. Вышли казусы.

Была попытка заменить 12 зодиакальных созвездий гербами двенадцати знатнейших королевских фамилий Европы.

Многие созвездия связаны с легендами. Например, созвездия Андромеды, Кассиопеи, Цефея, Персея и Пегаса связывает греческая легенда о подвиге Персея. Одно время царём Эфиопии был Цефей. У Цефея была жена Кассиопея и дочь Андромеда. Как то Кассиопея хвалилась, что она красивее морских нимф. Нимфы пожаловались богу морей Посейдону и он в наказание послал на Эфиопию страшное чудовище – Кита. Кит выходил время от времени из моря на берег и поедая людей и животных. Царь Цефей испугался и послал гонцов к оракулу Зевса в Ливию, чтобы узнать, как избавиться от напасти. Оракул ответил, что нужно отдать на съедение чудовищу Андромеду. Долго не хотел этого делать Цефей, но народ заставил его. Андромеду приковали цепями к скале и оставили чудовищу.

Но в это время над Эфиопией пролетал на волшебных сандалиях герой Персей, сын бога Зевса. Он возвращался домой после победы над Медузой, страшной Горгоной, имевшей вместо волос на голове змей. От одного взгляда Медузы живые существа превращались в камень. Персею удалось отрубить ей голову, с помощью волшебного меча, подаренного ему богом Гермесом и щита, данного Афиной.

Персей полюбил Андромеду и решил спасти её от гибели. Царь Цефей пообещал за это свою дочь герою в жёны. Когда из пучин моря выплыло чудовище, Персей взлетел в воздух на крылатых сандалиях и завязался бой. После долгой схватки, Персей зарубил Кита и освободил Андромеду.

В память о героическом поступке, все персонажи были помещены на небо. Недалеко от созвездий Персея, Кассиопеи и Андромеды находятся созвездия Цефея и Кита.

2.2 Суточное вращение, понятие о небесной сфере

Луна перемещается по небесной сфере со скоростью 13 гр. в сутки, Солнце – 1 гр. в сутки.

Звёзды восходят и заходят на одной и той же широте всегда в одном и том же месте. При изучении видимых движений небесных тел необходимо определять их положения в моменты наблюдения. Видимые положения светил определяются только направлениями, так как расстояния до них несущественны.

Сфера произвольного радиуса с центром, помещённым в произвольной точке пространства, называется *небесной сферой*.

Вращение небесной сферы повторяет вращение небесного свода. Небесная сфера служит для изучения видимых положений и движений небесных тел.

2.3 Основные пункты и круги, системы координат на небесной сфере

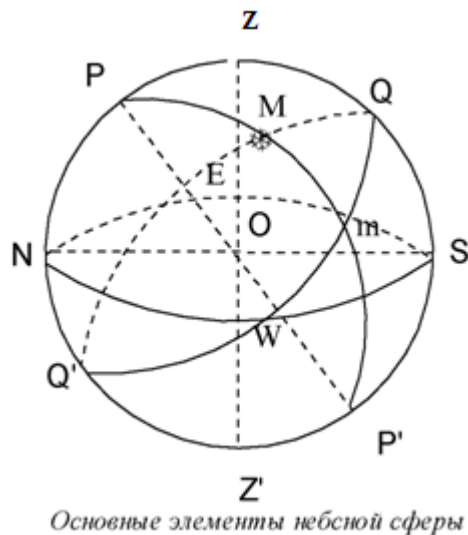
Для определения видимого положения небесных тел и изучения их движения в астрономии вводится понятие небесной сферы.

Сфера произвольного радиуса с центром, помещённым в произвольной точке пространства, называется *небесной сферой*.

Вращение небесной сферы повторяет вращение небесного свода. Прямая ZOZ' , проходящая через центр O небесной сферы и совпадающая с направлением нити отвеса в месте наблюдения называется *вертикальной линией*.

Вертикальная линия пересекает небесную сферу в точках *Зенита* и *Надира*.

Большой круг небесной сферы $SWNE$, плоскость которого перпендикулярна к вертикальной линии, называется *математическим* или *истинным горизонтом*.



Математический горизонт делит небесную сферу на две половины – видимую и невидимую для наблюдателя.

Диаметр PP' , вокруг которого происходит вращение небесной сферы, называется осью мира. Ось мира пересекается с небесной сферой в северном и южном полюсах. Большой круг небесной сферы $QWQ'E$, плоскость которого перпендикулярна к оси мира, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит поверхность небесной сферы на два полушария – северное и южное.

Небесный экватор пересекается с математическим горизонтом в двух точках – *точке востока E* и *точке запада W*.

Круги высот, проходящие через точки востока и запада, называются *первыми вертикалами* – *восточным* и *западным*.

Большой круг небесной сферы $PZQSP'Z'Q'N$, плоскость которого проходит через отвесную линию и ось мира, называется *небесным меридианом*.

Небесный меридиан делит поверхность небесной сферы на восточное и западное полушария.

Плоскость небесного меридиана и плоскость математического горизонта пересекаются по прямой линии NOS , которая называется *полуденной линией*. Небесный меридиан пересекается с математическим горизонтом в двух точках – *точке севера* и *точке юга*.

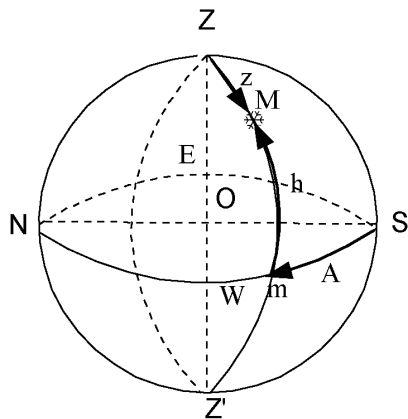
Большой круг небесной сферы ZMZ' , проходящий через зенит, светило M и надир, называется *кругом высоты* или *вертикалом светила*.

Малый круг небесной сферы (bMb'), плоскость которого параллельна плоскости небесного экватора, называется *небесной* или *суточной параллелью* светила. Видимые суточные движения светил совершаются по суточным параллелям. Большой круг небесной сферы RMP' , проходящий через полюсы мира и светило M , называется *часовым кругом*, или *кругом склонения* светила.

Положение основных элементов небесной сферы относительно друг друга зависит от географической широты p места наблюдения. Под углом p к плоскости математического горизонта расположена ось мира PP' .

Системы небесных координат. Положение светила на небе однозначно определяется по отношению к основным плоскостям и связанным с ними линиям и точкам небесной сферы и выражается количественно двумя величинами (центральными углами или дугами больших кругов), которые называются небесными координатами.

Горизонтальная система. Основной плоскостью является плоскость математического горизонта NWSE, а отсчёт ведётся от зенита и от одной из точек математического горизонта.



Горизонтальная система координат

Одной координатой является *зенитное расстояние* z , или *высота* светила над горизонтом h .

Высотой h светила M называется дуга вертикального круга mM от математического горизонта до светила, или центральный угол mOM между плоскостью математического горизонта и направлением на светило M .

Высоты отсчитываются в пределах от 0 до 90° к зениту и от 0 до -90° к надиру.

Зенитным расстоянием светила называется дуга вертикального круга ZM от зенита до светила.

$$z + h = 90^\circ$$

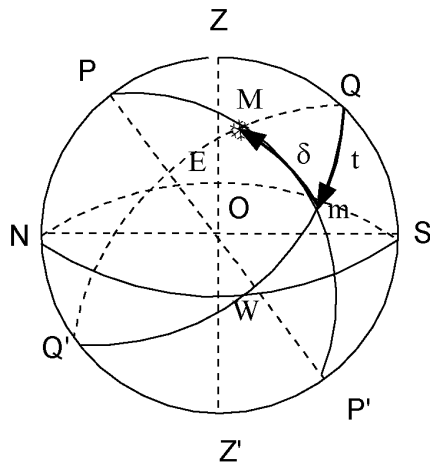
Положение самого вертикального круга определяется другой координатой – *азимут* A .

Азимут A светила называется дуга математического горизонта Sm от точки юга S до вертикального круга, проходящего через светило.

Азимуты отсчитываются в сторону суточного вращения небесной сферы, т.е. к западу от точки юга, в пределах от 0 до 360° .

Система координат используется для непосредственных определений видимых положений светил с помощью угломерных инструментов.

Первая экваториальная система координат. Начало отсчёта – точка небесного экватора Q . Одной координатой является *склонение*.



Первая экваториальная система координат

Склонением δ называется дуга mM часового круга $PMmP'$ от небесного экватора до светила. Отсчитываются от 0 до $+90^\circ$ к северному полюсу и от 0 до -90° к южному.

$$p + \delta = 90^\circ.$$

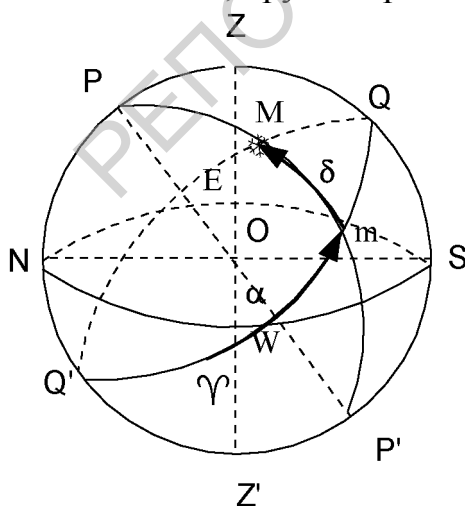
Положение часового круга определяется часовым углом t .

Часовым углом светила M называется дуга небесного экватора Qm от верхней точки Q небесного экватора до часового круга $PMmP'$, проходящего через светило.

Часовые углы отсчитываются в сторону суточного обращения небесной сферы, к западу от Q в пределах от 0 до 360° или от 0 до 24 часов.

Система координат используется в практической астрономии для определения точного времени.

Вторая экваториальная система координат. Одной координатой является склонение δ , другой прямое восхождение α .



Вторая экваториальная система координат

Прямое восхождение α светила M называется дуга небесного экватора Qm от точки весеннего равноденствия Q до часового круга, проходящего через светило. Отсчитываются α в сторону, противоположную суточному вращению в пределах от 0 до 360° или от 0 до 24 часов.

Система координат используется для определения звёздных координат и составления каталогов.

Высота полюса мира над горизонтом, высота светила в меридиане. Высота полюса мира над горизонтом всегда равна астрономической широте φ места наблюдения.

1. Если склонение светила меньше географической широты, то оно кульминирует к югу от зенита на $z = \varphi - \delta$ или на высоте $h = 90^\circ - \varphi + \delta$.

2. Если склонение светила равно географической широте, то оно кульминирует в зените и $z = 0$, а $h = +90^\circ$.

3. Если склонение светила больше географической широты, то оно кульминирует к северу от зенита на $z = \delta - \varphi$ или на высоте $h = 90^\circ + \varphi - \delta$.

Условия для восхода и заката светил. Светило восходит и заходит на данной широте, если

$$|\delta| < (90^\circ - |\varphi|).$$

Светило будет незаходящим или не восходящим, если

$$|\delta| > (90^\circ - |\varphi|).$$

Для наблюдателя на земном экваторе все светила восходящие и заходящие.

На полюсах наблюдатели могут созерцать только полусферы.

Явление пересечения светил небесного меридиана называется *кульминацией светил*.

Если светило пересекает верхнюю часть меридиана – наступает верхняя кульминация, если нижнюю – нижняя кульминация.

Переход от горизонтальных координат светила к экваториальным и обратно, в общем случае, осуществляется с использованием формул сферической тригонометрии. Однако эта задача упрощается при кульминации светил.

Тема 3 Годовое движение Солнца и измерение времени

3.1 Эклиптика, эклиптическая система координат.

Зодиак и зодиакальные созвездия

Эклиптика – линия видимого годового движения Солнца.

Созвездия, по которым проходит эклиптика, называются зодиакальными. Зодиакальные созвездия: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы, Змееносец.

Объяснить разницу между зод. созвездиями и знаками. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора под углом $23^\circ 26'$.

Диаметр ПП", перпендикулярный к плоскости эклиптики, называется *осью эклиптики*.

Эклиптика пересекается плоскостью небесного экватора в двух точках: в точке весеннего равноденствия Υ и точке осеннего равноденствия Ω .

Точки эклиптики, отстоящие от равноденственных на 90 гр. называются точкой летнего солнцестояния и точкой зимнего солнцестояния.

Эклиптическая система координат. Эклиптическая широта β -светила M называется дуга mM круга широты от эклиптики до светила.

Эклиптические широты отсчитываются в пределах от 0 до +90 гр. к северному полюсу эклиптики и от 0 до – 90 гр. к южному полюсу.

Второй координатой является эклиптическая долгота λ – дуга φm эклиптики от точки весеннего равноденствия φ до круга широты, проходящего через светило. Отсчитывается в сторону видимого годового движения Солнца по эклиптике от 0 до 360 гр.

Применяется в теоретической астрономии при определении орбит небесных тел.

3.2 Измерение времени

Измерение времени основано на наблюдениях суточного вращения свода и годичного движения Солнца, т.е. на вращении Земли вокруг оси и на обращении Земли вокруг Солнца.

Вращение Земли вокруг оси происходит почти равномерно, с периодом, равным периоду вращения небесного свода. Поэтому по углу поворота Земли от некоторого начального положения можно судить о протекшем времени. За начальное положение Земли принимается момент прохождения плоскости земного меридиана места наблюдения через избранную точку на небе, или, что одно и то же, момент верхней кульминации этой точки на данном меридиане. Продолжительность основной единицы времени, называемой сутками, зависит от избранной точки на небе. В астрономии за такие точки принимаются:

- точка весеннего равноденствия (*звёздное время*),
- центр видимого диска Солнца (*истинное Солнце*, истинное солнечное время),
- *среднее Солнце* – фиктивная точка, положение которой на небе может быть вычислено теоретически для любого момента времени (среднее солнечное время).

Для измерения длинных промежутков времени служит тропический год, основанный на движении Земли вокруг Солнца.

Тропический год – промежуток времени, между двумя последовательными прохождениями центра истинного Солнца через точку весеннего равноденствия. Содержит 365,2422 средних солнечных суток.

Из-за медленного движения точки весеннего равноденствия навстречу Солнцу, вызванного прецессией, относительно звёзд Солнце оказывается в той же точке неба через промежуток времени на 20 мин. 24 с. больший, чем тропический год. Он называется *звёздным годом* и содержит 365,2564 средних солнечных суток.

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

За начало звёздных суток на данном меридиане принимают момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия.

Время, протекшее от верхней кульминации точки φ до любого другого её положения, выраженное в долях звёздных суток называется *звёздным временем* s . Угол, на который Земля повернётся от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до какого-нибудь другого момента, равен часовому углу точки φ в этот момент.

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

Практически для установления начала звёздных суток или зв. времени в какой-то момент надо измерить часовой угол t какого-то светила M , прямое восхождение которого известно.

$$\text{Тогда } t = Qm, \alpha = \varphi m, \text{ а } t_{\varphi} = Q\varphi = s = \alpha + t.$$

Звёздное время в любой момент равно прямому восхождению какого-либо светила плюс его часовой угол.

В момент верхней кульминации светила его часовой угол $= 0$, тогда $s = \alpha$.

Истинное солнечное время. Промежуток времени между двумя последовательными кульминациями Солнца центра солнечного диска) на одном и том же географическом меридиане называется *истинными солнечными сутками*.

За начало истинных солнечных суток на данном меридиане принимают момент нижней кульминации Солнца (*истинная полночь*).

Время, протекшее от нижней кульминации Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях истинных солнечных суток называется *истинным солнечным временем* T_c .

Истинное солнечное время T_c на данном меридиане в любой момент численно равно часовому углу Солнца $t_c + 12^h$.

Истинные солнечные сутки имеют различную продолжительность, так как:

1. Солнце движется не по небесному экватору, а по эклиптике, наклонённой на угол 23гр.26мин.
2. Движение Солнца по эклиптике неравномерно.

Среднее солнечное время. Чтобы получить сутки постоянной продолжительности и в то же время связанные с движением Солнца, в астрономии введены понятия двух фиктивных точек: среднего эклиптического и среднего экваториального Солнца.

Среднее эклиптическое Солнце равномерно движется по эклиптике со средней скоростью Солнца.

Среднее экваториальное Солнце равномерно движется по экватору с постоянной скоростью среднего эклиптического Солнца и одновременно с ним проходит точку весеннего равноденствия.

Промежуток времени между двумя последовательными кульминациями среднего экваториального Солнца на одном и том же географическом меридиане называется *средними солнечными сутками*.

Продолжительность средних солнечных суток равна среднему значению продолжительности истинных солнечных суток за год.

За начало средних солнечных суток на данном меридиане принимают момент нижней кульминации среднего экваториального Солнца (средняя полночь). Время, протекшее от нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого его положения, выраженное в долях средних солнечных суток называется *средним солнечным временем* T_m .

Среднее солнечное время T_m на данном меридиане в любой момент численно равно часовому углу Солнца $t_m + 12^h$.

Уравнение времени. Разность часовых углов среднего экваториального Солнца t_m и истинного Солнца t_c называется *уравнением времени* η .

$$\eta = t_m - t_c.$$

Всемирное время. Местное среднее солнечное время гринвичского меридиана называется всемирным или мировым временем T_0 .

Местное среднее солнечное время любого пункта на Земле определяется:

$$m = T_0 + \lambda^h.$$

Поясное время. Местных систем счёта времени бесчисленное множество, как и меридианов.

В 1884 году была предложена поясная система счёта среднего времени. Счёт времени ведётся только на 24 основных географических меридианах, расположенных друг от друга по долготе точно через 15 гр., приблизительно посередине каждого часового пояса.

За основной меридиан нулевого пояса принят Гринвичский.

Местное среднее солнечное время основного меридиана какого-либо часового пояса называется поясным временем T_n .

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

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

Декретное время. В целях более рационального распределения электроэнергии, идущей на освещение предприятий и жилых домов, в летнее время вводят летнее время.

В СССР 16.07.1930г. декретом правительства стрелки часов перевели на 1 час вперёд против поясного времени.

3.4 Календарь, принципы его построения и различные виды

Лунные, солнечные и лунно-солнечные календари, история возникновения и развития.

Система счёта длительных промежутков времени называется календарём. Древние народы измеряли промежутки времени, наблюдая за движением светил. В Библии написано об этом: "И сказал Бог: да будут светила на тверди небесной, для отделения дня от ночи, и для знамений, и времён, и дней, и годов" (Бытие.1,13). Здесь указано, что в представлении древних людей светила небесные нужны были для установления календаря.

Для измерения длительных промежутков времени используют период обращения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца. Эти явления сложны и поэтому ещё издревле возникала путаница с установлением точного числа дней и месяцев в году. В целый год, т.е. во время видимого обращения Солнца вокруг Земли, входит не целое количество дней и не целое количество равных месяцев.

По современным данным один тропический год (промежуток времени между двумя прохождением Солнца через точку весеннего равноденствия) равен 365,2422 суток. В основу месяца положено обращение Луны вокруг Земли. Но каждый лунный месяц имеет 29–30 дней. Значит, в году не может быть 12 ровных лунных месяцев.

Одни народы, например, евреи и арабы, жили и живут по лунному календарю. Год в этом календаре содержит ровно 12 лунных месяцев продолжительностью 29–30 дней. Из-за того, что лунный год имеет меньше дней, чем тропический, у арабов вообще нет фиксированного начала года, оно постоянно перемещается по сезонам. В течение жизни одного человека год может начинаться и весной, и летом, и зимой, и осенью. Другие народы комбинировали солнечный и лунный циклы, пытаясь найти компромисс.

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

Гай Юлий Цезарь провёл реформу древнего римского календаря, основанного на движении Луны. Он ввёл с 1 января 45 г. до н.э. солнечный календарь. Средняя продолжительность года по этому календарю равна 365,25 суток. Чтобы избежать ошибки, связанной с дробным числом дней, каждые 4 года добавлялся 1 день. Год с 366-ю днями называется с тех пор високосным. Лишний день вставлялся не 29 февраля, как это делается сейчас, а между 24 и 25 числами. У римлян счёт дней был отличный от нашего. Отправным пунктом являлся не первый день месяца, а какое-то знаменательное событие, могущее быть даже в другом месяце. Фиксировались обычно три дня каждого месяца, каждый из которых соответствовал началу новой лунной фазы.

Принятое ныне исчисление дней с первого до последнего в месяце установилось лишь в 6 в. н. э.

Например, дни в феврале считались от мартовских коленд. Так 24 февраля по римски называлось "шестой день до мартовских коленд".

А так как в високосном году было два двадцать четвёртых числа, то второе называлось "дважды шестой до мартовских коленд". На латинском языке это звучит так: "bis sextum Kalendae Mart". Позднее год с лишним днём стал называться annus bissextus. Латинское слово биссекстус превратилось в русском языке в високосный.

Этот календарь в память о Юлии Цезаре называется юлианским. Месяц июль тоже назван в память об императоре. Месяц август был назван в честь императора Октавиана Августа в 8 в.н.э. Остальные месяцы календаря называются по разным традициям, например январь в честь бога Януса, февраль в честь ежегодных очистительных обрядов Februa, март по имени бога Марса, май по имени богини Майи, июнь по имени богини Юноны.

В юлианском календаре один день прибавляется в годы, номера которых делятся на 4 без остатка.

Однако, средняя продолжительность тропического года, измеренного по истинному обращению Земли вокруг Солнца, отличается от юлианского на 0078 суток. Для жизни одного поколения это неощутимо, но за 128 лет разница составляет сутки.

В Средние века погрешность стала равной семи дням. Это было замечено церковными деятелями.

По христианской традиции праздник Пасхи связывается с днём весеннего равноденствия и рассчитывается относительно 21 марта.

Это правило было принято в 325 году на Никейском Вселенском Соборе. Из-за неточности юлианского календаря в 16 веке весеннее равноденствие, как природное явление, приходилось на 11 марта, а Пасха рассчитывалась исходя из древней традиции, считая, что оно должно быть 21 марта.

Обсуждение реформы календаря продолжалось несколько столетий. Наконец, папа Григорий XIII 24 февраля 1582 года издал буллу, в которой провозглашал новый календарь и постановлял, что после четверга 4 октября 1582 года наступит пятница 15 октября.

Григорианский календарь основан на более точном знании тропического года и полностью привязан к астрономическим явлениям. Дата весеннего равноденствия всегда приходится на 21 марта и не может сместиться. Небольшое несоответствие между григорианским и истинным тропическим годами всё же есть. Разница в один день набегает за 3300 лет. Такая погрешность сегодня для нас несущественна.

Високосный год – каждый четвёртый, за исключением годов с целым числом столетий (1700, 1800,...). Год с целым числом столетий считается високосным только тогда, когда число сотен делится на 4 без остатка.

Преимущество Григорианского календаря ещё и в том, что расчёт церковных праздников основан на логике Вселенских Соборов.

В России этот календарь был введён со среды 31 января 1918 года. Следующий день уже был 14 февраля. За время, прошедшее со времён Юлия Цезаря календарная ошибка достигла 13 дней.

В католических странах переход на новый календарь произошёл в XVI веке, в Скандинавии и Великобритании в 18 веке.

Православные страны Греция, Болгария, Румыния, Сербия приняли новый стиль в начале XX века.

В современном церковном православном календаре есть много ошибок. Различные годовщины празднуются неверно из-за того, что разница между григорианским и юлианским календарём не была постоянной, а менялась. В IV веке она была равна 1 дню, а в XX веке достигла 13 дней. Например, преставление преподобного Сергия, игумена Радонежского приходится на 25 сентября (8 октября) 1392 года. 8 октября по старому стилю для 1392 года не соответствует 25 сентября по новому. В XIV веке разница составляла всего дней. Значит чествование должно проходить 29 сентября по новому календарю. Практически все даты, глубже XVIII столетия празднуются с ошибкой.

Эры. Исходный пункт каждого летоисчисления называется эрой. Эры у разных народов были разные и связывались с какими-либо знаменательными событиями или с годами правления царей и императоров. В Греции применялась эра Олимпиад (начало 776 г. до н.э.). Года записывались так: Ol 5 3 – 3-й год 5-й Олимпиады. В Риме использовалась эра от Основания Рима (753 г. до н.э.) и счёт годов от назначения консулов. Последний консул был Флавий Василий Младший в 541 году н.э. и года считали *post consulatum Basilii*. В средневековой Европе распространена была эра Диоклетиана (29 августа 284 г. н.э.). В Александрии она была переименована в эру мучеников чистых, поскольку император Диоклетиан преследовал христиан и сохранилась в Египте до 19 века.

Евреи используют эру от Сотворения мира, которая начинается в 3761 году до н.э. Христиане тоже используют эру от сотворения мира, но имеют разные традиции счёта лет. Все они основываются на подсчёте библейских поколений, но имеют свои особенности. Например, византийская традиция считает, что в год начала мира должны начинаться солнечный круг (количество лет, за которое повторяется совпадение високосных лет и начала недель), лунный круг (период повторяемости лунных фаз) и 15-летний индиктион. Получилось, что сотворение мира произошло в 5508 году до н.э.

Эру от Рождества Христова ввёл в 525 году папский архивариус Дионисий Малый. 248 год эры Диоклетиана он приравнял 532 году от Рождения Христа. Исследователи считают, что Дионисий выбрал эту дату для удобства расчёта пасхалии, потому что точно определить дату рождения Иисуса Христа никому до сих пор не удалось. Эра от Рождества Христова начала употребляться кое-где в веке, а повсеместно в католических странах лишь с 15 века.

3.5 Юлианские дни

При решении некоторых задач астрономии нужно знать число средних солнечных суток, протекших между двумя датами, далеко отстоящими друг от друга. Это легко сделать при помощи юлианских дней. Юлианские дни – это дни, которые непрерывно считаются через годы, столетия и тысячелетия от 1 января 4713 года до н.э. Начало каждого юлианского дня считается в средний гринвичский полдень.

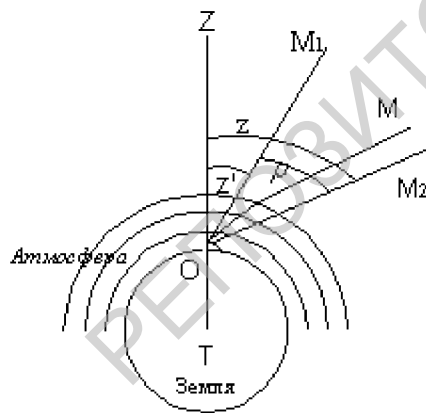
3.6 Рефракция

Видимое положение светила над горизонтом отличается от вычисленного по формулам.

Лучи света от небесного тела, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, проходят сквозь атмосферу Земли и преломляются в ней, а так как плотность атмосферы увеличивается к поверхности Земли, то луч света всё более и более отклоняется в одну и ту же сторону по кривой линии, так что направление OM_1 , по которому наблюдатель видит светило, оказывается отклонённым в сторону зенита и не совпадает с направлением OM_2 , по которому бы он видел светило при отсутствии атмосферы.

Явление преломления световых лучей при прохождении ими земной атмосферы называется астрономической *рефракцией*.

Угол M_1OM_2 называется *углом рефракции* или *рефракцией* ρ .



Рефракция

Угол ZOM_1 называется видимым зенитным расстоянием светила z' , а угол ZOM_2 – истинным зенитным расстоянием z .

$$z - z' = \rho,$$

т.е. истинное зенитное расстояние светила больше видимого на величину рефракции ρ .

Рефракция как бы приподнимает светило над горизонтом.

Так как по законам оптики, луч падающий и преломлённый лежат в одной плоскости, поэтому рефракция не изменяет азимута светила и равна 0, если светило находится в зените.

Рефракция зависит от высоты светила над горизонтом, состояния атмосферы (температуры и давления).

На линии горизонта рефракция в среднем равна $35'$.

При давлении B мм рт. ст. и температуре $t^{\circ}\text{C}$ приближённое значение рефракции:

$$\rho = 60'',25 \times \frac{B}{760} \times \frac{273^{\circ}}{273^{\circ} + t^{\circ}} \times \operatorname{tg} z'.$$

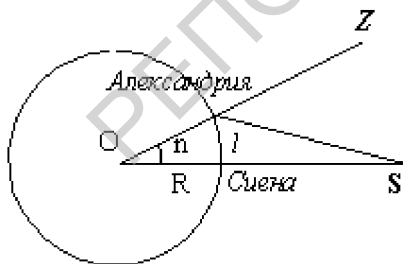
Вследствие рефракции наблюдается изменение формы дисков Солнца и Луны при их восходе или заходе.

3.7 Определение формы и размеров Земли.

Триангуляция

Земля имеет форму близкую к сферической. Об этом знали различные древние народы. В частности, многие греческие философы не имели в этом сомнения, начиная с древнейших. Уже Пифагор в VI веке до н.э. учил, что Земля шарообразна и вращается вокруг центрального огня.

Истинные размеры Земли были известны древним халдеям и египтянам. К сожалению, до нас не дошли методы, которыми были получены эти значения. Самые ранние, из известных, измерения размеров Земли провёл Эратосфен (276–194 гг. до н. э.). Он определил, что в эпоху летнего солнцестояния зенитное расстояние Солнца в полдень в Александрии равно $7^{\circ},2$, в то время как в Сиене Солнце в это момент находилось точно в зените. Зная, что Сиена находится на одном меридиане с Александрией, он решил, что расстояние между этими городами и равно $7^{\circ},2$ окружности Земли. Это расстояние было хорошо известно в греческих стадиях, так как они лежали на оживленном торговом пути. Подставив свои расчеты полученное значение, Эратосфен вычислил длину земной окружности, равную 250 000 стадий. Отсюда следовало, что радиус Земли равен (в современных единицах) 6300 км.



Измерение размеров Земли

Эти расчеты можно представить таким образом. Представим, что l – длина дуги меридиана, а n – ее значение в градусной мере. Тогда длина дуги 1° меридиана l_0 будет равным

$$l_0 = \frac{1}{n}.$$

Длина всей окружности меридиана равна

$$L = 360^{\circ} \times l_0 = \frac{360^{\circ} \times l}{n} = 2\pi R,$$

откуда получаем радиус окружности Земли

$$R = \frac{180^\circ \times l}{\pi \times n}.$$

Значение $n = \varphi_1 - \varphi_2$.

Здесь φ_1 и φ_2 – географические широты городов.

Впервые расстояние от Земли до Солнца астрономическими методами установил Аристарх Самосский. Измеряя угловое расстояние Луны от Солнца в момент первой четверти, когда угол Земля – Луна – Солнце равен 90° , он нашел, что "расстояние от Земли до Солнца превышает расстояние до Луны более чем в 18, но менее чем в 20 раз... , что такое же отношение имеет диаметр Солнца к диаметру Луны: что диаметр Солнца к диаметру Земли имеет отношение большее, чем 19 к 3, но меньшее, чем 43 к 6...". Если разобраться в этих соотношениях, то получается, что радиус Солнца составляет около семи радиусов Земли. Именно это и привело Аристарха Самосского к выводу, что не Земля, а Солнце, как большее тело, расположено в центре мира. Конечно, значения, полученные греческим учёным, не соответствуют действительности, но показывают правильную тенденцию. Метод Аристарха Самосского в принципе верен, однако плохая точность измерений углов не позволила ему получить верные результаты.

Многочисленные современные измерения на земной поверхности показали, что длина одного градуса земного меридиана отличается на разных широтах. Возле экватора это значение равно 110,6 км, а возле полюсов 111,7 км. Длина одной минуты среднего градуса широты равна 1852,2 м. Она принимается за основу морских измерений и носит название морской мили. Ею пользуются в морском деле, где все расчеты принято вести в градусах, минутах и секундах. Известны также сухопутная миля, равная 1609 м, миля географическая, равная 4 мин широты или 7412,6 м, и другие мили. Диаметр Земли между полюсами с севера на юг (длина земной оси) равен 12 713,7 км. Диаметр земного экватора равен 12756,5 км.

Кривизна земной поверхности меньше в полярных областях, чем в экваториальных. Это свидетельствует о том, что Земля имеет поверхность близкую к сфероиду.

По измерениям элементов земного сфероида Международным астрономическим союзом в 1964 г. было принято, что его малая полуось, совпадающая с осью вращения $b = 6356,78$ км, а большая полуось, лежащая в плоскости экватора $a = 6378,16$ км. Сжатие $\varepsilon = (a - b) / a = 1 / 298,25$.

Реальная фигура Земли, имеющая горы, впадины, моря и др. неровности рельефа, не может быть описана не одним правильным геометрическим телом.

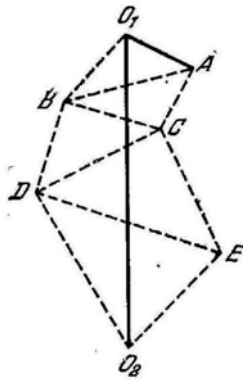
Сегодня фигура Земли называется геоидом. Изучением формы нашей планеты занимаются геодезия и гравиметрия.

Метод триангуляции впервые был применен Снеллиусом в 1615 г. при измерении дуги меридиана в Голландии. С тех пор и до настоящего времени в разных странах, на разных широтах было измерено много дуг на поверхности Земли и не только по меридианам, но и по параллелям. Все эти измерения

показали, что длина дуги 1° меридиана не одинакова под разными широтами: около экватора она равна 110,6 км, а около полюсов – 111,7 км, т. е. увеличивается к полюсам. Это означает, что кривизна земной поверхности меньше в полярных областях, чем в экваториальных. Следовательно, Земля отличается от шара и имеет несколько сплюснутую форму, близкую к сфероиду (эллипсоиду вращения.).

Большие расстояния на земной поверхности измерить очень трудно. Этому мешают неровности формы земного ландшафта. Вычисления проводятся с помощью специального метода – триангуляции, который требует измерения небольшого базиса и углов. Впервые он был применен Снеллиусом в 1615 году при измерении меридиана в Голландии.

Суть метода триангуляции заключается в следующем. По обе стороны дуги O_1O_2 , длину которой необходимо определить, выбирается несколько точек $B, C, D, E, \dots$ на расстояниях примерно 40 км одна от другой.



Точки выбираются так, чтобы из каждой были видны хотя бы две другие точки. Во всех точках устанавливаются геодезические вышки. Наверху вышки делается площадка для наблюдателя. Расстояние между двумя соседними точками, например, O_1A , выбирается на очень ровной поверхности и принимается за базис. Длину базиса измеряют очень точно с помощью мерной ленты. После этого наблюдатель на каждой вышке измеряет все углы треугольников $OAB, ABC, BCD, \dots$. Зная в первом треугольнике O_1AB все углы и базис, можно вычислить и две другие его стороны O_1B и AB , а зная сторону AB и все углы треугольника ABC , можно вычислить стороны AC и BC и т. д. Таким образом, шаг за шагом, можно вычислить длину ломаной линии O_1BDO_2 . Определив из точки O_1 азимут направления стороны O_1A , нужно спроецировать ломаную линию O_1BDO_2 на меридиан O_1O_2 и получить линейные размеры дуги O_1O_2 .

Тема 4 Гео- и гелиоцентрические системы мира

4.1 Древние представления о строении мира

Древние мудрецы помещали Землю в центр мироздания. Некоторые считали её шарообразной, другие – плоской или чечевицеобразной, а небо – куполом. Пифагорейцы считали, что Земля и планеты движутся по окружностям, так как это самый идеальный путь.

Евдокс, чтобы объяснить наблюдательные несоответствия идеального движения, предложил систему концентрических сфер, в центре которых находится Земля. На самой дальней сфере закреплены звёзды.

Для описания движения Луны и Солнца понадобилось по три движущихся друг относительно друга сферы, а для описания планет – по четыре.

Идеи Евдокса принял Аристотель. Он усовершенствовал систему Евдокса. В его описании мира было уже 55 подвижных сфер для удовлетворительного описания всех перемещений небесных тел.

Сферичность Земли Аристотель доказывал, ссылаясь на искривлённость её тени на поверхности Луны во время лунных затмений.

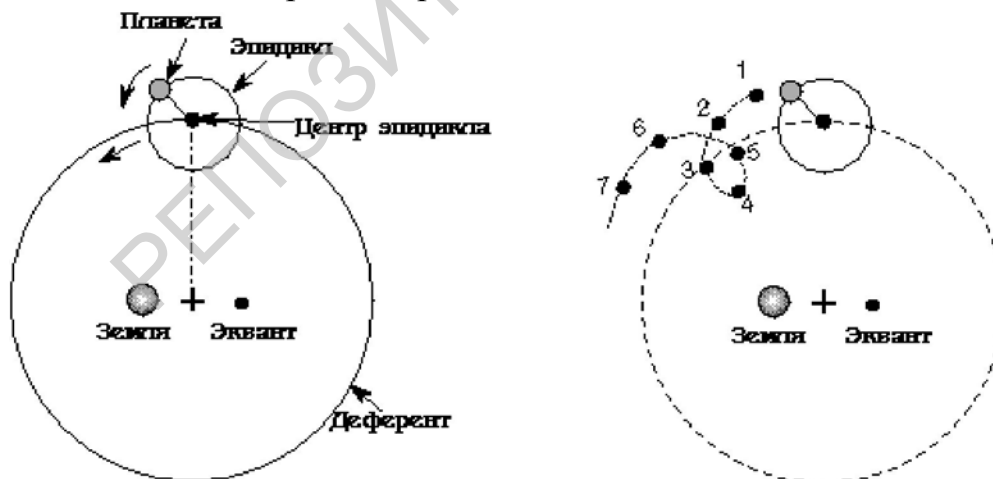
По представлению Аристотеля, если бы Земля двигалась, то камень, брошенный с башни, должен был бы приземлиться на большом расстоянии от башни, возникали бы штормовые ветры.

Пифагореец Филолай в 5 в. до н.э. предполагал, что Земля вращается вокруг центрального огня.

Гераклит учил, что Меркурий и Венера движутся вокруг Солнца, а Солнце вокруг Земли.

Птолемей решил, что поскольку центр Вселенной – место, куда должны двигаться все тела, то если бы Земля не была в центре, то летела бы к центру быстрее всех тел, имеющих на её поверхности.

Эпициклы и деференты. Эквант – элемент, позволяющий планете совершать неравномерное движение по кругу, лишь бы из какой-нибудь точки это движение казалось равномерным.



Кропотливо подбирая для каждой планеты присущее только ей сочетание деферентов, эпициклов и эквантов, Птолемей добился того, что его система мира предсказывала положение планет с удивительной точностью.

Идеи вращения Земли вокруг своей оси высказывали Николай Орезмский (1320–1382), Николай Кузанский (1401–1464). Последний учил, что Вселенная бесконечна и не имеет выделенного неподвижного центра.

4.2 Системы Браге, Бруно и Коперника

Николай Коперник введя гелиоцентрическую систему мира, всё же считал, что планеты движутся по окружностям и равномерно, поэтому для того, что бы описать сложное движение небесных тел приходилось пользоваться эпициклами. Его система насчитывала 34 круговых движения. Кое-кто считал, что система Коперника насчитывала 48 движений, в то время, как в одной из разновидностей системы Птолемея было всего 40 движений.

Книга Коперника была издана в 1543 году и посвящена римскому папе Павлу III. Вначале она не была осуждена католической церковью, но вызвала ярость протестантов. Работа Коперника была внесена в "Индекс запрещённых книг" лишь через 70 лет, благодаря усилиям Дж. Бруно.

Тихо Браге считал, что Земля неподвижна и находится в центре мира, а Солнце вращается вокруг Земли. Планеты же вращаются вокруг Солнца.

Т. Браге обнаружил, что кометы движутся вокруг Солнца, а не являются атмосферными явлениями.

Наблюдения Тихо Браге помогли И. Кеплеру открыть три закона движения небесных тел.

Открытия Галилея, Кеплера показали, что мир сложнее, чем его представляла система мира Аристотеля и разрушили догматическое восприятие природы.

4.3. Видимое движение планет и его объяснение.

Конфигурации планет

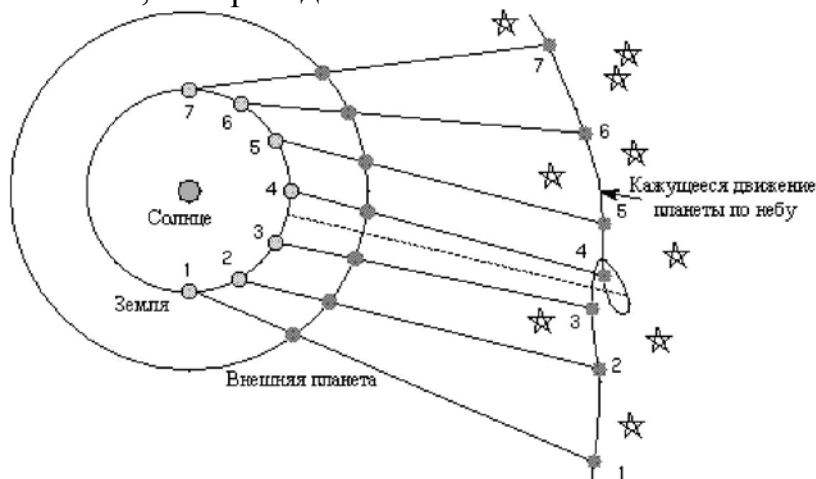
Мы наблюдаем движение планет Солнечной системы с движущейся вокруг Солнца Земли и это приводит к ряду особенностей в их видимых перемещениях на небе. Траектории движения планет проектируются на неподвижные звёзды. Планеты, как и Солнце, движутся только по зодиакальным созвездиям, постоянно пересекая эклиптику, но никогда сильно не удаляются от неё.

Планеты движутся прямо, в направлении движения Солнца по эклиптике, потом замедляют свой ход, останавливаются и движутся в противоположном направлении. Через какое-то время направление движения снова меняется. Эти движения называются прямыми и попятными. Древние астрономы называли планеты из-за их сложного движения "блуждающими светилами".

Прямые и попятные движения планет объясняются различием орбитальных линейных скоростей планеты и Земли. При этом планеты имеют петлеобразные траектории. Размер петли зависит от отношения радиусов орбит планеты и Земли. У Юпитера угловой размер петли около 11° , а у Плутона всего 3° .

При своём движении по орбитам планеты могут занимать различные положения относительно Солнца и Земли. Эти положения называются конфигурации. Конфигурации различаются для нижних и для верхних планет.

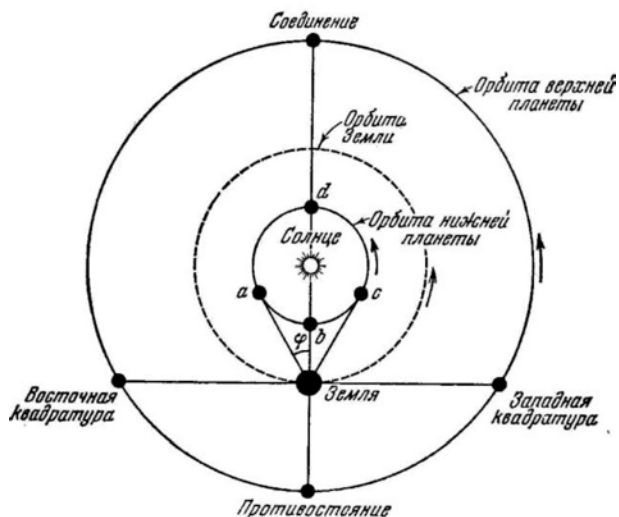
Нижними являются планеты, находящиеся ближе к Солнцу, чем Земля, верхними – те, которые дальше.



Для нижних планет выделяют конфигурации: нижнее и верхнее соединение с Солнцем, наибольшая западная и восточная элонгации. Слово элонгация означает удаление. Смысл двух элонгаций заключается в том, что если мы будем наблюдать нижние планеты с Земли, то они будут находиться на самом большом угловом расстоянии от Солнца. Когда планета находится в соединении, то она с Земли не наблюдается, так как максимально сближается с Солнцем и теряется в его лучах.

Конфигурации для верхних планет несколько иные. Верхние планеты имеют соединение, противостояние (оппозицию), западную и восточную квадратуру. Смысл этих конфигураций можно понять аналогично, как и для нижних планет. Соединение означает соединение с Солнцем при наблюдении планеты с Земли. Значит, во время нахождения планеты в этой конфигурации, она наблюдаться не может, так как теряется в солнечных лучах.

В противостоянии, наоборот, планета будет видна лучше всего, так как противостоит Солнцу, а значит, наблюдается на обратной стороне неба. В это время планета ближе всего подходит к Земле и видна почти всю ночь. Нижняя планета находится ближе всего к Земле в момент нижнего соединения и дальше всего в момент верхнего. Верхняя планета приближается в момент противостояния и удаляется в момент соединения.



Прямые и попятные движения планет объясняются различием орбитальных линейных скоростей планеты и Земли.

Синодический период обращения (S) планеты – промежуток времени между её двумя последовательными одноименными конфигурациями.

Сидерический или звёздный период обращения (T) – промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг Солнца по своей орбите.

Сидерический период обращения Земли называется звёздным годом (T_3). Угловое перемещение по орбите за сутки у планеты равно $360/T$, а у Земли – $360/T_3$. разность суточных угловых перемещений планеты и Земли есть видимое смещение планеты за сутки, т.е. $360/S$.

Получаем для нижних планет

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

Для верхних планет:

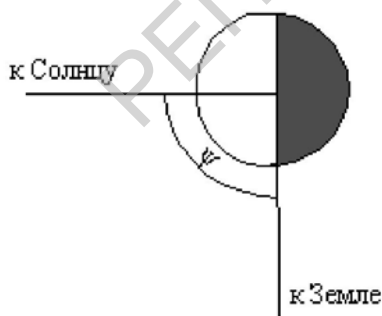
$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T}$$

Это уравнения синодического движения.

Непосредственно из наблюдений могут быть определены только синодические периоды обращений планет S и сидерический период обращения Земли. Сидерические же периоды обращений планет вычисляются по уравнению синодического движения.

Продолжительность звёздного года равна 365,256 средних солнечных суток.

Фаза планеты измеряется отношением площади освещённой части видимого диска ко всей его площади. Угол между направлением с планеты на Солнце и Землю называется фазовым углом.



Фазовый угол планеты

При фазовом угле $\psi = 180^\circ$ планета находится между Солнцем и Землёй, фаза равна нулю, планета не освещена совсем. При фазовом угле $\psi = 0^\circ$ Земля и Солнце находятся по одну сторону от планеты, фаза равна 1, видимый диск планеты освещён полностью.

Связь между фазой и фазовым углом:

$$\Phi = \cos^2 \frac{\Psi}{2}$$

Для нижних планет фазовый угол изменяется от 0 до 180. Для Марса – не более 48,3, для Юпитера – 11, для остальных меньше 11. Для верхних планет фаза близка к 1.

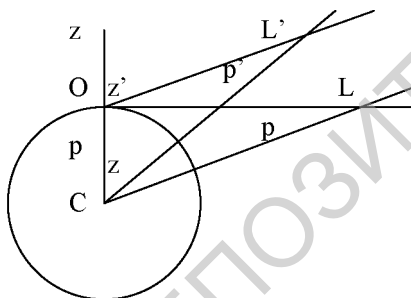
4.4 Определение расстояний в Солнечной системе

Кажущееся смещение светила, обусловленное перемещением наблюдателя, называется *параллактическим смещением*, или параллаксом светила. Параллактические смещения светила тем больше, чем ближе светило к наблюдателю и чем больше перемещение наблюдателя.

Координаты светил, определённые из точки на поверхности Земли называются *топоцентрическими*.

Топоцентрические координаты планет различны в разных местах Земли. Поэтому координаты относят к центру земли и называют геоцентрическими. Угол между направлениями, по которым светило M'' было бы видно из центра Земли и из какой-нибудь точки на её поверхности, называется *суточным параллаксом* светила.

Суточный параллакс есть угол p' , под которым со светила был бы виден радиус Земли в месте наблюдения.



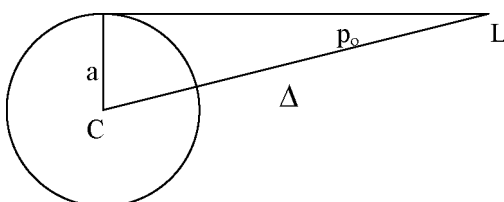
Суточный и горизонтальный параллакс

Для светила, находящегося в зените, суточный параллакс равен 0. Для светила, наблюдаемого на горизонте, суточный параллакс принимает максимальное значение и называется *горизонтальным параллаксом* p .

Знание горизонтального параллакса светила позволяет найти расстояние от центра Земли до светила.

a – экваториальный радиус Земли,

CL – расстояние от центра Земли до светила, равное Δ , угол OLC – горизонтальный параллакс светила p_0 .



Горизонтальный экваториальный параллакс

Получаем формулы:

$$\Delta = \frac{a}{\sin p_0}, \text{ угол } p_0 \text{ мал, } \sin p_0 \approx p_0$$

$$p_0'' \sin 1'' = p_0'' \frac{1}{206265}.$$

$$\Delta = \frac{206265'' a}{p_0''}.$$

Если принять горизонтальный параллакс Солнца равным $8'',794$, то расстояние от Земли до Солнца будет равно 149 597 870 км. Это расстояние называется *астрономической единицей* (а.е.).

Расстояния до планет и Солнца были определены также методами радиолокации в 1946–1963 годах.

$$\Delta = \frac{ct}{2}$$

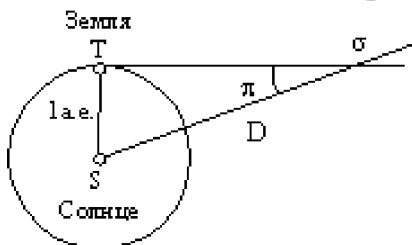
где $c = 3 \cdot 10^5$ км/с – скорость распространения радиоволн. t – время прохождения радиосигнала с Земли до небесного тела.

4.5. Годичные параллаксы звезд

Вследствие больших расстояний до звёзд, горизонтальные параллаксы их очень малы и расстояния до звёзд определяются с помощью годичных параллакс π .

Годичный параллакс звезды π – угол, под которым со звезды был бы виден средний радиус земной орбиты при условии, что направление на звезду перпендикулярно к радиусу. Годичные параллаксы звёзд очень маленькие величины и всегда меньше $1''$. Для их измерения нужно использовать очень точную астрономическую технику и хорошо знать погрешности инструмента, которые могут быть больше параллактического угла.

На рисунке показан метод определения параллакса. Более близкая к нам звезда смещается относительно дальних звёзд. Это смещение можно измерить только для недалёких звёзд, так как точность инструментов не позволяет измерять слишком малые параллактические углы.



Годичный параллакс

На рисунке ST – радиус земной орбиты, т.е. а.е. σS – расстояние от звезды до Солнца, угол $S\sigma T$ – годичный параллакс звезды π , то получаем:

$$D = \frac{1 \text{ a.e.}}{\sin \pi} = \frac{206265''}{\pi''} \text{ a.e.}$$

Расстояние, соответствующее годичному параллаксу в $1''$, называется *парсеком* (пс).

$$1 \text{ пс} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

Если D выражается в парсеках, то $D = 1/\pi''$.

Расстояние, составляющее 1000 парсек, называется килопарсеком, а расстояние 1 000 000 парсек – мегапарсеком.

Расстояние, которое свет проходит за один год, распространяясь со скоростью около 300 000 км/с, называется *световым годом*.

$$1 \text{ световой год} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} = 63198 \text{ а.е.} = 0,3064 \text{ пс.}$$

$$1 \text{ пс} = 3,26 \text{ светового года.}$$

Расстояния до ближайших звёзд имеют порядок нескольких световых лет. Так, самая близкая к Солнцу звезда α Центавра удалена на 4,34 св.г., а звезда Барнарда на 5,97 световых лет.

Впервые астрономическая техника позволила измерить параллаксы в середине 19 века. Этим занимались в Германии Фридрих Бессель, на мысе Доброй Надежды Томас Гендерсон и в России В.Я. Струве.

Бессель определил параллакс звезды 61 Лебедя в 1838–1840 гг. Угол получился равным $0'',3$. Это значение соответствует расстоянию в 11 световых лет.

Тема 5 Движение Луны

5.1 Видимое движение и фазы Луны

Видимое движение Луны вокруг Земли использовалось с глубокой древности разными народами для многих целей. На наблюдении лунных фаз строился лунный календарь.

По известному точно положению Луны на каждый час можно найти долготу места наблюдения. Это правило использовалось в мореходстве до 18 века, пока на кораблях не стали перевозить хронометры.

Однако до сих пор морскими ведомствами разных государств печатаются таблицы положений Луны в служебных изданиях.

Чтобы точно составлять таблицы, нужно знать теорию движения Луны.

Эта задача решалась астрономами на протяжении 25 веков.

Движение Луны очень сложное из-за многочисленных возмущений её орбиты. Орбита Луны представляет собой эллипс, эксцентриситет которого равен $1/18$, большая полуось 384 400 км. В перигее расстояние от Земли до Луны меньше среднего на 21 000 км, в апогее – на столько же больше.

Плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости эклиптики под углом $5^\circ 09'$. Эта величина периодически колеблется от $4^\circ 58'$ до $5^\circ 020'$ за полгода. Впервые значение наклона орбиты нашёл Гиппарх и ошибся лишь на $9'$.

Среднее значение эксцентриситета равно $e = 0,055$ (0,044–0,072).

Лунные узлы – точки пересечения лунной и земной орбит – постоянно перемещаются по эклиптике навстречу движения Луны, совершая полный оборот по эклиптике за 18 лет 7 месяцев.

Перигей лунной орбиты непрерывно движется к востоку, завершая полный оборот за 9 лет.

Луна и Земля обращаются вокруг общего центра масс, который называется барицентр. Соотношение масс Луны и Земли такое, что барицентр находится внутри земного шара, на расстоянии 4670 км от центра масс Земли.

Вращение Луны вокруг своей оси описывается тремя законами Кассини. По этим законам лунный экватор имеет постоянный наклон к плоскости эклиптики

$$I = 1^{\circ}32'47''.$$

Видимый путь Луны на небе обусловлен обращением её вокруг Земли и представляет собой незамыкающуюся кривую линию, постоянно меняющую своё положение среди звёзд зодиакальных созвездий.

Для того чтобы получить значение широты Луны с точностью $0'',1$, нужно просуммировать 655 членов. Для определения долготы всего 300.

5.2 История лунной теории

Движение Луны является настолько сложным, что удовлетворительное объяснение многим его феноменам дал лишь И. Ньютон в созданной им теории движения Луны на основании тяготения.

Клавдий Птолемей решал проблему неравномерного движения Луны, вводом эксцентра. Он предполагал, что Луна движется вокруг Земли по кругу, центр которого не совпадает с Землёй.

Птолемей доказал теорему о том, что движение Луны по эксцентру можно представить как комбинацию двух равномерных круговых движений, по деференту и эпициклу.

Для точного описания движения Луны нужно было найти отношение радиусов деферента и эпицикла. Птолемей нашёл их, исследуя две тройки затмений. Найденная теория хорошо описывала движение Луны в сизигиях, и давала большие погрешности с наблюдаемыми значениями для остальных точек орбиты.

Форма лунной орбиты периодически изменяется. Её эксцентриситет возрастает, когда линия апсид направлена на Солнце, и уменьшается, когда она составляет с ним прямой угол. (Эвекция) Период эвекции равен 31,81 средних солнечных суток.

Причина эвекции в том, что в новолуние Луна находится ближе к Солнцу чем Земля и Солнце сильнее притягивает её, стремясь как бы отдалить. В полнолуние таким же образом Солнце действует на Землю. Во время квадратур действие Солнца стремится сблизить их между собой. Благодаря эвекции орбита Луны стремится вытянуться по направлению к Солнцу и эксцентриситет всё время меняется. Период его изменения равен 206 суток.

Для усовершенствования своей теории Птолемей ввёл понятие экванта – неравномерного движения по окружности.

За это допущение он позднее критиковался арабскими учёными и Н. Коперником.

Всё же Птолемей создал достаточно удовлетворительную теорию движения Луны. По его расчётам среднее расстояние до Луны равно 59 земным радиусам. Современное значение – 60.

Серьёзные возражение вызывало лишь то, что Птолемей приводит слишком большое отношение наибольшего расстояния от Земли до Луны к наименьшему

1,9 (совр. 1,14). С таким значением видимые размеры Луны должны были бы меняться в два раза, в зависимости от того, в какой точке своей орбиты находится Луна. Мы этого не наблюдаем, а Птолемей обошёл молчанием.

Теория Коперника внесла мало ясности в движение Луны, так как Луна двигалась вокруг Земли и по теории Птолемея.

Коперник предложил своё описание движения Луны, применив для неё два эпицикла. Эта теория устраняла средний и истинный перигей, неравномерное движение центра эпицикла по эксцентру, эквант.

Однако теория Коперника описывала движение Луны не намного лучше. Истинное понимание было внесено лишь И. Ньютоном после открытия законов тяготения.

5.3 Фазы

Видимое движение Луны сопровождается непрерывным изменением её внешнего вида, характеризуемого фазой Луны.

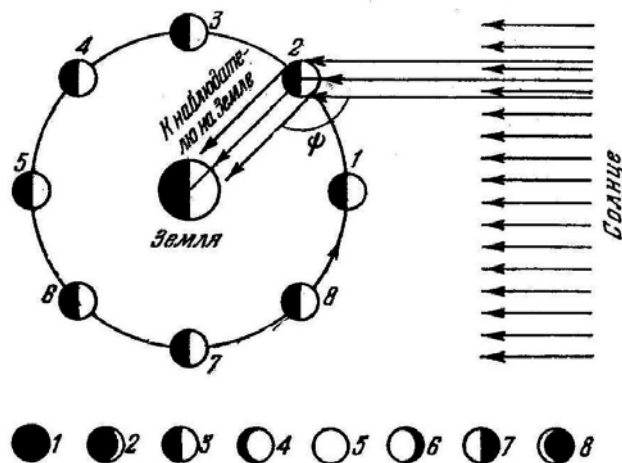
Фаза Луны измеряется отношением площади освещённой части видимого диска ко всей его площади.

Угол между направлением с Луны на Солнце и Землю называется *фазовым углом*.

Различают четыре основные фазы Луны, которые постепенно переходят одна в другую: *новолуние*, *первая четверть*, *полнолуние*, *последняя четверть*.

Линия, отделяющая тёмную часть диска Луны от светлой, называется *терминатором*.

Соединение Луны с Солнцем во время новолуния и противостояние во время полнолуния называются *сизигиями*.



С древних времён народы Земли наблюдали за фазами Луны. С прибыванием месяца связывали лучшее, интенсивное произрастание растений, здоровье детей. У центральноафриканского племени баганда при появлении нового месяца матери выносят своих младенцев и показывают их возрождённой Луне.

В Германии в течение многих столетий приурочивали к новой Луне посевы, свадьбы, начало строительства.

В последнюю четверть считалось очень плохо выходить на войну и охоту. По свидетельству Геродота, спартанцы именно поэтому не послали вовремя свои войска против персов к Марафону.

У крестьян до сих пор существуют поверья, что сеять надо при растущей Луне, а жать при убывающей.

Клавдий Птолемей писал в Тетрабиблосе: "Луна, как наиболее приближённое к Земле небесное тело, в изобилии дарует свой свет земным предметам, причём большинство из них как одушевлённых, так и неодушевлённых, испытывает к ней расположение и изменяется вместе с ней; реки ускоряют или замедляют свой бег под воздействием её лучей, приливы и отливы морей начинаются с её восходом и заходом, а растения или животные полностью или частично расцветают или увядают вместе с ней."

У В. Шекспира Отелло говорит:

"Вина Луны, она, как видно,

Не в меру близко подошла к Земле И сводит всех с ума."

В США группа учёных исследовала обстоятельства всех убийств, совершённых в округе Дейд за период с 1956 по 1970 год. Пики кривой убийств совпадали с фазами новолуния и полнолуния.

Луна обращена к Земле всегда одной и той же стороной, одним и тем же полушарием, так как она вращается вокруг своей оси с тем же периодом (и в том же направлении), с каким она обращается вокруг Земли.

Звёздные сутки на Луне составляют 27,32 земных средних суток.

Ось вращения Луны наклонена к плоскости лунной орбиты на угол 83020'.

Луна немного поворачивается к земле то одной скрытой стороной, то другой, так что на Земле можно наблюдать 60% её поверхности. Это явление называется *либрации* (качания) Луны.

5.4 Синодический, сидерический и драконический месяцы

Период обращения Луны вокруг Земли называется сидерическим или *звёздным месяцем*. Его продолжительность равна 27,32 средних солнечных суток. По истечении этого времени Луна снова занимает прежнее положение на своей орбите по отношению к звёздам.

Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными фазами Луны называется *синодическим месяцем*.

Синодический месяц равен 29,53 средних солнечных суток.

Он длиннее сидерического.

Через сидерический месяц, Луна, сделав полный оборот по орбите, займёт прежнее положение относительно звёзд, но так как Земля сместится в положение 2, то полнолуния ещё не будет. Оно наступит спустя некоторое время, когда Земля займёт положение 3.

Драконический месяц – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Луны через один и тот же узел своей орбиты (27,21 средних солнечных суток).

Драконический месяц короче сидерического из-за движения узлов лунной орбиты навстречу движению Луны.

Аномалистический месяц – промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Луны через перигей (27,55 средних суток).

Все эти месяцы точно вычислил ещё Гиппарх.

5.5 Солнечные и лунные затмения

При движении вокруг Земли Луна проходит перед далёкими светилами и может их заслонить своим диском. Это явление называется *покрытие светил Луной*.



Определение точных моментов начала и конца покрытий имеет большое значение для изучения движения Луны и формы её диска.

Покрытия Солнца Луной называются *солнечными затмениями*.

Солнечное затмение имеет различный вид для разных точек земной поверхности.

Диск Солнца будет полностью закрыт лишь для наблюдателя, находящегося внутри конуса лунной тени, максимальный диаметр которой на поверхности Земли не превосходит 270 км.

В этой области будет полное солнечное затмение.

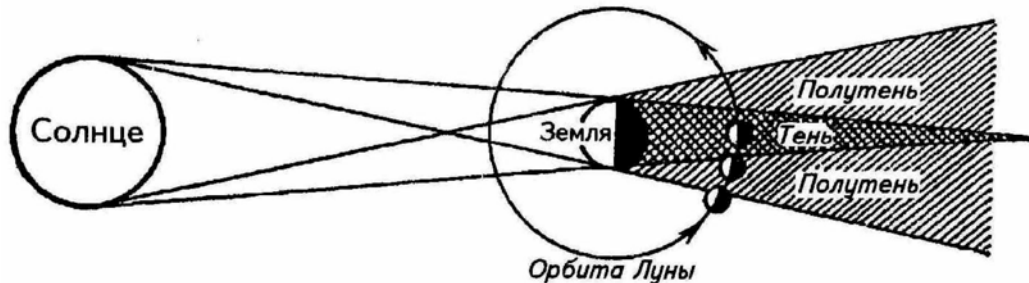
В областях, куда падает полутень от Луны, внутри конуса лунной полутени будет частное солнечное затмение – диск Луны закроет только часть солнечного диска. Чем ближе наблюдатель к оси тени, тем большая часть диска Солнца закрыта. Вне конуса полутени виден весь диск Солнца и затмение не наблюдается. Так как расстояние от Луны до Земли изменяется от 405 500 км до 363 300 км, а длина конуса полной тени от Луны в среднем равна 374 000 км, то вершина конуса лунной тени иногда не доходит до поверхности Земли. В этом случае наблюдается *кольцеобразное затмение*.

В разных точках Земли солнечное затмение наступает в разное время. Лунная тень перемещается с запада на восток, образуя полосу длиной в

несколько тысяч километров и шириной около 200 км. Длится полное затмение несколько минут – от 2-х до 7-ми. Общая продолжительность всех фаз может длиться свыше двух часов.

При попадании Луны в конус земной тени происходит *лунное затмение*.

Конус земной тени длиннее конуса лунной, а диаметр на расстоянии Луны превышает диаметр Луны больше чем в 2,5 раза.



Поскольку во время затмения Луна лишается солнечного света, то лунное затмение видно на всём ночном полушарии Земли и для всех точек начинается в один и тот же физический момент (отличный от местного времени) и заканчивается одновременно.

При вхождении Луны полностью в земную тень наступает *полное затмение* Луны, при вхождении части Луны бывает частное затмение.

Полное лунное затмение может продолжаться до 2-х часов.

Затмению предшествует и завершает его полутеневое лунное затмение, когда Луна проходит сквозь земную полутень.

Условия наступления затмений.

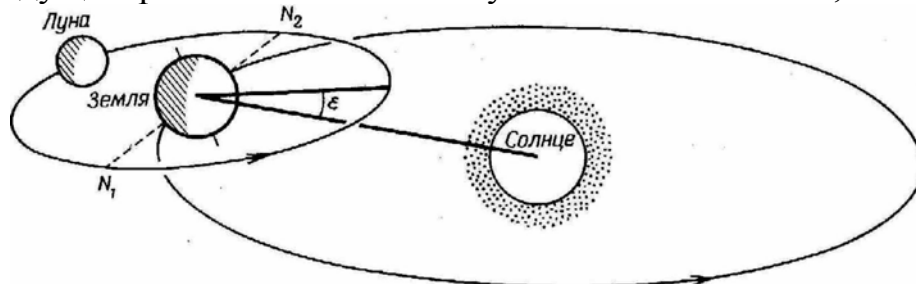
Если бы плоскость лунной орбиты совпадала с плоскостью эклиптики, то затмения происходили бы каждый синодический месяц. Из-за того, что угол наклона составляет $5^{\circ}09'$, Луна во время новолуния или полнолуния может находиться далеко от плоскости эклиптики, и тогда её диск пройдёт выше или ниже Солнца или конуса тени Земли и затмения не произойдёт.

Чтобы произошло затмение нужно, чтобы Луна во время новолуния или полнолуния находилась вблизи узла своей орбиты, т.е. недалеко от эклиптики.

Чтобы произошло солнечное затмение, нужно чтобы геоцентрическая эклиптическая широта Луны была меньше $88',7$, а расстояние Луны от узла своей орбиты до $16^{\circ},5$.

Каждый год бывает два солнечных затмения возле узлов лунной орбиты, но может быть 4 и 5.

Для наступления лунного затмения нужно чтобы в полнолуние расстояние между центром земной тени и лунным узлом было меньше чем $10^{\circ},6$, и между центрами земной тени и Луны – меньше чем $56',5$.



На протяжении года может не произойти ни одного лунного затмения, а может быть два или три.

5.6 Сарос. История затмений

Последовательность затмений повторяется почти точно в прежнем порядке через промежуток времени, который называется саросом. Сарос (египт. – повторение) был вычислен ещё в древности и составляет 18 лет и 11,3 суток.

В течение каждого сароса происходит 70 затмений, из них 41 солнечное и 29 лунных. Солнечные затмения происходят чаще лунных, но в данной точке на поверхности Земли чаще можно наблюдать лунные затмения, так как они видны на целом полушарии Земли, тогда как солнечные затмения видны лишь на узкой полосе. Полных солнечных затмений в течение сароса бывает 10, но их редко можно увидеть. В данной точке Земли солнечные затмения видны в среднем 1 раз в 200–300 лет.

По древней китайской легенде придворные астрономы Хи и Хо, жившие в XXII в. до н. э., предались пьянству и не предсказали вовремя солнечное затмение 22 октября 2137 г. до н.э. Затмение наступило во время торжественной церемонии, нарушив её ритуал. Астрономам отрубили головы.

Сарос был открыт вавилонянами не позднее 6 в до н.э. Клавдий Птолемей описал его в Альмагесте со ссылкой на вавилонских астрономов:

"Древнейшие математики нашли из наблюдений лунных затмений, что за промежуток в $6585 \frac{1}{3}$ дня заканчивается приблизительно 223 синодических месяца, 239 аномалистических, 242 возвращения по широте (драконических), 241 возвращение по долготе (сидерических) и сверх того $10 \frac{2}{3}$ градусов, которые Солнце прошло за то же время сверх своих 18 оборотов, считая их по отношению к неподвижным звёздам; и они называли этот промежуток времени периодом, так как после него все эти движения возвращаются к исходному положению."

В 19 веке были найдены клинописные таблички древнего Вавилона. На одной из них есть таблица саросов с –372 до –276 г.

Авторами теории затмений в Вавилоне были астрономы Кидинну и Набуриманну.

Сообщения о затмениях в Вавилоне носили такой характер: "Четырнадцатого произойдёт затмение; это – неблагоприятно для Элама и Амурру, но благоприятно для царя, мой господин; пусть царь, мой господин, успокоится. Оно будет видно без Венеры. Из Ирасшиилу, царский слуга."

Тема 6 Начала небесной механики

6.1 Законы Кеплера

Иоганн Кеплер родился в 1571 году. Закончил Тюбингенскую духовную академию. После окончания занимался преподаванием.

Книга "Предвестник космографических изысканий, содержащий космографическую тайну об удивительном соотношении небесных сфер, а

также истинные и должные причины числа небес, их величин и периодических их движений, объяснённую посредством пяти правильных геометрических тел" показала большие математические способности и послужила сближению Кеплера с Тихо Браге. В дальнейшем И. Кеплер вывел свои законы на основании наблюдений, собранных Тихо Браге.

В 1609 году вышла в свет книга "Новая астрономия, причинно обоснованная, или физика неба, изложенная в исследованиях движения звезды Марс, по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге". В этой книге формулировались первые два закона движения небесных тел. Третий закон появился спустя 10 лет исследований в книге "Гармония мира", вышедшей в 1619 году. Долгие годы исследований заставили Кеплера отречься от прежних идеализированных воззрений на природу движения небесных тел.

Законы Кеплера формулируются следующим образом:

1. *Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце.*

2. *Радиус – вектор планеты в равные промежутки времени описывает равновеликие площади.*

3. *Квадраты сидерических периодов обращений планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.*

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

где T_1 , T_2 – сидерические периоды обращений планет, a_1 , a_2 – большие полуоси их орбит. Если большие полуоси орбит выразить в единицах среднего расстояния от Земли до Солнца (в а.е.), а периоды обращений в годах, то для Земли $a = 1$, $T = 1$, и период обращения любой планеты вокруг Солнца равен:

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Если обобщить законы Кеплера на различные случаи движения небесных тел, получим следующие формулировки:

1. *Под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений – кругу, эллипсу, параболе или гиперболе.*

2. *Площадь, описанная радиусом вектором за единицу времени есть величина постоянная.*

$$r^2 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{const}$$

где r – радиус-вектор, θ – полярный угол (истинная аномалия).

$$3. \frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

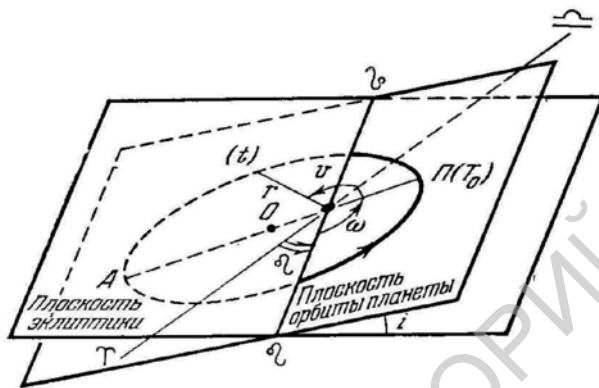
где M_1 и M_2 – массы главных тел, а m_1 и m_2 – массы спутников, a_1 и a_2 – большие полуоси орбит спутников.

6.2 Элементы эллиптических орбит

Движение планеты будет определено, если известны:

- плоскость, в которой лежит её орбита,
- размеры и форма орбиты,
- ориентировка в плоскости,
- момент времени, в который планета находится в определённой точке орбиты.

Величины, определяющие орбиту планеты, называются элементами орбиты. Плоскость эклиптики является основной плоскостью, относительно которой определяется положение орбиты. Две точки, в которых орбита планеты пересекается с плоскостью эклиптики, называются узлами – *восходящим* и *нисходящим*. Восходящий узел – тот, в котором планета пересекает эклиптику, удаляясь от её южного полюса.



Эллиптическую орбиту планеты определяют 6 элементов:

1. *Наклонение i* плоскости орбиты к плоскости эклиптики. Может иметь значения от 0° до 180° . Элементы эллиптических орбит. Если $0^\circ < i < 90^\circ$, то планета движется вокруг Солнца в том же направлении, что и

Земля (прямое движение). Если $90^\circ > i > 180^\circ$, то планета движется в противоположном направлении (обратное движение).

2. *Долгота (гелиоцентрическая) восходящего узла ϱ* , т.е. угол между направлениями из центра Солнца на восходящий узел ϱ и на точку весеннего равноденствия. Долгота может иметь значения от 0° до 360° .

Долгота восходящего узла и наклонение определяют положение плоскости орбиты в пространстве.

3. *Угловое расстояние ω перигелия от узла*, т.е. угол между направлениями из центра Солнца на восходящий узел и на перигелий П. Отсчитывается в плоскости орбиты планеты в направлении её движения и может иметь любые значения от 0° до 360° .

Угловое расстояние ω определяет положение орбиты в её плоскости.

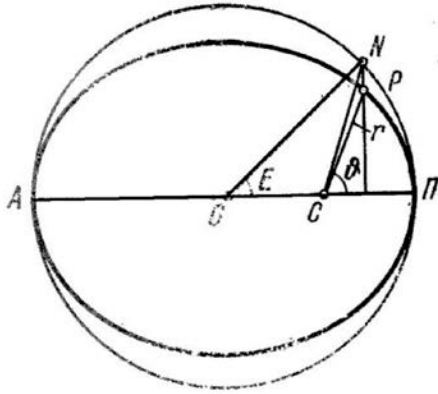
4. *Большая полуось a* эллиптической орбиты, которая однозначно определяет сидерический период обращения T планеты. Среднее суточное движение $n = \frac{360^\circ}{T}$, т.е. средняя угловая скорость планеты в сутки.

$$5. \text{Эксцентриситет орбиты } e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, (1)$$

где a и b – полуоси эллиптической орбиты. Большая полуось a и e определяют размеры и форму орбиты.

6. Момент прохождения через перигелий t_0 , или положение планеты на орбите в какой-то определённый момент времени t .

Зная момент прохождения через перигелий t и другие элементы орбиты, можно определить положение планеты в плоскости её орбиты для любого момента времени t .



Положение планеты на орбите определяется двумя величинами: радиус-вектором r и истинной аномалией θ . Истинной аномалией планеты называется угол ПСР между направлением из Солнца на перигелий П и радиусом-вектором планеты Р.

$$r = a(1 - e \cos E), (2)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \times \operatorname{tg} \frac{E}{2}, (3)$$

где $E = \angle PON$ и называется *эксцентрической аномалией*.

Эксцентрическая аномалия вычисляется из уравнения Кеплера

$$M = E - e \sin E, (4)$$

где M – угол, называемый *средней аномалией*. Средняя аномалия представляет собой дугу круга, которую бы описала планета за время $(t - t_0)$, если бы двигалась равномерно по окружности радиуса a со средней угловой скоростью n .

$$M = n(t - t_0) = \frac{2\pi(t - t_0)}{T}. (5)$$

6.3 Эфемериды небесных тел

Эфемеридой небесного тела называется таблица, в которой приведены вычисленные на основании теории положения этого тела на небесной сфере для различных моментов времени. При составлении точных эфемерид учитывают возмущения. Приближённые эфемериды составляются на основании известных элементов невозмущённой орбиты данного тела. Определение видимых координат планеты по элементам их орбит называется вычислением эфемерид.

Обратная задача, т.е. определение элементов орбит по наблюдаемым координатам, называется *определением орбит*. Впервые эту задачу решил Кеплер по многочисленным наблюдениям давно известных планет. В современной астрономии используются методы определения орбит по трём наблюдениям. Эта задача была решена только в 19 веке.

Вычисление положения планеты на орбите для момента t проводится в следующей последовательности:

- 1) По формуле (5), в которой известны T и $(t - t_0)$, определяют среднюю аномалию.
- 2) По формуле (4), при известных e и M , методом последовательных приближений находят эксцентрическую аномалию E ;
- 3) По формулам (2) и (3) вычисляют радиус-вектор и истинную аномалию.

Определив положение планеты на орбите для заданных моментов времени, можно вычислить для этих же моментов её пространственные гелиоцентрические координаты. Зная элементы орбиты Земли и вычислив для тех же моментов положение Земли на её орбите, можно определить геоцентрические координаты планеты и найти её расстояние от центра Земли.

Тема 7 Влияние масс небесных тел на их движение

7.1 Методы определения масс небесных тел

Закон всемирного тяготения Ньютона позволяет измерить одну из важнейших физических характеристик небесного тела – его массу.

Массу можно определить:

- а) из измерений силы тяжести на поверхности данного тела (гравиметрический способ),
- б) по третьему уточнённому закону Кеплера,
- в) из анализа наблюдаемых возмущений, производимых небесным телом в движениях других небесных тел.

1. Первый способ применяется на Земле.

На основании закона тяготения ускорение g на поверхности Земли:

$$g = G \cdot \frac{m}{R^2}, \text{ где } m - \text{масса Земли, а } R - \text{её радиус.}$$

$$m = (gR^2) / G.$$

g и R измеряются на поверхности Земли. $G = \text{const.}$

С принятыми сейчас значениями g , R , G получается масса Земли:

$$m = 5,976 \cdot 10^{27} \text{ г} = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$$

Зная массу и объём, можно найти среднюю плотность. Она равна $5,5 \text{ г/см}^3$.

2. По третьему закону Кеплера можно определить соотношение между массой планеты и массой Солнца, если у планеты есть хотя бы один спутник и известны его расстояние от планеты и период обращения вокруг неё.

$$\frac{T^2(M+m)}{t_c^2(m-m_c)} = \frac{a^3}{a_c^3},$$

где M , m , m_c – массы Солнца, планеты и её спутника, T и t_c – периоды обращений планеты вокруг Солнца и спутника вокруг планеты, a и a_c – расстояния планеты от Солнца и спутника от планеты соответственно.

Из уравнения следует

$$\left(\frac{M}{m} + 1\right) \div \left(1 + \frac{m_c}{m}\right) = \frac{t_c^2 a^3}{T^2 a_c^3}.$$

Отношение M/m для всех планет очень велико; отношение же m/m_c , очень мало (кроме Земли и Луны, Плутона и Харона) и им можно пренебречь.

Соотношение M/m можно легко найти из уравнения.

Для случая Земли и Луны нужно сначала определить массу Луны. Это сделать очень сложно. Решается задача путём анализа возмущений в движении Земли, которые вызывает Луна.

3. По точным определениям видимых положений Солнца в его долготе были обнаружены изменения с месячным периодом, называемые "лунным неравенством". Наличие этого факта в видимом движении Солнца указывает на то, что центр Земли описывает небольшой эллипс в течение месяца вокруг общего центра масс "Земля – Луна", расположенного внутри Земли, на расстоянии 4650 км от центра Земли.

Положение центра масс Земля – Луна было найдено также из наблюдений малой планеты Эрос в 1930–1931 гг.

По возмущениям в движениях искусственных спутников Земли отношение масс Луны и Земли получилось 1/81,30.

В 1964 году Международный астрономический союз принял его как const.

Из уравнения Кеплера получаем для Солнца массу = $2 \cdot 10^{33}$ г, что в 333000 раза превосходит земную.

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

7.2. Приливы и отливы

Прилив – это любая из циклических деформаций одного астрономического тела, вызванная гравитационными силами другого.

Размеры Земли не бесконечно малы по сравнению с расстоянием до Луны и Солнца. Силы лунного и солнечного притяжения на разные точки Земли неодинаковы. Поэтому появляется возмущающая сила, действующая на различные детали поверхности Земли по-разному. В твёрдых массивах действие силы вызывает натяжение, большие массивы воды же увлекаются силой притяжения и перетекают с места на место. Приливное воздействие на атмосферу выражается в появлении атмосферных потоков.

Водные приливы и отливы известны с давних времён. Географ Страбон (род. – 66 г.) рассказывает, что финикийцы хорошо знали о приливах и отливах. В Сред-

иземном море эффект малый, но финикийцы проходили через Геркулесовы столбы и наблюдали его в океане. Они указывали, что приливы зависят от фаз Луны и особенно интенсивны в полнолуния и новолуния.

Итальянский иезуит Кабео (1585–1650) предполагал, что Луна производит на морском дне какое-то спиртное вещество, которое и вызывает прилив.

Стевин объяснял прилив притяжением Луны, но горб на обратной стороне Земли объяснял существующей там ещё одной притягивающей точкой.

Галилей объяснял приливы центробежной силой, отвергая тяготение.

Некоторые исследователи предполагали, что Луна производит изменения в давлении воздуха, что влияет на уровень моря.

Наиболее верное объяснение явлению приливов и отливов дал Исаак Ньютон, с помощью теории гравитации. Он писал, что Луна оттягивает воду от Земли на одной стороне и оттягивает Землю от воды на другой.

Если земная поверхность со всех сторон покрыта океаном, то каждая капля воды имеет ускорение, пропорциональное квадрату расстояния между частицей и центром Луны.

Равнодействующая ускорений, сообщаемых твёрдым частицам проходит через центр Земли T и равна:

$$\omega_T = Gm/r^2,$$

где m – масса Луны, r – расстояние центра Луны от центра Земли.

Для воды океана ускорение в точке A больше, чем ω_T , а в точке B меньше, чем ω_T , так как: $\omega_A = Gm/(r - R)^2$, $\omega_B = Gm/(r + R)^2$, где R – радиус Земли.

Относительное ускорение (относительно центра Земли) в точке A равно:

$$\omega_A - \omega_T = Gm\left\{1/(r - R)^2 - 1/r^2\right\} = Gm\left\{(2rR - R^2)/(r - R)^2 r^2\right\} = Gm2R/r^3.$$

Пренебрегаем малым членом R^2 , и вместо $(r - R)$ оставляем r .

Эта разность ускорений направлена от центра Земли.

В точках A и B действие Луны ослабляет силу тяжести на Земной поверхности. В точках F и D действие Луны увеличивает силу земной тяжести.

Действие ускорений в промежуточных точках приводит к тому, что вода в океане стремится на одной половине Земли к точке A , где Луна находится в зените, на другой половине к точке B – где Луна находится в надире.

Под действием Луны водная оболочка Земли принимает форму эллипсоида, вытянутого по направлению к Луне. Вблизи точек A и B будет прилив, а у точек F и D – отлив.

За промежуток времени между двумя последовательными кульминациями Луны, равный 24ч52м, приливные выступы обойдут вокруг Земли, и в каждом месте будет по два прилива и два отлива.

Под действием солнечного притяжения водная оболочка Земли испытывает приливные силы меньше лунных в 2,2 раза. Солнечные приливы отдельно не наблюдаются, они только изменяют величину лунных приливов.

Во время новолуний и полнолуний силы складываются и приливы больше обычных, в квадратуры на лунный прилив приходится солнечный отлив, силы вычитаются и приливы меньше.

В реальности Земля не везде покрыта водой, дно морей и океанов обладает сложным рельефом, приливная волна испытывает большое трение. Момент

прилива поэтому не совпадает с моментом кульминации Луны и запаздывает до шести часов. Этот промежуток времени называется *прикладным часом*.

Высота прилива в Чёрном море равна нескольким сантиметрам, в заливе Фанди на Атлантическом побережье Канады – 18 метрам.

Трение приливной волны о твёрдые части Земли вызывает систематическое замедление её вращения.

Приливы и отливы сказываются на изменениях атмосферного давления.

7.3 Прецессия и нутация земной оси

Вследствие возмущающего действия, оказываемого на вращение Земли телами Солнечной системы, ось вращения Земли совершает в пространстве очень сложное движение. Земля имеет форму сфероида, и поэтому различные части сфероида притягиваются Солнцем и Луной неравномерно.

1. Ось медленно описывает конус, оставаясь всё время наклонённой к плоскости движения Земли под углом около $66^{\circ},5$. Это движение называется *прецессионным*, период его около 26 000 лет. Оно определяет среднее направление оси в пространстве в различные эпохи.

2. Ось вращения Земли совершает различные мелкие колебания около своего среднего положения, главные из которых имеют период 18,6 года, (этот период есть период обращения узлов лунной орбиты, так как нутация есть следствие действия притяжения Луны на Землю) и называются *нутацией* земной оси. Нутационные колебания возникают, потому что прецессионные силы Солнца и Луны непрерывно меняют свою величину и направление. Они = 0, когда Солнце и Луна находятся в плоскости экватора Земли и достигают максимума при наибольшем удалении от него.

Вследствие прецессии и нутации взаимное расположение полюсов мира и полюсов эклиптики непрерывно изменяется.

3. Притяжение планет мало, чтобы вызывать изменения положений земной оси. Но планеты влияют на положение земной орбиты. Изменения положений плоскости эклиптики под воздействием притяжения планет называется *планетной прецессией*.

Полюс мира, определяемый средним направлением оси вращения Земли, т.е. обладающий только прецессионным движением, называется *средним полюсом мира*.

Истинный полюс мира учитывает и нутационные движения оси.

Средний полюс мира вследствие прецессии за 26 000 лет описывает около полюса эклиптики окружность радиусом 230,5. За один год перемещение среднего полюса мира на небесной сфере составляет около 50",3. На такую же величину перемещаются на запад и равноденственные точки, двигаясь навстречу видимому годовому движению Солнца. Это явление называется *прецессией* или *предварением равноденствий*. Вследствие этого Солнце попадает в равноденственные точки раньше, чем на то же самое место на фоне звёзд. Полюс мира описывает незамыкающийся круг на небесной сфере. 2000 лет до н.э. полярной звездой была α Дракона, через 12 000 лет полярной станет α Лиры.

В начале нашей эры точка весеннего равноденствия находилась в созвездии Овна, а точка осеннего равноденствия в созвездии Весов. Сейчас точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыб, а осеннего в созвездии Девы. Прецессионное движение полюса мира вызывает изменение координат звёзд с течением времени.

Влияние прецессии на координаты:

$$d\alpha/dt = m + n \sin \alpha \operatorname{tg} \delta, \quad d\delta/dt = n \sin \alpha.$$

где $d\alpha/dt$, $d\delta/dt$ – изменения координат за год, m – годичная прецессия по прямому восхождению, n – годичная прецессия по склонению.

Из-за непрерывного изменения экваториальных координат звёзд, происходит медленное изменение вида звёздного неба для данного места на Земле. Некоторые невидимые ранее звёзды будут восходить и заходить, а некоторые видимые

станут невосходящими. Так, через несколько тысяч лет в Европе можно будет наблюдать Южный Крест, но нельзя будет увидеть Сириус и часть созвездия Ориона.

Истинный полюс мира описывает вокруг среднего полюса сложную кривую.

Его движение на небесной сфере совершается приблизительно по эллипсу, большая полуось которого равна 18",4, а малая 13",7. Он совершает один оборот за 18,6 года. Это движение истинного полюса мира вокруг среднего называется нутацией.

Прецессия была открыта Гиппархом и объяснена И. Ньютоном.

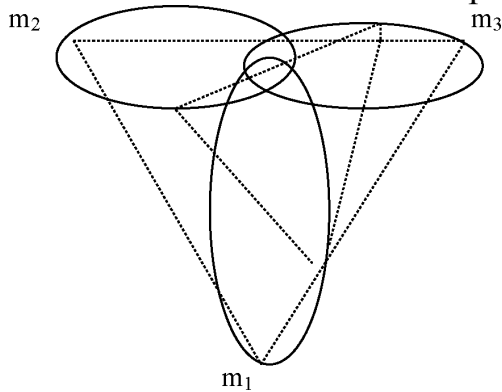
7.4 Задача трёх тел

Определение движения трёх тел, взаимно притягивающих друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, называется *задачей трёх тел*.

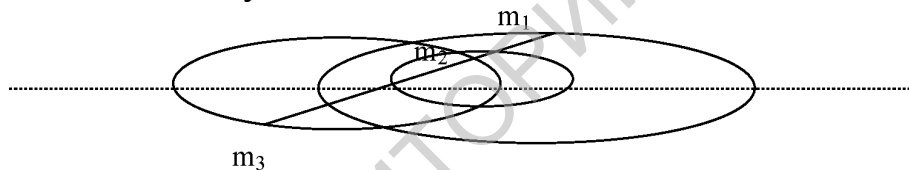
Эта задача очень сложна и её математическое решение трудно. В 1912 году финский математик К. Зундман нашёл формальное решение этой задачи. Он выразил результат в виде степенных рядов. Однако, для расчётов солнечных затмений в рядах Зундмана нужно удерживать число членов, равное примерно единице с 40 нулями.

Лагранж в 1772 году доказал, что существует определённое количество частных случаев в этой задаче, для которых может быть найдено точное решение. Рассмотрим два из них. В обоих случаях тела описывают подобные между собой кеплеровские орбиты с фокусами в центре масс.

1. Тела образуют *лагранжеву конфигурацию* – равносторонний треугольник, который может пульсировать в своих размерах и вращаться в своей плоскости в постоянном направлении.

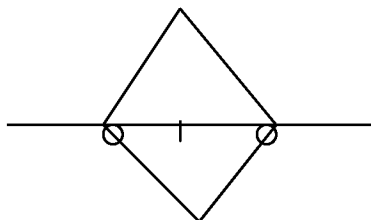


2. Тела образуют *эйлерову конфигурацию* и находятся на прямой, проходящей через центр масс, и оставаясь на ней, вращаются и пульсируют аналогичным образом. Этот случай был найден Л.Эйлером независимо от Лагранжа в 1767 году.



Если заданы массы тел и их положение на плоскости, то рассматриваемые частные случаи движения в этой плоскости получаются при рассмотрении третьего тела в одной из пяти точек, называемых *точками либрации* или *точками Лагранжа*.

Первые три точки либрации располагаются в определённых точках прямой, соединяющей обе заданные массы, причём одна между ними, а две другие – вне их. Четвёртая и пятая точки являются вершинами двух равносторонних треугольников, в которых остальные вершины заняты заданными массами.



Лагранж показал, что если третье тело находится в одной из пяти точек либрации, то конфигурация, которую образуют все три тела, всегда остаётся подобной самой себе, а их движение происходит по коническим сечениям одинакового вида.

1. Если тела находятся на одной прямой, то они обращаются, оставаясь на ней, вокруг общего центра масс.

2. Если три тела расположены в вершинах равностороннего треугольника, то они обращаются вокруг общего центра масс так, что треугольник остаётся всё время равносторонним.

В начале XX века были открыты две группы астероидов, движение которых соответствует второму решению Лагранжа. В 1907 году был открыт 588 Ахиллес, позднее ещё восемь “греков”, движущихся по соседству с Ахиллесом. Пять “троянцев” движутся с другой стороны. Эти астероиды находятся в точках либрации системы Солнце – Юпитер.

В системе Земля-Луна тоже существуют точки либрации. Эйлеровы называются коллинеарными, а лагранжевы – эквидистантными.

Точки либрации могут быть устойчивыми, лишь когда отношение масс больших тел достаточно мало.

Прямолинейные точки неустойчивы. Достаточно малой возмущающей силы, чтобы либроид удалился из окрестности данной точки. Треугольные точки будут устойчивыми почти для всех достаточно малых отношений масс. Неустойчивость может быть только в двух случаях, когда отношение масс равно одному из двух чисел – 0,0137 и 0,0249.

В 1961 году польский астроном К. Кордылевский наблюдал облакообразные скопления в треугольных точках системы Земля – Луна.

Точки либрации используются в космонавтике.

7.5 Задача n тел

Задача определения четырёх и более тел (задача n тел), притягивающих друг друга по закону Ньютона, ещё более сложна, чем задача трёх тел и в общем виде до сих пор не решена.

Задача N тел в общем виде формулируется следующим образом: “*В пустом пространстве помещено N свободных материальных точек, которые притягиваются друг к другу по закону Ньютона. Заданы их начальные координаты и начальные скорости. Определить последующее движение этих точек*”. Решение задачи одного тела даёт 1-й закон Ньютона: “*Всякое тело удерживается в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не побуждается приложенными силами изменить это своё состояние*”.

Задача двух тел тоже была решена И. Ньютоном и рассмотрена нами выше.

Для исследования движений n тел применяется метод вычисления возмущений, позволяющий найти приближённое решение задачи. Сейчас существует целый ряд методов для приближённого решения задачи, позволяющих для каждой конкретной системы тел с заданными конкретными начальными условиями построить траектории движения с любой нужной для практики точностью для любого ограниченного отрезка времени.

На ЭВМ было промоделировано движение пяти внешних планет Солнечной системы за 400 лет – с 1653 по 2060 год. Результаты вычислений совпали с данными наблюдений.

Однако конкретные численные методы не могут дать ответы на многие вопросы качественного характера, например:

- Будет ли одно из тел всегда оставаться в некоторой области пространства или сможет удалиться в бесконечность?
- Может ли расстояние между какими-либо двумя из этих тел неограниченно убывать, или, напротив, это расстояние будет заключено в определённых пределах?
- Распадётся ли когда-нибудь Солнечная система, если считать, что она состоит из тел, движение которых возмущается малыми силами со стороны всех остальных небесных тел?

Пьер Симон Лаплас в 1799–1825 гг. решал задачу о движении планет и их спутников под действием силы тяготения Солнца и их взаимного гравитационного воздействия. Лаплас учёл движения 18 тел. Он считал, что точное движение планет временами нарушается и необходимо внешнее вмешательство, чтобы восстановить порядок.

В.И. Арнольд доказал несколько теорем, по которым следует, что Солнечная система не распадётся ещё многие миллионы лет.

7.6 Открытие новых планет

В 1781 году Вильям Гершель открыл новую большую планету Уран, которую раньше принимали за звезду. К 1840 году стало ясно, что орбита Урана отличается от предсказанной по теории Ньютона. В орбите были заметны отклонения от теоретически вычисленной траектории.

Было сделано предположение, что, движение Урана возмущает какое-то массивное тело, находящееся за его орбитой.

Ж.Ж. Леверье и Дж.К. Адамс независимо друг от друга вычислили положение этого тела. Адамс дал свои вычисления в Гринвичскую и Кембриджскую обсерватории, но на них не обратили должного внимания.

Леверье сообщил о своём открытии в Берлинскую обсерваторию Иоганну Готфриду Галле. Он сразу начал поиски объекта и обнаружил его на расстоянии 10 от вычисленного. Это оказалась планета Нептун.

В 80-х годах нашего столетия на ЭВМ было промоделировано движение пяти внешних планет Солнечной системы за 400 лет – с 1653 по 2060 год. Результаты показали, что за орбитой Плутона нет никакой планеты, заметно возмущающей орбиты уже известных планет. Однако сам Плутон почти не влияет на орбиту Нептуна из-за своей малой массы. Если за орбитой Плутона находятся такие же маломассивные планеты, то их почти невозможно обнаружить. Однако, проведённый эксперимент, очевидно, доказывает, что нет звезды – гипотетической Немезиды, входящей как второй звёздный компонент в Солнечную систему.

Тема 8 Основы космонавтики

8.1 Космические скорости

Искусственные спутники Земли подчиняются тем же законам, что и естественные, но их орбиты имеют некоторые особенности.

ИСЗ выводятся на орбиту с помощью многоступенчатых ракет. Последняя ступень ракеты сообщает спутнику определённую скорость на заданной высоте h от поверхности Земли. Тело станет ИСЗ, если его скорость будет достаточной. Если скорость запуска точно равна круговой скорости на данной высоте h , то тело будет двигаться по круговой орбите. Если скорость превышает круговую, то тело будет двигаться по эллипсу, причём перигей эллипса окажется в точке выхода на орбиту.

Масса спутника очень мала по сравнению с массой Земли.

Круговая скорость спутника на расстоянии $r = R + h$:

$$v_c = \sqrt{fm/(R+h)} = \sqrt{gR^2/(R+h)},$$

где m – масса Земли, R – её радиус.

У воображаемого спутника, движущегося по окружности у самой поверхности Земли ($h = 0$), при $R = 6.378 \cdot 10^8$ см скорость должна быть равна

$$v_{1k} = 7,91 \text{ км/с.}$$

Это *первая космическая скорость* относительно Земли.

Из-за наличия у Земли атмосферы, спутник, движущийся у самой поверхности, реально существовать не может. Поэтому запуск ИСЗ производится на некоторой высоте $h > 150$ км.

Круговая скорость на высоте h меньше 1-й космической и определяется по формуле:

$$v_c = v_{1k} \sqrt{R/(R+h)}.$$

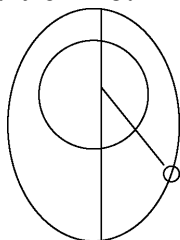
Элементы орбиты ИСЗ зависят от места и времени его запуска, от величины и направления начальной скорости.

Связь между большой полуосью орбиты спутника a и его начальной скоростью определяется по формуле:

$$v_0^2 = Gm(2/r_0 - 1/a),$$

где r_0 – расстояние точки выхода ИСЗ на орбиту от центра Земли.

Обычно запуск ИСЗ производится перпендикулярно к радиальному направлению.



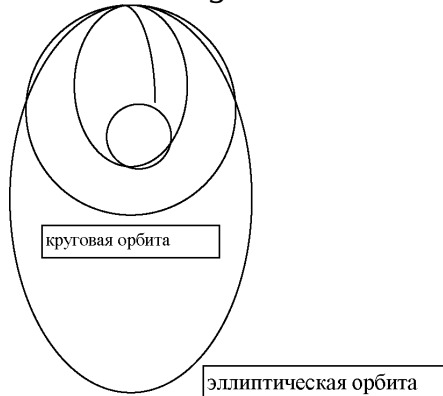
Эллиптическая орбита ИСЗ. Эксцентриситет при горизонтальном запуске: $e = 1 - q/a$, где q – расстояние перигея (ближайшей точки орбиты от центра Земли).

Расстояние апогея $Q = a(1+e) = R + h_A$. h_A – высота апогея над земной поверхностью.

Период обращения спутника вычисляется по третьему закону Кеплера:

$$T = 2\pi a^{3/2} / P\sqrt{g}.$$

при $R = 6370$ км и $g = 981$ см/с² – $T = 1,659 \cdot 10^{-4} a^{3/2}$ (мин)



Зависимость формы орбиты ИСЗ от начальной скорости, с которой он выведен на орбиту показана на рисунке.

Если в точке К спутнику сообщена горизонтальная скорость, равная круговой для этого расстояния от центра Земли, то он будет двигаться по круговой орбите (1). Если начальная скорость в точке К меньше круговой, то спутник будет двигаться по эллипсу (2), а при очень малой скорости по эллипсу (3), сильно вытянутому и пересекающему поверхность Земли. Выпущенный спутник упадёт на поверхность Земли, не совершив и одного оборота. Если скорость в точке К больше соответствующей круговой, но меньше параболической, то спутник будет двигаться по эллипсу (4).

Основные причины, изменяющие эллиптическую орбиту спутника – экваториальное утолщение Земли и влияние сопротивления Земли.

Вторая причина вызывает изменение высоты спутника и изменение формы орбиты. Основное сопротивление и уменьшение скорости спутника происходит вблизи перигея. Высота апогея спутника с каждым оборотом заметно уменьшается. Уменьшается большая полуось и орбита округляется. Когда высота апогея становится сравнимой с высотой перигея, спутник испытывает торможение, теряет свою скорость вдоль всей орбиты. Спутник приближается по спирали к поверхности Земли, входит в плотные слои атмосферы и сгорает.

Траектория космического аппарата состоит из двух основных участков – активного и пассивного. Движение на активном участке определяется тягой реактивных двигателей и притяжением Земли. Пассивный участок начинается с момента выключения двигателя последней ступени. На пассивном участке космический аппарат движется под действие притяжения Земли и других тел Солнечной системы.

Для того чтобы космический аппарат преодолел притяжение Земли и ушёл в космическое пространство, необходимо в начале пассивного участка сообщить ему скорость, равную или большую скорости

$$v = v_c \sqrt{2} = \sqrt{2Gm/(R+h)},$$

где h – высота начальной точки пассивного участка.

У поверхности Земли $h = 0$ и $v_{2k} = v_{1k} \sqrt{2} = 11,2$ км/с.

Это *вторая космическая скорость* относительно Земли.

Скорость космического аппарата в любой точке на пассивном участке (без учёта возмущений) определяется по формуле:

$$v^2 = Gm(2/r - 1/a).$$

Для того чтобы космический аппарат, преодолев притяжение Земли и войдя в сферу действия Солнца, не упал на его поверхность, он должен иметь в этот момент скорость относительно Солнца, отличную от нуля.

Скорость, при которой запущенный с Земли космический аппарат может уйти за пределы Солнечной системы, сильно зависит от направления выхода аппарата из сферы действия Земли по отношению к направлению орбитального движения Земли и лежит в пределах $16,6 \text{ км/с} < v_0 < 72,8 \text{ км/с}$.

Минимальная скорость $v_{3k} = 16,6$ км/с называется *третьей космической скоростью* относительно Земли.

8.2 Проблема межзвёздных перелётов

1. Межзвёздные перелёты имеют ряд существенных особенностей, сильно отличающих их от полётов в границах Солнечной системы.

Межзвёздные перелёты возможны лишь при скорости сравнимой со скоростью света. Согласно теории относительности А. Эйнштейна, время, текущее в корабле, проходит с иной скоростью, чем для людей, оставшихся на Земле.

Для космонавтов имеется возможность перелететь огромные расстояния, равные сотням и тысячам световых лет, и остаться в живых.

Пусть летательный аппарат движется с постоянным ускорением a и на половине пути до цели полёта начнёт тормозить с тем же ускорением.

Американский астроном Карл Саган приводит формулы для времени полёта t , по часам космонавтов:

$$t = \frac{2c}{a} \operatorname{arccch} \left(1 + \frac{aS}{2c^2} \right) - \text{где } S - \text{длина перелёта.}$$

По вычислениям, при $a = g$ космолёт долетит до ближайших звёзд за несколько лет, до ядра Галактики, удалённого на 30 000 св. лет – за 21 год, до Туманности Андромеды за 28 лет.

Пока корабль совершит свой перелёт в оба конца, на Земле пройдёт время равное удвоенному расстоянию до цели, выраженному в световых годах.

До туманности Андромеды и обратно космонавты будут лететь по земным часам 3 млн лет. До скопления галактик в Волосах Вероники – несколько сот миллионов лет.

Для межгалактических перелётов

$$t = \frac{2c}{a} \ln \left(\frac{aS}{2c^2} \right)$$

При $S = 2 \cdot 10^{26}$ см (расстояние до скопления в Com Ber) $t = 38$ лет.

Полёт с околосветовой скоростью сопряжён с огромными трудностями. Ускорение и замедление ракеты требует огромных ресурсов энергии. Трудности, возникающие при этом, вряд ли преодолимы.

При приемлемом для нас соотношении начальной массы ракеты M_0 к массе, оставшейся после выгорания горючего M_1 , скорость ракеты после выгорания горючего V составит лишь малую часть скорости света. Это будет даже при использовании ядерных реакций в качестве источника энергии.

Из формулы теории реактивного движения следует:

$$V/W = \ln(M_0/M_1),$$

где W – скорость выброса рабочего вещества ракеты.

Максимально возможная величина W при урановой реакции будет около 13 000 км/с.

Значит для того, чтобы скорость ракеты после выгорания горючего V была порядка скорости света, надо чтобы M_0 было в сотни раз больше чем M_1 , что неприемлемо. Значит только фотонная ракета, для которой $W = c$, может обеспечить межзвёздный полёт со скоростью, близкой c .

При этом возникают новые трудности.

Из теории реактивного движения следует, что ускорение ракеты b определяется:

$$b = 2P/W,$$

где P – отношение мощности двигателей ракеты к её полной массе.

В случае фотонной ракеты

$$b = P/c.$$

Если мы хотим, чтобы $b = g$, нужно чтобы $P = 3$ млн Вт/гр. Это очень большая величина.

При мощности двигателя 15 млн Вт (как у современной атомной подводной лодки) вес корабля должен был бы быть 5 граммов.

На современном уровне развития техники фотонные ракеты построить нельзя. Однако в 19 столетии собирались лететь на Луну с помощью парового двигателя. Может быть, в 21 веке откроются новые возможности.

Реактивные двигатели для межзвёздных полётов непригодны.

Бюссар выдвинул предположение, что можно будет использовать межзвёздную среду для термоядерного горючего. Звездолёту не придётся нести с собой запасы топлива.

Межзвёздный газ состоит из атомов водорода. На ракете нужно поставить термоядерное устройство, синтезирующее из ядер водорода ядра дейтерия. Особенностью этого летального аппарата является то, что поверхность всасывания межзвёздного газа должна быть очень большой. Если масса ракеты равна 100 т, то поверхность всасывания межзвёздного газа должна быть около 700 км. Очень большой трудностью является возможность столкновения

летательного аппарата, движущегося со световой скоростью, с атомами и пылинками межзвёздной среды.

При концентрации 1 атом на см^3 поток энергии в форме космических лучей через переднюю поверхность ракеты будет $2 \cdot 10^{11}$ эрг/ см^2 .

Экранирующие устройства вряд ли возможны.

Существует проект ионизации встречных атомов с помощью какого-то аппарата и отклонения их в сторону сильным магнитным полем.

2. Посещалась ли Земля инопланетянами в прошлом?

Анализируя многие легенды и мифы древности, можно предположить, что да. М.М. Агрест считает, что они могли оставить памятник о себе на обратной стороне Луны, чтобы человечество его рассмотрело только достигнув высокого уровня развития.

К. Саган считает, что в Галактике одновременно существует около 10^6 технически развитых цивилизаций. Время существования такой цивилизации может достигать 10^7 лет. Если каждая цивилизация ежегодно посылает один корабль для исследования космоса, то средний интервал между посещениями какой-нибудь звезды будет 10^5 лет.

Средний интервал между посещениями планеты с разумной жизнью будет меньше и составит несколько тысяч лет. Значит, на Земле могли быть такие посещения.

3. Можно не обязательно летать самим космонавтам и необязательно далеко. На расстоянии до ближайших инопланетных цивилизаций около 10 св. лет, подходят для жизни звёзды Эпс. Эридана, Тау Кита, Эпс. Индейца.

Если взять расстояние около 100 св. лет, то таких звёзд будет несколько тысяч. Для исследования ближайших планетных систем можно посылать автоматические зонды. Техника посадки зонда на круговую орбиту вокруг звезды уже разработана.

Высокоорганизованная цивилизация может посылать искусственные спутники ко многим ближайшим звёздам. Скорость движения может достигать 100–200 км/с. Эта скорость велика, но не сравнима со скоростью света, следовательно, не будет релятивистских эффектов.

Потребуется несколько столетий, чтобы вокруг всех звёзд на расстоянии 100 св. лет обращались искусственные спутники.

Методы астрофизических исследований. Цель астрофизики – изучение физической природы и эволюции отдельных космических объектов, включая и всю Вселенную.

За последние десятилетия она стала ведущим разделом астрономии.

Открытие спектрального анализа и изобретение фотографии в 19 веке, возникновение фотоэлектрии, радиоастрономии и внеатмосферных методов исследования в 20 в. привели к расцвету астрофизики. Астрономия стала всеволновой, т.е. наблюдения проводятся в любом диапазоне э/м волн.

Вместе с развитием практической астрофизики развилась и теоретическая, благодаря созданию теории излучения и строения атома.

Теоретическая астрофизика состоит из разделов, изучающих физику звёзд, Солнца, планет, туманностей, космических лучей, космологию.

В практическую астрофизику входят астрофотометрия, астроспектроскопия, астрофотография, калориметрия.

Новейшие разделы астрофизики – радиоастрономия, баллонная, рентгеновская, внеатмосферная, гамма-, нейтринная астрономия.

Тема 9 Яркость небесных тел. Астрофотометрия

9.1 Связь между яркостью объекта, его угловыми размерами и освещённостью, которая образуется в месте наблюдения

Основная задача астрофотометрии – изучение интенсивности излучений небесных тел.

Если космический объект обладает видимыми угловыми размерами, то определяется его *яркость*. Если он выглядит точкой, то определяется *блеск*.

Блеск точечного объекта, которым является звезда – это астрономический эквивалент понятия освещённости.

Пусть на площадку σ падает по перпендикулярному направлению поток излучения F . Тогда освещённостью E площадки σ называется отношение

$$E = F/\sigma.$$

Для измерения освещённости используется единица – люкс (лк). Это та освещённость, которую создаёт международная свеча на расстоянии, равном одному метру.

Освещённость, создаваемая на поверхности Земли Солнцем, близка к 135.000 лк, Луной – 0,25 лк, а светом ночного неба – 0,0003 лк.

Освещённость и блеск уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения.

Освещённость поверхности, перпендикулярной к падающим лучам, определяет *блеск* источника света.

Для измерения блеска в астрономии вводится понятие *звёздной величины*. Рассмотрим площадку S на поверхности светящегося тела. Пусть по перпендикулярному к ней направлению она испускает излучение, обладающее интенсивностью I .

Отношение I/S называется *яркостью* площадки.

Яркость не зависит от расстояния источника света от наблюдателя. При удалении светящейся площадки от наблюдателя, интенсивность излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но и видимая площадь убывает в этой же пропорции. Следовательно, их отношение, т.е. яркость, сохраняет свою величину.

Поэтому нельзя говорить “яркость звезды”.

Для измерения яркости используется величина *стильб* (сб). Это та яркость, которую имеет площадка в 1 см^2 , если сила испускаемого ею света равна одной международной свече.

Яркость поверхности Солнца около 150 000 сб, а диска полной Луны – 0,25 сб.

9.2 Формула Погсона

Видимая звёздная величина m или блеск является мерой освещённости E , создаваемой источником на перпендикулярной к его лучам поверхности в месте наблюдения.

Сложившееся ещё в древности деление видимых невооружённым глазом звёзд на «звёздные величины» есть отражение общего психофизиологического закона Вебера – Фехнера (чувствительность меняется как логарифм интенсивности раздражителя), определяющего изменение «ощущения» с изменением «раздражения». Связь m и E выражается формулой:

$$m = a + b \lg E,$$

где коэффициент $b = -2,5$ введён в середине 19 века английским астрономом Погсоном, подметившим, что у разных наблюдателей интервалу в 5 звёздных величин соответствует отношение световых потоков или освещённостей около 100. (Это правило было положено в основу шкалы зв. величин ещё Гиппархом). Он был принят равным 100, чтобы логарифм отношения освещённости был точно равен 0,400.

Тогда отношение

$$E_m / E_{m+1} = 2,512.$$

Величина a представляет нуль-пункт шкалы звёздных величин и устанавливается международным соглашением, связанным с выбором фотометрического стандарта. Сначала этим стандартом была звёздная величина Полярной звезды, потом – звёздные величины около 100 звёзд Северного Полярного Ряда.

По отношению к звезде стандарта по формуле

$$m_2 - m_1 = -2,5(\lg E_2 - \lg E_1)$$

можно определить блеск любого источника.

Блеск звезды связан с её видимой звёздной величиной формулой Погсона. Можем получить эту формулу таким способом.

Обозначим через l_n блеск звезды n -й величины.

Было введено ещё Гиппархом, что

$$l_1/l_2 = l_2/l_3 = l_3/l_4 = \dots = l_{n-1}/l_n = 2,512.$$

Перемножая соотношения, находим, что

$$l_1/l_4 = l_1/l_2 * l_2/l_3 * l_3/l_4 = 2,512^3.$$

Эти соотношения могут быть обобщены в следующем виде:

$$l_m/l_n = 2,512^{n-m}.$$

или, так как $\lg 2,512 = 0,4$, то

$$n - m = 2,5 \lg(l_m / l_n).$$

Числа m и n могут быть и дробными, так как звёздные величины не обязательно целые числа.

Современное определение звёздной величины:

$$m = -2,5 \lg \int_0^{\infty} E_{\lambda} f_{\lambda} d\lambda + C.$$

Здесь E_{λ} — освещённость, λ — длина волны, f_{λ} — спектральная чувствительность регистрирующей аппаратуры, C — постоянная, задающая нуль-пункт системы величин. Коэффициент $-2,5$ определяет шкалу звёздных величин и называется коэффициентом Погсона. Знак минус указывает на то, что при увеличении блеска зв. величина уменьшается.

Земная атмосфера поглощает значительную долю энергии, приходящей от астрономических объектов. Поглощение сильно зависит от длины волны, зенитного расстояния объекта, высоты обсерватории над уровнем моря и состояния атмосферы. Поэтому измерения исправляют на атмосферную экстинкцию. В таком случае E_{λ} определяет распределение энергии в спектре за пределами земной атмосферы.

9.3 Шкалы звёздных величин

Измеряя при помощи фотометра отношение блеска звёзд, можно определить разность звёздных величин по формуле Погсона. Нуль-пункт же выбирают условно, по соглашениям. При этом договорено, что бы стандартная звезда первой звёздной величины (средняя из 20 самых ярких звёзд) давала бы в 100 раз больше света, чем звезда шестой звёздной величины, находящаяся на пределе зрения.

За интервал в 1 звёздную величину (1^m) принято отношение освещённостей в 2,512 раза. Его десятичный логарифм равен 0,4, а интервал в 5^m соответствует соотношению в 100 раз.

Предел зрения невооружённого глаза около 6^m , в большой телескоп можно увидеть 19^m , а сфотографировать можно до 22^m .

Звезда первой величины ярче 21^m в 100 млн раз.

Звезда 23^m даёт меньше света в 630 млн раз чем 1^m .

Так как звёздная величина характеризует измеряемый поток излучения от светила, её определение можно распространить и на протяжённые объекты.

Измеряя освещённости, создаваемые Солнцем, полной Луной, планетами, можно найти соответствующие им звёздные величины.

Солнце	— $26^m,8$
Луна (полнолуние)	— $12^m,7$
Венера (наибольшая элонгация)	— $4^m,1$
Юпитер (в противостоянии)	— $2^m,4$
Сириус	— $1^m,46$

Число звёзд первой величины 20, второй — 60, третьей — 170, четвертой — 400, пятой — 1100, шестой — 4000 и т.д. Звёзд девятой величины насчитывается около 300 000.

После изобретения фотометра блеск звезды сравнивался с эталонной путём выравнивания последней до блеска первой.

Эти оценки делались глазом и называются визуальными зв. величинами.

9.4 Цвета звёзд

Звёздные величины, измеренные в разных участках спектра различаются между собой.

Цветовые характеристики системы звёздных величин определяются диапазоном длин волн, регистрируемых приёмником.

Глаз лучше всего воспринимает жёлто-зелёные лучи.

Звёздные величины, измеренные по фотографиям несколько отличны от визуальных.

Разность между фотографической и визуальной зв. величинами называется показателем цвета.

У белых звёзд показатель цвета условно равен нулю.

Фотографическая пластинка не воспринимает красные лучи, поэтому у красных звёзд показатель цвета будет положителен. Бывает, что красная звезда обладающая визуальной 5^m на фотопластинке выглядит как 8^m .

Звёздная величина, полученная на основании определения полной энергии, излучаемой во всём спектре, называется болометрической.

Результаты визуальных, фотографических, фотоэлектрических измерений потока излучений позволяют установить системы визуальных, фотографических, фотоэлектрических звёздных величин.

Визуальные и фотографические методы определения зв. величин не достаточно точны. Погрешность составляет 0,05.

Более точный метод – фотоэлектрический. Он определяет звёздные величины с ошибками от $0^m,01$ до $0^m,02$.

В фотоэлектрическом методе используется эффект, состоящий в том, что при освещении некоторых веществ в них возникает электрический ток, сила которого пропорциональна интенсивности падающего света. Измерения “световых” величин заменяются измерениями тока, которые производятся гораздо точнее.

В связи с этим были получены более удобные фотометрические системы звёздных величин.

Система U – определяет звёздные величины звёзд в ультрафиолетовой области спектра, со средней длиной волны 3640 Å.

Система В близка к фотографической области и отнесена к длине волны 4445 Å. Система V соответствует визуальной и относится к длине волны 5505 Å. Системы R и I соответствуют инфракрасной области.

Система UBVR_I была принята Международным астрономическим союзом в качестве стандарта.

Специально выбранные звёзды определяют нуль-пункт, от которого отсчитываются звёздные величины в каждом установленном цвете. Измеренные величины всех других звёзд сопоставляются с этими стандартами.

Цвет каждой звезды характеризуется показателем цвета.

У каждой звезды можно определить не один, а несколько показателей цвета $U - B$, $B - V$, $V - R$, $R - I$, т.е. сравнить интенсивность излучения в разных участках спектра.

В системе болометрических звёздных величин суммируются все излучение звезды во всех участках спектра.

Свет звёзд настолько сильно поглощается земной атмосферой в области длин волн короче 0,3 мкм, что нет никакой возможности использовать для этой области стандартную систему, если не наблюдать звёзды из космоса.

В настоящее время ведутся исследования на космических станциях, расположенных на околоземной орбите.

Но даже с космических станций трудно исследовать звёзды на длинах волн короче 0,09 мкм, главным образом из-за “галактического тумана”, образованного атомами нейтрального водорода межзвёздного газа, которые поглощают большую часть далёкого ультрафиолетового излучения за пределом Лаймана.

Земная атмосфера ставит значительные препятствия для наблюдения в некоторых длинах волн, так как интенсивно поглощает свет. Например, в диапазоне от до 4 мкм и вблизи 1.8 и 2.8 мкм свет поглощается, но вблизи 1.3, 2.2, 3.4 мкм существуют окна прозрачности.

Для удовлетворительных наблюдений иногда приходится выбирать сухую погоду, подниматься в горы на высоту более 2700 м, чтобы над инструментом находилось меньше паров воды.

От большей части атмосферного поглощения можно избавиться, производя наблюдения с самолётов, поднимающихся на высоту 12–15 км.

Важная задача фотометрии – установление на небе широкой и всеобъемлющей сети стандартных звёзд, для которых определены звёздные величины и цвета. Для этого должны быть произведены точные измерения с помощью определённых систем фильтров и фотоэлементов с постоянными свойствами.

Гарольд Джонсон произвёл подобные измерения для системы цветов UBV . Составленные им списки содержат данные о нескольких сотнях звёзд.

Для ближайших к нам звёзд показатель цвета непосредственно характеризует температуру звезды.

Температура может быть найдена по формуле:

$$T = 7200^\circ / (C + 0^m, 64).$$

Это цветовая температура звезды. Она только приблизительно характеризует истинную температуру звезды. Она зависит от использованных эффективных длин волн.

Бело-голубые звёзды с температурой поверхности 25 000 К излучают в голубых лучах гораздо интенсивнее, чем красные звёзды с температурой на поверхности 3000 К.

Свет далёких звёзд сильно краснеет из-за воздействия космической пыли, находящейся между звёздами.

Анализируя вид спектра звезды, часто можно сказать, каков был её показатель цвета до поглощения межзвёздной средой. Эта величина называется *истинным показателем цвета*.

Зная истинный показатель цвета, можно сравнить его с наблюдаемым и определить степень покраснения, вызванного космической пылью. Таким образом мы получим сведения о поглощении света пылью в системе Млечного Пути.

9.5 Абсолютные звёздные величины

Видимый блеск и видимая звёздная величина звезды зависят от её расстояния до наблюдателя r . Чтобы освободиться от влияния расстояния, введено понятие об абсолютном блеске и абсолютной величине звезды.

Абсолютным блеском звезды L называется тот блеск, который она имела бы, будучи удалена от наблюдателя на расстояние равное, 10 парсекам.

Так как освещённость убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, то абсолютный блеск L и видимый блеск l связаны соотношением:

$$L/l = r^2/100 = 2,512^{m-M}.$$

m – видимая звёздная величина, M – абсолютная звёздная величина, под которой понимают ту звёздную величину, которую бы имела звезда, будучи удалённой на расстояние, равное 10 парсекам.

Из указанного соотношения получаем формулу:

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

(или так как $r = 1/\pi$, $M = m + 5 + 5 \lg \pi$).

С учётом межзвёздного поглощения:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - A(r).$$

где $A(r)$ – поглощение света, пропорциональное расстоянию до звезды.

Эта формула позволяет вычислить абсолютную звёздную величину звезды, если известно расстояние, и вычислить расстояние, если известна абсолютная величина, по формуле:

$$\lg r = (m - M)/5 + 1.$$

Абсолютные звёздные величины могут быть болометрическими, визуальными, фотографическими.

Значения абсолютных звёздных величин заключены в пределах от $+18^m$ до -10^m . Солнце имеет абсолютную звёздную величину $+4,7^m$.

Часто используют *светимость звезды* – отношение абсолютного блеска звезды к абсолютному блеску Солнца.

Самые яркие звёзды ярче Солнца на 14^m , они испускают больше энергии в 1 000 000 раз. Самые слабые слабее на 14^m . Они испускают меньше энергии в 300 000 раз.

Отношение светимостей самых ярких и самых слабых звёзд достигает около 100 млрд.

Тема 10 Астрономические инструменты

10.1 Оптические телескопы

Первый телескоп использовал Г. Галилей. Его инструмент состоял из выпуклой и вогнутой линзы и увеличивал в 3 раза. Диаметр объектива был 4 см. Позднее Галилей построил телескоп с диаметром 4,5 см и увеличением 30 раз. Но даже с этим телескопом учёный смог сделать важнейшие открытия, потому что до него на небо в телескоп никто не смотрел.

В 1611 году И. Кеплер предложил другую систему телескопа, состоящую из двух двояковыпуклых линз.

При наблюдениях сильно мешают aberrации (хроматическая, сферическая, кома, астигматизм, дисторсия). Их можно ослабить, введя комбинированные объективы.

Было замечено, что при увеличении фокусного расстояния объектива хроматическая и сферическая aberrации уменьшаются. Поэтому в 17–18 веках строили очень длиннофокусные телескопы. Трубы имели размеры 30–40 метров. Самый большой телескоп построил французский астроном Озу. Он был длиной 98 метров. Однако качества этого инструмента были плохими.

С помощью таких воздушных телескопов было сделано много открытий. Гевелий (каталог звёзд, селенография), Кассини (спутники и щель кольца Сатурна, полярные шапки Марса и полосы Юпитера), Гюйгенс (полосы Юпитера) провели очень много ценных исследований.

Самые большие рефракторы были построены Альваном Кларком. В 1888 году на Ликской обсерватории был установлен телескоп с диаметром 92 см. Деньги на его строительство выделил миллионер Джеймс Лик.

Ещё больший телескоп был установлен в Йеркской обсерватории на деньги Чарльза Йеркса. Он имеет 102 см в диаметре. На этой величине рефракторы себя истощили.

Дальнейшее увеличение диаметра телескопа приводит к деформации линзы под собственной тяжестью и технически трудноосуществимо.

Рефлекторы были описаны теоретически в 1616, 1638 и 1663 годах, но построен первый зеркальный телескоп был лишь И. Ньютоном в 1668 году. Зеркало имело диаметр 2,8 см. Фокусное расстояние было 6,5 см. Увеличение – 40 раз. Главное преимущество рефлекторов – отсутствие хроматической aberrации. При параболическом зеркале можно уничтожить и сферическую aberrацию. Больших успехов в наблюдениях с рефлекторами добился В. Гершель. Он создал 47 см. и 122 см. зеркала. Со своими инструментами он открыл много туманностей, двойных звёзд, планету Уран.

Большой телескоп диаметром в 2 м сделал лорд Росс в 1842 году. На этом телескопе было открыто спиральное строение галактик.

Маунт-Паломарский рефлектор имеет диаметр 5 м, фокусное расстояние 16,5 м. Масса главного зеркала составляет 15 тонн.

В СССР был построен 6 м. рефлектор в 1974 году. Зеркало с трубой весят 300 тонн. Фокусное расстояние главного зеркала 24 м. предельная зв. величина – 24.

Основные характеристики телескопов. Оптические телескопы предназначены для того, чтобы:

1. Собрать как можно больше света от далекого предмета.
2. Создать вблизи от наблюдателя изображение далекого предмета и позволить таким образом различить подробности, недоступные невооруженному глазу. Существуют сложные системы оптических телескопов, объединенные в три группы:

- линзовые телескопы – рефракторы;
- зеркальные телескопы – рефлекторы;
- зеркально-линзовые.

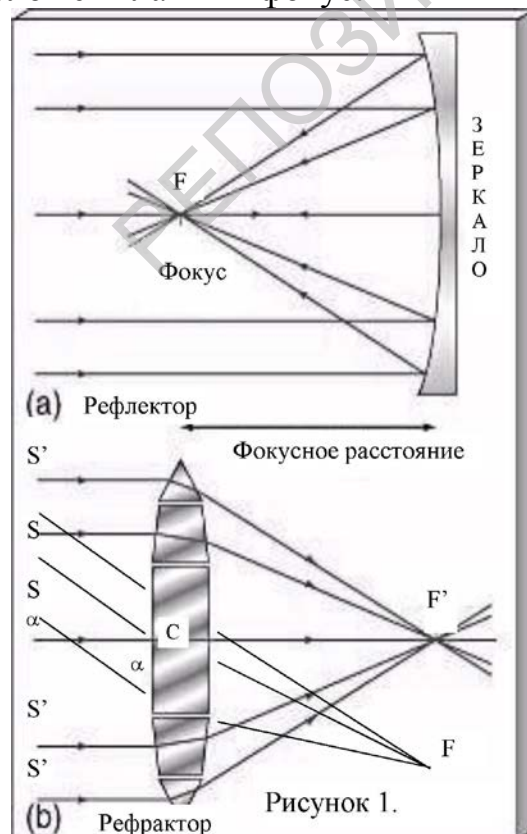
В рефракторах свет собирается объективом, состоящим из линз.

В рефлекторах объективом служит вогнутое зеркало, которое называется главным зеркалом.

В зеркально-линзовых телескопах одновременно применяются линза и зеркало. При визуальном наблюдении в фокальной плоскости объектива устанавливается окуляр – короткофокусная система линз.

Вместо окуляра можно установить чувствительный приемник излучения: фотопластинку, ФЭУ и т.д.

Фокусное расстояние F . Пусть линза (рис. 1) есть объектив, на который падают лучи от звезды. Прямая, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей объектива, будет его главной оптической осью; в точке F' расположен главный фокус.



На рис. 1 показаны лучи, идущие от другой звезды, находящейся в стороне от главной оси. Изображение этой звезды окажется в стороне от главной оси в точке F' , лежащей в фокальной плоскости. Из чертежа ясно, что если смотреть из центра объектива, то угловые расстояния между небесными телами (или между двумя точками одного тела) и их изображениями равны, т.к. $\angle FCF' = \angle SCS'$.

Обозначив эти углы буквой α , мы можем написать уравнение:

$$FF' = F'C \operatorname{tg} \alpha.$$

Ввиду малости угла α : $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$. Тогда $FF' = F'C \alpha$, где α выражается в радианах. Из этого уравнения следует, что одному и тому же угловому расстоянию на небе будет соответствовать тем большее изображение FF' , чем большее расстояние $F'C$, т.е. фокусное расстояние объектива.

Проницающая сила телескопа. Видимая звездная величина наиболее слабой звезды, доступной телескопу, определяет его проницающую силу. У зрачка глаза человека при наблюдении ночного неба диаметр $d = 6$ мм, и для человека со средним зрением доступны наблюдению звезды до $6^m,5$ видимой звездной величины. Объектив диаметром D мм собирает света в $(D/d)^2$ раз больше, и поэтому в него видны звёзды во столько же раз более слабые. Видимая звездная величина таких звезд определяется формулой Погсона:

$$m_t = m + 5(\lg D - \lg d),$$

откуда

$$m_t = 5 \lg D(\text{мм}) + 2,1.$$

Относительное отверстие А. Важнейшей величиной, характеризующей объектив, является отношение диаметра входного отверстия объектива к его фокусному расстоянию, которое называется относительным отверстием.

$$A = D/F.$$

Количество света, собранное объективом от звезды (точечного источника), будет зависеть только от входного отверстия ($\sim D^2$). Иначе обстоит дело с объектами, имеющими заметные угловые размеры, например, с планетами. В этом случае видимая яркость изображения будет уменьшаться, в то время как при наблюдении точечных объектов – увеличивается $\sim D^2$. В самом деле, при увеличении фокусного расстояния F пропорционально увеличиваются и линейные размеры изображения такого светила. При этом количество света, собираемое объективом при неизменном D , остается прежним. Одно и то же количество света распределяется, следовательно, на большую площадь изображения, которое растет $\sim F^2$. Таким образом, при увеличении F (или, что то же: при уменьшении A) вдвое, площадь изображения увеличивается вчетверо. Количество света на единицу площади, которое определяет яркость изображения, уменьшается в том же отношении. Поэтому изображение будет тускнеть при уменьшении относительного отверстия.

Совершенно такое же действие окажет и окулярное увеличение, понижающее яркость изображения в том же отношении, что и уменьшение относительного отверстия A объектива.

Поэтому для наблюдения самых протяженных объектов (туманностей, комет) предпочтительно слабое увеличение, но, конечно, не ниже наименьшего полезного. Оно может быть значительно повышено при наблюдении ярких планет, и в особенности Луны.

Увеличение телескопа. Если обозначить фокусное расстояние объектива через F и фокусное расстояние окуляра через f , то увеличение M определится формулой:

$$M = F / f .$$

Наибольшее допустимое увеличение при спокойном состоянии атмосферы не превышает $2D$, где D – диаметр входного отверстия.

Диаметр выходного зрачка. Наблюдаемый предмет виден в телескоп отчетливо лишь в том случае, если окуляр установлен на строго определенном расстоянии от фокуса объектива. Это такое положение, при котором фокальная плоскость окуляра совмещена с фокальной плоскостью объектива. Приведение окуляра в такое положение называется наводкой на фокус или фокусировкой. Когда телескоп наведен на фокус, то лучи от каждой точки предмета выходят из окуляра параллельными (для нормального глаза). Световые лучи от изображений звезд, образованные фокальной плоскостью объектива, превращаются окуляром в параллельные пучки.

Площадка, где пересекаются световые пучки звёзд называется выходным зрачком. Наведя телескоп на светлое небо мы легко можем увидеть выходной зрачок, поднеся к окуляру экран из кусочка белой бумаги. Приближая и удаляя этот экран, мы найдем такое положение, при котором светлый кружочек имеет наименьшие размеры и в то же время наиболее отчетлив. Легко понять, что выходной зрачок есть не что иное, как изображение входного отверстия объектива, образованное окуляром. Из рисунка 2. видно, что

$$\frac{D}{d} = \frac{F}{f} = M \Rightarrow d = \frac{D}{M} .$$

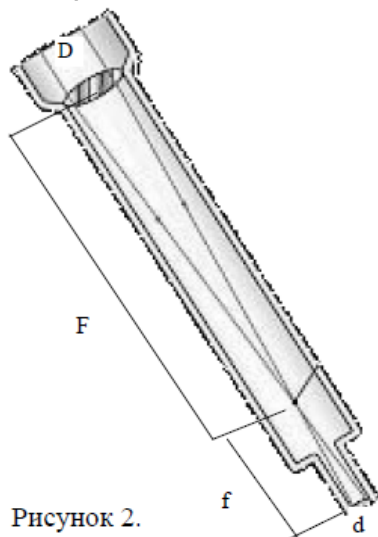


Рисунок 2.

Последнее отношение позволяет определить увеличение, даваемое телескопом, если не известны ни фокусное расстояние объектива, ни фокусное расстояние окуляра.

В выходном зрачке концентрируется весь свет, собираемый объективом. Поэтому заслоняя часть выходного зрачка, мы как бы заслоняем часть объектива. Отсюда вытекает одно из важнейших правил: *выходной зрачок не должен быть больше зрачка глаза наблюдателя, иначе часть света, собранная объективом, будет потеряна.*

Из определения выходного зрачка следует, что величина его тем меньше и он тем ближе к окуляру, чем короче фокусное расстояние окуляра (чем "сильнее" окуляр), и наоборот.

Определим увеличение, которое дает окуляр, образующий выходной зрачок, равный зрачку глаза (наименьшее полезное или равнозрачковое увеличение m):

$$m = D/\delta,$$

где δ – диаметр зрачка глаза или

$$m = \frac{D}{d} = \frac{F}{f},$$

$$f = \frac{f\delta}{D}$$

Величина поля зрения. Угол, под которым диафрагма окуляра видна наблюдателю, называется угловым полем зрения окуляра, в отличие от углового поля зрения телескопа, представляющего угловой поперечник видимого в телескоп кружка на небе.

Величина поля зрения телескопа равна величине поля зрения окуляра, деленной на увеличение.

Разрешающая способность телескопа. Из-за явления дифракции на краях объектива звезды видны в телескоп в виде дифракционных дисков, окруженных несколькими кольцами убывающей интенсивности. Угловой диаметр дифракционного диска:

$$\Theta = \lambda/D,$$

где λ – длина световой волны и D – диаметр объектива. Два точечных объекта с видимым угловым расстоянием Θ находятся на пределе раздельной видимости, что определяет теоретическую разрешающую способность телескопа. Атмосферное дрожание снижает разрешающую способность телескопа до:

$$\Theta = 1.22 \lambda/D.$$

Разрешающая способность определяет способность различить два смежных объекта на небе. Телескоп с большей разрешающей способностью позволяет лучше увидеть два близко расположенных друг к другу объекта, например, компоненты двойной звезды.

Лучше также можно увидеть детали любого одиночного объекта.

Когда угловая разрешающая способность мала, объекты выглядят как одиночное размытое пятно. С увеличением разрешающей способности два источника света станут различимыми как отдельные объекты.

10.2 Радиотелескопы

В 1931 году Карл Янски заметил, что на волне 14,7 метров существуют постоянные помехи радиопередачам с периодичностью, равной звёздным суткам, т.е. обороту Земли вокруг оси. Было обнаружено, что помехи исходят из созвездия Стрельца, где находится направление на центр Галактики.

Вторая мировая война способствовала развитию радиотехники и радиоастрономии.

Радиоастрономия использует сейчас самые чувствительные приёмные устройства и самые большие антенные системы.

Человеческий глаз принимает волны, длина которых лежит в пределах от 400 до 760 нм.

Радиоволны имеют большую длину.

Всякое нагретое тело излучает радиоволны. Однако земная атмосфера пропускает не все радиоволны. Существуют полосы поглощения и отражения, так волны длиннее 30 метров отражаются ионосферой.

Те же волны, которые проходят через атмосферу изучаются с помощью радиотелескопов.

Радиотелескопы устроены наподобие рефлекторов. Излучение собирает металлическое зеркало, сплошное или решетчатое. Форма зеркала – параболическая. Принимает излучение высокочувствительный радиоприёмник. Волны, падая на облучатель, возбуждают электрический ток. Ток передаётся по волноводам на приёмное устройство и исследуется. К приёмнику присоединяется самопишущий прибор, который регистрирует поток радиоволн определённой длины. Зеркала радиотелескопов значительно больше, чем у оптических. Один из самых больших подвижных телескопов имеет размер 76 метров.

Неподвижное зеркало в Аресибо имеет диаметр 300 метров.

В СССР самый большой радиотелескоп имеет диаметр 600 метров и состоит из кольца, составленного из 895 подвижных алюминиевых отражателей. Этот телескоп рассчитан на приём радиоволн с длиной от 8 мм до 30 см.

В радиотелескопах, рассчитанных на приём волн в несколько метров, зеркала делаются сетчатыми. Если размеры ячеек малы по сравнению с длиной волны, то зеркало работает как сплошное.

Меняя облучатель, можно настраивать телескоп на разные длины волн.

Прогресс в развитии радиоастрономии во многом связан с успехами теоретического объяснения радиоизлучения космических объектов. Было доказано, что причиной “нетеплового” радиоизлучения являются космические лучи (электроны высоких энергий). Эти электроны, двигаясь в слабых магнитных полях, генерируют радиоволны различных частот.

Было объяснено, что протяжённые компоненты радиоизлучения источников, связанных с радиогалактиками, это намагниченные облака разреженного газа, наполненные космическими лучами.

В большей или меньшей степени радиоизлучательной способностью обладают все галактики.

В активных радиогалактиках основной причиной радиоизлучения является мощная генерация релятивистских частиц в области ядер этих галактик. Выделяется два источника радиоизлучения – точечный в ядре галактики и протяжённый.

Радиоизлучение галактики Лебедь-А, находящейся на расстоянии 750 млн св. лет сравнимо с солнечным, при удалении Солнца от нас на расстояние 8 св. мин. мощность источника Лебедь-А в 10^{28} раз превосходит солнечное радиоизлучение.

10.3 Радиointерферометры со сверхдлинной базой

Радиointерферометр – состоит из двух одинаковых радиотелескопов, разделённых расстоянием (базой) и соединённых между собой электрическим кабелем, к середине которого присоединён радиоприёмник.

От источника радиоизлучения на оба радиотелескопа непрерывно приходят радиоволны. Попадающие на разные телескопы, они преодолевают неодинаковое расстояние. Эта разница называется разность хода. Если в неё укладывается чётное число радиоволн, то волны усиливаются.

В 1976 году радиотелескопы Крымской и Хайсптекской (США) обсерваторий составили один радиointерферометр. Его база была равна многим тысячам километров. Разрешающая способность достигла 0,0001. Под таким углом виден с Земли на Луне след ноги космонавта.

В результате исследований в ядрах галактик и квазарах были обнаружены взрывные процессы большой активности.

Рассматриваются проекты размещения радиотелескопов на спутниках, тогда база достигнет ещё большего значения.

Применение радиointерферометров позволило получить высокое разрешение многих радиогалактик. При этом выяснилось, что 75% изученных источников – это двойные системы. Так источник Лебедь-А оказался состоящим из двух компонент, симметрично расположенных по обе стороны от оптической галактики, с которой он был отождествлён. Линейные размеры каждого из компонент 100 000 св. лет, а расстояние между ними 300 000 св. лет.

В 1995 году учёные из Гарварда и Хейстекской обсерватории во главе с Д. Лебахом попытались подтвердить ОТО А.Эйнштейна с помощью радиointерферометра. Они наблюдали отклонение радиолучей вблизи Солнца при прохождении солнечного диска вблизи внегалактического радиоисточника 3C279. Использовались две антенны, одна в Массачусетсе, другая в Калифорнии. В пределах ошибок наблюдений ОТО подтвердилась.

10.4 Современные телескопы (новые технологии и методы)

Существует несколько проектов постройки больших телескопов, с диаметром зеркала 10, 18, 25 метров.

Однако возникают большие сложности в поворачивании этих инструментов при наблюдении за звёздами. Обзор неба будет небольшой. Для телескопа с диаметром 18 метров предполагается неподвижная конструкция, он будет направлен в одну точку и его поле зрения будет небольшим.

Есть проекты строительства составных телескопов из нескольких зеркал. При этом значительно уменьшается масса. Зеркало 6-м телескопа весит 42 тонны, а если сделать такое зеркало из составных частей, то вес будет равен 6,5 тонн. Планируется строительство 25-м телескопа из зеркал диаметром 8 метров. На этом инструменте можно будет наблюдать звёзды до 32 величины.

Сейчас достраивается 10-метровый телескоп "Кек". Он делается по системе Ричи-Кретьена с 36-сегментным главным зеркалом. С помощью нового телескопа удалось обнаружить самый далёкий объект Вселенной – квазар PC 1247+3406 в Гончих Псах.

Мексика и США создают большую радиоантенну с диаметром 50 м (сост. из 126 индивидуально корректируемых сегментов) для миллиметровой астрономии. Телескоп вступит в строй в 2000 году. Он будет изучать волны с длинами от 1 до 4 мм. В этом диапазоне лежит излучение многих молекул, присутствующих в межзвёздных облаках, в которых происходит формирование звёзд и планет. С помощью этого телескопа будут изучаться дальние планеты Солнечной системы, кометы, астероиды, энергично эволюционирующие звёзды, ядра активных галактик, скрытых слоем пыли.

В Чили, в Кордильерах, на вершине горы Параналь, на высоте 2600 метров над уровнем океана, находится самая мощная на планете Европейская Южная обсерватория. Уже вступил в действие первый телескоп. Размер зеркала – 8,2 метра в диаметре. Зеркало отлила в г. Майнце фирма "Шотт". Вес зеркала – 24 тонны. Толщина – 18 см.

Это зеркало легко гнётся и лежит на 150 гидравлических подвижных опорах, находящихся под контролем компьютера. С помощью точно рассчитанного давления опора то поднимается, то опускается и выгибает в нужном направлении зеркало. Простым глазом такие коррекции изображения уловить невозможно: наибольшее отклонение, получаемое благодаря подвижным опорам, может достигать трех сотых миллиметра.

К 2002 году намечено сооружение еще трех телескопов, но их зеркала будут меньше по размеру – трехметрового диаметра. Все четыре прибора могут работать вместе – ансамблем. Лучи света от звезды или какого-либо другого объекта, пойманные четырьмя телескопами, пересекутся в туннеле под обсерваторией. Световые колебания всех четырех лучей должны быть совмещены с точностью миллионной доли миллиметра. Будет создан интерферометр, который обеспечит разрешающую способность такую же, как

зеркало диаметром в 200 метров. Разрешение будет таковым, что можно будет рассмотреть фары автомобиля, находящегося на Луне.

Список задач, стоящих перед новой обсерваторией на горе Параналь, обширен. Астрономам предстоит определить с высокой точностью траектории нескольких сотен звезд с тем, чтобы узнать, есть у звезды спутники или их нет.

Обсерватория должна будет зарегистрировать слабосветящиеся звезды и "коричневые карлики". Это поможет определить массу "темной материи" в космосе. Телескоп должен будет исследовать центр Млечного Пути и измерить скорость движения находящихся в нем звездных скоплений. Это подскажет местонахождение центральной черной дыры.

Стоимость всего проекта – один миллиард немецких марок. В строительстве участвуют Бельгия, Дания, Германия, Франция, Италия, Голландия, Швеция и Швейцария. Стоимость обсерватории много меньше, чем только ремонт в космосе орбитального телескопа Хаббла. А разрешающая способность нового астрономического инструмента в десять раз превосходит Хаббловскую.

10.5 Астрономические наблюдения со стратосферных и космических обсерваторий

Наземные обсерватории не могут работать в полную силу из-за атмосферных помех. Постоянное движение воздушных масс размывает, портит изображение небесных тел. Приходится применять ограниченные увеличения (не более чем 500х).

Из-за непрозрачности атмосферы для многих диапазонов э/м волн можно изучать небо в узких щелях.

В 1870 году француз Ж. Жансен исследовал Солнце с воздушного шара.

Позднее использовались самолёты для наблюдений, особенно затмений. Самолёт летел за лунной тенью и продлевал время затмения.

С 1951 года О. Дольфюс совершил ряд высотных полётов на воздушных шарах. В 1969 году его стратостат достиг высоты 13 км. Дольфюсу удалось сфотографировать спектр Венеры, найти в составе её атмосферы водяные пары.

В 1957 году М. Шварцшильд начал запускать стратостаты без людей. Один из них взлетел на высоту 24 км и поднял на борту управляемый по радио 36дюймовый телескоп.

На высоте 34 км влияние атмосферы на наблюдения сводится к нулю.

Удалось получить хорошие фотографии Солнца, были детально рассмотрены гранулы, пятна. В инфракрасных частях спектра некоторых холодных звёзд удалось заметить полосы воды.

С помощью стратостатов впервые были получены ультрафиолетовые спектры сотен звёзд.

С 1972 года на высоты 30-35 км запускаются сотни шаров.

Астрономы используют для исследований и ракеты. Ещё в 1946 году группа американских астрономов установила спектрограф на одну из трофейных ракет "Фау-2" и отправила ракету на высоту 200 км.

В настоящее время широко используются обсерватории, помещённые на спутниках, вращающихся вокруг Земли.

Для наблюдений Орбитальные Астрономические Обсерватории используют специальные системы стабилизации.

Американская ОАО “Коперник”, запущенная в 1972 году сохраняет в течение часа нужное направление с точностью до $0,1''$.

В настоящее время на орбите работает Космический Телескоп им. Хаббла, состоящий из рефлектора с диаметром зеркала 2,4 метра. Точность стабилизации составляет $0,005''$. Телескоп находится на орбите 600 км от Земли. В 1995 году была проведена коррекция телескопа, после чего он стал работать намного лучше. В него видны звёзды 29 зв. величины. В декабре 1994 года была осуществлена экспозиция в 18 часов и была достигнута 29 зв. величина.

Препятствия для наблюдений всё же остаются. Мешает рассеянный свет межпланетной и межзвёздной пыли. Оптику портит бомбардировка метеоритами и частицами космических лучей.

10.6 Инфракрасная астрономия

Между радиодиапазоном и участком видимого спектра располагается область инфракрасных лучей.

Впервые исследовал её Вильям Гершель в 1800 году, наблюдая Солнце через различно окрашенные темные стёкла.

Он разложил солнечный свет в спектр и измерял температуру каждого участка. Температура возрастала к красной части спектра. За красной частью, где глаз не видел уже никаких лучей, температура оставалась высокой.

Так были открыты инфракрасные лучи.

С помощью анализа инфракрасного излучения от планет были сделаны важные открытия. Так в атмосферах Марса, Венеры, Юпитера обнаружен углекислый газ.

Инфракрасное излучение раньше меряли при помощи термоэлемента, болометра, а сейчас применяют более современные методы – с использованием элемента Голея и полупроводниковых кристаллов.

Земная атмосфера сильно мешает инфракрасной астрономии, так как не только сильно поглощает инфракрасные лучи, но и сама является их источником. Поэтому приходится наблюдать с помощью космических аппаратов и стратосферных зондов.

В конце 1960-х годов Стронг и Дольфус с помощью аппаратуры, установленной на воздушном шаре обнаружили полосы поглощения водяных паров в инфракрасном спектре Венеры. Это значит, что над облачным слоем Венеры содержится слой водяных паров, в 100 раз меньше чем над поверхностью Земли. Была составлена инфракрасная карта Венеры и обнаружены несколько горячих пятен около южного полюса. такие пятна бывает появляются и исчезают через 20-25 часов.

Изучение Юпитера показало, что температура красного пятна на два градуса ниже остальной поверхности.

Полосы Юпитера на инфракрасной карте не видны, значит, их температура никак не выделяется среди остальных областей.

При наблюдениях Луны в инфракрасном диапазоне было обнаружено, что на её поверхности есть горячие пятна, совпадающие с молодыми кратерами.

Звёздная карта, составленная в инфракрасном диапазоне сильно отличается от видимой простым глазом. Самыми яркими выглядят красные холодные звёзды, хорошо заметно ядро Галактики. Вблизи центра Галактики обнаружен мощный источник инфракрасного излучения, поток излучения которого превышает солнечный в 300 000 раз. Сильными источниками такого излучения являются квазары.

10.7 Ультрафиолетовая, рентгеновская и гамма-астрономия

Коротковолновый участок спектра, отделённый от длинноволнового зоной видимых глазом лучей, состоит из трёх типов излучений – ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения.

Часть астрономии, использующую эти лучи, называют астрономией высоких энергий.

Ультрафиолетовое излучение регистрируется с помощью фотопластинок со специальной эмульсией, чувствительной к ультрафиолетовым лучам.

Это излучение очень слабо. В атмосфере Венеры были обнаружены ультрафиолетовые пятна, которые обладают другим периодом обращения, чем определённый по методам радиолокации. Возможно, появление пятен вызвано атмосферными вихрями или потоками.

Интенсивным источником ультрафиолетового излучения является туманность Северная Америка в созвездии Лебедя.

Самым мощным источником ультрафиолетового излучения является звезда Дзета Кормы. Её яркость в ультрафиолетовом диапазоне сравнима с яркостью Венеры. Далее следует Дзета Ориона. Ярким ультрафиолетовым источником является Туманность Ориона.

Для длин волн меньше 2000 А обычные преломляющие и отражающие системы непригодны. Кванты становятся очень энергичными, пробивают все материалы, не изменяя первоначального направления полёта.

Рентгеновское, гамма- излучение регистрируют с помощью счётчиков, применяемых при изучении космических лучей. Простейший прибор – счётчик Гейгера – Мюллера.

Рентгеновский телескоп устроен по такому же принципу. Недостатком его является охват большого участка неба, в несколько градусов, и невозможность выделить точечный конкретный источник излучения.

При изучении Солнца удаётся создать приборы, дающие разрешение близкое к 1 минуте дуги.

Изучение рентгеновского излучения Солнца при затмениях показало, что его источником является солнечная корона. Корона имеет высокую температуру, близкую к миллиону градусов и порождает рентгеновское излучение. Когда на Солнце возникает хромосферная вспышка, рентгеновское излучение увеличивается сотни раз.

В 1963 году американская ракета “Аэробы” зафиксировала на звёздном небе два мощных источника рентгеновского излучения. Один находится в созвездии Тельца и связан с Крабовидной туманностью, другой расположен в созвездии Скорпиона. Оба эти источника связаны со вспышками сверхновых звёзд. Изучение явления покрытия луной Крабовидной туманности показало, что источником рентгеновского излучения является не нейтронная звезда, находящаяся в центре туманности, а сама туманность. Лучи зарождаются в ней при торможении в магнитных полях быстрых электронов. Лучи посылаются центральной частью туманности.

Сейчас известны сотни источников рентгеновского излучения. Они намного слабее рассмотренных выше. Почти все источники расположены в Млечном Пути, в созвездиях Стрельца, Лебедя, Змеи и др.

По оценкам И.С. Шкловского расстояния до них составляет десятки тысяч св. лет.

Источниками рентгеновского излучения являются часто нейтронные звёзды, входящие в двойные системы.

Возможность возникновения гамма астрономии была высказана в 50-х годах теоретически. В 1952 году Хайякава обратил внимание на возможность изучения ядерной компоненты космических лучей методами гамма астрономии. При неупругом взаимодействии “космических” ядер с ядрами атомов межзвёздного газа возникают нейтральные пи-мезоны, которые, распадаясь, дают гамма кванты с энергией, превышающей несколько десятков МэВ.

Преимуществом гамма астрономии по сравнению с астрономией на других спектральных диапазонах должна быть большая проникающая способность гамма квантов. При прохождении кванта вдоль всей галактической плоскости вероятность его поглощения меньше 1%.

Впервые космические гамма кванты с энергией больше 50 МэВ от полосы Млечного Пути были зарегистрированы в 1972 году. Интенсивность гамма-излучения Млечного Пути растёт к галактическому центру.

Было обнаружено гамма-излучение у Крабовидной туманности.

В 1970-х годах были запущены ИСЗ с гамма-детекторами, изучавшие излучение в плоскости Млечного Пути. Выявлено большое усиление интенсивности по направлению к галактическому центру. Всплески наблюдаются в районе Крабовидной туманности, созвездия Парусов, Наугольника, Ориона.

Источниками гамма-излучения могут быть:

- а) взаимодействие ядерной компоненты космических лучей с ядрами межзвёздных атомов;
- б) тормозное излучение релятивистских электронов, входящих в состав космических лучей, при столкновении с атомами межзвёздной Среды;

в) взаимодействие релятивистских электронов с фотонами звёздного излучения, заполняющими межзвёздное пространство;

г) взаимодействие с низкочастотными квантами “реликтового” излучения, заполняющего всю Вселенную;

д) синхротронное излучение в гамма-диапазоне, обусловленное движением ультрарелятивистских электронов в космических магнитных полях. Гамма-кванты, попадая в земную атмосферу, вызывают каскад размножающихся вторичных частиц, прежде всего очень энергичных электронов. Они в свою очередь вызывают вспышки “черенковского” излучения. Для изучения гамма-излучения применяют черенковский счётчик. В современных земных гамма-телескопах регистрируется излучение участка неба поперечником 30–35°. Локализовать источник излучения удаётся при наблюдении с ИСЗ, особенно если одновременно наблюдают два или три спутника. В первом случае выделяется полоса, в которой находится источник, во втором – ромб.

Чем дальше друг от друга находятся спутники, тем точнее локализация.

5 марта 1979 года удалось зарегистрировать мощный гамма-импульс от туманности N 49, находящейся в Большом Магеллановом Облаке, на расстоянии 55 000 пс от Земли. По предположениям импульс исходил с периодом 8 с от нового пульсара. Большинство же локальных гамма-источников, предположительно, – старые пульсары.

Спутник “COS-B” обнаружил гамма-излучение от квазара 3C 273, удалённого на 500 Мпс.

Комптоновская гамма-обсерватория и ИСЗ Ulysses зарегистрировали 17.02.1994 мощную вспышку гамма-излучения. Эта вспышка продолжалась очень долго – более часа, в течение этого времени мощность гамма-излучения была в 12 раз больше максимальных значений, зафиксированных в прошлом. Энергия гамма-квантов составила 25 млрд эВ. Некоторые астрономы считают, что это случилось в результате столкновения двух звёзд. Окончательно феномен не раскрыт.

10.8 Понятие о методах нейтринной астрономии

Нейтрино предсказал в 1931 году Вольфганг Паули. Его ввели, чтобы устранить кажущееся нарушение закона сохранения энергии при бета-распаде. Энергия вылетающих электронов не всегда одна и та же, меняется в широком диапазоне. Паули предположил, что вместе с электроном из радиоактивного ядра вылетает частица, уносящая недостающую энергию.

Свойства нейтрино были очень необычны. При отсутствии электрического заряда оно должно было иметь очень малую массу.

В 1957 году было зарегистрировано первое нейтрино.

Нейтрино образуется при всех ядерных процессах. Значит, оно возникает в недрах всех звёзд, как побочный продукт ядерных реакций, которые обеспечивают их свечение.

Нейтринное излучение Солнца по энергии составляет 10% его видимого излучения.

Нейтрино беспрепятственно проходит через огромные толщи материи. Если бы Солнце было окружено железной оболочкой толщиной в миллионы световых лет, то это бы не помешало в движении нейтрино. Это обусловлено очень малой массой. Нейтральный заряд приводит к тому, что оно не реагирует на электромагнитные поля.

Нейтрино реагирует с ядром хлора. В итоге этой реакции образуется ядро радиоактивного изотопа аргона, которое испускает электрон. Если создать большой слой четырёххлористого углерода (перхлорэтилена) и изучить аргон, образованный нейтрино, то можно получить определённые выводы о нейтринном излучении.

На этом принципе была построена в 1955 году нейтринная обсерватория в США (Южная Дакота) на глубине 1490 метров.

Приёмником излучения служил горизонтальный цилиндрический бак длиной 14 метров, содержащий 400 000 литров перхлорэтилена. Результаты, полученные в ходе исследований, не удалось согласовать с теоретическими выводами. Исследование нейтрино может помочь в изучении недр Солнца и других звёзд. Можно предсказывать вспышки сверхновых, так как перед тем как вспыхнуть в видимом участке спектра, звезда излучает интенсивные потоки нейтрино.

Тема 11 Система Земля – Луна и ее характеристика

11.1 Система Земля – Луна

Земля и Луна находятся достаточно близко друг к другу и имеют не очень большое различие по размерам. Это даёт основание некоторым учёным называть систему Земля – Луна двойной планетой. Два тела вращаются вокруг общего центра масс, называемого барицентром и находящегося внутри Земли приблизительно на расстоянии 4,700 км от центра.

Расстояние между центрами масс Земли и Луны изменяется в довольно широких пределах из-за влияния объединенной гравитации Земли, Солнца, и Луны. Например, в течение периода 1969–2000, апогей лунной орбиты (самое большое расстояние) изменяется от 404 063 до 406 711 км, в то время как перигей (наименьшее расстояние) изменяется от 356 517 до 370 354 км.

Приливно-отливные взаимодействия затормозили вращение Луны таким образом, что теперь к Земле обращена всегда одна и та же её сторона.

Сидерический и синодический месяцы изменяются со временем вследствие приливно-отливных взаимодействий. Приливно-отливное трение замедляет вращение Земли, но угловой импульс земно – лунной системы остается постоянным. Следовательно, Луна медленно удаляется от Земли, так что в итоге месяц и день также становятся более длинными. Если проанализировать эти тенденции в прошлое, то получится, что оба периода должны были быть сотни миллионов лет назад намного короче. Эта гипотеза

подтверждена измерением дневных и годовых слоев коралловых окаменелостей.

11.2 Строение атмосферы Земли.

Внутреннее строение Земли, магнитное поле Земли и радиационные пояса

Солнце снабжает Землю теплом, необходимым для поддержания жизни. Учёные рассчитали, что светимость Солнца за несколько миллиардов лет увеличилась на несколько процентов. Этот рост будет продолжаться в том же темпе, но за миллион лет будет достаточно мал. Однако, изменение количества тепла, получаемого от Солнца, приведёт к сильным изменениям земного климата.

Эти изменения потока солнечного тепла несут ответственность за оледенения, происходившие каждые сто миллионов лет. Сейчас льды временно отступили. Когда они вернутся, некоторые области станут непригодными для жизни человека.

Земная атмосфера играет большую роль в поддержании температурного баланса. Она не допускает сильного охлаждения поверхности ночью и перегрева днём. Обладая парниковым эффектом, атмосфера поддерживает постоянную, более высокую, чем в космосе, температуру на Земле.

Атмосфера защищает обитателей Земли от большого потока вредного для жизни излучения – рентгеновского, ультрафиолетового, гамма- и др.

Атмосфера предохраняет от метеорных тел, которые постоянно прилетают из межпланетного пространства.

Метеоры сталкиваются с Землёй со скоростью до 72 км/с. Сила удара частицы массой 0,001 г, летящей с такой скоростью, аналогична выстрелу в упор. Ежедневно в атмосферу вторгаются миллиарды частиц.

Малые метеорные частицы, движущиеся в космическом пространстве вблизи плоскости земной орбиты, рассеивая солнечный свет, создают сияние, видимое вблизи Солнца утром незадолго до восхода Солнца и вечером вскоре после его захода. Так как метеорная пыль концентрируется вблизи плоскости эклиптики, проходящей через зодиакальные созвездия, это сияние называется зодиакальным светом.

Исчезновение динозавров в конце мелового периода 65 млн лет назад, а также окончание других геологических периодов могло быть связано с падением на Землю тел, размерами с астероид. Высокое содержание иридия в позднемеловом слое доказывает, что в Землю врезался астероид диаметром около 10 км. В результате взрыва в атмосферу были подняты тучи пыли, которые на несколько лет преградили путь солнечным лучам. Был нарушен процесс фотосинтеза, что прервало пищевую цепь и от голода вымерли все позвоночные массой более 20 кг.

Другой подход к проблеме смены флоры и фауны на Земле на рубеже геологических эпох связан с предположением увеличения радиационного излучения в определённые периоды истории (О. Шиндевольф,

В.И. Красовский, И.С. Шкловский). Например, Солнечная система могла при движении в Галактике, войти в область повышенного излучения, связанного с взрывом сверхновой звезды. Эпохи, когда поток жесткого излучения от сверхновых превышал на Земле средний уровень космической радиации в десятки раз, продолжались до нескольких тысяч лет.

Усиление радиации вызвало увеличение частоты мутаций. Если для видов с коротким циклом размножения для удвоения частоты мутаций требуется увеличение интенсивности космической радиации в сотни и тысячи раз, то для долгоживущих форм удвоение частоты мутирования достигается при увеличении дозы облучения всего в 3–10 раз. Длительное, продолжающееся тысячи лет воздействие в десятки раз увеличенной радиации могло оказаться губительным для некоторых видов животных. На другие же виды животных и растений радиация могла сказаться положительно.

Приблизительно подсчитано, что сверхновые звёзды, которые создают на поверхности Земли смертельную для многих животных дозу облучения в 500 Р вспыхивают каждые 50 млн лет, а звёзды, создающие облучения 25 000 Р – раз в 600 млн лет.

Для млекопитающих летальная доза при облучении в течение 30 суток составляет от 250 до 600 Р, для амёб – 100 000 Р. Синезелёные водоросли могут существовать чуть ли не в условиях ядерных реакторов.

Однако эти гипотезы сталкиваются со многими трудностями. Так многие динозавры вымирали на протяжении миллионов лет, что полностью противоречит астероидной гипотезе. В случае её истинности вымирание должно было произойти очень быстро.

Морские животные не должны были страдать от повышения радиации из-за экранирующего действия большой толщи воды океанов и морей. В действительности же они вымирали синхронно с земными.

Гигантская катастрофа, способная уничтожить жизнь на половине земного шара, привела бы к вымиранию незначительного числа семейств животных и растений. В случае катастрофы более глобального масштаба вымирание оказалось бы неизбежным.

В последнее время более популярны гипотезы, объясняющие вымирание совместным действием космических катастроф и земных событий, например, вулканической активностью.

Солнцем испускаются потоки заряженных частиц, которые вызывают на Земле явление *полярного сияния*.

На Землю попадает различное излучение и из удалённых областей Галактики. Для того чтобы привычная нам жизнь на Земле существовала, необходимо выполнение многих условий:

- расстояние от планеты до звезды должно быть заключено в узких пределах;
- поток излучения от звезды должен быть очень стабильным;
- планета должна обладать атмосферой, способной регулировать температуру и экранировать поверхность от космических лучей;
- атмосфера должна иметь определённый состав.

Химический состав земной атмосферы практически не меняется до высоты около 90 км.

Азот – 78%

Кислород – 21%

Водяной пар – 0,2–0,4%

Углекислый газ – 0,03%

Неон – 0,0018%

Гелий – 0,0005%

А также метан, криптон, сернистый газ, водород и др. в малых количествах.

Для исследования атмосферы используются специальные зонды, ракеты, воздушные шары.

Температура воздуха быстро падает с высотой в области толщиной несколько км, в пределах которой располагается основная облачность.

С ростом высоты под действием солнечного излучения небольшая доля кислорода превращается в озон. Поглощение озоном ультрафиолетового излучения способствует нагреванию атмосферы и предотвращает дальнейшее падение температуры. Поэтому температурный минимум достигается на высоте 17 км, а на высоте 50 км температура повышается почти до приповерхностной.

Выше 300 км атмосфера почти пропадает, её следы нагреваются Солнцем до 1500°C.

Выше 1000 км в атмосфере Земли находятся радиационные пояса, открытые во время измерений на первых советских и американских спутниках.

1-й пояс начинается на высоте 2400 км и кончается на высоте 5600 км и расположен между широтами от +30 до –30. 2-й пояс расположен на высотах от 12000 до 20000 км. 3-й пояс находится на высоте 50–60 тыс. км. Чем выше пояс, тем менее энергичные частицы он содержит.

Радиационные пояса это области земной атмосферы, заполненные очень энергичными ядрами атомов, в основном водорода, и электронами, захваченными магнитным полем Земли. Радиационные пояса очень опасны для живых организмов, не защищённых слоем, эквивалентным приблизительно 1,3 см. свинца. Некоторая доля частиц радиационных поясов возникает при взаимодействии космических лучей с атмосферой, а основная часть создаётся мощными потоками частиц, выбрасываемых Солнцем, особенно во время вспышек. Из внешних частей поясов частицы уходят довольно быстро, в течение суток или нескольких часов, тогда как в центральной части отдельные частицы могут оставаться гораздо дольше.

При рекомбинации ионов и электронов часто получают возбуждённые атомы и молекулы, которые дают слабое излучение, наблюдаемое ночью. Это свечение ночного неба ограничивает минимальную яркость космических объектов, которые можно наблюдать с Земли. Зв. величина яркости ночного неба составляет 4^м с одного квадратного градуса или 22^м с кв. секунды.

На высоте около 95 км плотность воздуха составляет 1/млн приповерхностного значения.

Половина всего воздуха содержится в первых 5,6 км над поверхностью, половина оставшегося до высоты 11,3 км и т.д.

Магнитное поле. У поверхности составляет около 0,5 Э. Магнитные силовые линии Земли близки к силовым линиям некоторого диполя. Этот воображаемый диполь, поле которого ближе всего соответствует истинному, называется *эквивалентным магнитным диполем*. Точки пересечения его оси с поверхностью Земли называются геомагнитными полюсами. Они не совпадают с географическими.

Координаты северного геомагнитного полюса $\varphi = 79$ с. ш., $\lambda = 70$ з. д. (Северная Гренландия).

Предполагается, что магнитное поле возникает благодаря гидродинамическим движениям в жидком ядре. Если в ядре имеется какое-либо начальное магнитное поле, то при пересечении этого поля потоком проводящего вещества возникает электрический ток. Электрический ток создаёт магнитное поле, которое при благоприятной геометрии течений может усилить начальное поле, а это усилит ток. Процесс усиления будет продолжаться до тех пор, пока растущие с увеличением тока потери на джоулево тепло не уравновесят приток энергии, поступающей за счёт гидродинамических движений.

Для формирования сильного магнитного поля необходимо приливное взаимодействие с Луной. На больших расстояниях от Земли форма её поля искажается под действием солнечного ветра.

Внутреннее строение Земли изучать намного сложнее. Самые глубокие скважины проникают на глубину до 10 км. Важную информацию об объёмном распределении масс в недрах Земли удалось собрать с помощью ИСЗ и измерений влияния экваториального вздутия Земли на движение Луны.

Важными методами являются:

- измерение ускорения силы тяжести от точки к точке;
- измерение напряжённости и направления геомагнитного поля;
- изучение характера распространения в Земле волн, порождаемых землетрясениями (сейсмических волн).

Средняя плотность Земли $5,52 \text{ г/см}^3$.

Плотность слоёв, прилегающих к поверхности – $2,6 \text{ г/см}^3$.

Температура растёт с глубиной со скоростью 10 на 50 м. Если бы такой рост продолжался непрерывно, то T внутри Земли была бы $130\,000^\circ\text{C}$. Однако, согласно исследованиям её значение равно $6\,000^\circ\text{C}$. В более глубоких слоях вещество обладает большей теплопроводностью. Внешние слои дополнительно нагревают радиоактивные элементы уран и торий.

Возраст земных пород 4,6 млрд лет.

Ядро Земли состоит из жидкой и твёрдой части. Плотность жидкой части в 2 раза больше средней. Радиус твёрдого ядра 1300 км.

Давление внутри Земли составляет 3,7 млн атм.

Так как Земля намагничена и большинство метеоритов железные – исследователи считают, что земное ядро является железным или железо – никелевым с примесью серы, кремния, кислорода.

Толщина коры различна в различных местах. Материковая кора имеет толщину 40 км, а океаническая – 6 км.

Кора плавает на верхнем жидком слое мантии (астеносфера). Вещество мантии, скорее всего, обладает упругостью и свойствами твёрдого вещества при ударах и текучестью при длительном воздействии силы.

Материки постоянно движутся. Это движение отражает перемещение плит земной коры. Столкновение континентальных плит приводит к образованию горных цепей. При раздвигании образуются моря.

Проявлением активности земных недр являются землетрясения. Они чаще всего происходят в зонах поддвижения.

Существует две гипотезы относительно происхождения Земли. Одна предполагает, что Земля возникла как однородное тело, которое потом расплавилось внутри и произошло распределение вещества в соответствии с его плотностью (гравитационная дифференциация). Вторая предполагает, что в протопланетном облаке первыми сконденсировались тугоплавкие вещества, и из них сформировались ядра планет, состоящие из тяжёлых элементов, а затем образовались оболочки из более лёгкого вещества (“неоднородная” аккреция).

11.3 Физические условия на Луне. Рельеф Луны. Химический состав и физические условия на поверхности Луны

Лунная поверхность безжизненна и пуста. Её особенностью является полное отсутствие атмосферных эффектов, которые наблюдаются на Земле. Ночь и день наступают мгновенно, как только появятся лучи Солнца.

Из-за отсутствия среды для распространения звуковых волн, на поверхности царит полная тишина.

Ось вращения Луны наклонена только на $1,5^\circ$ от нормали до эклиптики, поэтому Луна не имеет никаких сезонов, изменений пор года. Солнечный свет всегда почти горизонтален в лунных полюсах, что делает эти местности постоянно холодными и темными.

Лунная поверхность изменяется под воздействием деятельности человека, метеоритных бомбардировок, облучений частицами с высокой энергией (рентгеновские и космические лучи). Эти факторы не оказывают заметного воздействия, но за астрономические времена сильно “вспахивают” поверхностный слой – реголит.

При ударе о поверхность Луны метеорной частицы происходит миниатюрный взрыв и во все стороны разбрасываются частицы грунта и метеоритного вещества. Эти частицы в большинстве покидают гравитационное поле Луны. Диапазон суточного колебания температуры составляет 250°C . Колеблется от 101° до -153° . Но нагревание и охлаждение пород происходит

медленно. Быстрое изменение температуры происходит только при лунных затмениях. Было измерено, что температура меняется от 71 до – 79 °С за час.

Радиоастрономическими методами была измерена температура низлежащих слоёв, она оказалась постоянной на глубине 1 м и равна –50 °С у экватора. Значит, верхний слой является хорошим теплоизолятором.

Анализ лунных пород, доставленных на Землю, показал, что они никогда не подвергались воздействию воды.

Средняя плотность Луны – 3,3 г/см³.

Период обращения Луны вокруг оси равен периоду её обращения вокруг Земли, поэтому она наблюдается с Земли только одной стороной. Обратная сторона Луны была впервые сфотографирована в 1959 году.

Светлые участки лунной поверхности называются материками и занимают 60% её поверхности. Это неровные гористые районы. Остальные 40% поверхности – моря. Это впадины, заполненные тёмной лавой и пылью. Они были названы в 17 веке.

Материки пересечены горными хребтами, расположенными вдоль побережий морей. Наибольшая высота лунных гор достигает 9 км.

Лунные кратеры имеют в большинстве метеоритное происхождение. Вулканических мало, но есть и комбинированные. Самые крупные лунные кратеры имеют диаметр до 100 км.

На Луне наблюдались яркие вспышки, что может быть связано с извержениями вулканов.

У Луны почти нет жидкого ядра, об этом свидетельствует отсутствие магнитного поля. Магнитометры показывают, что магнитное поле Луны не превышает 1/10 000 земного.

Атмосфера. Хотя Луна окружена вакуумом более совершенным, чем тот, который возможно создать в земных лабораторных условиях, её атмосфера обширна и представляет высокий научный интерес.

В течение двухнедельного лунного дня, атомы и молекулы, выбитые рядом процессов с лунной поверхности на баллистические траектории, ионизируются солнечным излучением и затем управляются электромагнитными эффектами как плазма.

Положение Луны на орбите определяет поведение атмосферы.

Размеры атмосферных явлений были измерены рядом приборов, помещенных на лунной поверхности астронавтами Аполлона. Но анализ данных был затруднён из-за того, что естественная лунная атмосфера является настолько незначительной, что загрязнение от исходящих с Аполлона газов существенно влияло на результаты.

Основные газы, представленные на Луне – неон, водород, гелий, аргон.

В дополнение к поверхностным газам обнаружено небольшое количество пыли, циркулирующей на высоте до нескольких метров над поверхностью.

Число атомов и молекул в единице объёма атмосферы составляет менее триллионной доли числа частиц, содержащихся в единичном объёме земной атмосферы на уровне моря. Сила гравитации Луны мала, чтобы удерживать молекулы у поверхности.

Любое тело, обладающее скоростью большей 2,4 км/с выйдет из-под гравитационного контроля Луны. Эта скорость немного больше средней скорости молекул водорода при обычной температуре. Диссипация водорода происходит почти мгновенно. Диссипация кислорода и азота происходит медленнее, т.к. эти молекулы тяжелее. За астрономически небольшие промежутки времени Луна способна потерять всю свою атмосферу, если она когда-либо у неё была.

Сейчас атмосфера пополняется из межпланетного пространства.

М. Мендилло и Д. Бомгарднер (Бостонский ун-т) после анализа результатов наблюдений полного лунного затмения 29.11.1993 пришли к выводу, что лунная атмосфера в 2 раза протяжённее (равна 10 диаметрам Луны), чем считали ранее. Она поддерживается не ударами о лунный грунт микрометеоритов и элементарных частиц солнечного ветра (протонов и электронов), а воздействием на него световыми и тепловыми фотонами солнечного излучения.

Основные компоненты – атомы и ионы натрия и калия, выбитые из лунного грунта. Атмосфера очень разрежена, однако атомы натрия легко возбуждаются и сильно излучают, поэтому их легко обнаружить. (Nature 5.10.1995). Происхождение: По преобладающим современным теориям Луна образовалась вместе с Землёй из одной планетезимали. Учёные считают, что первоначально Луна находилась очень близко к Земле, а Дж. Дарвин писал, что Луна была когда-то в контакте с Землёй и период обращения двух тел составлял около 4 часов. Но это предположение кажется маловероятным. Многие считают, что Луна образовалась на расстоянии, значительно меньшем половины современного. При этом приливные волны на Земле должны были бы достигать 1 км. Существуют и другие теории. Найдено новое доказательство гипотезы, что Луна образовалась от столкновения какого-то тела с Землёй.

По данным спутника Луны "Клементина", обработанным в Гавайском унте (США), была составлена карта процентного содержания железа на поверхности Луны. Оно может меняться от 0% в горах до 14% на дне морей. Если бы Луна имела такой же минералогический состав, как Земля, то железа было бы значительно больше. Значит она вряд ли образовалась из одного протопланетного облака с Землёй.

Громадные области на обратной стороне Луны вовсе не содержат железа, но покрыты анортозитом, породой, богатой алюминием. Чистый анортозит редко встречается на Земле.

Влияние на Землю: Американцы Р. Боллинг и Р. Сервени изучили данные о глобальном температурном распределении, полученные со спутников между 1797 и 1994 гг. Из данных следует, что Земля бывает тёплой, когда Луна полная, и холодной – когда Луна в новолунии. Своим светом в полнолуние Луна подогревает Землю на 0.02°C. Даже такие изменения температуры могут влиять на климат Земли. (Astronomy Now, май 1995).

Тема 12 Физические условия на Марсе, Меркурии, Венере

12.1 Правила Тициуса – Бодэ. Общие сведения

Удобное правило для приближённого определения расстояний планет от Солнца было предложено И. Тициусом в 1766 году и описанное И. Боде в 1772 году.

$$r_m = (4 + n_m)/10,$$

где $n_1 = 0$, $n_2 = 3$, $n_m = 2n_{m-1}$.

Полученные значения дают примерные расстояния, выраженные в а.е.

	Мерк.	Вен.	Земля	Марс	астер.	Юпит.	Сат.	Уран	Нептун	Плут.
n	0	3	6	12	24	48	96	192	-	384
Расстояние по правилу	0,4	0,7	1	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	-	38,8
Истинное расстояние	0,39	0,72	1	1,52	—	5,2	9,54	19,18	-	39,67

Эволюция атмосфер планет земной группы: Разные атмосферы Земли, Марса и Венеры обусловлены различиями в круговороте углекислого газа (CO_2) – обмене им между корой планеты и атмосферой. Углекислый газ является “парниковым” газом – пропускает солнечный свет, но поглощает инфракрасное излучение планеты и переизлучает часть этого тепла назад к поверхности.

Умеренный климат, который установился на Земле, связан с особенностями газообмена на планете. Когда поверхность остывает, количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, когда температура поверхности растёт, его количество уменьшается.

Марс потерял возможность возвращать газ в атмосферу и находится в замороженном состоянии.

На Венере отсутствует механизм выведения углекислого газа из атмосферы и установилась очень высокая температура.

По наиболее достоверным современным теориям, Венера имела раньше много воды, но из-за близкого расположения к Солнцу и высокой температуры поверхности её потеряла. В горячей атмосфере воздух по мере подъёма охлаждается медленно. Холодная ловушка находится на высоте 100 км (на Земле – 9–17 км). Такая высота способствует тому, что влага уходит в более высокие слои атмосферы, где молекулы H_2O подвергаются фотодиссипации и водород уходит в космос. Менее чем за 30 млн лет этот процесс способен уничтожить океан воды.

На поверхности Марса слишком малое давление углекислого газа, чтобы поддерживать парниковый эффект. Но учёные считают, что раньше Марс обладал большой атмосферой, так как обнаружены древние русла рек. Со временем недра планеты остывали и стали неспособны выбрасывать в атмосферу большие количества углекислого газа. Весь углекислый газ,

вымываемый из атмосферы, оказался заключённым в грунте. Но по данным спектроскопических исследований с Земли, марсианские породы не содержат большого количества карбонатных пород. Поэтому проверка данной теории должна быть проведена в будущем.

12.2 Рельеф, атмосфера Меркурия

Меркурий получил своё имя от римлян в честь быстрого посыльного богов, потому что двигался по небу быстрее, чем любая другая планета.

Меркурий – самая внутренняя планета в нашей солнечной системе и предпоследняя по величине. Меньше Меркурия только Плутон.

Сатурн и Юпитер имеют спутники, которые по размерам больше Меркурия, например, Титан и Ганимед.

Ио, Европа и Каллисто близки по размерам к Меркурию.

Меркурий – самая близкая к Солнцу планета. Поэтому его очень трудно наблюдать с Земли, он всегда теряется в ярких лучах Солнца. Более всего Меркурий удаляется от Солнца на 280.

Ранее астрономы думали, что планета всегда обращена к Солнцу одной стороной, период обращения вокруг Солнца равен периоду вращения вокруг оси и соответствует 88 сут.

Однако радионаблюдения Меркурия на телескопе в Аресибо показали, что это не так. Оказалось, что период вращения равен 59 земных суток, т.е. 2/3 периода обращения. Вследствие резонанса солнечные сутки на Меркурии равны 176 земных суток.

Меркурий обращается вокруг Солнца по сильно вытянутой орбите (эксцентриситет = 0,21), поэтому в перигелии диаметр Солнца в 1,5 раза больше, чем в афелии. Поверхность Меркурия в перигелии получает в 2 лишним раза больше тепла, чем в афелии. Ось вращения перпендикулярна плоскости орбиты. Космический аппарат “Маринер-10” пролетел на расстоянии 756 км от поверхности Меркурия, поэтому на переданных изображениях можно рассмотреть детали размером до 50–150 м.

Поверхность Меркурия похожа на лунную, но почти не имеет морей. Есть участки поверхности, где кратеры не наблюдаются. Существуют свойственные только для Меркурия образования – эскарпы или обрывы, разделяющие два ничем не отличающиеся друг от друга участка поверхности.

Самый большой кратер на Меркурии Бетховен равен 625 км.

На Меркурии менее выраженные рельефные формы, чем на Луне, горы меньше. Это вызвано, очевидно, большей силой тяжести (в 2,3 раза).

За долгие ночи температура на Меркурии падает до -173°C , за солнечные дни поднимается до $+430^{\circ}\text{C}$. При такой температуре плавятся олово, свинец и цинк. Суточные изменения температуры составляют 600°C .

Диаметр Меркурия измерен радиолокационным методом и равен 4878 км, что в 1,4 раза превышает диаметр Луны.

Но масса Меркурия больше лунной в 4,5 раза. Значит, плотность планеты больше ($5,43 \text{ г/см}^3$) и примерно равна Земной.

На Меркурии должно находиться очень много железа (60% его массы).

Атмосфера. Обнаружена водородно-гелиевая очень разреженная атмосфера. Этот факт был открыт ещё на Земле Н.А. Козыревым, наблюдавшим прохождения Меркурия по диску Солнца.

Атмосфера разреженная из-за низкой силы тяжести на поверхности и невысокой скорости убегания (4,2 км/с).

Давление атмосферы на поверхности на солнечной стороне меньше триллионной доли земного давления. На ночной стороне давление на порядок выше.

Магнитное поле: “Маринер-10” обнаружил магнитное поле у Меркурия, где-то в 100 раз меньшее, чем у Земли. Учитывая среднюю плотность планеты $= 5,43 \text{ г/см}^3$, можно предположить, что Меркурий имеет железное ядро, размеры которого равны размерам Луны (диаметр – 3600 км) Ядро окружено тонким слоем мантии = 640 км.

Сильного магнитного поля на Меркурии не может быть из-за медленного вращения планеты, даже если она и обладает большим жидким ядром.

Лёд: – Околополярные регионы планеты покрыты водяным льдом. Ось планеты перпендикулярна плоскости орбиты, поэтому несмотря на то, что полуденная температура достигает 500°C , солнечные лучи никогда не проникают во внутренние области околополярных кратеров. Температура там не поднимается выше -160°C . Источниками водяного пара могут быть недра, кометы, астероиды. Так как орбита Меркурия наклонена к плоскости эклиптики на 7° , это позволило радиолокационным методом с Земли наблюдать околополярные области планеты.

Отражённый сигнал был отражён водяным льдом толщиной 2 метра. Лёд этот очень древний и накапливается на дне кратеров миллионы лет. (Sky & Telescope, Vol.88, №4)

Исследования: – Европейское космическое агентство будет исследовать Меркурий с 2006 года 10 лет.

Будет выведен искусственный спутник и осуществлена посадка на поверхность планеты. (Nature, Vol.371, № 6499).

12.3 Рельеф, атмосфера Венеры

Венера – третье по яркости светило на небе. В экваториальных областях Земли она светит так ярко, что предметы отбрасывают от её света тени. Древние халдеи на барельефах всегда рисовали три светила – Солнце, Венеру и Луну. Изучению Венеры и её влияния на жизнь людей уделялось пристальное внимание. Называли планету в Вавилоне по имени богини Иштар.

Наблюдается Венера либо вечером, после захода Солнца, либо утром, перед восходом. Древние астрономы предполагали, что это две разные планеты.

Фазы Венеры впервые увидел Галилей и зашифровал своё открытие в анаграмме:

Naec immatura a me jam frustra leguntur, o,u

Не оконченное и скрытое прочтено мною.

Cynthiae figuras aemulatur mater amorum
Мать любви подражает фигурам Цинтии.

Венерианский день равен 243 земным и длиннее года, который равен 224,7 дней.

Венера вращается с востока на запад. Наблюдатель на поверхности планеты увидел бы восход Солнца на западе и заход на востоке.

Сидерический период обращения Венеры равен 224,7 дня, а синодический – 440 суток.

Венера подходит к Земле на самое близкое расстояние – 42 млн км, но в это время её наблюдения затруднены из-за того, что она видна в виде узкого серпа и расположена очень близко к Солнцу.

По массе и размерам Венера очень близка к Земле.

Планета обладает такой плотной атмосферой, что сквозь неё никогда нельзя увидеть элементы поверхности. Поэтому с давних пор выдвигались разные гипотезы о том, какой должна быть поверхность Венеры. До середины 20 века высказывалось мнение, что на Венере имеются условия, схожие с земными в эпоху каменноугольного периода. Рисовались картины с динозаврами и птеродактилями, хвощами и плаунами.

Впервые удалось наблюдать детали атмосферы Венеры только с помощью ультрафиолетового излучения.

Ультрафиолетовые облака Венеры вращаются с периодом 4 дня. Радиолокационные наблюдения Венеры показали, что она вращается вокруг своей оси в обратную сторону, по сравнению с Землёй. Наклон экватора к плоскости орбиты равен 177° .

Только недавно удалось проникнуть за покров венерианских облаков.

Это сделали космический аппарат “Пионер – Венера” (1978), Венера 15 и 16 (1983–1984), и Magellan (1990–1994).

Венерианская поверхность состоит из обширных плоскостей, покрытых потоками лавы и областями нагорий и гор.

Поверхность Венеры покрыта многочисленными ударными кратерами. Маленьких (до 2 км) среди них почти нет из-за плотной атмосферы.

85 % поверхности покрыто вулканическими породами.

Потоки лавы простираются на сотни километров.

Потоки из вулканов создали длинные извилистые каналы, простирающиеся на сотни километров.

На поверхности найдены гигантские кальдеры, более 100 км в диаметре.

Горные области Венеры подобны по размерам земным материкам, а низменности – океанам. Низменные части поверхности занимают 1/6 часть поверхности. Венерианские вулканы поднимаются на высоту около 4000 км и значительно больше земных.

Самые возвышенные части Венеры – земля Иштар с горами Максвелла. Эти горы поднимаются на 11 км. Земля Иштар вдвое больше земного Тибетского нагорья и лежит на большей высоте.

Температура поверхности Венеры равна $+467^{\circ}\text{C}$. Эта температура мало меняется от дня к ночи и быстро падает с высотой.

Такие элементы, как кадмий, свинец, олово и цинк находятся в расплавленном состоянии.

Давление атмосферы у поверхности равно 90 атм. Оно соответствует давлению на дне земного океана на глубине 900 м.

Спектральные наблюдения с Земли и космических аппаратов позволили определить состав атмосферы Венеры.

Углекислый газ	– 96,4%
Азот	– 3,4%
Вода	– от 0,1 до 1%
Водород	– 0,03%

В незначительных количествах двуокись серы, кислород, окись углерода, аргон, аммиак, гелий, сероводород.

Было установлено, что облака Венеры состоят из капелек серной кислоты. Освещённость поверхности Венеры составляет 10% земной освещённости.

По сведениям, переданным спускаемыми аппаратами, поверхность Венеры состоит из базальтов. Не найдены признаки выветривания пород. У поверхности ветры очень слабы – 0,3–1,4 м/с.

На высоте от 10 до 50 км ветры усиливаются до 50–60 м/с.

Магнитное поле Венеры очень мало. Его напряжённость в 10^5 раз меньше земного. Поэтому головная ударная волна солнечного ветра находится на расстоянии 1,5 радиуса планеты, в 10 раз ближе, чем от Земли. Магнитосфера почти полностью отсутствует.

То, что Венера не имеет большого магнитного поля согласуется с её медленным вращением.

История – 300–500 млн лет назад мощный всепланетный потоп выплеснул много лавы из жерл многих вулканов и покрыл всю поверхность планеты.

На планете отсутствуют фрагменты рельефа, принадлежащие к первым 85% её истории. (Nature, Vol.372, № 6508)

12.4 Рельеф, атмосфера Марса

Марс светит красным светом и поэтому всеми народами, наблюдавшими его, отождествлялся с богом войны.

Большую популярность планета приобрела в 1877 году, во время великого противостояния. Джованни Скиапарелли выполнил тщательные наблюдения Марса и обнаружил каналы, пересекающие всю поверхность планеты. Первоначально астроном вовсе не предполагал, что они должны быть искусственные. Однако, как это всегда бывает, пресса извратила научные факты и подняла шум.

В 1892 году Скиапарелли вновь наблюдал поверхность Марса и склонился к мнению, что каналы – искусственные сооружения. Американский астроном У. Пикеринг даже рассмотрел в местах слияния каналов “оазисы”.

Обобщил открытия П. Ловелл, заявив, что марсиане пользуются талой водой с полярных шапок и по каналам обводняют “оазисы”, где размещены марсианские города.

Современные исследования показали, что на Марсе нет каналов и даже растительной жизни.

В условиях низкого атмосферного давления вода закипает при температуре $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в жидком виде существовать не может.

Наиболее благоприятные условия для наблюдений Марса складываются через каждые 2 года и 50 суток, когда он находится в противостоянии.

Лучше всего видны на поверхности полярные шапки. Они подвержены сезонным изменениям. Когда на одном из полушарий приходит зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает 57° широты в северном полушарии и 45° в южном. С приходом весны шапки начинают таять.

Полярные шапки состоят из обычного льда и замерзшего углекислого газа или “сухого льда”. Осенью, когда формируются полярные шапки, можно наблюдать голубовато-белые облака в атмосфере планеты.

На поверхности часто наблюдаются пылевые бури. Тучи пыли могут полностью скрыть поверхность Марса от наблюдателя. Программа полёта “Маринера-9” чуть не сорвалась из-за сильной пылевой бури, которая поднялась во время подлёта аппарата к Марсу. Наиболее часты бури во время прохождения планеты через перигелий, когда в южном полушарии лето. Возле северной полярной шапки накапливается вода и пыль.

Слой вечной мерзлоты может достигать километровых толщин.

Южная полярная шапка состоит из двуокиси углерода, а северная из водяного льда и пыли.

Вода течёт под слоем грунта из северных областей и испаряется в “оазисах”. Пыль попадает в атмосферу при испарении воды во время нагрева марсианским летом южных экваториальных областей. Скорость ветра достигает 50–90 м/с. Учёные долго спорили о происхождении русел рек на Марсе. Одни говорят, что раньше планета обладала более мощной атмосферой и условия были благоприятны для сохранения воды в жидком виде. Другие предполагают, что существует большой подповерхностный слой воды, который подогревается недрами планеты и радиоактивными породами, залегающими в коре. Время от времени в результате катастроф этот слой пробивается и изнутри извергаются большие потоки воды.

Недавно были получены новые подтверждения гипотезы, что на Марсе текла настоящая вода. Учёные исследовали метеорит, упавший среди льдов Антарктики около 10 лет назад. Исследования показали, что это осколок, выброшенный с Марса. Его возраст более 4,5 млрд лет. В метеорите оказалось очень высокое содержание карбонатов – химических элементов, которые могут быть образованы только при условиях, что на Марсе когда-то текли большие потоки воды.

Красный цвет поверхности Марса вызывают красные окислы железа.

Кратеры покрывают преимущественно южное полушарие. Значит с геологической точки зрения северное – моложе.

На Марсе существует самый большой перепад высот в Солнечной системе и достигает 27 км (на Земле – 19 км).

Самый большой марсианский вулкан – гора Олимп возвышается на 21 (24) км над равнинами (Эверест на Земле имеет высоту 8,8 км над уровнем моря). Основание горы имеет диаметр около 500 км и возвышается на 6 км.

С вулканами и поднятием Фарсида связаны огромные системы трещин и гряд, некоторые из них тянутся на 4000 км и возвышаются на 10 км.

Долина (Vallis Marineris) тянется на 4000 км и имеет глубину от 2 до 7 км.

Hellas Planitia – ударный кратер в южном полушарии, имеет глубину 6 км и диаметр 2000 км.

Температура поверхности Марса была найдена по измерениям “Викинга-1”. Самая низкая температура наблюдается вблизи южного полюса, где может конденсироваться углекислый газ = -139°C . В оазисах в районе озера Феникс и земли Ноя перепад температур составляет от -53° до $+22^{\circ}\text{C}$ летом и от -103 до -43°C зимой.

Атмосфера. Среднее давление атмосферы Марса составляет 6 мбар – 0,6% земного.

Сила тяжести равна 0,38 земной. Масса атмосферного столба над единичной площадкой равна 0,2%.

Атмосфера состоит:

Углекислый газ	95%
Азот	2,7%
Аргон	1,6%
Кислород	2%

Содержание водяного пара сильно меняется.

Синодический период относительно Земли равен 780 суток.

Марсианский год равен 687 суткам.

Экватор Марса наклонён к плоскости орбиты на угол около 24° .

Период обращения Марса вокруг своей оси – 24ч.37мин.

Расстояние до Марса меняется от 55,7 млн до 101,2 млн км из-за большого эксцентриситета орбиты. Ближе всего Марс подходит к Земле во время великих противостояний, когда противостояние совпадает с прохождением планеты через перигелий. Это время равно 15–17 годам.

12.5 Спутники Марса – Фобос и Деймос

Марс имеет два спутника – Фобос и Деймос, которые были открыты в 1877 году Асафом Холлом во время великого противостояния планеты.

Спутники имеют сероватый цвет и отражают свет подобно углистым хондри- там. Большие оси спутников всегда направлены на Марс.

Происхождение спутников остаётся загадкой. Одни учёные считают, что это захваченные астероиды, другие считают, что это осколки одного спутника, распавшегося в результате столкновения.

Космический аппарат “Викинг-1” в 1977 году получил подробные снимки поверхности спутников. Специалисты по планетам обработали их так, чтобы не были видны стыки отдельных фотографий и разность в яркости отдельных фрагментов. В результате были получены хорошие по качеству фотографии Фобоса.

Самой главной деталью Фобоса является кратер Стикни. Его диаметр 10 км, тогда как диаметр самого спутника – 22 км. От кратера Стикни тянутся длинные борозды, шириной 150–200 м и протяжённостью до 10 км и более.

Было высказано несколько гипотез о происхождении борозд. Одна говорит о том, что это наслоения лавы на том небесном теле, от которого откололся обломок – Фобос.

Другая гипотеза предполагает, что борозды – это свидетельства начавшегося процесса разлома спутника под действием приливных сил. В конце концов, приливные силы могут привести к распаду Фобоса и превращению его в кольцо астероидов.

Связь борозд с кратером Стикни может также свидетельствовать о их метеоритном происхождении.

12.6 Проблема поиска жизни в Солнечной системе

Главная цель полёта “Викингов” к Марсу состояла в поиске жизни на этой планете.

Были выполнены три сложных биологических эксперимента: пиролизное разложение, газовый обмен, разложение метки.

1. *Пиролизное разложение.* Эксперимент был предназначен для выявления процесса фотосинтеза с участием углерода, содержащегося в атмосфере. Пробы грунта выдерживались в течение 5 суток в среде, идентичной среде на поверхности планеты, но к атмосферному газу добавлялись окись и двуокись углерода, меченые радиоактивным изотопом углерод-14. Образцы освещались ксеноновой лампой, имитирующей солнечный свет, ультрафиолетовое излучение поглощалось фильтром, чтобы исключить небиологические эффекты. Затем грунт нагревался до 625°C. При этом органические вещества, если бы они возникли, должны были бы разложиться, образовавшиеся пары были бы радиоактивными.

2. *Газовый обмен.* Этот эксперимент основывается на допущении, что марсианская жизнь должна использовать воду в качестве растворителя. Образец грунта помещался в пористый сосуд, расположенный в инкубационной камере, наполненной атмосферой из углекислого газа, криптона и гелия при марсианском атмосферном давлении. В течение первых семи суток сосуд выдерживался в этой камере над смесью органических питательных веществ, растворённых в воде, после чего химический состав газа над грунтом определялся с помощью газового хроматографа. Контролировалось содержание

водорода, азота, кислорода, метана, углекислого газа и криптона, взятого в качестве эталона. При наличии микроорганизмов в грунте должен был измениться газовый состав атмосферы в камере. При отсутствии признаков биологической активности уровень жидкости мог подняться до дна пористого сосуда.

3. *Разложение метки.* Эксперимент основан на допущении о необходимости воды для существования марсианской жизни. Предполагалось, что микроорганизмы должны усваивать органические молекулы и ионы из раствора питательных веществ (“бульона”) и выделять в результате такого цикла газ, содержащий углерод питательного раствора. Этим раствором, меченым радиоактивным изотопом углерод-14, смачивался образец грунта, помещённый в закрытую тёмную камеру с марсианским “воздухом”. Затем измерялся уровень радиоактивности в камере, чтобы определить, не выделились ли какие-либо соединения углерода в результате жизнедеятельности марсианских организмов.

Все три опыта дали положительный результат. Но исследователи решили, что они имеют небиологическую природу.

Хроматографический анализ не обнаружил никаких следов органических соединений – продуктов жизнедеятельности микроорганизмов марсианского грунта. Такой же прибор при пробах антарктического грунта нашёл значительное количество ископаемых органических соединений.

7 августа, 1996 было получено сообщение о том, что в метеорите, прилетевшем с Марса найдены следы примитивной жизни.

Группа учёных NASA нашла предположительное свидетельство того, что на Марсе могла существовать примитивная жизнь примерно 3.6 миллиарда лет назад.

Учёные обнаружили органические молекулы, некоторые минеральные особенности биологической активности, и, возможно, микроскопические бактериовидные организмы внутри древнего марсианского камня, который упал на Землю в качестве метеорита.

Это может быть косвенным свидетельством прошлой жизни на Марсе. Двухлетнее исследование было проведено во главе с JSC специалистами по планетам докторами David McKay, Everett Gibson и Kathie Thomas-Keptra Lockheed-Martin, в сотрудничестве со Stanford коллективом, возглавляемым профессором химии доктором Richard Zare.

" Нет твёрдого доказательства прошлой жизни на Марсе. То, что мы получили – это комбинация большого количества фактов, которые мы нашли," – говорит McKay. "Они включают обнаружение Стэнфордскими учёными уникального образца органической молекулы, углеродистый состав которой является основой жизни. Мы также нашли несколько необычных минеральных образцов, которые являются продуктами жизнедеятельности примитивных микроскопических организмов на Земле. "

"Очень трудно доказать, что жизнь существовала 3.6 миллиарда лет назад на Земле, а ещё труднее это сделать для Марса. " говорит Zare.

"Существующий стандарт доказательства, который мы применили, включает наличие точно датированного образца, содержащего microfossils, минералогические характеристики жизни, и свидетельства сложной органической химии. "

"В течение двух лет, мы применили современную технологию чтобы выполнить эти исследования, и мы полагаем что мы нашли весьма разумное свидетельство прошлой жизни на Марсе. " добавляет Gibson.

"Мы не утверждаем, что мы окончательно доказали это. Мы даём это свидетельство для научного сообщества, для других исследователей, чтобы проверить истинность. Тогда, в пределах года или двух, мы надеемся решить вопрос окончательно".

Камень, содержащийся в 4.2-фунтовом, картофелеобразном метеорите был датирован возрастом приблизительно 4.5 миллиарда лет, когда Марс только сформировался. Между 3.6 миллиардами и 4 миллиардами лет назад планета была более теплая и водяная.

Так как вода была связана с углеродом марсианской атмосферы, carbonate полезные ископаемые были депонированы в проломах поверхности, через которые вода поступала из глубин Марса.

Находка исследователей указывает, что живущие организмы также могут помочь в формировании карбонатов и на Земле.

Где-то 16 миллионов лет назад, огромная комета или астероид врезались в Марс и выбросили камни из поверхностного слоя в космическое пространство. В течение миллионов лет камни летали в межпланетном пространстве и столкнулись с атмосферой Земли 13,000, выпав в Antarctica как метеориты.

Метеорит, названный ALH84001, был найден в 1984 в Antarctica ежегодной экспедицией, занимающейся поисками метеоритов.

Возможное марсианское происхождение метеорита не признавалось до 1993 года.

Это – один из 12 метеоритов, идентифицированных и соответствующих уникальной марсианской химии, измеренной космическим кораблём Viking, который высадился на Марсе в 1976.

ALH84001 самый старый из 12 марсианских метеоритов, в 3 раза более старый, чем любой другой.

Многие открытия группы исследователей стали возможны только из-за применения недавних новейших технологических достижений.

Ими использовался электронный микроскоп с высоким разрешением и лазерный масс – спектрометр. Всего несколько лет назад, многие особенности, о которых сообщено, были неразличимы.

Прошлые исследования этого метеорита не дали никаких результатов.

Недавнее открытие чрезвычайно маленькой бактерии на Земле, названной panobacteria, побудило группу учёных выполнить эту работу с еще большей тщательностью, чем в прошлый раз.

Жизнь на Марсе: За и против.

Кусок горной породы, возникшей на Марсе 4,5 млрд лет назад был выброшен ударом астероида в космос, проблуждал там 16 млн лет, был захвачен гравитационным полем Земли и упал на лёд Антарктиды. Там пролежал 10–20 тыс. лет. В 1984 году найден.

За

Обнаружены мелкие точки, размером с точку в этом шрифте, усеивающие стенки трещин в марсианском камне. Это карбонатные розетки. Центр розетки состоит из соединений марганца, окружён слоем карбоната железа, а затем кольцом сульфида железа. Некоторые земные бактерии, живущие в прудах способны оставлять такие следы, перерабатывая имеющиеся в воде соединения железа и марганца.

В метеорите найдены полициклические ароматические углеводороды, часто входящие в состав организмов или продуктов их разложения. Химик Р. Зейр настаивает, что это остатки разложившейся живой органики

Под мощным электронным микроскопом обнаружены мельчайшие каплеобразные кристаллики магнетита и сульфида железа. Некоторые земные бактерии производят кристаллики такого же рода.

В карбонатной части метеорита под электронным микроскопом обнаружены вытянутые и яйцевидные структуры длиной в несколько десятков нанометров. Это могут быть окаменелые останки марсианских сверхмикроскопических организмов.

Против

Биолог К. Нилсон говорит, что такие отложения могут возникнуть в ходе чисто химических процессов.

Химик Б. Саймонеит из Орегонского университета указывает, что при высокой температуре такие соединения могут возникать самопроизвольно из воды и углерода. В некоторых метеоритах, прилетающих из астероидного пояса, найдены даже аминокислоты и сотни других сложных органических соединений.

Геолог Э. Шок говорит, что кристаллы такой формы могут возникнуть в результате других процессов.

Их объём в тысячу раз меньше самых мелких земных бактерий, это самый нижний размерный предел для образования, которое можно было бы считать живым. Это могут быть сверхмалые кристаллики минералов, а необычная форма свойственна им как раз из-за сверхмалых масштабов.

Б.Джакотски и К.Хатчинс из университета штата Колорадо определили по изотопному составу, что эти карбонаты возникали при температуре до 250°C, а это многовато для всего живого. Земные микробы живут при 150°C.

НОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ "ГАЛИЛЕО" – НАМЕК НА ВЛАЖНУЮ ИСТОРИЮ ЕВРОПЫ.

Согласно новым изображениям, полученным с космического корабля Галилео, свободные от кратеров области поверхности Европы предлагают более молодую, более тонкую поверхность льда, чем предварительно считали.

Изображения были получены в течение самого близкого подлёта к Европе 20 февраля, 1997, когда космический корабль был в пределах 363 миль от юпитерианской луны.

Эти особенности дают возможность предполагать, что под тонким льдом находится океан.

Доктор Ronald Greeley, (Аризонский Университет) сообщил что лед подвижен, это значит, что Европа имела и может все еще иметь, очень тонкую ледяную кору, закрывающую жидкую воду или топь (слякоть).

"Мы заинтригованы этими блоками льда, подобных замеченным на полярных морях Земли в течение весенних таяний," говорит доктор Greeley. "Размер и геометрия этих особенностей склоняют нас предполагать, что на Европе есть тонкий ледяной слой, закрывающий воду или талый лёд. Какие-то причины заставили этот слой расколоться".

"Эти блоки кажутся движущимися и могут быть сопоставлены с земными айсбергами" сообщил доктор Michael Carr, геолог из США.

Загадкой остаются причины, приводящие в движение ледяные блоки.

Новые изображения поверхности Европы также зажгли живые дебаты среди ученых. Доктор Clark Chapman – среди тех, кто полагает что более гладкие области с несколькими кратерами свидетельствуют, что поверхность Европы еще более молодая чем предварительно предполагали.

Экстраординарная поверхностная геология Европы указывает на чрезвычайно юный и очень живой мир в изменяющемся, текучем потоке. "

Учёные хотят найти свидетельство текущей активности на Европе, может быть прорыв гейзера. Они также хотят знать, изменилась ли поверхность Европы со времени полётов Вояджеров, а также со времени начала миссии Галилео.

Из сообщений NASA

9 апреля, 1997

Тема 13 Физические условия на Юпитере и Сатурне

13.1 Рельеф и атмосфера Юпитера

Самое близкое расстояние от Юпитера до Земли – 630 млн км. Масса Юпитера более чем в 300 раз больше массы Земли.

Полный оборот Юпитера вокруг оси – 9h55m.

На поверхности видны разноцветные полосы, структура которых постоянно трансформируется, но общий характер сохраняется.

Линейная скорость перемещения поверхностных облачных масс на экваторе – 40000 км/ч.

Ось магнитного поля Юпитера наклонена на 10 градусов к оси вращения. Магнитное поле вращается равномерно, с периодом 9 часов 55 мин. Это указывает на почти твёрдый характер вращения планеты под слоем облаков.

Сила тяжести на поверхности в 2,6 раза больше земной.

Средняя плотность Юпитера – $1,34 \text{ г/см}^3$. Это свидетельствует о том, что планета состоит в основном из лёгких газов, главным образом – водорода и гелия. Юпитер имеет протяжённую атмосферу. Интересным её объектом является Большое Красное пятно, открытое в 1665 году Кассини.

Протяжённость пятна от 15 000 до 50 000 км. Временами оно становится ярче, временами почти пропадает.

Пятно постоянно дрейфует в атмосфере планеты. В первые годы после открытия оно было очень ярким, с тех пор яркость постепенно падает. Вероятно, пятно со временем затухает. Исследования Галилео показали, что пятно лежит выше и более холодное, чем окружающие облака. Подобные структуры замечены на Сатурне и Нептуне, но остаётся непонятно, как они могут существовать столь долгое время.

Юпитер имеет такой большой диаметр, какой только может иметь газовая планета. Если бы ему добавили ещё массу, он бы увеличился ненамного в размерах. Для того чтобы стать звездой, Юпитеру понадобилось в 80 раз больше массы, чем он имеет.

Атмосфера Юпитера состоит в основном из водорода (90%) и гелия (10%). Обнаружены также аммиак (0,01%) и метан (0,07%), вода, окись углерода, фосфин, циан, этан, ацетилен. Остальных элементов очень мало. Вода вымерзла, сохранившись в газообразном состоянии в малых количествах.

Температура в атмосфере с высотой быстро падает. От -113°C при давлении 1 атм. до -160°C при давлении 0,03 атм.

Генерация тепла в недрах Юпитера и его собственное тепловое излучение превышает в 2 раза поток энергии, поступающий от Солнца.

На Юпитере отсутствует твёрдая поверхность и какой-то рельеф. Тепло из недр выносится путём вертикальной конвекции, порождающей турбулентные вихри. В экваториальной зоне (от $+9^\circ$ до -9°) течения направлены строго с запада на восток. Дуют западные ветры со скоростью 100 м/с. Вблизи широт от $+20^\circ$ до -20° ветры дуют с востока на запад со скоростью около 50 м/с. Между основными течениями существуют вихри и струи.

Исследования «Галилео» показали, что ветры в атмосфере могут значительно превышать 100 м/с и вызываются внутренним источником тепла. Ветры носят более характер реактивных струй, чем вихрей и торнадо.

Большое Красное пятно увлекается на запад вместе с южной тропической зоной. Оно не связано с глубокими слоями планеты. В нём наблюдается подъём вещества из верхних областей и растекание его от центра. Этим объясняется низкая температура пятна и антициклоническое вращение в нём, т.е. против часовой стрелки в южном полушарии с периодом около 7 суток.

Помимо Красного пятна наблюдаются белые овалы, которые представляют собой такие же возмущения, но появились позже, в 1939 году, и в настоящее время сжимаются.

Облака атмосферы состоят в основном из аммиака. Температура от -100° до -160°C . При давлении 1 атм. аммиак кипит при -33°C и плавится при -78°C . Метан кипит при -161°C и плавится при -184°C , поэтому существование его в жидком или кристаллическом виде невозможно.

Атмосфера Юпитера очень глубокая и, возможно, включает целую планету.

На большой глубине внутри Юпитера, давление настолько большое, что атомы водорода разрушаются и электроны освобождаются. Возникающие в результате этого атомы состоят из пустых протонов. Это состояние называется металлическим водородом. Температура в ядре достигает 30 000 К, а давление больше 1 млн бар. Высокая температура ядра существует благодаря механизму Келвина

Гельмгольца, т.е. из-за медленного гравитационного сжатия планеты.

В полярных облаках Юпитера наблюдается явление, подобное земному северному сиянию. Эти явления связаны с веществом, падающим из спутника Ио по спиральным линиям магнитного поля в атмосферу Юпитера.

Облака простираются в интервале высот 12 км. Атмосфера Юпитера окрашена различными цветами. Устойчивые атмосферные составляющие не могут так окрашивать атмосферу, они бы стремились постепенно выравнять окраску. Значит, из глубины постоянно поступают окрашенные металлические соединения, которые затем либо оседают, либо подвергаются химическим реакциям в атмосфере. Р. Вилд считает, что окраска Юпитера обусловлена натрием, а Г. Юри связывает окраску облаков с органическими молекулами. К. Саган и С. Миллер, пропуская через смесь газов, моделирующую атмосферу Юпитера, искровые разряды, получили ярко окрашенные органические молекулы. Космические аппараты «Вояджер-1 и 2» зарегистрировали мощные вспышки молний на Юпитере, сравнимые с сильнейшими грозовыми разрядами на Земле. Однако, никакой зависимости между молниями и цветом пока не найдено.

Исследования «Галилео» показали, что молнии на Юпитере вспыхивают в 10 раз реже, чем на Земле. Органических молекул почти не обнаружено. Химический состав Юпитера близок к протопланетному облаку.

Юпитер является полупериодическим радиоисточником. К. Шайн из Австралии открыл, что радиоизлучение Юпитера должно быть связано с определёнными районами поверхности планеты. Источники на поверхности вращаются с периодом 9ч. 55 мин. 30 сек. Энергия всплесков радиоизлучения Юпитера соответствует энергии миллиарда одновременных вспышек молний на Земле. Радиоизлучение может быть связано с внутренней частью магнитосферы и движением спутника Ио.

Юпитер обладает огромным магнитным полем. Его магнитосфера простирается на расстояние 650 миллионов км (дальше орбиты Сатурна!). Галилео обнаружил, что окружающая среда около Юпитера содержит высоко

энергичные частицы, пойманные магнитным полем. Эта "радиация" подобна, но намного более интенсивна чем в радиационных поясах Ван Аллена около Земли. Атмосферные исследования Галилео обнаружили новый интенсивный лучевой пояс между кольцом Юпитера и высшими атмосферными слоями. Этот новый пояс – приблизительно в 10 раз более сильный, чем пояса радиации Ван Аллена. В этом новом поясе были найдены высокоэнергичные ионы гелия неизвестного происхождения.

Головная ударная волна солнечного ветра на дневной стороне находится на расстоянии 100 радиусов Юпитера или 0,05 а.е.

Внутреннее строение Юпитера до конца неизвестно. Скорее всего, его недра находятся в жидком состоянии, за исключением небольшого каменного ядра. Жидкий водород на глубине 25 000 км металлизруется. Выше этой границы расположена зона молекулярного водорода, ниже металлического. *Столкновение с кометой* – В 1994 году на Юпитер упали осколки кометы Шумейкера – Леви. Явление наблюдалось с Земли и космическим телескопом им. Хаббла. После падения кометы Шумейкера – Леви, на широте падения осколков образовался широкий пояс, в котором температура на 5–7 К ниже чем обычно. Причины могут быть следующие:

- охлаждение через эффективное инфракрасное излучение молекул аммиака, синильной кислоты, воды и других веществ, выброшенных в атмосферу во время катастрофы.
- обычное термическое охлаждение дыма, образовавшегося в стратосфере при столкновении и переизлучение им солнечного света обратно в космос.

(IAU Circulars № 6119).

13.2 Спутники и кольцо Юпитера

Кольцо. “Вояджер-1” в 1979 году открыл у Юпитера кольцо. Внешний край кольца находится у орбиты самого малого 14 спутника, а внутренний – на расстоянии 5500 км от видимой границы облаков. Ширина наиболее яркой части кольца достигает 800 км. Толщина до 1 км. Кольцо Юпитера сильно отличается от кольца Сатурна. Оно состоит из очень маленьких частиц. Составлено из частиц пыли меньше чем 10 микронов в диаметре.

Происхождение кольца вероятно связано с бомбардировкой микрометеоритами маленьких спутников Юпитера, расположенных внутри кольца.

Возможно, что оно постоянно пополняется за счёт частиц космической пыли. Кольца Юпитера и его спутники существуют внутри интенсивного лучевого пояса электронов и ионов, которые улавливаются магнитным полем планеты.

Спутники. Первые четыре спутника Юпитера были открыты Галилеем в 1610 году. Сейчас известно уже 16.

Орбиты шести внутренних спутников почти круговые и располагаются в экваториальной плоскости планеты. Каждая последующая орбита лежит в 1,7

раза дальше предыдущей. Восемь внешних спутников очень маленькие. Их орбиты образуют две группы по четыре спутника. Первая группа располагается на расстоянии 12 млн км от Юпитера, движутся они в прямом направлении. Спутники второй группы находятся вдвое дальше, движение их по орбитам обратное. Это спасает их от притяжения Солнца, которое может действовать на них с силой вдвое большей чем у Юпитера, вследствие большой удалённости спутников (0,2 а.е.). Орбиты этих спутников сильно вытянуты ($e = 0,4$), наклонены к орбите Юпитера под углом 30° и постоянно меняются из-за солнечных возмущений.

Три внутренних спутника Ио, Европа, Ганимед движутся почти в полном резонансе с периодами обращения 1.77, 3.55, 7.16 земных суток, находящимися в соотношении 1:2:4. В небесной механике такое расположение считается устойчивым. Все внутренние спутники обращены к Юпитеру одной и той же стороной.

Ио. Радиус 1815 км. Ещё до полётов “Вояджеров” учёные предсказали, что спутник Ио очень сильно нагревается вследствие приливных эффектов. Нагрев Ио должен быть в 20 раз больше чем Европы и превосходить в 10 раз нагрев Луны вследствие распада радиоактивных элементов. Предполагалось, что внутри Ио должна быть большая расплавленная область. Эти предположения сразу же подтвердились. “Вояджер-1” открыл на Ио 8 действующих вулканов. Вулканические выбросы поднимаются на высоту 7–280 км над поверхностью, что требует скорости выброса 1 км/с. Выбросы состоят из двуокиси серы SO_2 . Образование вулканов связано с расплавлением силикатных масс в недрах Ио, содержащих небольшое железное ядро. Это подтверждается средней плотностью Ио – $3,5 \text{ г/см}^3$. Под видимой корой лежит неоднородный подкорковый силикатный слой, который в очень немногих областях малой протяжённости выходит на поверхность в виде гор высотой до 10 км. Под верхним слоем твёрдой серы, смешанной с SO_2 лежит океан расплавленной серы ($t = 120^\circ\text{C}$, давление 40 бар). Потоки в расплавленных недрах Ио, так же как и в Земле, создают тепловые очаги, в которых образуются вулканы. Интенсивные красный, оранжевый, жёлтый, коричневый, чёрный и белый цвета на Ио подтверждают эти представления. Ударные кратеры с поперечником более 600 м не обнаружены, значит, скорость отложений на поверхности должна превышать 0,1 мм/год и определяться выбросами, потоками, поверхностной эрозией, связанной с вулканической активностью.

Возраст свежих разноцветных потоков меньше 1000 лет.

Европа. Радиус 1569 км. Поверхность Европы покрыта лабиринтом запутанных тонких линий и полос, похожих на марсианские “каналы”. Длина некоторых достигает тысяч километров, ширина 20–40 км. Скорее всего, это чем-то заполненные трещины. Самые высокие детали возвышаются на высоту всего 40 м. Она напоминает исцарапанный оранжевый шар. Почти полное отсутствие ударных кратеров говорит о том, что их следы сразу же исчезают. Внешняя кора, скорее всего, ледяная до глубин 100 км. Средняя температура поверхности около -150°C . Недра спутника должны быть горячими,

химический состав похожий на Ио. Плотность несколько меньше чем у Ио – $3,0 \text{ г/см}^3$ вызвана наличием ледяной коры. Множество трещин – результат снятия напряжений, возникающих под поверхностью.

Недавние наблюдения с помощью космического телескопа им. Хаббла позволили обнаружить на Европе разреженную атмосферу, состоящую из молекулярного кислорода. Её плотность очень мала. Солнечный свет, космические лучи и микрометеориты выбивают с поверхности Европы молекулы воды, которые под действием ультрафиолетового излучения распадаются на атомы водорода и кислорода. Атомы водорода сразу же покидают атмосферу, а атомы кислорода объединяются в энергетически более выгодные молекулы.

Ганимед. Самый крупный и массивный из всех спутников. Радиус 2631 км. Средняя плотность $1,9 \text{ г/см}^3$. Он почти на половину состоит из воды или льда. Средняя температура поверхности – 130°C . Тёмные области Ганимеда усеяны кратерами диаметром в несколько десятков километров.

На спутнике существует огромная система хребтов. Самым интересным объектом поверхности являются пучки длинных параллельных борозд. Они покрывают значительную часть площади спутника. Эти образования современной наукой не объяснены.

Каллисто. По размерам это третий спутник в солнечной системе. Радиус 2410 км. Но плотность самая маленькая $1,8 \text{ г/см}^3$. Поверхность Каллисто на невидимой с Юпитера стороне очень насыщена кратерами. На обращённой к Юпитеру стороне видна огромная многокольцевая структура с яркой центральной областью поперечником около 300 км. От 8 до 10 кольцевых гребней окружают центр до расстояния примерно 1500 км. В центральной области Каллисто кратеров гораздо меньше, чем на остальной поверхности. Значит эта область моложе. Парадоксально то, что при малой плотности Каллисто должна содержать больше воды, чем Ганимед, но при этом сохраняет древние ударные кратеры. Низкое альбедо Каллисто говорит о примеси в коре пыли. Температура поверхности – 120°C или выше. Эта температура всё же низка, чтобы образовать атмосферу из водяного пара.

13.3 Рельеф, атмосфера Сатурна

Сатурн имеет самую низкую плотность $0,7 \text{ г/см}^3$. Он вращается очень быстро, с периодом чуть больше 10 часов и поэтому заметно сплюснут. Облака на Сатурне заметны менее, чем на Юпитере. Иногда заметны крупномасштабные возмущения. Так в 1994 году наблюдалось большое белое пятно в экваториальной области.

“Вояджер-1” обнаружил облака различных типов и Большое Коричневое пятно размерами с Землю.

Температура в верхней части облаков от -178°C до -173°C .

Атмосфера состоит в основном из водорода и гелия.

Атмосферные массы в циклонических областях и антициклонических движутся навстречу друг другу со скоростями выше 100 м/с, соприкасаясь образуют вихри и бури.

Наибольшую скорость струйные течения воздушных масс имеют на экваторе – 500 м/с.

Ось магнитного поля почти полностью совпадает с осью вращения планеты. Напряжённость магнитного поля на экваторе равна 0,7 земного. Но внутреннее магнитное поле гораздо сильнее из-за больших размеров планеты.

Сатурн имеет внутренние источники энергии и излучает в 2,5 раза больше энергии, чем получает от Солнца.

Внутреннее строение Сатурна такое же как и у Юпитера.

13.4 Кольца Сатурна

Кольца Сатурна увидел ещё Галилей, но из-за плохого качества своих инструментов, не смог разглядеть их детально и решил, что это какие-то образования, наподобие шаров.

Наблюдения Гюйгенса показали, что Сатурн имеет кольца. Применение более совершенной техники позволило Дж. Кассини открыть щель между кольцами, которая с тех пор носит его имя.

Фотографии космического аппарата “Вояджер-1” показали, что кольца состоят из множества концентрических узких колец, общая картина которых напоминает звуковые дорожки на грампластинке.

Кольца Сатурна лежат точно в экваториальной плоскости планеты. При наблюдении с Земли они бывают видны под разным углом. 21 мая, 11 августа 1995 года и 11 февраля 1996 года кольца поворачивались к Земле ребром и были видны в виде узкой полоски.

Внутреннее кольцо С имеет размеры 17 000 км, среднее самое яркое В – 28000 км и внешнее А – 17000 км. Кольца А и В разделены щелью Кассини.

Большие кольца состоят из множества маленьких колечек, которые в свою очередь распадаются на отдельные частицы, причём каждая частица движется вокруг Сатурна по своей собственной орбите в соответствии с законом тяготения Ньютона. Данные спектрального анализа показывают, что частицы кольца покрыты льдом и инеем. Поэтому обладают высокой отражательной способностью.

Самые крупные частицы колец имеют размеры от 1 до 15 метров.

Частицы не могут объединяться в крупные тела, так как приливное воздействие Сатурна разрушило бы их. Скорее всего, что кольца состоят из разрушенного ранее спутника Сатурна с диаметром несколько сотен км.

Строение колец содержит много загадок. Например, некоторые узкие кольца имеют заметный эксцентриситет, наблюдается даже “переплетённое” кольцо, в котором переплетаются три отдельных кольца или потока частиц.

Наблюдаются также радиальные тёмные лучи в главных кольцах. Они создаются скорее всего магнитным полем.

13.5 Спутники Сатурна

До полёта “Вояджеров” было известно 10 спутников Сатурна. По новым данным их число может быть от 18 до 23.

Самыми большими являются Титан, Рея, Япет, Диона, Тетия, Энцелад, Мимас, Гиперон, Феба, Янус. Их диаметры соответственно от 2575 до 110 километров. Остальные по размерам незначительны (от 70 до 12 км).

Плотности больших спутников заключены между 1 и 1,3 г/см³. Самая большая плотность у Титана – 2 г/см³.

Мимас (диаметр 197 км) имеет поверхность, сплошь усыпанную кратерами. Примечательной деталью является огромный кратер Гершель, диаметр которого 140 км. Перепад высот на спутнике не превышает 7–8 км.

Энцелад (диаметр – 251 км) покрыт льдом. Его поверхность отражает почти 100% падающего на него солнечного излучения. На поверхности спутника видны следы тектонических процессов. Видны многочисленные разломы и борозды. Размер крупнейших кратеров не превышает 35 км.

Диона (диаметр 559 км) четвёртый по размеру спутник. Самый большой кратер имеет диаметр 100 км.

Титан – единственный спутник, обладающий протяжённой атмосферой. Ещё в 1943 – 1944 годах Дж. Койпер открыл у этого небесного тела мощную атмосферу, состоящую из азота. По современным гипотезам на поверхности Титана могут быть дожди и океаны из жидкого азота. Другие предположения допускают наличие тёплой и покрытой водой поверхности.

По последним данным Титан не имеет больших океанов, поскольку его орбита имеет значительный эксцентриситет, а приливные эффекты его бы давно уменьшили. Скорее всего, на поверхности есть моря или озёра, заполненные жидкими углеводородными соединениями (метан). Наблюдения в инфракрасном диапазоне на космическом телескопе подтверждают эту гипотезу.

Вокруг планеты существует большое водородное облако, что можно объяснить диссипацией метана в верхней атмосфере.

Япет имеет одну особенность. Половина его поверхности, обращённая к Сатурну, тёмная и отражает около 5% падающего света, тогда как обратная сторона отражает в 6 раз больше. “Вояджер-1” показал, что яркая сторона покрыта льдом, а тёмная сторона имеет ледяное покрытие всего на 5%.

В 1995 году NASA сообщило об открытии четырёх спутников Сатурна космическим телескопом. Размеры спутников от 50 до 24 км. Они расположены вблизи колец и были обнаружены только при компьютерной обработке фотографий, включающей уменьшение засветки колец.

Дальнейшие наблюдения на космическом телескопе показали, что это скорее всего новый класс объектов, состоящий из осколков льда. Так как их протяжённость слишком велика, чтобы составлять целое космическое тело.

Тема 14 Рельеф, атмосфера и спутники Урана, Нептуна. Плутон и его спутник Харон

14.1 Рельеф, атмосфера Урана

Открыл планету William Herschel в 1781 г. Уран имеет экваториальный диаметр 51,800 км и год, равный 84.01 земных года.

Масса Урана = 14,5 массы Земли.

Среднее расстояние от Солнца 2.87 млрд км.

Длина дня на Уране – 17 часов 14 мин.

Атмосфера Урана состоит из водорода 83 %, гелия 15 %, 2 % метана и малого количества ацетилена и других гидрокарбонатов.

Ветры в средних широтах на Уране дуют в направлении вращения планеты со скоростью от 40 до 160 м/с.

Планета обладает атмосферой, подобной той, которую имеет Юпитер.

Альbedo высокое, в спектре видны полосы поглощения метана. При визуальном наблюдении планета кажется зеленоватой. Метан в верхней атмосфере поглощает красный свет, поэтому Уран имеет сине – зеленый цвет.

Видны спектральные линии водорода, аммиак пока не обнаружен.

Температура облаков равна -193°C .

Внутренних источников энергии планета не имеет, или они малы.

Облака Юпитера и Сатурна состоят из метана и на экваторе их высота меньше, чем у полюсов.

Уран вращается вокруг оси, наклонённой под углом 98° к орбитальной плоскости.

Наблюдается слабое магнитное поле. Магнитосфера очень сложна. Напряжённость 0,23 Э. Ось магнитного диполя смещена почти на 8000 км от центра планеты к северному полюсу и наклонена к оси вращения на 60° . Полярность магнитного диполя должна дважды меняться за один оборот планеты вокруг оси. Магнитный хвост скручен вращением Урана в длинный штопор позади планеты.

Источник магнитного поля неизвестен.

14.2 Спутники и кольца Урана

Впервые кольца Урана были открыты в 1977 году с борта Койперовской самолётной обсерватории на высоте 12,5 км.

Учёные обнаружили 4 круговых кольца и одно слегка вытянутое. Позже было обнаружено ещё четыре кольца. “Вояджер-2” в 1986 году открыл ещё одно кольцо. Сейчас всего известно 10 колец. Они расположены на расстояниях от 41000 до 52 000 км от центра Урана.

Кольца имеют разный цвет: белые, зелёно-голубые, светло-коричневые. Скорее всего, они состоят из частиц различного химического состава.

Семь колец очень узкие (0,5–3 км шириной) и непрозрачные. Одно кольцо имеет ширину 12 км. Самое внешнее кольцо сильно отличается от

остальных. Его ширина равна 85 км, (в то время, как ширина всех остальных – 67 км) переменна и линейно зависит от расстояния до Урана.

Спутники. Уран имеет по крайней мере 15 лун. Две самых больших луны, Titania и Oberon, обнаружены В. Гершелем в 1787.

Сегодня известно всего 18 спутников Урана.

Они малы и трудны для наблюдений. Спутники движутся в прямом направлении, их орбиты лежат почти в одной плоскости, наклонённой к плоскости орбиты Урана на 98° .

Учитывая положение плоскости спутников Урана можно предположить, что они все формировались вместе с планетой, а не были захвачены после.

Более-менее точно известны массы и радиусы лишь пяти самых больших спутников – Миранды, Ариэля, Умбриэля, Титании, Оберона. Массы же большинства спутников оцениваются по взаимным возмущениям очень приближённо, а радиусы известны так плохо, что определять их плотность нет смысла.

Миранда – (диаметр – 480 км) имеет наиболее сложную поверхность из всех известных тел Солнечной системы. Поверхность покрыта кратерами, волнистыми холмами, долинами, бороздами, впадинами, хребтами и утёсами. Высота утёсов выше 5 км. Перепад высот до 10 км.

Сложная поверхность объясняется тем, что спутник мог быть разрушен при столкновении с крупным метеороидным телом, а потом аккумуляровался вновь. Возможно, что на спутнике действуют вулканы.

14.3 Рельеф, атмосфера Нептуна

Планету открыл 23 сентября, 1846 Johann Gottfried Galle, на Берлинской Обсерватории.

Имеет экваториальный диаметр 49,500 км.

Нептун обращается вокруг Солнца с периодом 165 лет. День на Нептуне – 16 часов и 6.7 минут.

Внутренние две трети Нептуна составлены из смеси литого камня, воды, жидкого аммиака и метана. Внешняя треть – смесь нагретых газов, составленных из водорода, гелия, воды и метана.

Метан дает Нептуну синий цвет облаков.

Это динамическая планета с несколькими большими, темными пятнами.

Самое большое пятно, известное как Большое Темное Пятно, имеет размеры Земли и подобно Большому Красному Пятну на Юпитере.

Предполагается, что это мощный антициклон в атмосфере планеты. На границе антициклона видны белые облака, высота которых от 50 до 100 км над основным облачным слоем.

Южнее располагается антициклон меньшей мощности – “Тёмное Пятно-2”. Voyager нашел маленькое, неправильной и непостоянной формы облако, перемещающееся в восточном направлении. Облако делает оборот вокруг Нептуна каждые 16 часов.

Длинные яркие облака, подобные cirrus-облакам на Земле, были замечены высоко в атмосфере Нептуна.

На планете дуют самые сильные ветры. Большинство из них дуют в направлении, противоположном вращению планеты. Возле Большого Тёмного Пятна скорость ветров 2 000 км в час.

Масса Нептуна достигает 17,3 массы Земли.

Альbedo высокое, в спектре видны полосы поглощения метана. при визуальном наблюдении планета кажется зеленоватой. Видны спектральные линии водорода, аммиак пока не обнаружен.

Температура облаков равна -193°C .

Теоретически Нептун должен быть на 12° холоднее. Видимо он обладает внутренними источниками тепла, дающими столько энергии, сколько её приходит с Солнца.

Одна из версий наличия внутренних источников энергии – эволюционное сжатие планеты. Неизвестно лишь, почему на Уране этого не происходит. Магнитное поле Нептуна аналогично урановому, ось его наклонена на 47° к оси вращения.

14.4 Спутники и кольца Нептуна

“Вояджер-2” обнаружил у Нептуна кольца. Пока известно всего 5 колец. Они расположены на расстоянии от 41 900 до 62 900 км.

Кольца сделаны из пыли.

В настоящее время известно 8 спутников Нептуна, 6 из них обнаружены Вояджером.

Спутник Нептуна Тритон – один из самых крупных спутников в Солнечной системе. Он значительно больше Луны (радиус 2700 км), его масса составляет почти 2 массы Луны.

Плотность равна $2,07 \text{ г/см}^3$.

Тритон обладает незначительной метановой атмосферой, его поверхность каменистая, а не ледяная.

На поверхности видны полосы тёмных отложений, разломы, светлые области, покрытые, возможно, слоем азотной изморози.

Южный полюс спутника обращён к Солнцу и окружён полярной шапкой.

На поверхности наблюдаются тёмные пятна правильной формы – эруптивные центры, из которых происходят выбросы пыли и газа на высоту 7–8 километров. В атмосфере в ультрафиолетовом диапазоне наблюдались полярные сияния. Тритон имеет силикатное ядро радиусом до 1000 км. Ядро окружено мантией, а мантия – глобальным водным океаном, насыщенным аммиаком и метаном. Океан покрыт ледяной оболочкой.

Движение Тритона обратное. Из-за такого движения приливное трение, вызываемое Нептуном, может разрушить планету. Возможно, что через 10–100 млн лет Тритон, двигаясь по спирали, разрушится.

Спутник Нереида имеет диаметр 340 км. Сведений о массе пока нет.

Орбиты этих спутников сильно различаются. Тритон обращается по орбите, наклонённой к экваториальной плоскости Нептуна на 28° . Расстояние до планеты 356 000 км.

Нереида движется в прямом направлении, на расстоянии 5 570 000 км. “Вояджер-2” обнаружил ещё 6 спутников. Четыре ближайших спутника находятся в полости Роша и состоят почти полностью из воляного льда. Их строение более похоже на строение комет.

Протеус – имеет неправильную форму, похожую на яйцо. На поверхности обнаружен кратер диаметром 200 км.

14.5 Плутон и Харон

Плутон – самая маленькая планета Солнечной системы. Она имеет большой спутник Харон. Поэтому систему Плутон – Харон часто называют двойной планетой.

Космический Телескоп получил новые изображения Плутона и Харона. Размеры Плутона по данным наблюдений составили 2320 км и Харона – 1270 км (Sky & Telescope, Vol.88, № 5)

Масса Плутона незначительна и по мере уточнения, всё время уменьшается. Учёные исследовали возмущения Плутона на орбиты Нептуна и Урана и обнаружили, что они совсем незначительны. Можно сказать, что Плутон почти не возмущает орбиты этих двух планет. Первые измеренные возмущения, приведшие к открытию Плутона, оказались неверными и существование Плутона было предсказано случайно.

Средняя плотность Плутона – $2,06 \text{ г/см}^3$, а Харона – $2,18 \text{ г/см}^3$.

Это указывает на то, что обе планеты состоят в основном из льда. Спектральные наблюдения показали, что на планете есть замёрзший метан.

Харон имеет более голубой цвет, чем Плутон. Значит, они имеют различный состав. Группа В. Вайлда из Чикагского ун-та, исследуя альбедо Плутона, обнаружила, что различные участки планеты имеют в разное время разную отражательную способность. Значит, атмосфера Плутона способна переносить приповерхностный иней с места на место. (Sky & Telescope, Vol.88, № 5)

Температура Плутона около -228°C .

Радиус орбиты Харона – 19 130 км, а период обращения вокруг Плутона составляет 6,387 суток.

Орбита Плутона сильно вытянута и пересекает орбиту Нептуна. Высказывалось предположение, что Плутон – потерянный спутник Нептуна, или что обе планеты могут столкнуться. Однако, по современным расчётам, Нептун и Плутон находятся в гравитационном резонансе с периодом, близким к 20 000 лет и поэтому никогда не столкнутся и, вероятно, не были связаны ранее.

NASA планировало посылку к Плутону космического аппарата, но в 1994 году отрёклось от этой затеи из-за слишком больших расходов и предполагаемой малой результативности.

Тема 15. Малые тела Солнечной системы

15.1 Астероиды

После открытия в 1781 году Урана астрономы убедились, что правило Тициуса – Боде хорошо описывает основные закономерности в расположении планетных орбит и стали искать планету, расположенную на расстоянии 2,8 а.е. от Солнца, т.е. между орбитами Марса и Юпитера.

1 января 1801 года Джузеппе Пиацци из Сицилии увидел слабую “звезду” в созвездии Тельца, которая не была нанесена на звёздных картах. Астроном заметил, что это небесное тело постоянно меняет своё положение. К концу 1801 года было установлено, что объект делает оборот вокруг Солнца за 4,6 года на расстоянии 2,77 а.е. Это расстояние как раз указывается правилом Тициуса-Боде. Так был открыт первый астероид, названный Церерой – по имени богини покровительницы Сицилии.

В 1802 году Генрих Ольберс обнаружил ещё один слабый объект, который оказался вторым астероидом. Его назвали Палладой. Паллада делает оборот вокруг Солнца за 4,6 года на расстоянии 2,77 а.е.

Так как открытые астероиды имели малую яркость, астрономы решили, что они невелики по размерам. Действительно, диаметр Цереры – самого большого астероида всего 900 км. Ни Церера, ни Паллада не подходили на роль искомой планеты, но так как оба астероида имели почти одинаковые орбиты, учёные решили, что эта планета взорвалась. Эта гипотеза была подтверждена открытием в 1804 году Юноны (4,4 года, 2,67 а.е.) и в 1807 году Весты (3,6 года, 2,36 а.е.). Пятый астероид был открыт лишь в 1845 году Карлом Генке и получил имя Астрея. К 1890 году было найдено около 300 астероидов.

Изобретение фотографии и применение её в астрономии значительно облегчило поиск малых планет.

В наше время официально зарегистрировано свыше 5000 астероидов и вычислены их орбиты.

Все крупные астероиды открыты давно. У 230 из них диаметр более 100 км. Предполагается, что малых астероидов, с диаметром не более нескольких км около 100 000.

Первоначально астероидам давали женские имена из мифологии, потом просто женские имена. Когда они иссякли, стали давать имена, связанные с фамилиями известных учёных, названиями стран и городов.

Почти все астероиды обращаются между орбит Марса и Юпитера, на расстояниях от 2,2 до 3,6 а.е. от Солнца, поэтому эта область называется поясом астероидов.

Среди астероидов есть семейства, орбиты которых близко подходят одна к другой. Две такие группы называются греками и троянцами. Греки движутся вокруг Солнца приблизительно по орбите Юпитера, на 60° впереди него, а троянцы позади.

Хоть астероидов и много, их общая масса очень мала. Она составляет всего лишь обычный спутник, не дотягивая до малой планеты.

Гипотеза о том, что астероиды – осколки планеты сталкивается с большими трудностями. Масса астероидов недостаточна, чтобы образовать планету. Скорее всего это осколки вещества протопланетной туманности, так и не сумевшие сконденсироваться в планету.

Кольцо астероидов испытывает большую возмущающую силу со стороны Юпитера. Его гравитационное воздействие приводит к тому, что в кольце существует семь больших щелей в интервале 2,2–3,3 а.е. от Солнца. Эти щели называются пробелами Кирквуда.

Каждая щель соответствует орбите, период обращения по которой равен простой дроби ($1/2$, $1/3$ и т.д.) от периода Юпитера. При нахождении на такой орбите небесное тело и Юпитер часто располагаются на одной линии с Солнцем и Юпитер отклоняет астероид на другую орбиту.

Астероиды состоят из твёрдых каменных пород, в которых иногда содержится значительное количество железа. Спектральный анализ показывает, что химический состав астероидов схож с метеоритным.

Астероиды имеют различную форму. Самым вытянутым является Географос. Он меняет свой блеск в шесть раз. Продольный размер астероида больше поперечного почти в 3 раза. Длина составляет 5 км и поперечник 2 км. Период вращения равен 5ч13м. Таких вытянутых астероидов очень мало, всего около 1%.

В феврале 1996 года была запущена ракета со спутником “NEAR” к ближайшему к Земле астероиду Эрос. Этот аппарат станет искусственным спутником астероида. Астероид имеет продолговатое тело размерами 35x15x13 км. В перигелии расстояние 1,13 а.е., в афелии 1,46 а.е. Сближение произойдёт в 1999 году. Аппаратура, установленная на борту спутника, позволит рассмотреть астероид с разрешением 10 м, будет произведён спектральный анализ, определение химического состава планеты.

В 1994 году получены снимки астероида 1994 ХМ, который пролетал на самом близком от Земли расстоянии – 100 000 км. Размеры астероида не превышали 10–20 м. Опасность сближения Земли с такими телами состоит в том, что их часто удаётся обнаружить лишь за несколько часов до максимального сближения. В США на обсерватории Кит Пик (Аризона) постоянно дежурит 90-см. телескоп в поисках таких пришельцев.

Хирон – уникальный объект Солнечной системы. Его орбита лежит между орбитами Сатурна и Урана. Диаметр около 200 км. Возможно, это комета или астероид. Орбита Хирона на протяжении десятков тысяч лет неустойчива, поэтому неизвестно, как он двигался ранее и что с ним будет в будущем. Предполагается, что он прилетел из кометного пояса, находящегося на расстоянии 35–45 а.е. от Солнца.

Наблюдения покрытия Хироном звезды в 1994 году показали, что на поверхности планеты существуют 4 гейзероподобных образования, источающих какое-то тёмное вещество. Одно извергало вещество широким веером, а три других – узкими арками. Это может быть сверхлетучий лёд СО как на кометах или N₂-лёд как на Тритоне и Плутоне.

Веста. Космический телескоп им. Хаббла в 1994 году наблюдал астероид Веста. Получены хорошие снимки с разрешением деталей около 86 км. Диаметр астероида – 525 км.

Ида. Изображение астероида было получено космическим аппаратом “Галилео” на пути к Юпитеру. Размеры около 98 км. У астероида есть небольшой спутник Дактил. Его размеры 1,6 на 1.2 км а поверхность полностью испещрена кратерами.

Тоутатис. Астероид № 4179 был обнаружен в 1989 французскими астрономами и был назван по имени кельтского бога, который был защитником племени древних галлов.

Вытянутая четырёхлетняя орбита астероида простирается изнутри орбиты Земли к основному поясу астероидов.

В декабре 1992 Тоутатис приблизился к Земле на расстояние приблизительно 4 миллиона километров. Были получены хорошие изображения астероида с помощью наземного радара. Изображения Тоутатиса показывают, что он состоит из двух несимметричных объектов, размером 4 и 2.5 километра, которые находятся, вероятно, в контакте друг с другом.

Тоутатис – один из самых странных объектов в солнечной системе, с очень неправильной формой и необычным "кувыркающимся" вращением. И форма и вращение являются результатом многочисленных столкновений. Вследствие этого странного вращения астероид не имеет фиксированного северного полюса. Он блуждает по кривой на астероиде каждые 5.4 дня.

Вращения сотен астероидов было изучено оптическими телескопами. Огромное большинство их вращается с фиксированным полюсом и периодом между одним часом и одним днем, хотя они и могли раньше в течение некоторого времени кувыркаться подобно Тоутатису. Внутреннее трение заставило эти астероиды наладить нормальное вращение за короткое время. Однако, Тоутатис вращается настолько медленно, что этот процесс намного более длительный чем возраст Солнечной системы.

29 сентября 2004 Тоутатис подойдет к Земле на четыре расстояния между Землей и Луной. Его траектория больше чем на несколько столетий с этого времени не может быть предсказана точно. Орбита Тоутатиса является наиболее хаотической из всех.

Пояс Койпера. Недавно обнаружен ещё один небольшой пояс астероидов, находящийся за орбитой Нептуна. Всего открыто 17 тел, вращающихся по орбитам, удалённым на расстояния между 31 и 45 а.е.

В 1951 году астроном Gerard Kuiper предположил, что некоторые кометоподобные тела должны находиться за орбитой Нептуна. Это предположение подкреплялось фактом, что существует семейство комет Юпитера, объекты которого отличаются от тех, которые прилетают из облака Оорта.

Гипотеза Койпера была подтверждена в 1980-ом году, когда компьютерное моделирование формирования солнечной системы показало, что какие-то тела разваливающегося протопланетного диска должны обязательно формироваться на краю солнечной системы.

Согласно этому сценарию, планеты формировались достаточно быстро во внутренней области протозвёздного солнечного диска, а на край должны были переместиться различные остатки.

Пояс Койпера был открыт в 1992, благодаря обнаружению 220-км тела, названного 1992QB1 на месте подозреваемого пояса. Несколько тел подобных размеров были обнаружены впоследствии, подтверждая реальность пояса.

Планета Плутон, открытая в 1930, рассматривается, как самый большой член этого пояса. Спутники Нептуна Triton и Nereid, и спутник Сатурна Phoebe находятся на необычных орбитах и могут квалифицироваться как объекты пояса Койпера.

15.2 Метеоры, метеориты

Метеориты – небольшие твёрдые тела, которые пройдя через земную атмосферу, упали на поверхность Земли. Большинство метеорных тел, которые сталкиваются с Землёй, сгорают в атмосфере, но некоторые из них долетают до поверхности Земли.

По химическому составу метеориты можно разделить на три больших класса:

1. Каменные (аэролиты) – содержащие наименьшее количество железа, менее 20%. Они состоят из того же вещества, что и обычные земные породы. Поэтому их трудно обнаружить. Особенно, если они какое-то время подвергаются воздействию земных погодных условий – дождя, снега, ветра. Таких метеоритов большинство, около 90% от числа всех, сталкивающихся с Землёй.

2. Железокаменные (сидеролиты) – состоят из равных пропорций минералов и металлического железа. Иногда имеют крупнозернистую структуру и поэтому легко опознаются. Они составляют 2% от общего числа, падающих на Землю.

3. Железные (сидериты) – состоят из железа, но могут содержать до 20% никеля. Их всего 6%. Такие метеориты легко обнаруживаются при помощи магнитов и детекторов металлов.

Если железный метеорит разрезать, отполировать и протравить азотной кислотой, то на нём выступает рисунок взаимопроникающих кристаллов металла. Это видманштеттеновы фигуры. Такие кристаллы могли вырасти только при условии, что расплавленная железо-никелиевая глыба остывала очень медленно, в течение миллионов лет.

Большинство метеоритов связаны с астероидами. Они появляются при столкновениях и дроблении более крупных небесных тел.

Время от времени на Землю падают крупные метеориты. Это происходит примерно один раз в 100 000 лет. В Аризоне есть огромный кратер диаметром около 1,5 км. По оценкам учёных метеорит упал 22 000 лет назад. Вокруг кратера было найдено 25 т. железных метеоритов.

Анализ спектра солнечного света, отражённого от астероидов, показывает, что их состав такой же, как у метеоритов.

10% астероидов имеют железокосменный состав. Они довольно крупные и достигают 100–200 км в диаметре. Находятся вблизи орбиты Марса.

10% из всего числа – железные астероиды.

Около 80% астероидов каменные. Метеориты такого типа называют углистыми хондритами. В таких метеоритах много воды и содержатся органические молекулы.

Углистые хондриты состоят из самых старых пород, более древних, чем найденные на Земле и Луне. Это образцы первичного вещества, из которого состояли планетезимали.

Метеор – падающая светящаяся «звезда». Светящаяся чётка, возникающая в небе при движении с высокой скоростью метеорной частицы, сгорающей в атмосфере Земли. Метеоры, в отличие от метеоритов, возникают из рыхлых тел с малой плотностью, образующихся из комет.

Каждые сутки на Землю падает около 3000 т межпланетного вещества. Большая часть этого вещества находится в виде пылевых частиц (называемых микрометеоритами), которые слишком малы и легки, чтобы произвести свечение в атмосфере. Эти частицы просто медленно проходят через атмосферу и оседают на Земле. Образцы такого вещества можно собрать в арктических и антарктических областях.

Когда Земля проходит через потоки более крупных частиц, наблюдаются «звёздные дожди» или метеорные потоки. Ежегодно наблюдается около 10 метеорных потоков. При этом кажется, что метеоры разлетаются из какой-то определённой части неба. Если продлить линии, очерченные метеорами, они пересекутся в какой-то области. Она называется радиантом метеорного потока. Самые крупные радианты находятся в созвездиях Персея, Лиры, Льва, Ориона, Близнецов и потоки называются Персеиды, Лириды, Леониды, Ориониды, Геминиды. В ясную безлунную ночь можно наблюдать до 60 метеоров за час. Иногда их интенсивность может быть очень высокой. Так утром 17 ноября 1966 года в восточной части США наблюдалось более 2000 метеоров в минуту.

15.3 Кометы. Физические процессы в ядрах и хвостах комет. Происхождение комет, метеорные потоки, их связь с кометами

Кометы обладают различными формами и размерами, но их строение в основном схоже. Твёрдая часть кометы, называемая ядром, очень мала – менее 15 км в диаметре. Ядро состоит из частиц пыли и льда, напоминая грязный айсберг. Когда комета приближается к Солнцу, частицы льда испаряются и начинают светиться под действием солнечного света. Вскоре вокруг ядра образуется светящийся газовый шар, называемый комой. Когда комета стремительно приближается к Солнцу, газы «сметаются» в длинный струящийся хвост. В результате действия солнечного ветра и давления излучения, хвост кометы почти всегда направлен от Солнца.

Кометы движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам. Многие из этих орбит очень велики. Для того чтобы совершить полный оборот нужно затратить от 100 000 до 1 млн лет.

Ежегодно наблюдается около 10 комет. Комету почти невозможно обнаружить, если она находится дальше орбиты Юпитера. Большое количество слабых комет проходит совсем незамеченными из-за их малых размеров.

Голладский астроном Оорт предположил, что Солнечная система окружена целым роем комет. Этот рой называется облаком Оорта. Он простирается на расстояние до 50 000 а.е. и окутывает Солнечную систему подобно большому сферическому гало. В облако Оорта входит до 100 млрд комет. Некоторые кометы двигаются по таким вытянутым орбитам, что уходят далеко за пределы Солнечной системы и могут быть захвачены другой звездой. Таким же образом и до нас могут долетать кометы из других миров.

Кометы наблюдались в глубокой древности. Мнения об их природе высказывались самые разные.

Пифагор и Сенека считали, что это звёзды, расположенные над Луной, никогда не пропадающие, но только из-за большого отдаления или укрытия под солнечными лучами, временно невидные, а временно, когда из под солнечных лучей выйдут, или сверху спустятся, видны.

При этом Демокрит и Анаксагор думали, что кометы это оптический обман, происходящий из-за суперпозиции световых волн в Космосе.

Гиппократ и Эсхил считали, что кометы – это звёзды, перемещающиеся то вниз, то вверх, то под Солнце.

Буллиялдус писал, что кометы – это такие звёзды, которые существуют в галактике, в Млечном Пути.

Иероним Карданус считал, что на каждой планетной сфере есть большие шары, которые, когда Солнце свои лучи через них пропускает, испаряются, либо выбрасывают огонь или бороду.

До наших дней дошли летописи, где появлению комет приписывались различные катаклизмы, войны, землетрясения, смерть монархов.

Вот пример таких появлений:

1312. (?) Когда Нюю было 600 лет, показалась комета в знаке Рыб, видна была 29 дней, после чего наступил всемирный Потоп.

1944. Появилась комета в знаке Козерога, видна была 65 дней, наступило смешение языков и разселение народов.

2010. Показалась комета в знаке Овна, видна была 70 дней, после чего сгорели Содом и Гоморра. Голод, кровавые войны.

2128. Показалась комета в знаке Льва, наступил в Египте голод.

2770. В знаке Близнецов была комета, после чего началась Троянская война. 2795. Была комета в Овне, после которой наступила суматоха во всём мире.

3489. Была видна комета в виде рога. После чего Ксеркс пошёл на Грецию с 1000000 солдат и был разбит под Саламином.

3504. Комета была видна 75 дней, после чего камень от Солнца упал в реку Эгос. Пелопонесская война. Лакедемоняне победили Афинян.

3519. 60 дней была видна комета, конец Пелопонесской войны.

3557. Была комета, после которой Афиняне потерпели поражение в Сицилии. Дарий завоевал Мидян.

3596. Комета в Орионе заняла треть неба, после чего зима очень морозная. Конец Лакедемонян, в Греции неприятности.

3616. Комета, похожая на гребень. Разрушение Дельфийского храма.

3628. Комета вблизи экватора. Ветер разбурил Коринф, потом Филипп Македонский захватил Афины.

3634. Комета видна была 60 дней, после чего Александр Великий начал походы.

Кометы делятся на короткопериодические, долгопериодические и непериодические.

Непериодические кометы движутся по параболам.

Короткопериодические кометы имеют периоды около 3–10 лет. Их афелии не выходят за границы орбиты Юпитера. Предполагается, что это семейство образовалось из-за захвата Юпитером комет, которые двигались ранее по более вытянутым орбитам.

Кометы очень сильно меняют свои орбиты при прохождении вблизи планет-гигантов или близко к Солнцу. В конце концов, они распадаются на мелкие части и метеорные потоки. Яркость короткопериодических комет со временем ослабевает, а в некоторых случаях даже наблюдался распад кометы. Примером может служить комета Биэлы, которая наблюдалась в 1772, 1815, 1826, 1832 годах. А в 1845 – 1846 годах распалась на две части.

Ядра комет состоят из льдов H_2O , CO , CO_2 , NH_3 , HCN .

Кометные хвосты делятся на несколько типов:

1. Образуется при ускорении солнечным ветром кометных ионов, направлен в сторону противоположную Солнцу.

2. Состоит из пылинок, имеющих размер от долей до десятков микрометров. Этот хвост несколько изогнут.

3. Сильно изогнуты. Состоят из ещё более крупной пыли.

Выбросы из головы, направленные прямо к Солнцу.

Хвосты могут растягиваться на расстояния 10 км.

В 1991 году было открыто странное небесное тело. Первоначально его сочли астероидом 1991DA (18.02.1991). Но параметры очень характерные для кометы. Период обращения 40 лет, афелийное расстояние 22 а.е. наклон орбиты 62° . Однако следы комы не зарегистрированы. Предположили, что это “мёртвая” комета.

15.4 Наиболее известные кометы

Комета Веста. Была открыта в 1975 году. Яркость головы в 1976 году была сравнима с яркостью Венеры, так что комету можно было наблюдать и днём недалеко от диска Солнца.

Считается, что это была самая крупная и самая яркая комета XX века.

Хвост имеет лучистую структуру. При пролёте вблизи перигелия ядро распалось на четыре части. Это случилось под действием приливных сил Солнца.

Масса первичного ядра была 10^{18} г. В следующий раз комета прилетит к Земле через 1000 лет.

Комета Галлея. Эдмунд Галлей впервые объяснил движение комет по теории Ньютона и предсказал в 1705 году, что одна из комет, движение которой он изучал, вернётся в 1758 году. Эта комета вернулась и была названа кометой Галлея. Она наблюдалась и намного раньше. Некоторые учёные предполагают, что её появление сопровождало рождению Иисуса Христа.

При своём появлении в 1066 году она была запечатлена на гобеленах, описывающих завоевание Англии норманнами. Период кометы 76 лет.

Последний раз комета подлетала к Земле весной 1986 года. Специально для её изучения были направлены три космических аппарата. Два советских “Вега-1” и “Вега-2” и один Европейского сообщества – “Джотто”.

Станция “Вега-2” прошла на расстоянии 8200 км от ядра. Наблюдатели при этом зафиксировали редкое явление – от кометы оторвался хвост.

Вещество оторвавшегося хвоста находится в плазменном состоянии. В спектрах хвоста видны эмиссионные линии CO^+ и N_2^+ .

Предполагается, что причиной отрыва плазменного хвоста может быть взаимодействие межпланетного магнитного поля с магнитным полем кометы. Возможно, что отрыв явился причиной временного прекращения газовой выделительной активности из ядра. Через несколько часов после отрыва у кометы снова образуется плазменный хвост.

Станция “Джотто” прошла на расстоянии 1500 км от ядра и передала изображение головы кометы. Ядро имеет удлинённую форму $16 \times 7,5 \times 7,5$ км.

Состоит на 80% из водяного льда. Ядро имеет очень низкую отражательную способность. Оно покрыто слоем пыли, причём температура пыли более 300К. Под пылевой коркой находится грязный лёд.

Ядро вращается с периодом 7,4 суток вокруг длинной оси.

Первые столкновения с частицами пыли зафиксированы уже на расстоянии 250 тыс. км от ядра. При тесном сближении станция испытала более 120 столкновений в секунду. Наиболее многочисленными оказались пылинки из органических веществ CHON. Масса пылинок около 10^{-6} г.

На фотографиях ядра видны холмы и кратеры.

Тема 16 Основные параметры Солнца

16.1 Размеры, масса, средняя плотность, температура.

Вращение Солнца

Солнце – обычная звезда, наблюдающаяся с Земли в виде круга, размеры которого немного меняются с течением года из-за изменения расстояния от Земли до Солнца.

Когда Земля находится в перигелии (начало января), видимый диаметр Солнца составляет $32'35''$, а в афелии (начало июля) – $31'31''$.

На среднем расстоянии от Земли видимый диаметр Солнца составляет $960''$, что соответствует линейному радиусу $= 696\,000$ км.

$$R_{sol} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ км } 960''/206265'' = 696\,000 \text{ км.}$$

Объём Солнца:

$$V_{sol} = 4/3\pi R_{sol}^3 = 1,41 \cdot 10^{18} \text{ км}^3 = 1,41 \cdot 10^{27} \text{ м}^3.$$

Масса Солнца:

$$m_{sol} = 1,99 \cdot 10^{33} \text{ г} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

Средняя плотность вещества:

$$\rho_{sol} = m_{sol} / (4/3\pi R_{sol}^3) = 1,41 \text{ г/см}^3.$$

Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца:

$$g_{sol} = fm_{sol}/R_{sol}^2 = 2,74 \cdot 10^4 \text{ см/с}^2 = 274 \text{ м/с}^2.$$

Температура Солнца:

– Эффективная температура, определяемая полным потоком излучения $= 5770 \text{ К.}$

- По положению максимума излучения в спектре 6750 К.
- Цветовые температуры для разных длин волн:
- $4700\text{--}5400 \text{ \AA}$ температура 6500 К.
- $4300\text{--}4700 \text{ \AA}$ температура 8000 К.
- в зелёных лучах – 6400 К.
- в радиодиапазоне метровых волн достигает миллиона К.

Температура солнечного вещества меняется с глубиной. Различное излучение доносит до нас температуру разных глубин. Радио-, ультрафиолетовое и видимое излучения относятся соответственно к всё более и более глубоким слоям Солнца.

Вблизи самой поверхности Солнца расположен слой, обладающий минимальной температурой -4500 К. , который можно наблюдать в ультрафиолетовых лучах. Выше и ниже этого слоя температура растёт.

Большая часть солнечного вещества должна быть сильно ионизована. При температуре $5\text{--}6000 \text{ К}$ ионизируются атомы многих металлов, а при температуре $10\text{--}15000 \text{ К}$ ионизируется водород. Солнечное вещество представляет собой плазму, т.е. газ, большинство атомов которого ионизовано. Лишь в тонком слое вблизи видимого края ионизация слабая и преобладает нейтральный водород.

Наблюдения отдельных деталей на солнечном диске, а также измерения смещений спектральных линий в различных его точках говорят о движении солнечного вещества вокруг одного из солнечных диаметров, называемого *осью вращения* Солнца.

Плоскость, проходящая через центр Солнца и перпендикулярная к оси вращения, называется плоскостью солнечного экватора. Она образует с плоскостью эклиптики угол в $7^\circ 15'$ и пересекает поверхность Солнца по экватору. Угол между плоскостью экватора и радиусом, проведённым из центра

Солнца в данную точку на его поверхности, называется *гелиографической широтой*.

Угловая скорость вращения Солнца убывает по мере удаления от экватора и приближения к полюсам.

В среднем $\omega = 14^\circ,4 - 2^\circ,7 \sin^2 B$, где B – гелиографическая широта. Угловая скорость измеряется углом поворота за сутки.

Сидерический период экваториальной области равен 25 суток, вблизи полюсов он достигает 30 суток. Вследствие вращения Земли вокруг Солнца его вращение кажется более замедленным и равно 27 и 32 суток соответственно (синодический период).

16.2 Солнечный спектр, распределение в нём энергии.

Химический состав. Солнечная постоянная

В видимой области излучение Солнца имеет непрерывный спектр, на фоне которого заметно несколько десятков тысяч тёмных линий поглощения, называемых *фраунгоферовыми*. Наибольшей интенсивности непрерывный спектр достигает в синезелёной части, у длин волн 4300–5000 Å. В обе стороны от максимума интенсивность спектра убывает.

Внеатмосферные наблюдения показали, что Солнце излучает в невидимые коротковолновую и длинноволновую области спектра. В более коротковолновой области спектр резко меняется. Интенсивность непрерывного спектра быстро падает, а тёмные *фраунгоферовы* линии сменяются *эмиссионными*.

Самая сильная линия солнечного спектра находится в ультрафиолетовой области. Это резонансная линия водорода L_α с длиной волны 1216 Å.

В видимой области наиболее интенсивны резонансные линии H и K ионизованного кальция. После них по интенсивности идут первые линии *бальмеровской* серии водорода H_α , H_β , H_γ , затем резонансные линии натрия, линии магния, железа, титана, других элементов. Остальные многочисленные линии отождествляются со спектрами около 70 известных химических элементов из таблицы Д.И. Менделеева. Присутствие этих линий в спектре Солнца свидетельствует о наличии в солнечной атмосфере соответствующих элементов. Установлено присутствие на Солнце водорода, гелия, азота, углерода, кислорода, магния, натрия, железа, кальция и др. элементов.

Преобладающим элементом на Солнце является водород. На его долю приходится 70% массы Солнца. Следующим является гелий – 29% массы. На остальные элементы вместе взятые приходится чуть больше 1%.

Поток излучения от Солнца принято характеризовать *солнечной постоянной* Q , под которой понимают полное количество солнечной энергии, проходящей за 1 минуту через перпендикулярную к лучам площадку в 1 см^2 , расположенную на среднем расстоянии Земли от Солнца.

По современным измерениям её значение известно с точностью до 1%:

$$Q = 1,95 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}) = 1,36 \cdot 10^6 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 1360 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Умножая эту величину на площадь сферы с радиусом в 1 а.е. получим полное количество энергии, излучаемое Солнцем по всем направлениям в единицу времени, т.е. его интегральную светимость. Она равна $3,8 \cdot 10^{26}$ Дж/с.

Единица поверхности Солнца (1 м^2) излучает $6,28 \cdot 10^7$ Вт.

Интегральная светимость Солнца отличается исключительным постоянством. Слабые колебания солнечной постоянной находятся в пределах 1%.

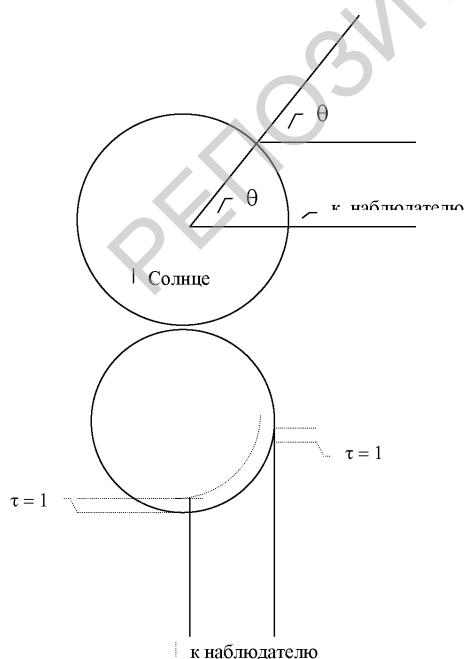
У поверхности Земли поток солнечного излучения уменьшается из-за поглощения и рассеяния в земной атмосфере и составляет в среднем 800–900 Вт/м².

16.3 Фотосфера Солнца. Потемнение к краю. Грануляция

Фотосферой называется основная часть солнечной атмосферы, в которой образуется видимое излучение, имеющее непрерывный характер. Таким образом, она излучает практически всю приходящую к нам солнечную энергию. Фотосфера – это тонкий слой газа протяжённостью в несколько сотен километров, достаточно непрозрачный.

Фотосфера видна при непосредственном наблюдении Солнца в белом свете в виде кажущейся его “поверхности”.

При наблюдении солнечного диска заметно его потемнение к краю. По мере удаления от центра, яркость убывает очень быстро. Этот эффект объясняется тем, что в фотосфере происходит рост температуры с глубиной.



Различные точки солнечного диска характеризуют углом θ , который составляет луч зрения с нормалью к поверхности Солнца в рассматриваемом месте. В центре диска этот угол равен 0, и луч зрения совпадает с радиусом Солнца. На краю $\theta = 90^\circ$ и луч зрения скользит вдоль касательной к слоям

Солнца. Большая часть излучения некоторого слоя газа исходит от уровня, находящегося на оптической глубине $\tau=1$. Когда луч зрения пересекает слои фотосферы под большим углом θ , оптическая глубина $\tau=1$ достигается в более внешних слоях, где температура меньше. Вследствие этого интенсивность излучения от краёв солнечного диска меньше интенсивности излучения его середины.

Уменьшение яркости солнечного диска к краю в первом приближении может быть представлено формулой:

$$I(\theta) = I_0(1 - u + \cos \theta),$$

где $I(\theta)$ – яркость в точке, в которой луч зрения составляет угол θ с нормалью, I_0 – яркость излучения центра диска, u – коэффициент пропорциональности, зависящий от длины волны.

Фотосфера сильно излучает, а следовательно и поглощает излучение во всей области видимого непрерывного спектра.

Для каждого слоя фотосферы, расположенного на определённой глубине, можно найти его температуру. Температура в фотосфере растёт с глубиной и в среднем равна 6000 К.

Протяжённость фотосферы равна нескольким сотням км.

Плотность вещества фотосферы – 10^{-7} г/см³.

В 1 см³ фотосферы содержится около 10^{16} атомов водорода. Это соответствует давлению в 0,1 атм.

В этих условиях все химические элементы с небольшими потенциалами ионизации ионизируются. Водород же остаётся в нейтральном состоянии.

Фотосфера это единственная на Солнце область нейтрального водорода. Визуальные и фотографические наблюдения фотосферы позволяют обнаружить её тонкую структуру, напоминающую тесно расположенные кучевые облака. Светлые округлые образования называются гранулами, а вся структура – грануляцией. Угловые размеры гранул составляют не более 1'' дуги, что соответствует 700 км. Каждая отдельная гранула существует 5–10 минут, после чего она распадается и на её месте образуются новые гранулы. Гранулы окружены тёмными промежутками. В гранулах вещество поднимается, а вокруг них опускается. Скорость этих движений 1–2 км/с.

Грануляция – проявление конвективной зоны, расположенной под фотосферой. В конвективной зоне происходит перемешивание вещества в результате подъёма и опускания отдельных масс газа.

Причиной возникновения конвекции в наружных слоях Солнца являются два важных обстоятельства. С одной стороны, температура непосредственно под фотосферой очень быстро растёт вглубь и лучеиспускание не может обеспечить выхода излучения из более глубоких горячих слоёв. Поэтому энергия переносится самими движущимися неоднородностями. С другой стороны, эти неоднородности оказываются живучими, если газ в них не полностью, а лишь частично ионизован.

При переходе в нижние слои фотосферы газ нейтрализуется и не способен образовывать устойчивые неоднородности. поэтому в самих верхних

частях конвективной зоны конвективные движения тормозятся и конвекция внезапно прекращается.

Колебания и возмущения в фотосфере порождают акустические волны. Наружные слои конвективной зоны представляют своеобразный резонатор в котором возбуждаются 5-минутные колебания в виде стоячих волн.

16.4 Внешние слои солнечной атмосферы: хромосфера и корона. Причины и механизм нагрева хромосферы и короны

Плотность вещества в фотосфере быстро уменьшается с высотой и внешние слои оказываются сильно разреженными. В наружных слоях фотосферы температура достигает 4500 К, а потом снова начинает расти.

Происходит медленный рост температуры до нескольких десятков тысяч градусов, сопровождающийся ионизацией водорода и гелия. Эта часть атмосферы называется *хромосферой*.

В верхних слоях хромосферы плотность вещества достигает $10\text{--}15\text{ г/см}^3$.

В 1 см^3 этих слоёв хромосферы содержится около 10^9 атомов, но температура возрастает до миллиона градусов. Здесь начинается самая внешняя часть атмосферы Солнца, которая называется солнечной короной.

Причиной разогрева самых внешних слоёв солнечной атмосферы является энергия акустических волн, возникающих в фотосфере. При распространении вверх, в слои с меньшей плотностью, эти волны увеличивают свою амплитуду до нескольких километров и превращаются в ударные волны. В результате возникновения ударных волн происходит диссипация волн, которая увеличивает хаотические скорости движения частиц и происходит рост температуры.

Интегральная яркость хромосферы в сотни раз меньше чем яркость фотосферы. Поэтому для наблюдения хромосферы необходимо применение специальных методов, позволяющих выделить слабое её излучение из мощного потока фотосферной радиации.

Наиболее удобными методами являются наблюдения в моменты затмений. Протяжённость хромосферы составляет 12–15 000 км.

При изучении фотографий хромосферы видны неоднородности, наиболее мелкие называются *спикулами*. Спикулы имеют продолговатую форму, вытянуты в радиальном направлении. Длина их составляет несколько тысяч км, толщина около 1 000 км. Со скоростями в несколько десятков км/с спикулы поднимаются из хромосферы в корону и растворяются в ней. Через спикулы происходит обмен вещества хромосферы с вышележащей короной. Спикулы образуют более крупную структуру, называемую хромосферной сеткой, порождённую волновыми движениями, вызванными значительно большими и более глубокими элементами подфотосферной конвективной зоны, чем гранулы.

Корона имеет очень малую яркость, поэтому может наблюдаться лишь во время полной фазы солнечных затмений. Вне затмений она наблюдается с

помощью коронографов. Корона не имеет резких очертаний и обладает неправильной формой, сильно меняющейся со временем.

Наиболее яркую часть короны, удалённую от лимба не более, чем на $0,2-0,3$ радиуса Солнца принято называть внутренней короной, а остальную, весьма протяжённую часть – внешней короной.

Важной особенностью короны является её лучистая структура. Лучи бывают различной длины, вплоть до десятка и более солнечных радиусов.

Внутренняя корона богата структурными образованиями, напоминающими дуги, шлемы, отдельные облака.

Излучение короны является рассеянным светом фотосферы. Этот свет сильно поляризован. Такую поляризацию могут вызвать только свободные электроны.

В 1 см^3 вещества короны содержится около 10^8 свободных электронов. Появление такого количества свободных электронов должно быть вызвано ионизацией. Значит, в короне в 1 см^3 содержится около 10^8 ионов. Общая концентрация вещества должна быть $2 \cdot 10^8$.

Солнечная корона представляет собой разреженную плазму с температурой около миллиона кельвинов. Следствием высокой температуры является большая протяжённость короны. Протяжённость короны в сотни раз превышает толщину фотосферы и составляет сотни тысяч километров.

Тема 17 Внутреннее строение Солнца

17.1 Модель внутреннего строения Солнца

В силу сферической симметрии физические свойства Солнца одинаковы на одинаковых расстояниях от центра. В зависимости от свойств вещества, Солнце можно разделить на 4 слоя.

Центральная область простирается на расстояние до $0,2$ радиуса называется ядром. Это зона энерговыделения. Температура в ядре $1,5 \cdot 10^7 \text{ К}$. Давление достигает $3 \cdot 10^{11} \text{ атм}$. В этих условиях атомы водорода движутся со скоростями до сотен км/с. При условии высокой плотности (150 г/см^3) часто происходят столкновения атомов. Некоторые из таких столкновений приводят к тесным сближениям атомных ядер, необходимым для возникновения ядерных реакций. Солнечное ядро – это самоуправляемый термоядерный реактор, в котором происходит синтез ядер гелия из ядер водорода (протон-протонный цикл).

Реакция начинается с β -распада одного из двух протонов в момент тесного их сближения:



При β -распаде протон превращается в нейтрон с испусканием позитрона e^+ и нейтрино ν . Объединяясь со вторым протоном, нейтрон даёт ядро тяжёлого водорода – дейтерия ${}^2\text{D}$. Для каждой пары протонов процесс в среднем осуществляется за 14 млрд лет, что и определяет медленность термоядерных реакций на Солнце и общую протяжённость его эволюции.

Далее происходят столкновения дейтерия с третьим протоном и образование ядер изотопа ^3He , которые, объединяясь и испуская два протона, дают ядро обычного гелия.

Масса ядра гелия на 1% меньше массы четырёх протонов. Эта потеря массы называется дефектом массы и является причиной выделения в результате ядерных реакций большого количества энергии в виде γ -излучения и испускания нейтрино. При рождении одного ядра гелия выделяется энергия $= 4,129 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} = 25,8 \text{ МэВ}$.

Нейтрино обладают ничтожной массой покоя, распространяются со скоростью света и на Земле должны составлять поток 10^{11} частиц через 1 см^3 за секунду. Светимость Солнца поддерживается превращением в гелий 600 млн т водорода. Основная часть энергии переносится из ядра жёстким электромагнитным излучением, которое миллионы лет диффундирует к поверхностным слоям Солнца. На расстоянии 0,3 радиуса от центра температура становится меньше 5 млн К, давление ниже 10 млрд атм. и ядерные реакции происходить уже не могут.

Ядро окружено зоной лучистого равновесия, или зоной лучистого переноса энергии. Эта зона простирается на расстояние от 0,2 до 0,7 радиуса.

Энергия ядра к внешним слоям переносится излучением. Электромагнитная волна сама переносит свою энергию. В этой зоне значительная часть движущихся из недр фотонов частично поглощается, частично рассеивается свободными ядрами и электронами, поэтому перенос энергии сопровождается уменьшением средней энергии квантов, а также уменьшением температуры, давления и плотности вещества. Эти слои только передают наружу излучение, выделившееся на большей глубине в виде гамма-квантов, которые поглощаются и переизлучаются отдельными атомами. Вместо каждого поглощённого кванта большой энергии атомы излучают несколько квантов меньших энергий. Поглощая, атом ионизируется или сильно возбуждается и приобретает способность излучать. Однако возвращение электрона на исходный энергетический уровень происходит не сразу, а через промежуточные состояния, при переходах между которыми выделяются кванты меньших энергий. В результате этого происходит дробление жёстких квантов на менее энергичные. Поэтому вместо гамма-лучей излучаются рентгеновские, вместо рентгеновских – ультрафиолетовые, которые в свою очередь уже в наружных слоях дробятся на кванты видимых и тепловых лучей, окончательно излучаемых Солнцем.

На расстоянии 0,7 радиуса от центра температурный режим становится таким, что уже могут существовать нейтральные атомы водорода и гелия ($T = 10^6 \text{ К}$, $p = 10^6 \text{ атм}$, $\rho = 10^{-2} \text{ г/см}^3$).

Перенос энергии излучением становится неэффективным. В отдельных объёмах газа температура может возрастать, они становятся более лёгкими и поднимаются вверх, на их место опускаются более холодные массы газа. Возникают крупномасштабные движения вещества – конвекция, которая и

является основным механизмом переноса энергии к поверхностным слоям. Эта зона называется конвективной.

Часть энергии при относительном движении потоков плазмы в конвективной зоне превращается в энергию электрических и магнитных полей.

Протяжённость конвективной зоны $1,5 \cdot 10^6$ км (0,2 радиуса). Скорость движения вещества значительно возрастает. От нескольких м/с до 3 км/с.

Над конвективной зоной на расстоянии 0,9 радиуса от центра и выше располагается атмосфера.

17.2 Активные образования в атмосфере Солнца: пятна, флоккулы, протуберанцы, вспышки

В солнечной атмосфере возникают и исчезают меняющиеся образования, резко отличающиеся от окружающих невозмущённых областей.

В фотосфере, хромосфере и короне проявления солнечной активности различны. Однако все они связаны общей причиной. Их вызывает магнитное поле, всегда присутствующее в активных областях.

Факелы. В невозмущённых областях фотосферы имеется лишь общее магнитное поле Солнца, напряжённость которого составляет 1 эрстед. В активных областях напряжённость магнитного поля увеличивается в сотни и даже тысячи раз. Небольшое увеличение магнитного поля до десятков и сотен эрстед сопровождается появлением в фотосфере более яркой области, называемой факелом. В общей сложности факелы могут занимать значительную долю всей видимой поверхности Солнца. Они отличаются характерной тонкой структурой и состоят из многочисленных прожилок, ярких точек и узелков – факельных гранул. Лучше всего факелы видны на краю солнечного диска. Они горячее соседней невозмущённой области на 200–300 К и слегка выступают над уровнем невозмущённой фотосферы.

Факелы могут существовать без изменений в течение нескольких недель и месяцев.

Пятна. В областях факелов с наибольшим усилением магнитного поля могут возникать солнечные пятна.

Пятно появляется в виде маленькой поры. Через день пора развивается в круглое тёмное пятно с резкой границей, диаметр которого увеличивается до размеров в несколько десятков тысяч километров.

Всё явление сопровождается плавным увеличением напряжённости магнитного поля, которое в центре крупных пятен достигает нескольких тысяч эрстед. Иногда возникает несколько пятен в пределах небольшой области, вытянутой параллельно экватору – группа пятен. Сильнее всего развиваются два пятна – ведущее (западное) и хвостовое (восточное). Магнитные поля обоих главных пятен всегда обладают противоположной полярностью, поэтому такую группу называют биполярной. Наибольшей величины площадь, занимаемая пятнами достигает на десятый день. После этого пятна начинают постепенно уменьшаться и исчезать. В целом весь процесс занимает около двух месяцев.

В центре пятна яркость меньше всего в 10 раз прилегающей областей фотосферы. Температура в пятне на 2 000 градусов меньше чем в фотосфере.

В конце мая 1995 года учёные Китт-Пикской обсерватории обнаружили в инфракрасных спектрах солнечных пятен линии поглощения водяного пара. Оказалось, что в пятнах существует водяной пар, нагретый до 1000°C.

Флоккулы. Хромосфера над пятнами и факелами увеличивает свою яркость. Контраст растёт с высотой. Эти яркие пятна называются флоккулами. Повышенная яркость флоккула можно объяснить увеличением плотности вещества в хромосфере в 3–5 раз при неизменном значении температуры.

Хромосферные вспышки. В хромосфере в области между развивающимися пятнами вблизи границы раздела полярности сильных магнитных полей, наблюдаются хромосферные вспышки. В начале вспышки яркость одного из светлых узелков флоккула внезапно возрастает. За короткое время, около минуты, сильное излучение распространяется вдоль длинного жгута или заливает целую область протяжённостью в десятки тысяч километров. Вспышка бывает заметна в белом видимом свете на фоне фотосферы. Одновременно с видимым излучением растёт интенсивность ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, мощность радиоизлучения.

После достижения максимума излучение ослабевает в течение нескольких десятков минут. Эти явления объясняются выделением большого количества энергии в результате неустойчивости плазмы, находящейся в области очень неоднородного магнитного поля. В результате взаимодействия магнитного поля и плазмы значительная часть энергии магнитного поля переходит в тепло, нагревая газ до температуры в десятки миллионов градусов, а также идёт на ускорение облаков плазмы и элементарных частиц.

Весь процесс имеет характер взрыва, сопровождающегося сильным сжатием вещества в некотором объёме хромосферы. Ускоренные в процессе вспышки частицы имеют большие энергии и являются космическими лучами. Их энергия всё же меньше, чем у частиц, приходящих из далёких областей Галактики, поэтому их называют “мягкими” космическими лучами.

Корпускулярные потоки ещё менее энергичных частиц распространяются со скоростями 500–1000 км/с.

Протуберанцы. Активные образования, наблюдающиеся в короне. Это более плотные и холодные облака, светящиеся примерно в тех же спектральных линиях, что и хромосфера. Чаще всего это длинные, очень плоские образования, расположенные почти перпендикулярно к поверхности Солнца. В проекции на солнечный диск протуберанцы видны в виде изогнутых волокон. Это наиболее грандиозные образования в солнечной атмосфере. Их длина достигает сотен тысяч километров, а ширина не выше 6000–10000 км.

Нижние части сливаются с хромосферой, а верхние простираются на десятки тысяч километров в корону.

Через протуберанцы постоянно происходит обмен вещества хромосферы и короны.

Возникновение, развитие и движение протуберанцев тесно связано с эволюцией групп солнечных пятен. На первой стадии развития активной

области пятен образуются короткоживущие и быстро меняющиеся протуберанцы вблизи пятен. На более поздних стадиях возникают устойчивые спокойные протуберанцы, существующие без заметных изменений в течение нескольких недель и месяцев, после чего может наступить стадия активизации протуберанца, проявляющаяся в возникновении сильных движений, выбросов вещества в корону и появлении быстро движущихся эруптивных протуберанцев.

Активные области в короне. Внешний вид солнечной короны тесно связан с проявлением активности в более низких слоях атмосферы. Над пятнами наблюдаются характерные образования в виде изогнутых лучей, напоминающие кусты, а также уплотнения коронального вещества в виде округлых облаков – корональные конденсации. Над факелами видны целые системы прямолинейных, слегка волнистых лучей. Протуберанцы обычно бывают окружены дугами и шлемами из уплотнённого вещества короны. Все эти образования часто переходят в длинные лучи, простирающиеся на много радиусов Солнца.

17.3 Общее магнитное поле Солнца, магнитное поле в области солнечных пятен и иных образований

Неизбежность существования магнитного поля у Солнца вытекает из факта существования внутри некоторых слоёв Солнца вертикального и горизонтального движений плазмы.

В 1953 году американский астроном У.Бэбкок обнаружил существование слабого магнитного поля дипольного характера с магнитным моментом, ориентированным вдоль оси вращения Солнца. Напряжённость общего магнитного поля 1–2 Гс. Обнаруженное магнитное поле оказалось переменным – приблизительно каждые 11 лет оно “переворачивается”, т.е. меняет полярность. Силовые линии общего магнитного поля должны быть расположены в меридиальных плоскостях. Наиболее распространённый способ определения параметров магнитного поля по измерению степени “расщепления” спектральных линий в солнечных спектрограммах (эффект Зеемана).

Наблюдения показали, что магнитное поле Солнца не может быть описано только дипольной составляющей. Так в отдельных активных областях фотосферы обнаружены локальные магнитные поля, напряжённость которых существенно превышает напряжённость общего магнитного поля.

Появлению факельных гранул предшествует увеличение напряжённости магнитного поля до 500–700 Гс, появлению поры – до 1000–2000 Гс, пятна – до 5000 Гс. Рассасывание локального магнитного поля ведёт к исчезновению соответствующего активного образования.

Образование локальных магнитных полей можно объяснить следующим образом: Дифференциальное вращение Солнца приводит к деформации силовых линий общего магнитного поля. Они вытягиваются параллельно

экватору, скручиваются в спираль – полоидальное поле превращается в тороидальное. Дальнейшая деформация силовых линий приводит к неустойчивости общего магнитного поля и его распаду на магнитные силовые трубки. Внутри трубки плотность магнитного поля существенно выше плотности общего магнитного поля. Однако, плотность плазмы внутри трубки существенно меньше плотности плазмы окружающей Среды. Магнитная трубка всплывает на поверхность фотосферы, образуя локальные магнитные поля разной напряжённости. Незначительное увеличение напряжённости в силовой трубке подавляет хаотическую составляющую конвективного движения плазмы и, тем самым, облегчает вынос на поверхность фотосферы горячих объёмов газа – образуется факел.

Усиление напряжённости до 1000–5000 Гс подавляет уже не только хаотическую, но и горизонтальную составляющую конвективного движения, т.е. подавляется сама конвекция и прекращается вынос в атмосферу горячего вещества конвективной зоны – появляются холодные поры и пятна.

Магнитные силовые трубки, как неустойчивые образования, разрушаются, происходит перестройка общего магнитного поля и процесс повторяется в противоположной полярности.

В солнечной короне наблюдаются полярные лучи, дуговые системы, петлеобразные протуберанцы, корональные выбросы плазмы и т.п. Все эти корональные элементы отличаются не только внешним видом, но температурой и плотностью образующего их вещества. Уплотнения вещества и разнотемпературные области могут долго существовать только благодаря наличию магнитных барьеров. Таким образом, структурные детали короны как бы обрисовывают топологию её магнитных полей. Движение плазмы возможно только вдоль магнитных силовых линий, поэтому изучение динамики корональных образований позволяет детально изучить форму и динамику силовых линий общего и локальных магнитных полей. Установлено, что напряжённость магнитного поля в тонких деталях внутренней короны (примыкающей к хромосфере и переходному слою) = 20–30 Гс, в корональных конденсациях = 100 Гс, в фоновой короне – 1–2 Гс. Корональная плазма сосредоточена внутри магнитных трубок, которые формируются выходящими из фотосферы и хромосферы магнитными полями. Там, где магнитные силовые линии замыкаются, на разных полюсах магнитного поля фотосферных и хромосферных активных образований наблюдаются системы *корональных арок*.

Форма опакал и корональных лучей повторяет форму замкнутых магнитных силовых линий, простирающихся далеко за пределы диска Солнца.

Вблизи полюсов магнитные силовые линии разомкнуты и уходят в межпланетное пространство – здесь в короне нет арочных структур, яркость короны сильно ослаблена, наблюдаются *корональные дыры*.

17.4 Радио- и рентгеновское излучение Солнца. Солнечный ветер и магнитосфера Земли

Солнечная корона полностью прозрачна для видимого излучения, но плохо пропускает радиоволны, которые испытывают в ней сильное поглощение и преломление.

На метровых волнах яркостная температура короны достигает миллиона градусов. На более коротких волнах она уменьшается. Это связано с увеличением глубины, откуда выходит излучение, из-за уменьшения поглощающих свойств плазмы.

Радиоизлучение солнечной короны прослежено на расстояния в несколько десятков радиусов. Это возможно благодаря тому, что Солнце ежегодно проходит мимо мощного источника радиоизлучения – Крабовидной туманности и солнечная корона затмевает его. Происходит рассеяние излучения туманности в неоднородностях короны.

Наблюдаются всплески радиоизлучения Солнца, вызванные колебаниями плазмы, связанными с прохождением через неё космических лучей во время хромосферных вспышек.

Рентгеновское излучение изучено при помощи специальных телескопов, установленных на космических аппаратах. Рентгеновское изображение Солнца имеет неправильную форму с множеством ярких пятен и “клочковатой” структурой. Вблизи оптического лимба заметно увеличение яркости в виде неоднородного кольца. Особенно яркие пятна наблюдаются над центрами солнечной активности, в областях, где находятся мощные источники радиоизлучения на дециметровых и метровых волнах. Это означает, что рентгеновское излучение возникает в основном с солнечной короне. Рентгеновские наблюдения Солнца позволяют проводить детальные исследования структуры солнечной короны непосредственно в проекции на диск Солнца.

Рядом с яркими областями свечения короны над пятнами обнаружены обширные тёмные области, не связанные ни с какими заметными образованиями в видимых лучах. Они называются корональными дырами и связаны с участками солнечной атмосферы, в которых магнитные поля не образуют петель. Корональные дыры являются источником усиления солнечного ветра. Они могут существовать в течение нескольких оборотов Солнца и вызывать на Земле 27-дневную периодичность явлений, чувствительных к корпускулярному излучению Солнца.

В межпланетном пространстве существует непрерывный поток плазмы, текущий радиально от Солнца со скоростью 100–1000 км/с и достигающий расстояний 100 а.е. Это явление получило название *солнечный ветер*.

Своим происхождением солнечный ветер обязан короне. Нагретая до высочайших температур корона не может находиться в состоянии гидростатического равновесия и должна расширяться. При этом корональное вещество (плазма) непрерывно ускоряется и на расстоянии в несколько

радиусов Солнца достигает скорости звука, а далее превосходит её в несколько раз.

Солнечный ветер – поток протонов и электронов с небольшой примесью (2–20%) ионов гелия и некоторых других элементов.

В пределах орбиты Земли скорость протонов – 400 км/с, концентрация протонов 6 в см³. За счёт солнечного ветра Солнце ежегодно теряет до 10^{-14} своей массы. Общий поток кинетической энергии, уносимый от Солнца солнечным ветром – 10^{27} эрг/с.

Потоки солнечного ветра вблизи Солнца движутся по силовым линиям его магнитного поля. Однако, на расстоянии 2–3 радиуса скорость солнечного ветра значительно увеличивается и коллективное движение протонов и электронов увлекает магнитные силовые линии за собой. Это явление получило название “вмороженность” магнитного поля в плазму. Структура солнечного ветра неразрывно связана с магнитным полем Солнца и меняется с изменением солнечной активности. Вращение Солнца придаёт вытянутым (замыкающимся на краю гелиосферы на расстоянии 10^5 а.е.) магнитным силовым линиям форму спиралей. Средняя напряжённость межпланетного магнитного поля $6 \cdot 10^6$ Гс. Электроны и протоны солнечного ветра движутся по спиральям, радиус которых зависит от массы и скорости частиц: радиус спиралей для электронов около нескольких км, для протонов – нескольких сотен км.

При сближении с Землёй происходит деформация силовых линий межпланетного магнитного поля – возникают поперечные волны Альвена. При резком усилении скорости плазмы солнечного ветра на границе с магнитосферой Земли возникает магнитогидродинамическая ударная волна, приводящая к существенным деформациям магнитного поля Земли (магнитные бури).

Плазма солнечного ветра, встречая на своём пути планету, частично огибает это препятствие, частично им поглощается.

Солнечный ветер, набегаящий на атмосферу, образует ударную волну. За фронтом ударной волны расположена переходная область, в которой направленная скорость существенно меньше, но концентрация частиц, температура и напряжённость магнитного поля больше, чем в невозмущённом солнечном ветре. Частицы солнечного ветра отклоняются магнитным полем задолго до того, как они вступают в соприкосновение с ионосферой. Картина магнитных линий в магнитном поле заметно деформируется.

Магнитное поле Земли удерживает огромное количество энергичных частиц, электронов и протонов. Их энергия и концентрация зависят от расстояния до Земли и геомагнитной широты. Частицы заполняют радиационные пояса.

Вся область околоземного пространства, заполненная заряженными частицами, движущимися в магнитном поле Земли, называется *магнитосферой*.

Она отделена от межпланетного пространства магнитопаузой. Вдоль магнитопаузы частицы корпускулярных потоков солнечного ветра обтекают магнитосферу.

Через лучистое и корпускулярное излучение Солнца и межпланетное магнитное поле осуществляется непрерывное влияние на все процессы, происходящие на поверхности Земли и в земной атмосфере.

Возмущения магнитного поля сопровождаются нарушениями радиосвязи в полярных районах.

Сильные магнитные бури происходят при наличии вблизи центра солнечного диска больших групп пятен. Но связаны они с солнечными вспышками, которые появляются во время развития группы пятен. Жёсткое излучение вспышки вызывает в ионосфере резкое увеличение ионизации.

17.5 Цикличность солнечной активности и её связь с явлениями на Земле

Главным возбудителем жизнедеятельности Земли является Солнце. Весь его спектр, начиная от коротких – невидимых, ультрафиолетовых волн и кончая длинными красными, а также все его электронные и ионные потоки. Статистические исследования показали, что в те годы, месяцы и недели, когда электромагнитная и радиоактивная деятельность Солнца увеличивается, на Земле, на разных материках, в разных странах увеличивается число массовых феноменов, например, заболевания, смертность от разных причин и другое. Обнаруживается соответствие между солнечными и земными феноменами. Количество пятен и других связанных с ними проявлений солнечной активности периодически меняется. Эпоха, когда количество центров активности наибольшее, называется максимумом солнечной активности.

В качестве меры степени солнечной активности пользуются условными числами Вольфа.

$$W = k(f + 10g),$$

где f – сумма общего числа пятен, g – число их групп.

Коэффициент пропорциональности k зависит от мощности применяемого инструмента.

Обычно число Вольфа усредняют по месяцам или годам и строят график зависимости солнечной активности от времени.

Максимумы и минимумы чередуются через каждые 11 лет, хотя промежутки времени между отдельными последовательными максимумами могут колебаться в пределах от 7 до 17 лет.

В течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна биполярных групп имеют некоторую полярность в северном полушарии и противоположную в южном. В следующем цикле полярность ведущих и хвостовых пятен меняется на противоположную. Одновременно с этим меняется и полярность общего магнитного поля Солнца.

летний цикл имеют и другие характеристики Солнца: доля площади, занятая факелами и флоккулами, частота вспышек, количество протуберанцев, форма короны, мощность солнечного ветра.

Некоторые исследователи выделяют и более продолжительные циклы, например, 33,33 года, 66,67 и 88,33 года, а также период в 266 лет.

Самый длительный цикл солнечной активности – 1800 лет. С этим циклом связывают значительные изменения климата на Земле.

Примерно около –4000 лет был период наибольшей влажности. С этих времён остались легенды о всемирном потопе, были найдены археологические подтверждения того, что сильно разливались реки Тигр и Евфрат, Амударья, был влажный климат в Сахаре.

Примерно к –3000 году период влажности сменился периодом усыхания. Понижились уровни альпийских озёр, сократилось оледенение Северной Атлантики, из Сахары люди переместились к Нилу и к озеру Чад.

Максимум новой эпохи увлажнения пришёлся на –200 год. Были затоплены многие свайные селения в Альпах, лес стал наступать на степь, широко разлилось Ладожское озеро. В Сахаре снова установился благоприятный климат.

В очередной период эпохи влажности в Европе были суровые зимы и снегопады. В –219 году армия Ганнибала с большим трудом преодолела снежные завалы в Альпах. В –177 году в Северной Греции вымерзли все деревья и сильные ветры сносили дома.

Засушливый период 6–10 вв. н.э. привёл к обмельчанию Каспийского моря, заселению горных долин Кавказа и Альп.

В 860 году викинги открыли Исландию и колонизовали её. В 895 году началось заселение Гренландии. Здесь были плодородные земли и хорошие пастбища.

С 13 века в Гренландии начались похолодания. Надвинулись с севера льды, население перестало заниматься скотоводством и земледелием. Последнее норвежское судно посетило Гренландию в 1377 году, а из Гренландии приплыло в Норвегию в 1410 году. Спустя 132 года экспедиция, отправленная из Европы в Гренландию не нашла ни одного жителя.

Максимум последней эпохи увлажнения приходится на 13–16 века. Вода в Каспийском море поднялась настолько, что затопила часть Баку. В Альпах и на Кавказе ледники достигли небывалой мощности. В Европе были сильнейшие морозы.

В нынешнее время идёт сухой период. В Альпах из-под отступающих ледников показались мощёные римлянами дороги, мелеет Каспийское море, усыхают озёра и реки.

Статистическими исследованиями было установлено, что солнечные пертурбации оказывают непосредственное влияние на сердечно-сосудистую, нервную и другие системы человека, а также на микроорганизмы.

В. Зейбель тщательно исследовал описания древних авторов, касающиеся чумы Юстиниана 580–581 гг. Согласно его работе с 513 года начался ряд необычайных явлений в природе, которые кончились лишь в 570 году.

В 513 году началось извержение Везувия, затем были опустошительные землетрясения, например, в Антиохийском погибло 250 тыс. человек. В 542 году чума появилась в Константинополе, в 543 году землетрясения потрясли всю Европу. С 552 года открылся новый цикл стихийных бедствий, землетрясений во всех странах древнего мира по берегам Средиземного моря.

В 526 году случилось настолько значительное уменьшение и потускнение солнечного света, что оно потеряло свой блеск и стало походить на луну, оставаясь без сияния в течение целого года.

Летописцы упоминают об огненном метеоре, разрушительных грозах 556 года, о засухах 562–563 гг., о появлении трёх комет в период сильной чумы, о движении саранчи в последнюю эпоху эпидемии, о необычном размножении рыб и др. необычных явлениях.

Современники чумной эпидемии 1348–1351 годов оставили много наблюдений природы.

Так, Мюсси писал, что в Китае шёл дождь из змей и жаб, в Индии землетрясение разрушило многие города, после чего с неба сошло пламя и сожгло их дотла вместе с людьми и животными. Во многих местах “с неба текли потоки крови и падали камни”.

В 1334 году в Китае стихийные бедствия и болезни уничтожили около 5 млн человек.

В 1348 году в Европе, в год наибольшего распространения чумы с юга на север и с востока на запад, прокатилось несколько сильнейших землетрясений. Было разрушено много городов и замков.

Летописцы упоминают о нечистом воздухе, тяжёлых испарениях, густых облаках, закрывающих небо, о неприятном жаре, утомляющем тело и стесняющем дыхание. Необычные зловония и испарения, поднявшиеся с земли, отмечены в Египте, Греции, Далмации, Германии. В Италии в 1347 году людей приводили в ужас “таинственные пары”, направлявшиеся с севера на юг. Некоторые летописцы упоминают о влиянии новолуний на обострение эпидемий.

В это же время отмечалось и множество болезней у животных.

В зависимость от степени напряжённости солнечной активности поставлены следующие физические явления на Земле:

- напряжённость земного магнетизма, магнитные бури, их частота,
- частота полярных сияний,
- частота появления пёристых облаков,
- частота появления галосов и венцов вокруг Солнца и Луны,
- количество ультрафиолетовой радиации,
- количество радиоактивной эманации в воздухе,
- степень ионизации верхних слоёв атмосферы, изменение радиоприёма,
- частота и интенсивность грозовой деятельности,
- количество озона в воздухе,
- количество тепловой радиации,
- температура воздуха у поверхности Земли и воды морей,
- давление воздуха, частота бурь, ураганов, смерчей,
- количество осадков, частота градобитий, число полярных айсбергов,
- высота уровня озёр,
- колебания климата, возмущения климата,
- землетрясения.

Явления в органическом мире Земли, поставленные в связи с периодической деятельностью Солнца:

- величина урожая кормовых злаков,
- количество и качество добываемого вина,
- рост древесины,
- время зацветания растений, пышность цветения растений,
- размножаемость и миграция насекомых,
- размножаемость, миграции рыб, количество икры в печени некот. рыб,
- время весеннего прилёта птиц,
- размножаемость и миграции животных, падёж скота,
- количество кальция в крови,
- частота поражения человека ударами молнии,
- колебания веса младенцев,
- психопатические эпидемии, массовые истерии, галлюцинации,
- частота эффективных преступлений,
- частота несчастных случаев,
- модификация нервной возбудимости нервно-психического тонуса,
- частота внезапных смертей, обострений, ухудшений в течении болезней,
- частота эпилептических припадков,
- колебания общей смертности,
- рождаемость, – брачность,
- эпидемии и пандемии.

Тема 18 Звезды и расстояния в межзвездной среде

18.1 Методы определения расстояния в астрономии.

Единицы расстояния – парсек и световой год, соотношения между ними

Самым распространённым методом определения расстояний до звёзд является метод годового параллакса. Он опирается на знание расстояния от Земли до Солнца. Современные радиолокационные данные дают значение а.е. = 149 597 870,5 ± 1,6 км. Удвоенная астрономическая единица является базисом, находясь на краю которого можно измерить параллактические углы ближайших звёзд, и определить расстояния до них. Расстояния находятся из треугольника, у которого известны одна сторона и два прилежащих угла.

$$D = \frac{1 \text{ а.е.}}{\sin \pi} = \frac{206\,265'' \text{ а.е.}}{\pi''}$$

Расстояние, соответствующее годовому параллаксу в 1'', называется парсеком (пс).

$$1 \text{ пс} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

Если D выражается в парсеках, то $D = 1/\pi''$.

Расстояние, составляющее 1000 парсек, называется килопарсеком, а расстояние 1 000 000 парсек – мегапарсеком.

Расстояние, которое свет проходит за один год, распространяясь со скоростью около 300 000 км/с, называется *световым годом*.

1 световой год = $9,46 \cdot 10^{12}$ км = 63198 а.е. = 0,3064 пс.

1 пс = 3,26 светового года.

Ближайшая к нам звезда имеет параллакс, равный $0,75''$, т.е. находится на расстоянии 4,3 светового года, или 1,3 пс.

В современной астрономии используется фотографический метод для определения параллаксов звёзд. Он был развит в начале 19 века Шлезингером на длиннофокусном рефракторе Йеркской обсерватории.

Из многих миллионов звёзд параллаксы измерены только у нескольких тысяч. Современные каталоги параллаксов включают около 8000 звёзд. Ежегодно измеряется лишь по 60–80 тригонометрических параллаксов. Ошибки измерения составляют $0,004''$ или более. Таким образом, измеренный параллакс звезды, находящейся на расстоянии 50 пс может иметь значение от $0,016$ до $0,024''$. Ошибка измерения очень велика. Точные параллаксы можно найти только для близких звёзд (до 20 пс).

Использование новых методов позиционных измерений с использованием современных светоприёмников и спутниковой астрономии позволит измерять параллаксы звёзд, находящихся на расстояниях 75–100 пс.

Расстояния между звёздами очень велики. Межпланетная станция “Пионер-10”, покинувшая пределы Солнечной системы, окажется у одной из самых близких звёзд – звезды Барнарда, находящейся на расстоянии 1,8 пс в 12490 году.

18.2 Основные характеристики звезд

Звёзды – сферически симметричные газовые (плазменные), раскалённые тела, находящиеся в состоянии теплового и гидростатического равновесия.

Это наиболее распространённые объекты во Вселенной. В них расположено более 98% массы космического вещества. Остальная часть рассеяна в межзвёздном пространстве.

Существование отдельной звезды в течение миллиардов лет как стабильного объекта является следствием равновесия между силами гравитационного сжатия, газового и лучевого давления, количеством и скоростью генерации энергии и процессами теплоотвода (излучения). Звезда является устойчивой саморегулирующей системой. Малейшее изменение хотя бы одного из указанных факторов неизбежно вызывает изменение других факторов и внутреннюю перестройку звезды.

Невооружённому глазу небо представляется в виде множества светящихся точек. Видимую яркость звезды, а точнее ту освещённость, которую создаёт звезда на единице поверхности приёмника, оценивают видимой звёздной величиной.

Видимая звёздная величина не отражает абсолютную характеристику звезды. Она зависит от расстояния, на котором находится звезда от

наблюдателя. Поэтому вводят такое понятие, как абсолютная звёздная величина, под которой понимают ту звёздную величину, которую бы имела звезда, будучи удаленной, на расстояние, равное 10 парсекам.

Абсолютная и видимая зв. величины связаны формулой:

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

Её можно переписать в следующем виде:

$$M - m = 5 - 5 \lg r.$$

Разность $M - m$ называется модулем расстояния.

Межзвёздная среда заполнена газом и пылью. Излучение звезды при её прохождении частично рассеивается, частично поглощается. Поэтому для получения реальных результатов в вышеприведённые формулы вводят параметр, описывающий характер среды $A(m)$.

$$M - m = 5 - 5 \lg r - A(m).$$

Физические характеристики звезды и её жизненный путь определяются массой, которую звезда имела в момент рождения, и начальным химическим составом. На величину массы накладываются ограничения физическими процессами, происходящими при сжатии фрагмента молекулярного облака, из которого родилась звезда.

Диапазон возможных масс 10^{-2} – 10^2 массы Солнца. При массах меньше указанного предела, в центральных районах формирующейся звезды не возникают условия, необходимые для возникновения и протекания термоядерных реакций. При массе больше предельной мощное излучение ядра активно противодействует дальнейшей концентрации вещества на поверхности звезды, либо, если масса и плотность слишком велики, облако в процессе эволюции сжимается в чёрную дыру.

Наблюдения показывают, что массы самых больших звёзд – голубых гигантов V класса светимости не превышают 60 масс Солнца, а массы красных карликов – порядка 0,1 массы Солнца.

18.3 Температура, радиусы, светимости

Непосредственные определения радиусов звёзд, за некоторыми исключениями, невозможны. Все звёзды находятся на очень большом расстоянии и даже самые крупные оптические телескопы не могут разрешить их угловые размеры.

Только недавно удалось получить вид истинного диска звезды Бетельгейзе с помощью космического телескопа им. Хаббла. Изображение показывает огромную ультрафиолетовую атмосферу с таинственным горячим пятном на поверхности. Огромное яркое пятно больше чем десять диаметров Земли и имеет температуру на 2 000 К большую, чем окружающая поверхность звезды. Характер пятна неизвестен. Оно может вызываться пульсациями, обнаруженными в гигантской звезде, или воздействием мощного магнитного поля.

Увидеть диск звезды возможно, потому что Бетельгейзе – настолько большая звезда, что если бы она находилась на месте Солнца, в центре Солнечной системы, то её внешняя атмосфера простиралась бы за орбиту Юпитера.

Угловые диаметры 20–30 ближайших звёзд определены с помощью звёздных интерферометров.

Принцип работы интерферометра основан на интерференции света звезды, отражённого парой широко расставленных зеркал.

Иногда для определения угловых размеров звезды удаётся использовать вид интерференционной картины, возникающей во время покрытия звёзд Луной. Линейные радиусы можно определить у затменно – переменных звёзд по продолжительности затмения.

Если для звезды с расстоянием r найден угловой диаметр d'' , то её линейный поперечник может быть легко вычислен по формуле

$$D = d''r / 206\,265''.$$

Радиусы звёзд варьируются в широком диапазоне. Самые большие звёзды – красные сверхгиганты с радиусами в 100–1000 раз превышающими солнечный. Самые малые звёзды – белые карлики и нейтронные звёзды, радиусы которых в 100–10000 раз меньше солнечного.

Звезда Лейтена в созвездии Кита имеет диаметр в 10 раз меньше земного, а нейтронные звёзды имеют размеры порядка 10 км.

Средняя плотность красных сверхгигантов 10^{-6} г/см³, а нейтронных звёзд более 10^{14} г/см³, т.е. сравнима по плотности с ядерной материей.

Различие в физических характеристиках звёзд определяет всё разнообразие нашей Галактики.

Поток энергии, излучаемый звездой по всем направлениям, называется светимостью.

$$\lg(L_3/L_C) = 0,4(M_C - M_3),$$

где M_C и M_3 – абсолютные звёздные величины Солнца и любой звезды соответственно, а L_C и L_3 – их светимости.

Обычно светимость Солнца принимается равной 1, и светимости звёзд выражаются в единицах светимости Солнца. Тогда:

$$\lg L_3 = 0,4(M_C - M_3),$$

Отношение светимостей самых ярких и самых слабых звёзд достигает около 100 млрд.

Голубые гиганты и красные сверхгиганты имеют светимость равную 800 000 солнечной. Красные карлики спектрального класса M имеют светимость 0,0001 солнечной.

До недавнего времени самой яркой звездой считали β Ориона. Однако сейчас самой яркой звездой в Галактике считается звезда Лебедь OB-2№12. Она превосходит блеском некоторые слабые галактики. Излучение в видимой части спектра в 1 млн. Раз больше солнечного. Если бы она была на месте α Центавра, светила бы ярче полной Луны. Это голубой сверхгигант, $T = 13 \cdot 10^3$ К.

Находится на расстоянии 50700 св. лет. Эта звезда окружена плотным облаком пыли, которое пропускает 0,0001 всего светового излучения. Возможно, это облако образовалось из-за потери массы звездой.

В 1988 году была идентифицирована звезда, принадлежащая к классу коричневых карликов. Это самые слабые объекты, доступные наблюдениям. Яркость в 20 000 раз слабее солнечной. Масса меньше в 20 раз. Находится на расстоянии 68 св. лет от Солнца. Малая масса не позволяет зажечься ядерным реакциям. Такие звёзды могут образовывать скрытую массу галактик (по некоторым подсчётам до 90% всей массы).

В 1994–1995 годах исследования на Паломарской обсерватории и космическом телескопе дали фотографию коричневого карлика. Эта звезда называется Gliese 229B (GL229B), и является маленьким компаньоном холодной красной звезды Gliese 229, находящейся на расстоянии 19 св. лет от Земли в созвездии Зайца. Масса карлика равна 20–50 масс Юпитера.

GL229B слишком массивен и горяч, чтобы быть планетой, но слишком маленький и прохладный, чтобы сиять подобно звезде. Светимость его в 100,000 раз меньше, чем у Солнца. Этот коричневый карлик самый слабый объект когда-либо замеченный на орбите вокруг другой звезды и обладает спектром, похожим на спектр Юпитера. Инфракрасные спектроскопические исследования показали, что карлик имеет много метана. Метан не обнаружен в звёздах, но содержится в планетах-гигантах Солнечной системы.

Масса звезды около 8% массы Солнца.

Коричневые карлики образуются также как и остальные звёзды, но не имеют достаточно массы, чтобы генерировать высокие температуры в недрах, достаточные для разжигания ядерных реакций.

Коричневые карлики имеют тот же механизм разогрева, что и планеты-гиганты через гравитационное сжатие.

Под температурой звёзд обычно понимают эффективную температуру. Эффективной температурой тела называется температура такого абсолютно чёрного тела, каждый квадратный сантиметр которого во всём спектре излучает такой же поток энергии, как и 1 см² данного тела.

$$T_{eff} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon}{\sigma}},$$

где $a = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Для определения эффективной температуры необходимо знать полный поток излучения и радиус звезды. Достаточно точно эти величины могут быть измерены для немногих звёзд. Для остальных звёзд эффективные температуры находят косвенными методами на основании изучения их спектров или показателей цвета с помощью шкалы эффективных звёздных температур.

Шкалой эффективных звёздных температур называется зависимость цветовых характеристик излучения звёзд, например, спектрального класса или показателя цвета, от эффективных температур. Если известна шкала температур, то, определив из наблюдений спектральный класс или показатель цвета данной звезды, легко найти её температуру. Температурная шкала

определяется эмпирически по звёздам с известными эффективными температурами, а также для звёзд некоторых типов теоретически.

Шкала эффективных температур звёзд.

Спектр. класс	гл. послед.	гиганты	сверхгиганты
O5	40 000		
B0	28 000		
B5	15 500		
A0	10 000		
A5	8 500		
F0	7 400		6 400
F5	6 600		
G0	6 000	5 700	5 400
G5	5 400	5 000	4 700
K0	4 700	4 300	4 000
K5	4 000	3 600	3 400
M0	3 600	3 400	2 800
M5	3 000	2 800	

Температура может быть найдена, если известен показатель цвета C по формуле:

$$T = 7200^\circ / (C + 0^m, 64).$$

Если известна болометрическая светимость звезды, или её эффективная температура, можно найти размеры звезды.

Светимость звезды:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{эфф}}^4.$$

Если применить полученное выражение к Солнцу, светимость и радиус которого нам известны, то получим:

$$L_C = 4\pi R_C^2 \sigma T_C^4.$$

Деля почленно эти равенства, получим:

$$R = R_C \left(T_C / T_{\text{эфф}} \right)^2 \sqrt{L / L_C},$$

логарифмируя, получаем:

$$\lg(R / R_C) = 1/2 \lg(L / L_C) + 2 \lg(T_C / T_{\text{эфф}}).$$

Если выразить радиус и светимость звезды в солнечных единицах, получим:

$$\lg R = 1/2 \lg L + 2 \lg(T_C / T_{\text{эфф}}).$$

18.4 Спектры, спектральная классификация.

Аномалии химического состава

Звёзды имеют непрерывные спектры, на которые накладываются тёмные и яркие спектральные линии. Различия спектров звёзд заключается в

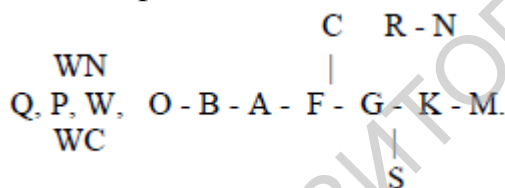
количестве и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, а также в распределении энергии в непрерывном спектре.

Часть лучей, проходящих через атмосферу звезды, поглощается, причём это поглощение может быть непрерывным, когда ослабляется некоторый более или менее протяжённый участок спектра, и избирательным, когда поглощаются узкие участки спектра.

Спектры большинства звёзд удалось расположить в виде последовательности, вдоль которой линии одних химических элементов постепенно ослабевают, а других – усиливаются. Сходные между собой спектры объединяются в спектральные классы. Тонкие различия между ними позволяют выделить подклассы. Звёзды, принадлежащие различным спектральным классам, отличаются своими температурами.

Эта классификация была впервые применена на Гарвардской обсерватории в начале нашего века. Позднее Гарвардская классификация дополнялась и видоизменялась и сегодня – это сложная схема с множеством индексов и подразделов. В результате работы гарвардских астрономов появился “Каталог Генри Дрэпера”, содержащий спектральные характеристики 225 320 звёзд северного и южного полушария неба и включающий практически все звёзды до 9 зв. величины.

В Гарвардской классификации спектральные типы обозначены буквами латинского алфавита



Класс О. большая интенсивность ультрафиолетовой области свидетельствует о высокой температуре. Свет этих звёзд кажется голубоватым. Наиболее интенсивны линии ионизованного гелия и многократно ионизованных углерода, кремния, азота, кислорода. Есть слабые линии нейтрального гелия и водорода.

Класс В. Наибольшую интенсивность имеют линии нейтрального гелия. Цвет голубовато – белый. Типичная звезда – Спика.

Класс А. Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Цвет белый. Типичные звёзды – Вега, Сириус.

Класс F. Линии водорода ослабевают. Усиливаются линии ионизованных металлов (кальция, железа, титана). Цвет желтоватый. типичная звезда – Процион.

Класс G. Очень интенсивны линии ионизованного кальция. Цвет жёлтый. Типичная звезда – Солнце.

Класс К. Фиолетовый конец ослаблен, что свидетельствует о сильном уменьшении температуры. Цвет красноватый. Типичные звёзды – Арктур, Альдебаран.

Класс М. Линии металлов ослабевают. Спектр пересечён полосами поглощения молекул окиси титана и других молекулярных соединений. Цвет красный. Типичная звезда – Бетельгейзе (альфа Ориона).

Кроме основных классов есть ответвления от классов G и K, представляющие собой звёзды с аномальным химическим составом, отличающимся от химического состава большинства других звёзд.

Класс С. Содержит углеродные звёзды. В спектрах выделены линии поглощения атомов и полос поглощения молекул углерода.

Класс S. Циркониевые звёзды. Вместо полос окиси титана присутствуют полосы окиси циркония.

В классах R и N заметны различные молекулярные соединения.

Буквой Q обозначаются спектральные классы новых звёзд.

Буквой P обозначаются спектральные классы спектров планетарных туманностей.

Буквой W обозначаются спектры звёзд типа Вольфа – Райе – очень горячие звёзды, в спектрах которых много эмиссионных линий.

В спектрах звёзд WN видны спектральные линии азота.

В спектрах звёзд WC видны спектральные линии углерода. Температуры фотосфер этих звёзд очень высоки: от 60 000 до 100 000 К.

Внутри каждого спектрального класса можно установить плавную последовательность подклассов, переходящих из одного в другой. Каждый класс (кроме O) делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от 0 до 9, которые ставятся после буквы.

Спектральный класс O делится на подклассы от O4 до O9,5.

После таких обозначений ставятся разные значки, если спектр обладает особенностями. Если присутствуют эмиссионные линии, ставится буква e. Звёзды – сверхгиганты часто отличаются глубокими узкими линиями. Это отмечается буквой s (сF0). Давление газа в той области звёздной оболочки, где образуются спектральные линии, влияет на их ширину. При малой плотности и малом давлении спектральные линии тонкие и резко очерченные. Эта особенность указывает на высокую светимость.

Интенсивность избранных линий поглощения позволяет судить о светимости звезды, является она гигантом или карликом. В первом случае перед спектральным классом ставится индекс g (гигант), во втором – d (карлик).

Другие особенности, нетипичные для данного класса обозначаются буквой p (pecular) – пекулярные спектры (A5p).

Осевое вращение звёзд приводит к расширению и размыванию спектральных линий. Поэтому введены индексы n – диффузные линии, и s – резкие линии, они пишутся рядом с обычным символом спектрального класса.

Помимо Гарвардской классификации была разработана ещё спектральная классификация звёзд по светимостям. Она называется Йеркская классификация или “классификация МКК” по имени разработчиков – Моргана, Кинана и Колльмана.

В этой классификации оставлены спектральные классы Гарвардской классификации, но введено понятие о классе светимости, который определяется

по виду и относительной интенсивности некоторых избранных для этой цели спектральных линий. Класс светимости – это характеристика абсолютной звёздной величины.

Ia – яркие сверхгиганты (светимость около 10 000)

Iab – промежуточные сверхгиганты.

Ib – слабые сверхгиганты (светимость 5 000)

II – яркие гиганты.

III – слабые (нормальные) гиганты.

IV – субгиганты.

V – карлики (большинство звёзд главной последовательности).

VI – субкарлики.

VIIa и VIIb – белые карлики.

Тема 19 Диаграмма Герцшпрунга – Рэссела

19.1 Основные группы звёзд на диаграмме

"спектр – светимость": главная последовательность, сверхгиганты, гиганты, субкарлики, белые карлики

В 1905 году Эйнар Герцшпрунг и в 1910 году Генри Рэссел установили существование зависимости между видом спектра и светимостью звёзд. Эта зависимость иллюстрируется графиком, по одной оси которого откладывается спектральный класс, по другой – абсолютная звёздная величина. Эта диаграмма называется *диаграммой спектр-светимость* или *диаграммой Герцшпрунга – Рэссела*.

Вместо абсолютной звёздной величины можно откладывать светимость, а вместо спектральных классов – показатели цвета или эффективную температуру. Положение каждой звезды на диаграмме определяется её физической природой и стадией эволюции. Поэтому на диаграмме запечатлена вся история рассматриваемой системы звёзд.

Диаграмма позволяет выделить различные группы звёзд, объединённые общими физическими свойствами, и установить зависимость между некоторыми их физическими характеристиками. С помощью диаграммы можно исследовать химический состав и эволюцию звёзд.

Верхняя часть диаграммы соответствует звёздам большой светимости, которые при данном значении температуры отличаются большими размерами. Здесь располагаются гиганты и сверхгиганты.

Нижняя часть диаграммы занята звёздами малой светимости. Здесь находятся карлики.

В левой части располагаются горячие звёзды более ранних спектральных классов, а в правой – более холодные звёзды, соответствующие более поздним спектральным классам.

Диагональ, идущая слева вниз направо, называется главной последовательностью. Вдоль неё расположены звёзды, начиная от самых горячих до наиболее холодных.

19.2 Классы светимости. Метод спектральных параллаксов

Детальное изучение диаграммы позволяет выделить несколько последовательностей, помимо главной, но обладающих большей дисперсией. Эти последовательности говорят о наличии у некоторых звёздных групп индивидуальной зависимости светимости от температуры.

Эти последовательности называются классами светимости (от I до VII).

I – Сверхгиганты. Занимают на диаграмме верхнюю часть и разделяются на несколько последовательностей.

II – яркие гиганты (располагаются на диаграмме)

III – слабые (нормальные) гиганты (между сверхгигантами и главной последовательностью)

IV – субгиганты (между сверхгигантами и главной последовательностью)

V – карлики (большинство звёзд главной последовательности).

VI – субкарлики. Образуют последовательность, проходящую ниже главной примерно на одну звёздную величину, начиная от класса A0 вправо.

VIIa и VIIb – белые карлики. Занимают нижнюю часть диаграммы. Принадлежность звезды к данному классу светимости устанавливается на основании специальных дополнительных признаков спектральной классификации. Сверхгиганты обладают узкими и глубокими линиями, а белые карлики – очень широкими линиями.

В спектрах карликов линии некоторых металлов относительно слабее, чем у гигантов тех же спектральных классов. Спектры субкарликов отличаются слабостью всех металлических линий, что связано с меньшим содержанием металлов в этих звёздах.

Определение класса светимости может служить основой для спектроскопического определения абсолютных звёздных величин и расстояний. *Метод определения расстояний, основанный на эмпирической зависимости светимости звёзд от отношения интенсивностей определённых линий в спектре, называется методом спектральных параллаксов.*

Спектральные параллаксы могут быть определены для очень удалённых объектов, если изучены их спектры.

Например, если известно, что звезда принадлежит к какому-то спектральному классу, мы по линиям спектра заключаем к какому классу светимости она относится: гигантам, главной последовательности или карликам. Определив таким образом абсолютную звёздную величину и измерив визуальную, можем найти расстояние до звезды по формуле:

$$\lg r = (m - M + 5)/5.$$

Ошибка определения расстояния по этому методу составляет 20% и не зависит от расстояния.

19.3 Диаграмма "радиус – масса" и "масса – светимость"

Из формулы

$$\lg R = 1/2 \lg L + 2 \lg(T_c/T_{\text{эфф}}).$$

следует, что радиусы, светимости и эффективные температуры звёзд связаны зависимостью.

Для каждой последовательности звёзд на диаграмме спектр – светимость можно установить определённое соотношение между спектральным классом и радиусом.

Отложим по одной оси абс. болометрическую зв. величину и логарифм зв. температуры по другой. На такой диаграмме положение всех звёзд, имеющих одинаковые радиусы, изобразится прямыми линиями, т.к. зависимость между $\lg L$ и $\lg T$ линейная. На рисунке показаны линии постоянных радиусов, позволяющие легко найти размеры звезды по её светимости и спектру.



Радиусы различных звёзд меняются в больших пределах: от сотен и тысяч радиусов Солнца до тысячной доли радиуса Солнца.

Главная последовательность и последовательность сверхгигантов изобразились почти прямыми линиями. Это позволяет установить для данных звёзд эмпирическую зависимость между болометрической светимостью и радиусом. Для звёзд главной последовательности выполняется формула:

$$L_{bol} = R^{5,2}.$$

Масса не может быть определена для одиночных звёзд. Поэтому известны лишь немногие массы звёзд, находящихся в двойных системах. Для немногих звёзд обнаружена эмпирическая зависимость между массой и болометрической светимостью.

$$L_{bol} = M^{3,9}.$$

Из этой формулы следует, что в верхней части главной последовательности находятся самые массивные звёзды с массами в десятки раз большими солнечной. По мере движения вниз массы убывают.

Наиболее густо населённые участки диаграммы Герцшпрунга – Рассела соответствуют наиболее длительным этапам эволюции звёзд. Меняя светимость, звёзды с течением времени меняют своё положение на диаграмме.

19.4 Двойные и кратные звёзды

Наблюдения показывают, что некоторые звёзды объединены в физически связанные между собой пары. Они называются *физическими* двойными звёздами. Существуют также случайные объединения звёзд, когда кажется, что звёзды образуют пару вследствие эффекта проекции двух физически не связанных объектов. Такие пары называются *оптическими*.

Двойные звёзды встречаются очень часто. Их изучение важно для выяснения природы звёзд и для космогонических проблем происхождения и эволюции звёзд.

Оба компонента пары сильно притягиваются друг к другу, но сила притяжения уравнивается центробежной силой вращения. Это приводит к орбитальному движению вокруг общего центра масс. Скорость этого движения и форма орбиты несут информацию о массах небесных тел, поэтому исследования двойных звёзд очень важны. Двойные звёзды, вероятно, образовались одновременно с рождением составляющих их звёзд в результате сжатия первоначального газового облака.

Двойные системы очень многообразны. Существуют пары настолько близкие друг к другу, что их поверхности почти соприкасаются. приливное взаимодействие приводит к тому, что компоненты приобретают форму эллипсоидов и с их поверхностей вещество перетекает с одного компонента на другой или даже постепенно выбрасывается за пределы системы. Периоды обращения таких систем составляют несколько часов.

Например, звезда W Большой Медведицы состоит из двух одинаковых звёзд, которые обращаются вокруг общего центра масс с периодом 8 часов. Расстояние между их центрами около 2 млн км, а поверхности почти соприкасаются. Двойственность такой системы обнаруживается с помощью спектрографа, а также путём изучения взаимных затмений, вызывающих переменность блеска. Эти звёзды нельзя увидеть отдельно. Такие системы называются *спектральнодвойными* или *фотометрическими двойными*, в зависимости от того, с помощью спектрографа или фотометра устанавливается двойственность.

Когда два компонента разделены сильнее, на расстояние в несколько сотен радиусов, их можно разрешить в телескоп. Такие пары называют *визуальнодвойными*.

Расстояния между компонентами этих пар могут быть столь велики, что притяжение других звёзд способно разрушить двойную систему.

Компоненты могут быть одинаковыми, могут быть совсем разными. Иногда одна из звёзд настолько мала, что не видна и выдаёт своё присутствие, вызывая аномалии в движении главной звезды. Такие системы называются *астрометрическими двойными*.

Часто встречаются кратные звёздные системы, состоящие из нескольких звёзд. При этом такие пары могут быть одновременно визуально-двойными, спектрально-двойными и иметь невидимые спутники. Например, звезда Альфа Центавра.

19.5 Орбиты двойных звёзд и метод определения их массы

Движения компонентов двойных звёзд происходит в соответствии с законами Кеплера, оба компонента описывают в пространстве подобные эллиптические орбиты вокруг общего центра масс. Если одна из звёзд значительно меньше другой, то она движется по эллипсу вокруг массивной звезды. Величины больших полуосей двух эллипсов обратно пропорциональны массам звёзд. Таким образом, если из наблюдений известна орбита относительного движения, то можно вычислить сумму масс компонентов двойной звезды по формуле:

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

Если известны отношения полуосей орбит движения звёзд относительно центра масс, то можно найти ещё отношение масс и массу каждой звезды.

Допустим, что главная звезда находится в фокусе эллипса. Точка орбиты спутника, ближайшая к главной звезде, называется периастром, противоположная – апоастром.

Движение спутника характеризуется элементами орбиты: длиной большой полуоси, эксцентриситетом орбиты, углом наклона орбиты (т.е. углом, который она составляет с перпендикулярной лучу зрения картинной плоскостью), периодом обращения спутника, моментом прохождения спутника через периастр, долготой периастра.

19.6 Визуально-двойные звёзды

Видимую орбиту звезды-спутника относительно главной звезды находят по длительным наблюдениям, выполненным в различные эпохи, на протяжении десятилетий.

Иногда сначала обнаруживается двойственность звезды по аномалиям в движении среди звёзд фона главной компоненты, а потом удаётся разрешить пару в телескоп.

Видимая орбита визуально-двойной звезды является проекцией истинной орбиты на картинную плоскость. Поэтому для определения всех элементов орбиты нужно знать угол наклона i . Угол наклона и долгота периастра находятся геометрическим методом. Период обращения, момент прохождения спутника через периастр и позиционный угол находят из наблюдений.

Истинное значение большой полуоси орбиты a и видимое a' связаны формулой:

$$a' = a \sqrt{(1 - \sin^2 \omega \sin^2 i)}.$$

Значение большой полуоси можно найти, только если известен параллакс звезды.

В настоящее время зарегистрировано свыше 60 000 визуально-двойных систем.

У 2000 из них удалось обнаружить орбитальные движения с периодами от 2,62 года до десятков тысяч лет. Однако надёжные орбиты вычислены примерно для 500 объектов с периодами, не превышающими 500 лет.

19.7 Затменно-переменные звёзды. Кривые блеска, определение орбит и физических характеристик компонент

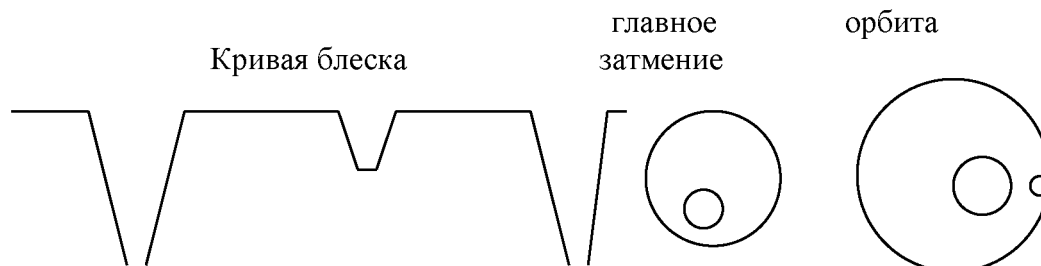
Затменными переменными называются такие неразрешимые в телескопы тесные пары звёзд, видимая зв. величина которых меняется вследствие периодически наступающих для земного наблюдателя затмений одного компонента системы другим. В этом случае звезда с большей светимостью называется главной, а с меньшей – спутником. Типичные примеры – Алголь (β Персея) и β Лиры. Вследствие регулярно происходящих затмений главной звезды спутником, а также спутника главной звездой суммарная видимая зв. величина меняется периодически.

График, изображающий изменение потока излучения звезды со временем называется кривой блеска. Момент времени, в который звезда имеет наименьшую видимую звёздную величину, называется эпохой максимума, а наибольшую – эпохой минимума.

Разность звёздных величин в минимуме и максимуме называется амплитудой, а промежуток времени между двумя последовательными максимумами или минимумами – периодом переменности.

По характеру кривой блеска затменной переменной звезды можно найти элементы орбиты одной звезды относительно другой, относительные размеры компонентов, представление об их форме.

На кривой блеска видны два минимума – глубокий, соответствующий затмению главной звезды и слабый, возникающий, когда главная звезда затмевает спутник.



На основании детального изучения кривых блеска можно получить следующие данные о компонентах затменных переменных звёзд:

1. Характер затмений определяется наклоном и размерами звёзд. Когда диск одной звезды полностью перекрывается диском другой, соответствующие области кривой блеска имеют плоские участки, что говорит о постоянстве излучения системы в течение некоторого времени. Если затмения частные – минимумы острые.

2. На основании продолжительности минимумов находят радиусы компонентов выраженные в долях большой полуоси орбиты, так как продолжительность затмения пропорциональна диаметрам звёзд.

3. Если затмение полное, то по отношению глубин минимумов можно найти отношение светимостей, а при известных радиусах – отношение эффективных температур звёзд.

4. Отношение промежутков времени от середины главного минимума до середины вторичного минимума и от вторичного минимума до следующего главного зависят от эксцентриситета орбиты и долготы периастра. Ассиметрия положения вторичного минимума позволяет найти $e \cos i$.

5. Плавное изменение кривой блеска говорит об эллипсоидальности, вызванной приливным воздействием очень близких компонентов двойных звёзд.

В настоящее время известно около 4000 затменных звёзд различных типов. Минимальный известный период – около часа, максимальный более 57 лет.

19.8 Спектрально-двойные звёзды

В спектрах некоторых звёзд наблюдаются периодическое раздвоение или колебание положения спектральных линий. Если эти звёзды являются затменными переменными, то колебания линий происходят с тем же периодом, что и изменение блеска. При этом в моменты соединений, когда обе звезды движутся перпендикулярно лучу зрения, отклонение спектральных линий от среднего положения равно 0. Если наблюдаемый спектр принадлежит только одной звезде, то вместо раздвоения линий наблюдается их смещение то в красную, то в синюю область спектра. Зависимость от времени лучевой скорости, определённой по смещениям линий, называется кривой *лучевых скоростей*.

В настоящее время известно около 2500 звёзд, двойственная природа которых установлена только на основании спектральных наблюдений. Для 750 из них получены кривые лучевых скоростей, позволяющие найти периоды обращения и форму орбиты.

19.9 Невидимые спутники звёзд и проблема выявления планетных систем

Согласно современным теориям о происхождении планет, они должны формироваться вместе со звёздами. Большинство звёзд в процессе образования должны приобретать несколько планет.

Увидеть в телескоп планеты даже у ближайших звёзд невозможно. Поэтому приходится использовать косвенные методы.

1. Если мы находимся в плоскости планетной системы звезды, то можно наблюдать, как звезда частично затмевается планетой. При прохождении поанеты типа Юпитера по диску звезды блеск изменяется на 0,01 зв. вел. Эти изменения можно измерить современными электрофотометрами. Но если плоскость орбиты планеты ориентирована произвольно, то изменения блеска звезды не будет.

2. Другой способ состоит в том, чтобы наблюдать малые возмущения в положении звезды, обязанные гравитационному притяжению достаточно массивной планеты. Движение звезды носило бы волновой характер. Расчёты О. Струве показали, что отклонение собственного движения от прямолинейного не превышает 0,0005'' в год, т.е. находится за пределами точности телескопов.

3. Спектроскопический метод позволяет выявлять периодические колебания составляющей скорости звезды по лучу зрения. Будут такие промежутки времени, когда орбитальная скорость будет направлена по лучу зрения к нам и от нас.

Период колебания лучевых скоростей будет равен периоду обращения планеты. Такие ничтожно малые изменения длины волны измерить невозможно.

Все эти эффекты очень малы и находятся на пределе возможностей лучших инструментов. Ситуацию можно изменить при наблюдениях на орбитальном телескопе.

Запущенный в 1983 году инфракрасный телескоп ИКАС получил данные о существовании около 10 планетных систем, находящихся в стадии образования, удалённых от Солнца на расстояние до 100 св. лет.

Было обнаружено излучение, исходящее от Веги, но в 10 раз большее ожидаемого. При этом анализ инфракрасного излучения показал, что оно приходит от кольца пылевых частиц, вращающихся вокруг главной звезды.

Расстояние от кольца до центра равно 85 а.е., а масса кольца = 300 масс Земли. Этим же телескопом была обнаружена пыль в туманности Ориона, из которой, возможно, формируются планеты.

Наблюдения с орбитального телескопа можно проводить и в видимых лучах. Такая планета как Юпитер, находящаяся на расстоянии 10 пс. будет видна как звезда 24 величины. Такой объект можно обнаружить на орбитальном телескопе.

Исследования звезды Барнарда ван де Кампом показали, что возле неё находится невидимый спутник малой массы. Звезда Барнарда – расположена на расстоянии 1,8 пс. от нас и движется очень быстро. Изучение траектории её движения позволило обнаружить волнообразный характер движения звезды. Период колебаний собственного движения равен 24 годам. Спутник расположен на расстоянии 4,4 а.е. Масса спутника в 1,5 раза больше массы Юпитера.

По современным статистическим подсчётам около 10% всех звёзд типа Солнца имеют планетные системы.

В последние годы было проведено несколько исследований на космическом телескопе им. Э. Хаббла, обнаруживших планеты возле ближайших звёзд.

1. Деформированный диск звезды β Pictoris свидетельствует о наличии возле неё планеты. (Исследования января 1995 г.)

Это изображение Телескопа показывает внутреннюю область пылевого диска диаметром 350 млрд км вокруг звезды β Pictoris. Диск – немного деформирован. Эта деформация может быть вызвана наличием планеты. Звезда находится на расстоянии 50 св. лет и немного горячее Солнца. (Верхняя часть рисунка – видимое световое изображение диска. Он состоит из микроскопических ледяных и силикатных пылинок, светящихся отражённым светом звезды. Нижняя часть фальшиво раскрашена, чтобы подчеркнуть детали в дисковой структуре.)

2. Космический телескоп обнаружил много протопланетных дисков вокруг рождающихся звёзд в Туманности Ориона.

По материалам космического телескопа было изучено около 100 звёзд в Туманности Ориона и возле около 56 из них найдены протопланетные диски.

HST ясно разрешает молодую звезду в центре каждого пылевого диска. Измерена масса некоторых из дисков. Она достаточна, чтобы образовать планеты, подобные Земле и в несколько раз превышает земную. Диски имеют размеры от 2 до 8 размеров нашей Солнечной системы. Центральные красные звезды приблизительно составляет от 30 % до 150 % массы нашего Солнца.

Пылевые диски в Туманности Ориона возможно содержат те же самые материалы, из которых состоят планеты Солнечной системы – углерод, силикаты и др.

Эти результаты позволяют сделать вывод, что существование планет – это общая закономерность и поднимают вероятность существования жизни вне Земли.

Единственная подтвержденная планетарная система до настоящего времени состоит из трех схожих с Землёй тел, обращающихся вокруг нейтронной звезды, находящейся на расстоянии 1 000 св. лет.

Звёзды в скоплении Ориона очень молодые – имеют меньше миллиона лет, поэтому у планет не было достаточно времени для формирования.

Диски вокруг молодых звезд состоят из газа на 99 % и пыли на 1 %. Даже это маленькое количество пыли достаточно, чтобы делать диски непрозрачными и темными в видимом излучении.

Перед исследованием Hubble пылевые диски были обнаружены только вокруг четырех звезд: ρ Pictoris, Альфа Lyrae, Альфа Piscis Austrini, и Epsilon Eridani. Эти диски составляют часть массы дисков в Орионе и могли бы быть остаточным материалом процесса формирования планеты.

Тема 20 Переменные звёзды

20.1 Классификация переменных по характеру изменчивости

Физические переменные звёзды – это звёзды, которые меняют свою светимость за короткие промежутки времени в результате физических процессов, происходящих в самой звезде.

Различают:

- пульсирующие переменные,
- цефеиды, типа RR Лиры, карликовые цефеиды, мириды, полуправильные, неправильные,
- эруптивные переменные,
- новые звёзды, сверхновые звёзды,

в зависимости от характера протекающих внутри звезды процессов.

Все переменные звёзды имеют специальные обозначения, если они не были обозначены раньше буквой греческого алфавита.

Первые 334 переменные звезды каждого созвездия обозначаются последовательностью букв латинского алфавита R, S, T, ..., Z, RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ..., ZZ, AA, ..., AZ, QQ, ... с добавлением названия соответствующего созвездия. Следующие переменные обозначаются V 335, V 336 и т.д.

20.2 Пульсирующие переменные. Цефеиды.

Соотношение между периодом и светимостью.

Долгопериодические переменные

Эволюционное превращение звезды в гиганта сопровождается увеличением её объема и уменьшением средней плотности вещества. В это время происходят коренные изменения внутреннего строения звезды, а оно может сопровождаться нарушением равновесия между силами гравитационного притяжения и лучевого давления. Это приводит к изменчивости звезды.

Часто периодически и неправильно колеблется объем звезды. Звезда то вспухает, то опадает. Такие колебания называются пульсационными.

При увеличении радиуса звезды увеличивается и площадь фотосферы, а также температура, светимость и блеск. Радиальные пульсации фотосферы и атмосферы приводят к изменениям радиуса. Внешние слои движутся то от наблюдателя, то к нему. Это вызывает изменение лучевой скорости, которая определяется из измерения смещений спектральных линий.

Первая пульсирующая звезда была открыта Фабрициусом в 1596 году в созвездии Кита и названа Мирой. Её период 331,6 суток. Подобные долгопериодические звёзды называются миридами.

В 1784 году Гудрайк открыл изменчивость 5 Цефея. амплитуда блеска равна $5^d,3663$. Подобные ей звёзды называются цефеидами.

Цефеиды – это пульсирующие гиганты, класса F и G, поэтому могут быть наблюдаемы с больших расстояний. Их периоды заключены от 1,5 до 50 суток. Амплитуды блеска цефеид достигают $1^m,5$.

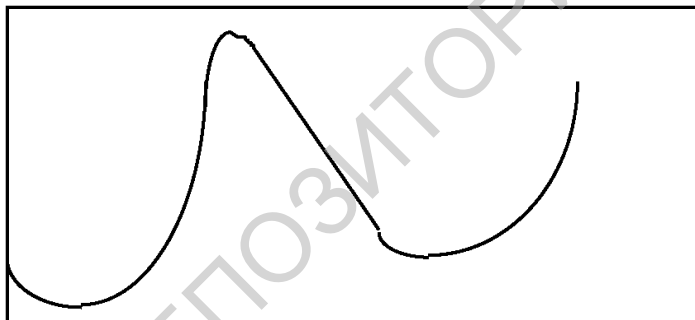
Полярная звезда тоже принадлежит к классу цефеид.

Видимая звёздная величина плавно и периодически меняется со временем и соответствует изменению светимости звезды в несколько раз. Синхронно с блеском меняются температура фотосферы, показатели цвета и лучевые скорости, а следовательно радиусы фотосферы и атмосферы. Происходит изменение спектра в пределах 1 спектрального класса.

Пульсация звезды происходит благодаря клапанному механизму, когда непрозрачность наружных слоёв звезды задерживает часть излучения внутренних слоёв.

Роль такого клапана играет тот слой звезды, где частично ионизован гелий. Нейтральный гелий непрозрачен к ультрафиолетовому излучению звезды, которое задерживается и нагревает газ. Этот нагрев и вызванное им расширение способствует ионизации гелия, слой становится прозрачным, поток выходящего излучения увеличивается. Но это приводит к охлаждению и сжатию, из-за чего гелий снова становится нейтральным и весь процесс повторяется снова.

Для осуществления этого механизма подходят только определённые звёзды, занимающие особое место на диаграмме Герцшпрунга – Рэссела.



Цефеиды находятся в стадии неустойчивости не вечно. Выведена формула, позволяющая вычислить возраст T цефеиды в зависимости от продолжительности периода:

$$\lg T = -0,714 \lg P + 2,57.$$

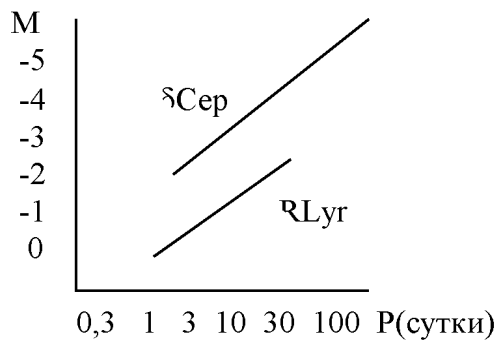
T – возраст выраженный в миллионах лет, начиная с того момента, когда звезда впервые вышла в своём развитии на главную последовательность.

Из теории пульсации следует, что между периодом P и средней плотностью ρ вещества существует зависимость:

$$P\sqrt{\rho} = \text{const}.$$

При изменении средней плотности должен меняться период.

Была установлена также зависимость между периодом и светимостью у цефеид. Эта зависимость линейная. Чем больше период, тем больше светимость и абсолютная звёздная величина.



По этой зависимости определяют расстояния до далёких объектов, когда не могут быть применены иные методы. Сложность заключается в том, что очень трудно найти нуль-пункт расположения прямых на диаграмме из-за того, что тригонометрическими методами не измерены расстояния ни до одной из цефеид.

К настоящему времени в нашей Галактике известно свыше 700 цефеид.

Цефеиды делятся на группы:

1. Дельта цефеиды (δ) или классические цефеиды. Для этих звёзд характерна зависимость между периодом и формой кривой блеска, открытая и изученная Э. Герцшпрунгом.

У цефеид с периодами в пределах от 1,5 до 5 суток кривая изменения блеска гладкая, при более продолжительных значениях периода появляется “горбик” на нисходящей ветви кривой блеска, который постепенно перемещается к максимуму. Таким образом, по величине периода и форме кривой блеска можно отличить дельта-цефеиду от других объектов.

Это молодые объекты, расположенные вблизи основной плоскости Галактики.

2. Цефеиды типа W Девы (W-цефеиды, CW). Эти звёзды не вписываются в закономерности обычных цефеид, расположены далеко от плоскости Галактики и намного старше. Они встречаются в шаровых звёздных скоплениях и принадлежат к сферической составляющей Галактики.

Эти звёзды горячее всего не в максимуме, а на середине подъёма блеска.

3. Малоамплитудные цефеиды – дзета (ζ). Типичный представитель – звезда ξ Близнецов. Они обладают симметричными кривыми блеска и расположены в пространстве вблизи центральных областей спиральных ветвей Галактики.

Звёзды типа RR Лиры. Это гиганты спектрального класса А. Они занимают узкий участок на диаграмме Герцшпрунга – Рэссела, соответствующий почти одинаковой для всех светимости.

Периоды этих звёзд лежат в пределах от 0,2 до 1,2 суток. Они очень быстро меняют блеск. Амплитуда изменения блеска достигает 1 зв. величины.

У всех звёзд этого типа изменяются лучевые скорости, что свидетельствует о пульсационных изменениях радиуса. Во время быстрого роста блеска в водородной оболочке возникает ударная волна и появляются яркие эмиссионные линии в спектре. Синхронно с блеском меняются и

показатели цвета, что вызвано изменением температуры фотосферы. В максимуме блеска звезда горячее и белеет.

Много таких звёзд в шаровых скоплениях, среди них многие обладают переменными периодами (эффект Блажко). У этих звёзд также как и у цефеид существует зависимость между периодом и светимостью.

Карликовые цефеиды. Эти звёзды обладают очень малым периодом изменения блеска от $0^d,055$ до $0^d,2$. Амплитуды колебания блеска невелики – от 0,2 до 0,7 зв. величин.

Спектры этих звёзд класса А, светимости небольшие – от +4 до +2.

Долгопериодические переменные (мириды). Звёзды типа о Кита.

Амплитуды изменения блеска могут достигать 10 зв. величин. Периоды очень разнообразны и могут быть от 90 до 730 суток.

Это красные звёзды спектральных классов М, S, N. По большим светимостям они относятся к классу сверхгигантов.

Механизм пульсации у этих звёзд несколько иной, чем у цефеид. Переменность блеска вызвана колебанием температуры. При понижении температуры атомы объединяются в молекулы. Молекулы активнее поглощают излучение, чем свободные атомы, и прозрачность внешних слоёв понижается, что приводит к ослаблению блеска. Энергия задерживается во внутренних слоях и постепенно накапливается, что приводит к разогреванию. При повышении температуры молекулы распадаются на атомы, и среда становится прозрачной.

К миридам относятся только те долгопериодические переменные, у которых в спектрах появляются эмиссионные линии.

Остальные же называются просто долгопериодическими переменными.

20.3 Неправильные переменные.

Эруптивные переменные

Помимо регулярных переменных существует значительное количество таких, у которых происходят очень сложные, непредсказуемые изменения блеска. Они называются *полуправильными* или *неправильными переменными*. Для их наблюдения необходимы длительные ряды однородных наблюдений.

Типичная такая звезда – μ Цефея. На кривой изменения блеска видны два типа колебаний. Это плавные колебания изменения блеска с амплитудой в 1 зв. величину. Моменты максимумов нельзя представить единой формулой с точным значением периода. Приходится заменять период циклом – средней продолжительностью промежутка времени, отделяющего два соседних момента максимума. Отдельные циклы изменений блеска этой звезды колеблются от 730 до 904 суток. Кривая изменения среднего блеска может еще имеет период в 4500 суток.

В тех случаях, когда удастся вывести некоторое среднее значение цикла, звезда называется полуправильной. Если же среднее значение найти нельзя – то неправильной.

Возможно, что одной из причин такого неправильного изменения блеска является вращение сверхгигантов, у которых диски покрыты огромными светлыми и более темными пятнами.

Есть много переменных звёзд и среди карликов, правда раз в 10 меньше, чем гигантов. Они проявляют свою переменность в виде повторяющихся вспышек, которые могут быть объяснены различного рода выбросами вещества – эрупциями. Поэтому всю эту группу звёзд вместе с новыми и сверхновыми называют *эруптивными*.

Среди эруптивных звёзд встречаются самые разнообразные, как молодые, так и старые.

Молодые звёзды. Это звёзды, ещё не завершившие процесс гравитационного сжатия. К ним относятся переменная Т Тельца и ей подобные.

Это карлики спектральных классов F – G, с эмиссионными линиями в спектре. Много таких звёзд в туманности Ориона, где идёт процесс звездообразования. Изменение светимости происходит очень неправильно, нельзя установить никакой закономерности. Хаотические изменения блеска могут происходить с амплитудами, достигающими 3^m , причём иногда до 1^m в течение часа. Звёзды типа Т Тельца встречаются чаще всего группами, особенно в пределах больших газопылевых туманностей. Эти группы называются Т-ассоциациями. Небольшие яркие туманности наблюдаются и непосредственно вокруг этих звёзд, что говорит о существовании у них обширных газовых оболочек.

Движение вещества в этих оболочках, связанное с процессом гравитационного сжатия звезды, является причиной хаотической переменности.

Вспыхивающие звёзды типа UV Кита. встречаются вместе с переменными типа Т Тельца. Это карлики спектральных классов K и M. В спектрах наблюдаются эмиссионные линии кальция и водорода. Отличаются необычайной быстротой возрастания светимости во время эпизодических вспышек. Менее чем за минуту поток излучения может увеличиться в десятки раз. После этого за полчаса возвращается в исходное состояние. Во время вспышки усиливается яркость эмиссионных линий. Характер явления напоминает хромосферные вспышки на Солнце, но в больших масштабах.

Вспышечная активность этих звёзд имеет длительные периоды усиления и ослабления, подобно 11 летнему солнечному циклу активности.

Возможно, что причина вспышек нетепловая. Из недр звезды вырываются потоки быстро движущихся заряженных элементарных частиц, которые вызывают мощные изменения в оболочке.

Эти звёзды чуть старше по возрасту предыдущих и находятся на заключительных стадиях гравитационного сжатия. Их обнаружено не очень много – около 75. Они имеют малую светимость и могут наблюдаться только вблизи Солнца. Есть большая группа вспышечных звёзд, у которых вспышки длятся не минуты, а гораздо более продолжительны. К таким звёздам относятся и все звёзды скопления Плеяды.

Звёзды типа Вольфа-Райе (WR). Образуют немногочисленную группу звёзд, принадлежащих к наиболее ярким объектам в Галактике. В среднем

имеют абс. зв. величину – 4^m . Число их не более 400. Спектры этих звёзд состоят из широких ярких линий, принадлежащих атомам и ионам с высокими потенциалами ионизации. Вид спектральных линий указывает на расширение оболочек, окружающих эти звёзды, происходящее с ускорением. Источником энергии в линиях является мощное ультрафиолетовое излучение очень горячей звезды, эффективная температура которой достигает 100 000К. Световое давление горячего излучения является причиной ускоренного движения атомов в атмосферах этих звёзд.

Фуоры и антифуоры. В 1936 году было обнаружено интересное явление. Слабая звезда 16^m за несколько месяцев плавно увеличила свой блеск в 150 раз и светит как звезда 10^m . Её спектр характерен для сверхгиганта спектрального класса F5 или G3. Звезда называется FU Ориона, а подобные ей звёзды называются фуорами.

Звезда CQ Тельца наоборот, была звездой 9^m , а затем плавно ослабела до 11^m и остаётся слабой. Эта звезда была названа антифуором.

20.4 Новые и сверхновые звёзды

Это эруптивные старые звёзды особого типа. У *новых* звёзд наблюдается внезапное и резкое увеличение светимости не менее чем на 7–8 звёздных величин.

Чаще всего за время вспышки видимая звёздная величина уменьшается на 10^m – 13^m , что соответствует росту светимости в десятки и сотни тысяч раз. После вспышки эти звёзды являются горячими карликами.

В максимальной фазе вспышки они похожи на сверхгиганты спектральных классов А – F. Если вспышка одной и той же новой наблюдалась не раз, она называется повторной. У повторных новых возрастание светимости меньше, чем у обычных.

Всего известно около 300 новых звёзд, из них около 150 вспыхнуло в нашей Галактике и свыше 100 в туманности Андромеды. У известных семи повторных новых наблюдалось около 20 вспышек. Вспышки происходят примерно раз в 100 лет. Многие, если не все новые являются тесными двойными звёздами. После вспышки часто обнаруживают слабую переменность.

При вспышке начальный подъём блеска происходит очень быстро, за 2-3 суток. Незадолго до максимума рост светимости несколько замедляется (окончательный подъём). После максимума происходит уменьшение светимости, длящееся годы. Падение блеска на первые три зв. величины плавное. Затем следует переходная стадия, отличающаяся либо плавным уменьшением светимости ещё на три величины, либо колебаниями её. Окончательное падение блеска происходит плавно, и звезда приобретает ту светимость, что имела ранее.

Во время вспышки происходит внезапный взрыв, вызванный неустойчивостью, возникающей в звезде. Эта неустойчивость может возникать у некоторых горячих звёзд в результате внутренних процессов, определяющих

выделение энергии в звезде, либо вследствие воздействия каких-либо внешних факторов. Причиной взрыва новой может являться обмен вещества между компонентами тесных двойных систем. Если богатое водородом вещество из оболочки главной звезды попадёт на поверхность её спутника – белого карлика, может произойти внезапное выделение термоядерной энергии. Эта энергия очень велика, но всё же неизмеримо меньше общих запасов энергии звезды, поэтому взрыв новой не сопровождается изменением общей её структуры, а затрагивает только приповерхностные слои.

Следствием нагрева газа, происходящего в результате взрыва, является выброс звездой вещества, приводящий к отрыву от неё внешних слоёв – оболочки массой $0,0001 M_{sol}$. Эта оболочка расширяется с огромной скоростью до 2000 км/с.

Об этом свидетельствуют доплеровские смещения спектральных линий в фиолетовую сторону спектра. Звезда быстро сбрасывает оболочку и в результате образует вокруг себя туманность. Расширяющиеся газовые туманности были обнаружены почти у всех близких новых.

Зная расстояние до новой звезды, можно определить её начальную и максимальную светимость, а также оценить радиус до вспышки и максимальный радиус.

Сверхновые – это звёзды, вспыхивающие подобно новым и достигающие в максимуме абс. зв. величины от -18^m до -21^m . Возрастание светимости происходит в десятки миллионов раз, более чем на 19^m . Общая энергия, излучаемая сверхновой за время вспышки превышает в тысячи раз энергию новых звёзд. Название “сверхновая” было дано в 1934 году американцами Цвикки и Бааде. Фотографически зарегистрировано более 300 вспышек сверхновых в других галактиках. Нередко светимость сверхновых была сравнима с интегральной светимостью всей галактики, в которой произошла вспышка. Так например, в 1895 году наблюдалась сверхновая в галактике NGC 5253. Звезда была $7,2^m$, а сама галактика 12^m . Одна звезда излучала в 100 раз больше, чем все звёзды галактики! По грубым подсчётам Цвикки сверхновые вспыхивают в галактике примерно один раз в 360 лет.

По летописям выявлено, что в нашей Галактике тоже было несколько вспышек сверхновых звёзд. Эту работу проделал шведский астроном Лундмарк. За последние 1000 лет наблюдалось по крайней мере 6 сверхновых: в 1006, 1054, 1181, 1572, 1604, 1667 годах.

Самые известные – это сверхновая 1054 года, наблюдавшаяся китайскими астрономами в созвездии Тельца и бывшая ярче Венеры, так, что её можно было видеть даже днём. Об этом осталась запись в Хронике Сунь Ханьяо: “В 22 день седьмой Луны первого года периода Ши-Хо Янг Вейтэ сказал: “Простираю свою персону ниц: я наблюдал в созвездии Твен-Куан явление звезды-гостыи... Согласно распоряжению императора я почтительнейше сделал предсказание, сводящееся к следующему: Звезда-гостыя не нарушит Альдебарана. Это указывает, что страна обретёт великую силу. Я прошу, чтобы

это предсказание было передано на хранение в департамент историографии...”. На память о ней осталась Крабовидная туманность.

Не менее интересным было и явление сверхновой звезды 1572 года. Эту звезду наблюдал Тихо Браге в созвездии Кассиопеи. За несколько дней звезда стала ярче Венеры, а потом ослабела в течение двух лет.

Несмотря на то, что вспышка сверхновой похожа на вспышку новой, это явление сильно отличается по своей физической сути и масштабу.

По характеру спектра в эпоху максимума сверхновые делятся на 2 типа.

Вблизи максимума имеют непрерывный спектр, в котором не видно никаких линий. Позднее появляются широкие эмиссионные полосы, положение которых не совпадает ни с какими известными спектральными линиями. Ширина полос соответствует расширению газов со скоростью до 6000 км/с. Кривая блеска после максимума плавная, уменьшение блеска идёт почти по линейному закону.

Светимость в максимуме меньше чем у 1-го типа. Спектры отличаются усилением ультрафиолетового свечения. Наблюдаются линии поглощения и излучения. На заключительной стадии кривые блеска круче. Иногда наблюдаются вторичные максимумы.

После вспышек сверхновых 1-го типа остаются быстро расширяющиеся газовые туманности. Форма эмиссионных линий Крабовидной туманности говорит о её расширении со скоростью около 1000 км/с. Крабовидная туманность является одним из мощных источников радиоизлучения в Галактике. Рентгеновское излучение можно объяснить торможением релятивистских электронов при их движении по спирали вокруг силовых линий слабых магнитных полей. Сверхновые 2 типа выбрасывают во время вспышек огромную массу газа, превосходящую массу Солнца. Газ, расширяясь, движется в пространстве и может существовать в виде туманности десятки тысяч лет.

Сверхновые 2 типа вспыхивают только в ветвях спиральных галактик, а в эллиптических и неправильных галактиках вспыхивают только сверхновые 1 типа.

Эллиптические галактики содержат в основном старые звёзды с массой ненамного превышающей массу Солнца. Все более массивные звёзды в них давно проэволюционировали. Значит сверхновые 1 типа до взрыва – это очень старые звёзды, масса которых превосходит солнечную только на 10–20%. Такие же звёзды вспыхивают и в спиральных галактиках.

Сверхновые 2 типа – молодые объекты. Они находятся в спиральных рукавах, где ещё идёт процесс рождения звёзд. Возраст этих звёзд не более десятков млн лет. Однако вспышка происходит со звездой только тогда, когда она сходит с главной последовательности и вступает в заключительный этап эволюции. Значит сверхновые 2 типа – очень массивные звёзды, с массой в 10 раз и более превышающей солнечную. На главной последовательности это горячие голубые гиганты классов О и В.

20.5 Пульсары и нейтронные звёзды.

Галактические источники рентгеновского излучения

Нейтронные звёзды были ещё в 30-х годах нашего столетия предсказаны теоретически. Согласно теории, если первоначальная масса ядра звезды находится в пределах от 1,2 до 2,4 массы Солнца, после исчерпания ядерного горючего, происходит следующее. Сила лучевого давления не может уравновешивать гравитационное сжатие и внутренние области обрушиваются к центру звезды, а внешняя оболочка выбрасывается со скоростью до 10 000 км/с. в результате взрыва. Происходит явление сверхновой звезды. Внутренние области звезды за несколько секунд сжимаются до состояния ядерного вещества. Линейные размеры звезды достигнут около 10 км.

В такой звезде силе гравитационного сжатия противостоит сила взаимодействия нейтронов и протонов. Поэтому она названа нейтронной звездой.

Практически нейтронную звезду обнаружить очень трудно из-за её малого размера. При температуре около 6000K на расстоянии около 10 св. лет звёздная величина будет всего около 30^m.

Открытие нейтронных звёзд стало возможным лишь с развитием рентгеновской и радиоастрономии. В 1964 году были обнаружены первые источники рентгеновского излучения. Сразу же было высказано мнение, что это и есть нейтронные звёзды, так как после сжатия температура поверхности нейтронных звёзд должна достигать около миллиарда К. Тогда максимум излучения должен приходится на жёсткое рентгеновское излучение.

В 1967 году сотрудники Кавендишской лаборатории обнаружили пульсары. На радиотелескопе наблюдались очень короткие, длительностью около 50 миллисекунд, импульсы радиоизлучения, повторяющиеся через строго постоянный период времени порядка 1-й секунды. Первоначально предполагали, что это источники искусственного происхождения. Однако, целенаправленные поиски подобных объектов позволили открыть их большое количество. Периоды пульсаров заключены в пределах от 0,002 до 4 с.

Изменение периодов пульсаров составляет очень малую величину, меньшую чем 10–14 за период.

В настоящее время известно более 300 пульсаров. Излучение пульсаров имеет нетепловую природу. Были измерены расстояния до них. Они лежат в пределах от сотен до тысяч парсеков.

Некоторые пульсары были отождествлены с туманностями – остатками вспышек сверхновых звёзд. Самый интересный пульсар – NP 0531 лежит в Крабовидной туманности. Оптическое излучение этой звезды тоже импульсивно. В максимуме блеска она имеет 13 зв. величину. Рентгеновское излучение звезды превышает в 100 раз мощность оптического.

Малые периоды пульсации связаны с тем, что вращение нейтронной звезды очень быстрое, доходит до нескольких десятков оборотов в секунду. Промежуток времени между последовательными импульсами равен периоду

вращения нейтронной звезды. Пульсация объясняется наличием неоднородностей, горячих пятен на поверхности нейтронных звёзд.

У некоторых пульсаров обнаружено медленное увеличение периодов (с удвоением за 1000–10 000 000 лет) связанное с тормозящим влиянием магнитного поля.

В 1962 году был обнаружен первый космический источник рентгеновского излучения. Он получил название “Скорпион X-1”.

К настоящему времени обнаружено более 600 источников рентгеновского излучения. Примерно половина из них относится к другим галактикам.

Много источников рентгеновского излучения отождествлено с радио и рентгеновскими пульсарами, некоторые с туманностями – остатками вспышек сверхновых звёзд. Причиной свечения последних является тепловое излучение газа, нагретого до температуры в несколько миллионов градусов.

Около ста ярких галактических рентгеновских источников связаны с рентгеновскими звёздами. Это тесные пары массивных звёзд, из которых одна является релятивистским объектом, а другая – обычная звезда.

Особенностью излучения этих объектов является переменность их излучения. Вариации потока оптического и рентгеновского излучения никак не связаны друг с другом. Анализ излучения показывает, что источниками рентгеновского излучения должны быть очень компактные объекты, типа нейтронных звёзд. Кроме нейтронных звёзд источниками могут быть белые карлики и чёрные дыры, находящиеся в тесной паре с нормальной звездой.

Причиной возникновения рентгеновского излучения является процесс потери массы нормальной звездой и захватом её релятивистским объектом. Потеря массы может происходить либо в виде струи, либо в виде звёздного ветра. В первом случае газ закручивается вокруг релятивистского объекта, образуя плоский диск. Трение приводит к уменьшению скорости и газ по спирали приближается к звезде. Это явление называется аккрецией.

В результате аккреции потенциальная энергия падающего газа переходит в тепло. Это приводит к большому нагреву. При высоких температурах максимум излучения газов приходится на рентгеновский диапазон спектра. Если у звезды есть магнитное поле, то газ движется вдоль магнитных линий, нагревается и падает вблизи магнитных полюсов.

У нейтронных звёзд магнитная ось и ось вращения не совпадают и наиболее горячие области, вблизи которых происходит аккреция, при благоприятной ориентации, становятся видимыми через промежутки времени, равные периоду вращения нейтронной звезды, что и даёт явление пульсара.

При аккреции на чёрную дыру явления пульсара не наблюдаются. Рентгеновское излучение может сильно флуктуировать.

Самый вероятный кандидат в чёрные дыры – рентгеновский источник Лебедь X-1. Масса его равна 7–10 солнечных масс.

Наблюдаются также вспышечные рентгеновские источники. Вспышки наблюдаются нерегулярно. Называются такие объекты барстерами и отождествляются с шаровыми звёздными скоплениями.

Тема 21 Внутреннее строение звёзд.

Условия существования материи в недрах звёзд

22.1 Уравнение гидростатического равновесия Перенос теплоты конвенцией и излучением.

22.2 Циск и температура в недрах звезд.

Тема 22 Эволюция звезд

22.1 Модели внутреннего строения звезд: звезда главной последовательности, гигант, белый карлик

Строение звёзд неодинаково. Звёзды главной последовательности, гиганты, карлики, нейтронные звёзды различаются между собой по устройству. Различия основаны на условиях, определяемых массой и радиусом звезды. Если для какой-то звезды известны масса и радиус, то можно получить представление о физических условиях в её недрах.

Температура звезды прямо пропорциональна её массе и обратно пропорциональна радиусу.

$$T = KM/R.$$

K – некоторый коэффициент пропорциональности.

Эта формула справедлива для звёзд похожих на Солнце.

Для звёзд главной последовательности справедлива формула:

$$T = 1,5 \cdot 10^7 R^{1/3}.$$

По мере продвижения звёзд вдоль главной последовательности радиусы звёзд увеличиваются. Поэтому температуры в недрах звёзд главной последовательности плавно возрастают с увеличением светимости. Для звёзд класса В0 V температура в недрах составляет около 30 млн кельвинов, для звёзд К0 V – меньше 10 млн К.

От температуры зависит характер ядерных реакций, протекающих в недрах звезды. В недрах звёзд типа Солнца выделение ядерной энергии происходит в результате протон-протонной реакции. В горячих звёздах ранних спектральных классов главную роль играет превращение водорода в гелий за счёт углеродного цикла. В результате этой реакции выделяется значительно большая энергия, чем при протон-протонной реакции, что и объясняет большую светимость звёзд ранних спектральных классов.

Звёзды верхней части главной последовательности. Это горячие звёзды, с массой больше солнечной. Температура и давление в недрах выше, чем у звёзд более поздних спектральных классов. Выделение термоядерной энергии происходит ускоренным темпом через углеродный цикл. Светимость у них больше и эволюционировать они должны быстрее.

Значит, горячие звёзды, находящиеся вверху главной последовательности – молодые.

Выделение энергии при углеродном цикле пропорционально высокой степени температуры (T^{20}), поток излучения растёт согласно закону Стефана-Больцмана как T^4 . Излучение оказывается неспособным вынести из недр звезды энергию, возникающую там в углеродном цикле. Поэтому переносить энергию должно само вещество, которое начинает перемешиваться и в недрах массивных звёзд возникают центральные конвективные зоны. Окружающие конвективное ядро слои звезды находятся в лучистом равновесии.

Звёзды нижней части главной последовательности. Эти звёзды по строению подобны Солнцу. Преобладающей является протон-протонная реакция. В центре звезды конвекция не возникает и ядро оказывается лучистым. Из-за сильной непрозрачности более холодных наружных слоёв у звёзд нижней части главной последовательности образуются протяжённые наружные конвективные оболочки. Чем холоднее звезда, тем на большую глубину происходит перемешивание. У Солнца только 2% наружных подфотосферных слоёв охвачены конвекцией.

У карлика K V с массой 0,6 солнечной в перемешивании участвует 10% всей массы.

Субкарлики. Эти звёзды содержат мало тяжёлых элементов. Субкарлики – это старые звёзды, возникшие на ранних стадиях эволюции Галактики из вещества, не побывавшего в недрах звёзд, а потому бедного тяжёлыми элементами. Вещество субкарликов отличается большой прозрачностью, потому что состоит из сильно ионизованной плазмы, где все лёгкие элементы лишены своих электронов и их атомы не могут поглощать кванты.

У субкарликов почти нет конвективных зон.

Красные гиганты. Красные гиганты имеют массы, ненамного превосходящие солнечную (1,3 раза), радиусы большие где-то в 20 раз, светимости в 220 раз. Эти звёзды имеют неоднородную структуру. По мере выгорания водорода в звёздах главной последовательности, область энерговыделения постепенно смещается в периферические слои. В результате образуется тонкий слой энерговыделения, где только и может происходить водородная реакция. Он разделяет звезду на две части: внутреннюю, с почти лишённым водорода гелиевым ядром, в котором нет ядерных реакций и внешнюю, в которой есть водород, но температура и давление малы для протекания реакции. На первых порах давление в слое энерговыделения больше, чем в ядре, которое начинает сжиматься, и, выделяя гравитационную энергию, разогревается. Это сжатие происходит до тех пор, пока газ не станет вырожденным. Огромное давление, необходимое для предотвращения сжатия, обеспечится большим увеличением плотности.

У звезды массой 1,3 солнечной образуется гелиевое ядро. Температура ядра достигает 40 млн К, но всё равно мала для протекания ядерных реакций превращения гелия в углерод. Гелиевое ядро оказывается лишённым ядерных источников и изотермичным. Оно содержит около четверти массы всей звезды, обладая размерами 0.001 радиуса. Плотность в центре ядра 350 г/см^3 . Газ в ядре вырожден и по свойствам не отличается от вещества белых карликов. Такое сходство позволяет сделать вывод, что в ядре красного гиганта находится

белый карлик. Ядро окружено оболочкой такой же протяжённости, где происходит энерговыделение. Затем следует лучистая зона толщиной в 0,1 радиуса. Основная часть наружных слоёв красного гиганта, примерно 70% по массе, составляющих 0,9 её радиуса образуют мощную конвективную зону красного цвета. Причина образования такой протяжённой конвективной зоны – непрозрачность вещества, та же, что и у красных карликов.

Белые карлики. Гелиевое ядро красного гиганта имеет массу примерно равную массе Солнца, состоит из вырожденного газа. Такой объект имеет значительную температуру, небольшие размеры (0.01–0.001 радиуса Солнца) и обладает малой светимостью. Положение такого объекта на диаграмме Герцшпрунга – Рассела соответствует области белых карликов.

Таким образом, белые карлики – сверхплотные вырожденные звёзды, исчерпавшие водородные источники термоядерной энергии. Плотность в центре белых карликов может достигать сотни тонн в кубическом см. Медленно остывая, они постепенно излучают большой запас тепловой энергии вырожденного газа.

У некоторых белых карликов, называемых полярами, наблюдаются сильные магнитные поля (до 10^8 Э). Их излучение поляризовано до 30%.

Белыми карликами становятся и маломассивные звёзды, у которых масса меньше 0,08 солнечной. В процессе сжатия протозвезды температура в недрах настолько мала, что никакие термоядерные реакции не могут противостоять гравитационному сжатию и звезда непрерывно сжимается до состояния белого карлика.

Красные карлики. Это звёзды с малой массой, меньшей, чем у Солнца. Время их пребывания на главной последовательности больше возраста Галактики. Если масса меньше 0.3 массы Солнца, звёзды остаются полностью конвективными всегда. Лучистое ядро у них никогда не образуется. Температура в центре таких звёзд мала для того, чтобы полностью работал протон-протонный цикл. Он обрывается на образовании изотопа ^3He , а сам ^4He уже не синтезируется. За 10 млрд лет в ^3He превратится только 1% водорода. Эти звёзды называются красными карликами.

Коричневые карлики. Это самые слабые объекты, доступные наблюдениям. Яркость их в десятки тысяч раз меньше солнечной. Масса меньше в несколько десятков раз. Малая масса не позволяет зажечься ядерным реакциям. Такие звёзды могут образовывать скрытую массу галактик (по некоторым подсчётам до 90% всей массы).

В 1994–1995 годах исследования на Паломарской обсерватории и космическом телескопе дали фотографию коричневого карлика. Это объект GL229B – маленький компаньон холодной красной звезды Gliese 229, находящейся на расстоянии 19 св. лет от Земли в созвездии Зайца. Масса карлика равна 20–50 масс Юпитера. GL229B слишком массивен и горяч, чтобы быть планетой, но слишком маленький и прохладный, чтобы сиять подобно звезде. Светимость его в 100,000 раз меньше чем у Солнца. Этот коричневый карлик обладает спектром, похожим на спектр Юпитера. Инфракрасные

спектроскопические исследования показали, что карлик имеет много метана. Метан не обнаружен в звёздах, но содержится в планетах-гигантах Солнечной системы.

Коричневые карлики образуются также как и остальные звёзды, но не имеют достаточно массы, чтобы генерировать высокие температуры в недрах, достаточные для разжигания ядерных реакций.

Коричневые карлики имеют тот же механизм разогрева, что и планеты-гиганты через гравитационное сжатие.

Нейтронные звёзды. Начиная с некоторого значения массы, давление вырожденного газа не может уравновесить силу гравитации. Такая звезда может неограниченно сжиматься. Коллапс неизбежен при массах 2-3 солнечной. Однако, при массах 1,2–2 солнечной силам гравитации противостоит давление вырожденного нейтронного газа и звезда превращается в нейтронную. При этом превращении происходит ядерный взрыв, наблюдаемый как вспышка сверхновой звезды. В результате этого взрыва выделяется вся возможная ядерная энергия и образуется нейтронная звезда.

Нейтронная звезда имеет твёрдую поверхность, её внешние слои (кора) состоят из тяжёлых ядер Fe и Ni. Толщина коры порядка 1 км, а общий радиус звезды – 10 км.

Под корой давление очень велико, тяжёлые ядра распадаются до нуклонов, электроны вдавливаются в протоны и образуется нейтронная жидкость. Центральная часть звезды, диаметром около 1 км находится в твёрдом состоянии.

22.2 Эволюция звёзд

В настоящее время наиболее популярна идея о том, что образование звёзд происходит путём конденсации газово-пылевого межзвёздного вещества. Под действием сил тяготения протозвёздное газово-пылевое облако принимает сферическую форму и начинает сжиматься. За счёт уменьшения потенциальной энергии происходит разогревание протозвезды. Эта фаза развития звезды называется контракционной.

В начале контракционной стадии единственным источником разогрева протозвезды является гравитационная энергия. Перенос энергии внутри звезды происходит только путём конвекции.

После того, как звезда достигает достаточно высокой светимости, она быстро продвигается по диаграмме Г-Р почти вертикально вниз, что вызывается быстрым уменьшением её радиуса и повышением внутренней температуры. Во внешней оболочке звезды протекают недолгие реакции сгорания тяжёлых элементов. В центре звезды возникает область лучистого равновесия. С ростом этой области гравитационное сжатие замедляется, падение светимости прекращается. Радиус продолжает уменьшаться, температура поверхности начинает расти и звезда поворачивает на диаграмме Г – Р влево, приближаясь к главной последовательности. На этой стадии начинается сгорание водорода и скорость эволюции сильно снижается. С этого времени для достижения главной

последовательности звёздам с солнечной массой нужны десятки миллионов лет, а с 0,1–0,2 солнечной массы – сотни миллионов лет.

К состоянию с высокой светимостью из фазы холодного и слабо светящегося объекта звезда приходит очень быстро. Для постороннего наблюдателя складывается впечатление рождения звезды, ранее не существовавшей. Подобное явление наблюдалось в районе туманности Ориона в виде звездообразных узелков, выявляющихся при сопоставлении фотографий, разделённых десятками лет.

Примером тому может служить и звезда FU Ориона, связанная с глобулой, кометообразной туманностью и яркой водородной туманностью. Эта звезда испытывала очень быстрые изменения блеска на 6^м в год.

Вступив на главную последовательность, не очень массивная звезда изменяется очень медленно. Солнце вступило на главную последовательность 3 млрд лет назад. За это время оно стало излучать на 20% больше энергии. На Земле в это время уже существовали водоросли (докембрийский период) и средняя годовая температура было около 0°C.

Не только массивные, но и звёзды умеренной массы на контракционной стадии развития некоторое время находятся в области диаграммы Г – Р, занятой гигантами субгигантами. Однако, их внутреннее строение совершенно отлично от внутреннего строения старых звёзд с вырожденным ядром.

Подавляющее большинство звёзд меняет свои основные характеристики (светимость и радиус) очень медленно. Но всё равно звезда постепенно изменяется, эволюционирует. В процессе эволюции меняется её химический состав. Постепенно уменьшается содержание водорода, увеличивается количество гелия. Химический состав перестаёт быть однородным. В центре водород уменьшается, а на периферии остаётся его прежнее количество. По мере эволюции меняется модель звезды, её структура. Изменяется светимость, радиус, поверхностная

температура. Звезда постепенно меняет своё положение на диаграмме Герцшпрунга – Рассела. Она опишет на диаграмме определённый трек.

Протозвезда сжимается до тех пор, пока температура и давление в её недрах не достигнут значения, при котором возможна протон-протонная реакция. С этого времени рождается молодая звезда, которая занимает определённое место на главной последовательности. Точное её место определяется значением первичной массы. Массивные протозвёзды располагаются в верхней части, звёзды с массой меньшей, чем у Солнца – располагаются в нижней части. Таким образом протозвёзды появляются вдоль всей главной последовательности. Массивные звёзды проходят стадию протозвезды за несколько сот тысяч лет. Поэтому их число в Галактике мало. С тех пор, как звезда вступает на главную последовательность, она долгое время там остаётся без существенного изменения своих свойств.

Характер изменения состояния звезды зависит от того, перемешивается вещество в её недрах или нет. Если вещество интенсивно перемешивается, то по мере эволюции звезда уходит с главной последовательности влево. В обратном случае, при отсутствии полного перемешивания – вправо.

Практически наблюдается много звёзд, находящихся в правой части от главной последовательности и не наблюдается слева. Значит, по мере эволюции, звёзды главной последовательности превращаются в красных гигантов. Сама эволюция не сопровождается полным перемешиванием вещества в недрах. Расчёты показывают, что по мере эволюции звезды размеры и масса её конвективного ядра уменьшаются. Массивные звёзды по мере выгорания водорода перемещаются поперёк главной последовательности, не выходя за пределы её ширины. При содержании водорода около 1% темпы эволюции ускоряются. Для поддержания энерговыделения на необходимом уровне при резко уменьшившемся содержании водородного топлива необходимо увеличение температуры ядра. Это достигается путём сжатия звезды как целого. В это время лучеиспускание звезды поддерживается ядерными реакциями в тонком слое, примыкающем к ядру и сжатием ядра, состоящего из чистого гелия. Эволюционные треки резко поворачивают влево, т.к. температура поверхности возрастает. Скоро сжатие прекращается, так как весь водород выгорает. При сжатии и разогреве гелиевого ядра наружные слои быстро и сильно разбухают. Это означает, что при мало изменяющемся потоке поверхностная температура значительно уменьшается. Её эволюционный трек круто поворачивает направо и звезда приобретает признаки сверхгиганта. При разогреве ядра до сотни миллионов К и плотности свыше 4000 г/см^3 , включается гелиевая реакция. Энергия излучения остановит дальнейшее сжатие ядра. Массивные звёзды извилистым путём уходят с главной последовательности, образуя ветвь гигантов на диаграмме Герцшпрунга – Рассела.

При этом звёзды с массой близкой к солнечной образуют ветвь субгигантов, а с массой 10–15 солнечных – сверхгигантов. Чем менее тяжёлых элементов в звезде, тем более она прозрачна и обладает более высокой температурой.

На заключительной фазе эволюции температура вещества в центральных областях массивной звезды очень велика, порядка нескольких миллиардов кельвинов. При такой температуре водород и гелий уже выгорели. Ядерные реакции идут очень быстро. Равновесное состояние вещества характеризуется преобладанием ядер элементов группы железа. Железное ядро такой звезды окружено мантией из более лёгких элементов (кислород, азот, неон и др.). Эти элементы представляют собой потенциальное горючее, необходимое для взрыва сверхновой звезды. Далее звезду окружает разреженная водородно-гелиевая оболочка.

В процессе эволюции железное ядро начинает катастрофически сжиматься. При этом нарушается механическое равновесие остальной части звезды. Вес выше лежащих слоёв не уравнивается давлением газа снизу и они начинают падать по направлению к центру. Через 1 секунду кинетическая энергия падающей оболочки превратится в тепловую, что повлечёт за собой её быстрый нагрев.

Тем самым создадутся условия для ядерного взрыва находящихся там лёгких элементов. Этот ядерный взрыв приводит к вспышке сверхновой II типа, выбросу наружных слоёв и коллапсу ядра в состояние чёрной дыры.

22.3 Особенности эволюции тесной двойной звездной системы. Механизм вспышки новой

Приблизительно половина звёзд главной последовательности входит в состав кратных систем, а массивных горячих звёзд – 70%. Новые и рентгеновские звёзды встречаются только в двойных системах. Поэтому механизм эволюции двойной системы очень важен.

В 1951 году учёные обратили внимание на то, что в двойных системах компонента с наибольшей светимостью обладает меньшей массой. Ситуация выглядит так, что более массивная компонента находится на главной последовательности, а менее массивная обладает избыточной светимостью, т.е. является почти гигантом – звездой, покинувшей главную последовательность в ходе эволюции. В 1955 году этот парадокс был объяснён тем, что звезда с высокой светимостью в паре обладала большей массой изначально. Истощив большую часть своего ядерного топлива, она стала раздуваться. При этом значительная часть её массы перетекла на соседнюю компоненту. Таким образом, масса соседки стала превышать массу более быстро эволюционирующей звезды.

Важным процессом, определяющим эволюцию звёзд в двойной системе является обмен массами.

Новые звёзды имеют своеобразный механизм повторяющихся вспышек. Прозволюционировавшая горячая компактная звезда представляет собой объект, сходный с белым карликом и бедный водородом. В то же время от заполняющей свою полость Роша красной компоненты на проэволюционировавшую звезду всё время падает богатый водородом газ. Газ этот, после того, как он накопится в поверхностном слое горячей звезды в течение сотен и тысяч лет, может стать причиной теплового взрыва, носящего локальный характер, т.е. не охватывающего всю структуру звезды как целого. При таком взрыве выбрасывается значительное количество массы – 0,0001 массы Солнца, что следует из спектральных наблюдений новых звёзд. Примерно такая же масса перетекает на горячую компактную звезду от соседней компоненты за время между двумя вспышками.

22.4 Гипотезы формирования звёзд из газа и сверхплотного вещества

Гипотеза формирования звёзд из сверхплотного вещества была выдвинута академиком В.А. Амбарцумяном. Она говорит о том, что звёзды образуются из некоего сверхплотного вещества.

Основой этой гипотезы является вывод, что в наблюдаемой Вселенной процессы распада преобладают над процессом соединения. Значит, процесс образования звёзд должен быть переходом вещества из более плотного состояния в менее плотное.

Гипотеза требует, чтобы во Вселенной существовал материал – сверхплотное вещество, которого ещё никто не наблюдал и свойства которого остаются неизвестными. Сверхплотная материя, если она существует, должна быть недоступна современным средствам наблюдения, так как она занимает очень малые объёмы пространства и почти не излучает. Основные её свойства – необычайно высокая плотность и огромный запас энергии, которая бурно выделяется при распаде такого вещества.

Пока не существует стройной математической теории, основанной на этой гипотезе. Основной довод её сторонников в том, что она соответствует наблюдательным данным.

Тема 23 Млечный Путь и его составляющие

23.1 Млечный Путь. Методы звёздной статистики

Физическое явление светящейся полосы из звёзд, видимой на небе называется полосой Млечного Пути или просто Млечным Путём.

Млечный путь в Белоруссии лучше всего виден летом, особенно в июле, августе. Он выглядит светлой светящейся полосой, проходящей через всё небо, в одних местах более яркой, в других – менее. Вдоль Млечного Пути наблюдаются яркие звёздные облака и тёмные провалы. Млечный Путь образует на небе почти полный круг. Он называется галактическим кругом или галактическим экватором. Точки, отстоящие на 90 гр. от галактического экватора по обе стороны от него, называются северным и южным полюсами Галактики. Положение объекта можно определить галактической широтой и долготой. Началом отсчёта или нулём галактической долготы по международному соглашению принята точка на галактическом экваторе, соответствующая направлению на центр Галактики. Галактический экватор наклонён по отношению к небесному экватору примерно на 62 гр.

Визуальные и фотографические звёздные подсчёты показывают, что самые слабые звёзды сильнее концентрируются к полосе Млечного Пути. Так как слабые звёзды являются более далёкими, то такие наблюдения доказывают, что Млечный Путь является сплюснутой системой звёзд. Об этом писал ещё Вильям Гершель в 18 веке. Он имеет большую глубину. Некоторые звёзды находятся на расстоянии сотен, другие на расстоянии тысяч парсек от Солнца. Поскольку Млечный Путь кажется нам лентой, опоясывающей небо и делящей его на две почти равные части, значит Солнце должно располагаться вблизи центральной плоскости системы.

Система Млечного Пути содержит примерно 100 млрд звёзд, газ и пыль. Изучение Млечного Пути показало, что Солнце лежит не в центре Галактики, а где-то ближе к краю, дальше середины расстояния между краем и центром. Центр Галактики находится в направлении созвездия Стрельца, где Млечный Путь имеет самую большую ширину и яркие звёздные облака.

То, что центр находится именно с созвездии Стрельца доказывает и распределение шаровых звёздных скоплений, новых звёзд, планетарных

туманностей. Об этом свидетельствует вращение Галактики и интенсивное радиоизлучение, идущее из созвездия Стрельца.

Центр Млечного Пути лежит между 8000 и 11000 пс от Солнца. Наиболее вероятным считается значение 10 000 пс. Солнце удалено от плоскости Галактики на расстояние около 10 пс.

Всего же Млечный Путь имеет длину около 30 000 пс.

Вблизи Солнца существует система спиральных ветвей, накладывающихся на равномерный конгломерат ничем не примечательных звёзд. Спиральные ветви можно легко проследить, если схематически изобразить положение белоголубых сверхгигантов и областей наибольшей плотности межзвёздного газа и пыли.

Вращение звёзд происходит вокруг центра Галактики. Солнце движется со скоростью 250 км/с.

Знание расстояний до звёзд позволяет найти их распределение в пространстве, определить структуру Галактики. Для того, чтобы охарактеризовать количество звёзд в различных частях Галактики вводят понятие звёздной плотности. Звёздной плотностью называется количество звёзд, находящихся в единице объёма пространства. За единицу объёма принимается 1 кубический парсек.

Лучше всего звёздная плотность изучена для окрестностей Солнца, так как для близких звёзд известны расстояния. Подсчёты показали, что в окрестностях Солнца звёздная плотность составляет около 0,06 звезды на кубический парсек. На каждую звезду приходится 16 пс^3 . Среднее расстояние между звёздами около 2,5 пс.

Чтобы узнать, как меняется плотность в различных направлениях, подсчитывается число звёзд на единице площади (на 1 кв. градусе) в различных участках неба. При приближении к полосе Млечного Пути наблюдается сильное увеличение концентрации звёзд.

Увеличение концентрации происходит при приближении к галактической плоскости и к Центру Галактики.

Важным в изучении Галактики является метод подсчёта объектов различного типа. Большинство объектов находятся вблизи тонкого плоскостного слоя. К ним относятся звёзды ранних спектральных классов О и В, цефеиды, не принадлежащие к шаровым скоплениям, сверхновые звёзды 2 типа, рассеянные звёздные скопления, звёздные ассоциации и тёмные пылевые туманности. Эти объекты образуют плоскую подсистему Галактики. Это молодые объекты.

Звёзды типа RR Лиры, W Девы, д Цефея, сверхновые 1 типа, субкарлики и шаровые скопления занимают объём эллипсоида, для которого галактическая плоскость является диаметральной сечением. Эти объекты являются сфероидальной составляющей и концентрируются к центру Галактики.

Новые звёзды, звёзды типа RV Тельца, долгопериодические переменные, белые карлики, звёзды спектральных классов С и S, планетарные туманности располагаются в пределах более или менее сплюснутых эллипсоидов.

Звёзды классов О и В располагаются на определённых расстояниях от центра, образуя спиральные ветви. Спиральная структура также подтверждается изучением распределения в ней диффузного вещества и магнитного поля.

23.2 Звёздные скопления: шаровые и рассеянные, их диаграмма "спектр – светимость" и оценка возраста. Звёздные ассоциации

Звёздными скоплениями называются группы динамически связанных между собой звёзд, содержащие большое количество объектов и отличающиеся своим видом и звёздным составом.

По внешнему виду скопления делятся на рассеянные и шаровые. Рассеянные скопления содержат от 20 до 2000 звёзд и легко распадаются на звёзды даже в слабый телескоп, а шаровые могут включать от 10 000 до 1 000 000 звёзд и требуют для своего изучения мощного инструмента.

Рассеянные скопления находятся вблизи полосы Млечного Пути, а шаровые на удалении от 5 до 20 градусов. Рассеянных скоплений всего известно около 800, но вероятное их число несколько десятков тысяч.

Плеяды удалены на расстояние 130 пс, Гиады – 40 пс.

Чтобы отделить звёзды, принадлежащие скоплению от звёзд поля, случайно проектирующихся на эту же область неба, можно построить диаграмму спектр – светимость для звёзд скопления. Для рассеянных скоплений на диаграмме хорошо выделяется главная последовательность. Ветвь гигантов почти полностью отсутствует. Выделив звёзды, принадлежащие скоплению и найдя нормальное положение главной последовательности, можно получить модуль расстояния, а следовательно и само расстояние до скопления. Если расстояние найдено, можно найти линейные размеры скопления. Они составляют от 2 до 20 пс.

Шаровые скопления сильно выделяются благодаря большому количеству компактно расположенных звёзд, образующих сферическую или эллиптическую систему, с сильной концентрацией звёзд к центру.

Диаметры шаровых скоплений составляют около 40 пс. Из-за большой яркости шаровые скопления наблюдаются почти все и их число в Галактике около 100. Шаровые скопления образуют сферическую подсистему и концентрируются к центру Галактики.

Диаграмма цвет – видимая зв. величина имеет особый вид. На ней выделяется характерная для шаровых скоплений горизонтальная ветвь, ветвь гигантов, соединяющаяся с главной последовательностью. В шаровых скоплениях всегда много переменных звёзд, особенно типа RR Лиры, которые позволяют определить расстояния до скоплений.

Самые молодые и обширные рассеянные звёздные скопления называются звёздными ассоциациями. Ассоциации трудно выделить на фоне других звёзд фотографически, но можно это сделать, применяя спектральные методы. В О-ассоциациях группируются горячие звёзды спектральных классов О и В. Они во

много раз превышают по размерам обычные рассеянные скопления, простираясь на десятки и сотни парсеков.

Т-ассоциации состоят из молодых образующихся звёзд типа Т Тельца.

23.3 Диффузная материя в Галактике. Поглощение света. Тёмные и светлые туманности. Планетарные туманности. Физические процессы в туманностях

В области нашей Галактики, простирающейся на 2000 пс от Солнца 80–85% вещества содержится в звёздах и их остатках, а остальные 15–20% приходятся на долю межзвёздного газа и пыли. 99% этого межзвёздного вещества газообразно, 1% приходится на пыль. Облака космической пыли проявляют себя различным способом. Иногда они светятся как слабые туманности, но чаще выглядят как области, лишённые звёзд, сквозь которые могут быть не видны расположенные сзади звёзды.

На фотографиях звёздного неба, особенно в области Млечного Пути можно заметить сильную неоднородность распределения звёзд, вызванную наличием тёмной непрозрачной материи. Объектами такого типа являются тёмные туманности под названием “Конской Головы” и “Угольного Мешка”. “Угольный Мешок” находится на расстоянии 150 пс и его размеры – 8 пс. На небе занимает область больше 3 гр. Туманность выглядит чёрным пятном по сравнению с окружающими яркими областями и уменьшая свет примерно в 3 раза. Ослабление света соответствует $1^m,2$.

Таких областей в Млечном Пути много, они образуют длинную полосу.

Наличие в межзвёздном пространстве вещества, поглощающего свет, подтверждается явлением межзвёздного покраснения света. Оно состоит в том, что спектральный состав излучения многих звёзд, особенно далёких, оказывается не таким, как у звёзд того же спектрального класса. Разница заключается в недостатке излучения в синей части спектра, который приводит к кажущемуся покраснению. Изменение спектрального состава излучения вызывается тем же самым веществом, которое вызывает поглощение света. Оно оказывается более сильным для синих лучей и менее сильным для красных. Такое ослабление свет испытывает при прохождении через среду, состоящую из мелких твёрдых частиц (пылинок), если их диаметр составляет 0,8 мкм.

В окрестностях Солнца ослабление света составляет $1^m,5$ на 1 000 пс.

Наиболее сильное поглощение вблизи плоскости Галактики. Особенно велико оно в направлении на центр Галактики и меняется в больших пределах. По мере удаления от плоскости Млечного Пути общая величина межзвёздного поглощения быстро падает за счёт уменьшения толщины поглощающего слоя, расположенного на луче зрения. В направлении к полюсу Галактики поглощение видимого света составляет $0^m,4$ на всём протяжении слоя. Пыль относится к плоской подсистеме Галактики, распределяясь в пределах диска толщиной в несколько сотен парсеков. Распределение пыли носит клочковатый характер.

В некоторых случаях удаётся увидеть часть пылевой туманности, освещённую какой-либо яркой звездой, находящейся недалеко. Поперечник освещённой области обычно не более 1 пс. Часто в таких туманностях наблюдаются изогнутые волокна, т.е. вещество распределено неравномерно. Спектры туманности и освещающей звезды очень похожи. Свечение вызывается пылинками, отражающими излучение звезды. Эти туманности называются отражающими. Множество таких облаков (по 8–10 на 1000 пс) часто встречается в спиральных рукавах Галактики вместе с газовыми туманностями, образуя газово-пылевые комплексы размерами в десятки и сотни пс.

Наблюдаются большие концентрации пыли в маленьких образованиях, называемых глобулами, которые видны на фоне ярких туманностей. Концентрация пыли здесь больше в дес. и сотни раз, чем в пылевых облаках.

Кроме пылевых существуют газовые туманности. Самая известная – туманность Ориона, протяжённостью около 6 пс. Всего известно около 400 таких объектов. В спектрах газовых туманностей имеются яркие эмиссионные линии, доказывающие газовую природу их свечения. Внутри газовой туманности или рядом с ней всегда можно найти горячую звезду спектрального класса О или В0, являющуюся причиной свечения туманности. Эти горячие звёзды обладают мощным ультрафиолетовым излучением, ионизирующим и заставляющим светиться окружающий газ.

Поглощённая атомом туманности энергия ультрафиолетового кванта звезды большей частью идёт на ионизацию атома. В результате происходящих процессов рекомбинации вместо первоначально поглощённого жёсткого ультрафиолетового кванта атомы туманности излучают несколько менее энергичных квантов видимых лучей. Этот процесс называется флуоресценцией. Таким образом в туманности происходит дробление ультрафиолетовых квантов звезды и переработка их в излучение, соответствующее спектральным линиям видимого спектра.

Концентрация частиц в туманностях – 100–1000 в см. куб. Это в миллионы раз меньше, чем в солнечной короне и в миллиарды раз меньше, чем могут обеспечить современные вакуумные насосы. Температура в туманностях – 10 000 К и средняя скорость электрона 500 км/с.

Горячие звёзды на больших расстояниях вокруг себя ионизуют газ (до нескольких десятков парсеков). Ионизованный газ прозрачен к ультрафиолетовому излучению, нейтральный газ его поглощает. Поэтому окружающая горячую звезду область ионизации имеет резкую границу, дальше которой газ остаётся нейтральным. Таким образом, газ в межзвёздной среде может быть либо полностью ионизован (зоны Н II), либо нейтрален (зоны Н I). Горячих звёзд мало, поэтому газовые туманности и зоны Н II составляют примерно 1–5% межзвёздной среды. Эти объекты располагаются в спиральных ветвях нашей Галактики и других спиральных галактик.

Тема 24 Структура Галактики

24.1 Собственное движение и лучевая скорость звезд.

Пекулярные скорости звезд и Солнца в Галактике.

Вращение Галактики

Сравнение экваториальных координат одних и тех же звёзд, определённых через значительные промежутки времени, показало, что α и δ меняются с течением времени. Значительная часть этих изменений вызывается прецессией, нутацией, абберацией и годичным параллаксом. Если исключить влияние этих причин, то изменения уменьшаются, но не исчезают полностью. Оставшееся смещение звезды на небесной сфере за год называется собственным движением звезды μ . Оно выражается в сек. дуги в год.

Собственные движения различны у разных звёзд по величине и направлению. Только несколько десятков звёзд имеют собственные движения больше $1''$ в год. Самое большое известное собственное движение у “летающей” звезды Барнарда $\mu = 10'',27$. Основное число звёзд имеет собственное движение равное сотым и тысячным долям секунды дуги в год.

За большие промежутки времени, равные десяткам тысяч лет, рисунки созвездий сильно меняются.

Собственное движение звезды происходит по дуге большого круга с постоянной скоростью. Прямое восхождение изменяется на величину μ_α , называемую собственным движением по прямому восхождению, а склонение — на величину μ_β , называемую собственным движением по склонению.

Собственное движение звезды вычисляется по формуле:

$$\mu = \sqrt{(\mu_\alpha^2 + \mu_\delta^2)}.$$

Если известно собственное движение звезды за год и расстояние до неё r в парсеках, то нетрудно вычислить проекцию пространственной скорости звезды на картинную плоскость. Эта проекция называется тангенциальной скоростью V_t и вычисляется по формуле:

$$V_t = \mu'' r / 206265'' \text{ пс/год} = 4,74 \mu r \text{ км/с}.$$

Чтобы найти пространственную скорость V звезды, необходимо знать её лучевую скорость V_r , которая определяется по доплеровскому смещению линий в спектре звезды. Поскольку V_t и V_r взаимно перпендикулярны, пространственная скорость звезды равна:

$$V = \sqrt{(V_t^2 + V_r^2)}.$$

Самыми быстрыми звёздами являются переменные типа RR Лиры. Их средняя скорость относительно Солнца равна 130 км/с. Однако, эти звёзды движутся против вращения Галактики, поэтому их скорость оказывается малой ($250 - 130 = 120$ км/с). Очень быстрые звёзды, со скоростями около 350 км/с относительно центра Галактики не наблюдаются, потому что скорости 320 км/с

достаточно, чтобы покинуть поле притяжения Галактики или вращаться по сильно вытянутой орбите.

Знание собственных движений и лучевых скоростей звёзд позволяет судить о движениях звёзд относительно Солнца, которое тоже движется в пространстве. Поэтому наблюдаемые движения звёзд складываются из двух частей, из которых одна является следствием движения Солнца, а другая – индивидуальным движением звезды.

Чтобы судить о движениях звёзд, следует найти скорость движения Солнца и исключить её из наблюдаемых скоростей движения звёзд.

Точка на небесной сфере, к которой направлен вектор скорости Солнца называется солнечным апексом, а противоположная точка – антиапексом.

Апекс Солнечной системы находится в созвездии Геркулеса, имеет координаты: $\alpha = 270^\circ$, $\delta = \pm 30^\circ$. В этом направлении Солнце движется со скоростью около 20 км/с, относительно звёзд, находящихся от него не далее 100 пс. В течение года Солнце проходит 630 000 000 км, или 4,2 а.е.

Если какая-то группа звёзд движется с одинаковой скоростью, то находясь на одной из этих звёзд, нельзя обнаружить общее движение. Иначе обстоит дело, если скорость меняется так, как будто группа звёзд движется вокруг общего центра. Тогда скорость более близких к центру звёзд будет меньшей, чем удалённых от центра. Наблюдаемые лучевые скорости далёких звёзд демонстрируют такое движение. Все звёзды вместе с Солнцем движутся перпендикулярно к направлению на центр Галактики. Это движение является следствием общего вращения Галактики, скорость которого меняется с расстоянием от её центра (дифференциальное вращение).

Вращение Галактики имеет следующие особенности:

Оно происходит по часовой стрелке, если смотреть на Галактику со стороны северного её полюса, находящегося в созвездии Волос Вероники.

Угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра.

Линейная скорость вращения сначала возрастает по мере удаления от центра. Затем примерно на расстоянии Солнца достигает наибольшего значения около 250 км/с, после чего медленно убывает.

Солнце и звёзды в его окрестности совершают полный оборот вокруг центра Галактики примерно за 230 млн лет. Этот промежуток времени называется галактическим годом.

24.2 Звездные населения и галактические подсистемы

Звёзды, расположенные вблизи Солнца отличаются большой яркостью и относятся к I типу населения. Они обычно находятся во внешних областях Галактики. Звёзды, расположенные далеко от Солнца, находящиеся около центра Галактики и в короне относятся ко II типу населения. Разделение звёзд на населения было проведено Бааде при изучении Туманности Андромеды. Самые яркие звёзды населения I – голубые и имеют абсолютные величины до -9^m , а самые яркие звёзды населения II – красные с абс. величиной -3^m . Кроме

того население I характеризуется обилием межзвёздного газа и пыли, которые отсутствуют в населении II.

Детальное разделение звёзд в Галактике на населения включает 6 типов:

Крайнее население I – включает объекты, содержащиеся в спиральных ветвях. Сюда относятся межзвёздные газ и пыль, сконцентрированные в спиральных рукавах, из которых образуются звёзды. Звёзды этого населения очень молоды. Их возраст составляет 20–50 млн лет. Область существования этих звёзд ограничена тонким галактическим слоем: кольцом с внутренним радиусом 5000 пс, внешним радиусом 15 000 пс и толщиной около 500 пс.

К этим звёздам относятся звёзды спектральных классов от O до B2, сверхгиганты поздних спектральных классов, звёзды типа Вольфа – Райе, эмиссионные звёзды класса B, звёздные ассоциации, переменные типа T Тельца.

Звёзды обычного населения I немного старше, их возраст 2–3 космических года. Они удалились от спиральных рукавов и часто находятся вблизи центральной плоскости Галактики.

К ним относятся звёзды подклассов от B3 до B8 и нормальные звёзды класса A, расс. скопления со звёздами этих же классов, звёзды классов от A до F с сильными линиями металлов, менее яркие красные сверхгиганты.

Звёзды населения диска. Их возраст от 1 до 5 млрд лет, т.е. 5–25 космических лет. К этим звёздам относится и Солнце. К этому населению относится множество малозаметных звёзд, находящихся в пределах 1000 пс от центральной плоскости в галактическом поясе с внутренним радиусом 5000 пс и внешним радиусом 15 000 пс. К этим звёздам относятся обычные гиганты классов от G до K, звёзды главной последовательности классов от G до K, долгопериодические переменные, с периодами более 250 суток, полуправильные переменные звёзды, планетарные туманности, новые звёзды, старые рассеянные скопления.

Звёзды промежуточного населения II включают объекты, находящиеся на расстояниях свыше 1000 пс по обе стороны от центральной плоскости Галактики. Эти звёзды вращаются по вытянутым орбитам. К ним относится большинство старых звёзд, с возрастом от 50 до 80 космических лет, звёзды с большими скоростями, со слабыми линиями, долгопериодические переменные с периодами от 50 до 250 суток, цефеиды типа W Девы, переменные типа RR Лиры, белые карлики, шаровые скопления.

Население галактической короны. Относятся объекты, возникшие на ранних стадиях эволюции Галактики, которая была в то время менее плоской, чем сейчас. К этим объектам относятся субкарлики, шаровые скопления короны, звёзды типа RR Лиры, звёзды с крайне слабыми линиями, звёзды с самыми большими скоростями.

Звёзды населения ядра включают наименее известные объекты. В спектрах этих звёзд, наблюдаемых в других галактиках, сильны линии натрия, интенсивны полосы циана (CN). Это могут быть карлики класса M. К таким объектам относят звёзды типа RR Лиры, шаровые зв. скопления богатые

металлами, планетарные туманности, карлики класса М, звёзды-гиганты классов G и M с сильными полосами циана, инфракрасные объекты.

Важнейшие элементы структуры Галактики – центральное сгущение, спиральные рукава, диск. Центральное сгущение Галактики скрыто от нас тёмной непрозрачной материей. Лучше всего видна его южная половина в виде яркого звёздного облака в созвездии Стрельца. В инфракрасных лучах удаётся наблюдать и вторую половину. Эти половины разделяет мощная полоса пылевой материи, которая непрозрачна даже для инфракрасных лучей. Линейные размеры центрального сгущения 3 на 5 килопарсек.

Область Галактики на расстоянии 4–8 кпс от центра выделяется рядом особенностей. В ней сосредоточено наибольшее число пульсаров и газовых остатков от взрывов сверхновых звёзд, интенсивно нетепловое радиоизлучение, чаще встречаются молодые и горячие O и B-звёзды. В этой области существуют водородные молекулярные облака. В диффузной материи этой области увеличена концентрация космических лучей.

На расстоянии 3–4 кпс от центра Галактики методами радиоастрономии обнаружен рукав нейтрального водорода с массой около 100 000 000 солнечной, расширяющийся со скоростью около 50 км/с. по другую сторону от центра, на расстоянии около 2 кпс имеется рукав с массой в 10 раз меньшей, удаляющийся от центра со скоростью 135 км/с.

В области центра имеется несколько газовых облаков с массами 10 000–100 000 масс Солнца, удаляющихся со скоростью 100–170 км/с.

Центральная область с радиусом меньше 1 кпс занята кольцом из нейтрального газа, которое вращается со скоростью 200 км/с вокруг центра. Внутри него имеется обширная область H II в форме диска с диаметром около 300 пс. В области центра наблюдается нетепловое излучение, что свидетельствует об увеличении концентрации космических лучей и напряжённости магнитных полей. Совокупность явлений, наблюдаемых в центральных областях Галактики, говорит о возможности того, что свыше 10 000 000 лет назад из центра Галактики произошёл выброс газовых облаков с общей массой порядка 10 000 000 масс Солнца и со скоростью порядка 600 км/с.

В созвездии Стрельца, вблизи центра Галактики имеется несколько мощных источников радио- и инфракрасного излучения. Один из них – Стрелец-А находится в самом центре Галактики. Его окружает кольцеобразное молекулярное облако радиусом в 200 пс, расширяющееся со скоростью 140 км/с. В центральных областях идёт активный процесс звездообразования.

В центре нашей Галактики скорее всего находится ядро, похожее на шаровое звёздное скопление. Инфракрасные приёмники обнаружили там эллиптический объект размерами в 10 пс. Внутри него может находиться плотное звёздное скопление диаметром 1 пс. Это может быть и объект неизвестной релятивистской природы.

24.3 Спиральная структура Галактики

Природу спиральной структуры Галактики связывают со спиральными волнами плотности, распространяющимися в звёздном диске. Эти волны подобны звуковым волнам, но из-за вращения приобретают вид спиралей. Среда, в которой распространяются эти волны, состоит не только из газово-пылевой межзвёздной материи, но и из самих звёзд. Звёзды тоже образуют своеобразный газ, отличающийся от обычного тем, что между его частицами не бывает столкновений. Спиральная волна плотности, как и обычная продольная волна, представляет собой чередование последовательных уплотнений и разрежений Среды. В отличие от газа и звёзд, спиральный узор волн вращается в ту же сторону, что и вся Галактика, но заметно медленнее и с постоянной угловой скоростью, как твёрдое тело.

Поэтому вещество постоянно догоняет спиральные ветви с внутренней стороны и проходит через них. Однако у звёзд и газа это прохождение через спиральные ветви происходит по-разному. Звёзды, как и газ, уплотняются в спиральной волне, их концентрация увеличивается на 10–20%. Соответственно возрастает и гравитационный потенциал. Но поскольку между звёздами столкновений не происходит, они сохраняют момент, чуть изменяют свой путь в пределах спирального рукава и выходят из него практически в том же направлении, в каком они вошли.

Газ ведёт себя иначе. Из-за столкновений, входя в рукав, он теряет момент количества движения, тормозится и начинает скапливаться у внутренней границы рукава. Набегающие новые порции газа приводят к образованию у этой границы ударной волны с большим перепадом плотности. В результате у спиральных ветвей образуются кромки уплотнения газа и возникает тепловая неустойчивость. Газ быстро становится непрозрачным, остывает и переходит в плотную фазу, образуя газово-пылевые комплексы, благоприятные для звездообразования. Молодые и горячие звёзды возбуждают свечение газа, из-за чего возникают яркие туманности, которые вместе с горячими звёздами очерчивают спиральную структуру, повторяющую спиральную волну плотности в звёздном диске.

Спиральная структура нашей Галактики была изучена при помощи исследования других спиральных галактик. Исследования показали, что спиральные ветви соседних галактик состоят из горячих гигантов, сверхгигантов, пыли и газа. Если убрать эти объекты, то исчезнут спиральные ветви. Красные и жёлтые звёзды заполняют равномерно области в ветвях и между ними.

Чтобы прояснить спиральную структуру нашей Галактики нужно наблюдать горячие гиганты, пыль и газ. Это сделать достаточно сложно, потому что Солнце находится в плоскости Галактики и различные спиральные ветви проектируются друг на друга. Современные методы не позволяют точно определять расстояния до далёких гигантов, что затрудняет создание пространственной картины. К тому же в плоскости Галактики лежат большие

массы пыли неоднородной структуры и различной плотности, что ещё более затрудняет исследование далёких объектов.

Большие надежды подаёт исследование водорода на длине волны 21 см. С их помощью можно измерить плотность нейтрального водорода в различных местах Галактики. Эта работа была проделана голландскими астрономами Холстом, Мюллером, Оортом и др. В результате получилась картина распределения водорода, обозначившая контуры спиральной структуры Галактики. Водород находится в больших количествах рядом с молодыми горячими звёздами, определяющими структуру спиральных ветвей. Излучение нейтрального водорода длинноволновое, находится в радиодиапазоне и для него межзвёздная пылевая материя прозрачна. 21-сантиметровое излучение доходит из самых далёких областей Галактики без искажений.

Галактика непрерывно изменяется. Эти изменения протекают медленно и постепенно. Исследователям их трудно обнаружить, потому-что человеческая жизнь очень коротка по сравнению с жизнью звёзд и галактик. Обращаясь к космической эволюции нужно выбирать очень длинную единицу времени. Такой единицей является космический год, т.е. время полного оборота Солнца вокруг центра Галактики. Он равен 250 млн земных лет. Звёзды Галактики постоянно перемешиваются и за один космический год, двигаясь даже с небольшой скоростью 1 км/с относительно друг друга, две звезды удалятся на 250 пс. В течение этого времени одни звёздные группы могут распасться, другие образоваться вновь. Внешний вид Галактики сильно изменится. Кроме механических изменений, за космический год изменяется физическое состояние Галактики. Звёзды классов О и В могут ярко сиять лишь за время, равное какой-то части космического года. Возраст самых ярких наблюдаемых гигантов около 10 млн лет. Однако, несмотря на это, конфигурация спиральных ветвей может оставаться достаточно стабильной. Одни звёзды будут покидать эти области, другие прилетать на их место, одни звёзды будут умирать, другие рождаться из огромной массы газово-пылевых комплексов спиральных ветвей. Если распределение положений и движений объектов в какой-нибудь галактике не подвергается большим изменениям, то эта звёздная система находится в состоянии динамического равновесия. Для определённой группы звёзд состояние динамического равновесия может сохраняться в течение 100 космических лет. Однако за более длительный период равный тысячам косм. лет состояние динамического равновесия будет нарушено из-за случайных близких прохождений звёзд. Ему на смену придёт динамически квазипостоянное состояние статистического равновесия, более устойчивое, при котором звёзды тщательнее перемешаны.

Тема 25 Внегалактическая астрономия

25.1 Классификация галактик и их пространственное распределение

Французские искатели комет Мессье и Мэшем составили в 1784 году каталог туманных объектов, наблюдаемых на небе невооружённым глазом или в телескоп для того, чтобы в дальнейшей работе не путать их с прилетающими кометами. Объекты каталога Мессье оказались самой разнообразной природы. Часть из них – звёздные скопления и туманности принадлежит нашей Галактике, другая часть – объекты более далёкие и являются такими же звёздными системами, как и наша Галактика. Понимание истинной природы галактик пришло не сразу. Только в 1917 году Ричи и Кертис, наблюдая сверхновую звезду в галактике NGC 224 вычислили, что она находится на расстоянии 460 000 пс, т.е. в 15 раз больше диаметра нашей Галактики, а значит далеко за её пределами. Окончательно вопрос проявился в 1924–1926 гг., когда Э. Хаббл при помощи 2,5метрового телескопа получил фотографии Туманности Андромеды, где спиральные ветви разложились на отдельные звёзды.

Сегодня известно очень много галактик, находящихся от нас на расстоянии от сотен тысяч до миллиардов св. лет.

Многие галактики описаны и сведены в каталоги. Наиболее употребительный – “Новый общий каталог Дрейера” (NGC). Каждая галактика имеет свой номер. Например, Туманность Андромеды обозначается NGC 224.

Наблюдение галактик показало, что они очень разнообразны по форме и структуре. По внешнему виду разделяют галактики эллиптические, спиральные, линзовидные и неправильные.

Эллиптические галактики (Е) имеют на фотографиях форму эллипсов без резких границ. Яркость плавно увеличивается от периферии к центру. Внутренняя структура обычно отсутствует. Эти галактики построены из красных, жёлтых гигантов, красных и жёлтых карликов, некоторого количества белых звёзд невысокой светимости, т.е. в основном из звёзд II типа населения. Нет белоголубых сверхгигантов, которые обычно создают структуру спиральных рукавов. Внешне эллиптические галактики различаются большим или меньшим сжатием.

Показателем сжатия является величина

$$10(a - b)/a,$$

легко отыскиваемая, если на фотографии измерены большая a и малая b полуоси. Показатель сжатия дописывается за буквой, обозначающей форму галактики, например, Е3. Выяснилось, что сильно сжатых галактик нет, поэтому самый большой показатель – 7. Сферическая галактика имеет показатель 0.

Очевидно, что эллиптические галактики имеют геометрическую форму эллипсоида вращения. Э.Хаббл поставил задачу, не является ли разнообразие наблюдаемых форм следствием различной ориентации одинаково сплюснутых галактик в пространстве. Эта задача была решена математически и получен

ответ, что в составе скоплений галактик наиболее часто встречаются галактики с показателем сжатия 4, 5, 6, 7 и почти нет сферических галактик. А вне скоплений встречаются почти только галактики с показателями 1 и 0. Эллиптические галактики в скоплениях – это гигантские галактики, а вне скоплений – карликовые.

Спиральные галактики (S). В них наблюдается структура в виде спиральных ветвей, которые выходят из центрального ядра. Ветви выделяются на менее ярком фоне из-за того, что содержат наиболее горячие звёзды, молодые скопления, светящиеся газовые туманности.

Эдвин Хаббл разбил спиральные галактики на подклассы. Мерой служит степень развития ветвей и размер ядра галактики.

В галактиках Sa ветви туго закрученные и сравнительно гладкие, слабо развитые. Ядра всегда большие, обычно составляют около половины наблюдаемого размера всей галактики. Галактики этого подкласса наиболее похожи на эллиптические. Обычно наблюдаются две ветви, выходящие из противоположных частей ядра, но редко бывает и больше.

У галактик Sb спиральные ветви заметно развиты, но не имеют разветвлений. Ядра меньше чем у предыдущего класса. У галактик такого типа часто наблюдается много спиральных ветвей.

Галактики с сильно развитыми, разделяющимися на несколько рукавов ветвями и малым по сравнению с ними ядром относятся к типу Sc.

Несмотря на многообразие внешнего вида, спиральные галактики имеют сходное строение. В них можно выделить три составляющие: звёздный диск, толщина которого в 5–10 раз меньше диаметра галактики, сфероидальную составляющую, плоскую составляющую, которая меньше в несколько раз по толщине, чем диск. К плоской составляющей относятся межзвёздный газ, пыль, молодые звёзды, спиральные ветви.

Коэффициент сжатия спиральных галактик всегда больше 7. В то же время у эллиптических всегда меньше 7. Это говорит о том, что в слабо сжатых галактиках спиральная структура не может развиваться. Для её появления нужно, чтобы система было сильно сжата.

Доказано, что сильно сжатая галактика в ходе эволюции не может стать слабо сжатой, также как и наоборот. Значит, эллиптические галактики не могут превращаться в спиральные, а спиральные в эллиптические. Различное сжатие обусловлено различным количеством вращения систем. Те галактики, которые при формировании получили достаточное количество вращения, приняли сильно сжатую форму, в них развились спиральные ветви.

Встречаются спиральные галактики, у которых ядро находится в середине прямой перемычки и спиральные ветви начинаются лишь у концов этой перемычки. Такие галактики обозначаются SBa, SBb, SBc. Добавление буквы B указывает на присутствие перемычки.

Линзовидные галактики (S0). Внешне похожи на эллиптические, но имеют звёздный диск. По структуре похожи на спиральные галактики, но отличаются от них отсутствием плоской составляющей и спиральных ветвей. От спиральных галактик, наблюдаемых с ребра линзовидные галактики

отличаются отсутствием полосы тёмной материи. Шварцшильд предложил теорию, по которой линзовидные галактики могут образовываться из спиральных в процессе выметания газо-пылевой материи.

Неправильные галактики (Ir). Имеют несимметричный вид. В них нет спиральных ветвей, а горячие звёзды и газопылевая материя концентрируется в отдельные группы или разбросаны по всему диску. Имеется сфероидальная составляющая с малой яркостью. Эти галактики отличаются высоким содержанием межзвёздного газа и молодых звёзд.

Неправильная форма у галактики может быть вследствие того, что она не успела принять правильной формы из-за малой плотности в ней материи или из-за молодого возраста. Может стать неправильной галактика и из-за искажения формы в результате взаимодействия с другой галактикой.

Неправильные галактики разделяются на два подтипа.

Подтип Ir I характеризуется высокой поверхностной яркостью и сложностью неправильной структуры. В некоторых галактиках этого подтипа обнаруживается разрушенная спиральная структура. Такие галактики часто встречаются парами.

Подтип Ir II характеризуется низкой поверхностной яркостью. Это свойство мешает обнаружению таких галактик и их известно всего несколько. Малая поверхностная яркость свидетельствует о невысокой звёздной плотности. Значит, эти галактики должны очень медленно переходить от неправильной формы к правильной.

В июле 1995 года было проведено исследование на космическом телескопе им. Хаббла по поиску неправильных слабых голубых галактик. Оказалось, что эти объекты, расположенные от нас на расстояниях от 3 до 8 млрд световых лет, самые распространённые. Большинство из них имеет чрезвычайно насыщенный голубой цвет, что говорит о том, что в них интенсивно идёт процесс звездообразования. На близких расстояниях, соответствующих современной Вселенной, эти галактики не встречаются.

Галактики гораздо многообразнее, чем рассмотренные виды, и это многообразие касается форм, структур, светимости, состава, плотности, массы, спектра, особенностей излучения.

Можно выделить следующие морфологические типы галактик, подходя к ним с разной точки зрения.

Аморфные, бесструктурные системы – включающие галактики E и большинство S0. В них нет или почти нет диффузной материи и горячих гигантов. Галактики Aro – голубее остальных. Многие из них имеют узкие, но яркие линии в спектре. Может быть, они очень богаты газом.

Галактики Сейферта – различного вида, но характерные очень большой шириной сильных эмиссионных линий в их спектрах.

Квazarы – квазизвёздные радиоисточники, QSS, не отличимые по виду от звёзд, но излучающие радиоволны, как наиболее мощные радиогалактики. Они характерны голубоватым цветом и яркими линиями в спектре, имеющими огромное красное смещение. По светимости превосходят галактики –

сверхгиганты. Квазаги – квазизвёздные галактики QSG – отличаются от квазаров отсутствием сильного радиоизлучения.

25.2 Взаимодействующие галактики.

Ядра галактик и их активность

Близко расположенные друг к другу галактики иногда бывают связаны между собой полосой светящейся материи. Часто эти светящиеся полосы являются продолжением спиральных ветвей. Цвет полос голубоватый и они состоят из горячих гигантов и сверхгигантов. Часто галактики погружены в общий “звёздный туман”.

Взаимодействующие галактики изучал Б.А. Воронцов-Вельяминов. Он составил атлас взаимодействующих галактик, куда вошло 355 объектов. Так как для исследования использовался Паломарский атлас неба, включающий много слабых галактик, не учтённых в NGC, взаимодействующим галактикам Воронцова-Вельяминова даны особые обозначения, например, VV 13.

В большинстве случаев особенности форм взаимодействующих галактик объясняются возмущающими приливными силами, действующими на звёзды галактики со стороны другой. Многие исследователи считают, что взаимодействующие галактики сближаются, но В.А. Амбарцумян предположил, что мы наблюдаем процесс разделения одной галактики на две или несколько. При этом происходит бурный процесс взрывного характера.

У большинства галактик можно выделить яркую центральную часть, называемую ядром. Эта область отличается большой звёздной плотностью, достигающей 10^6 – 10^8 пс⁻³. Даже при таких плотностях столкновений не бывает. Исследования последних лет показали, что ядро не является просто более плотным местом галактики, в самом центре ядра можно обнаружить ещё одно сильное уплотнение – ядрышко. При наблюдении ядра туманности Андромеды (размеры его 100 пс) удалось выделить яркое ядрышко поперечником 1–14 пс. Оно вращается как твёрдое тело, с периодом обращения 500 000 лет. Масса его – 13 млн солнечных масс. Плотность его 1500 солн. масс на 1 пс³, в 20 000 раз больше, чем в окрестностях Солнца. Оно себя ведёт таким образом, как будто это самостоятельное образование, вложенное в галактику.

Радиоисследования нашей Галактики показали, что в центре имеется ядрышко размером в 6 пс.

Ядра большинства галактик содержат эмиссионные линии в спектрах. Особенно распространена длина волны, принадлежащая дважды ионизованному кислороду. Для того чтобы дважды ионизовать кислород должно быть мощное ультрафиолетовое излучение. Характер эмиссионных линий указывает, что газы движутся со скоростями около 8000 км/с. В ядрах происходят какие-то бурные процессы, природа которых неясна.

Наблюдения некоторых галактик показали, что в ядрах могут происходить грандиозные взрывы. Так в ядре галактики NGC 3034 наблюдается взрыв с выбросом энергии больше 10^{49} Дж, т.е. в миллион раз больше, чем при вспышке сверхновой звезды. Вполне возможно, что каждая галактика

переживает на какой-то стадии своей эволюции взрыв в ядре. В среднем по статистике должна наблюдаться одна взрывающаяся галактика на тысячу, поэтому сейчас известно мало таких объектов. Эмиссионные линии спектров ядер галактик могут говорить о бывших в прошлом взрывах. Вещество в результате взрыва выбрасывается из центра галактики и за 10 млн лет разбрасывается на большое расстояние, так что не остаётся и следа от взрывного процесса.

Галактики с активными ядрами составляют несколько % от количества нормальных галактик. Особенно часто встречаются сейфертовские галактики, в центре которых наблюдается яркий источник малого углового размера. Непрерывный спектр его имеет нетепловой характер, т.е. не объясняется излучением горячих тел. Широкие эмиссионные линии в спектрах говорят о большой скорости движения газов. Важной особенностью излучения ядер является их переменность. Иногда светимость ядра меняется за несколько месяцев или дней. Это указывает на то, что основной источник излучения в ядре очень мал по сравнению с размерами галактики.

25.3 Радиогалактики и квазары

Галактики часто бывают источниками радиоизлучения. Однако, с больших расстояний, больше 5–6 Мпс, радиоизлучение нормальных галактик оказывается слишком слабым для современных наблюдательных средств. В среднем радиоизлучение нормальных галактик в миллион раз меньше оптического излучения. Наряду с нормальными галактиками встречаются особенные, радиоизлучение которых на несколько порядков выше и лежит в пределах от 10^{28} до 10^{34} квт. В большинстве случаев оптическое излучение таких галактик слабо и не всегда удаётся отождествить радиогалактику с оптическим источником. Радиогалактики являются одной из разновидностей галактик с активными ядрами. Они обычно относятся к числу массивных эллиптических галактик. Механизм излучения синхротронный и связан с выбросом из галактики облаков релятивистских частиц, движущихся в магнитном поле. Всего известно около 500 радиогалактик. Самая выдающаяся радиогалактика – Лебедь А. Это мощнейший дискретный источник радиоизлучения, но в оптическом диапазоне он имеет всего 18 зв. величину. $M = -20,5$ зв. вел. Но энергия радиоволн всё равно преобладает над оптическим излучением. Бааде и Минковский предложили, что радиоизлучение происходит из-за проникновения друг в друга двух спиральных галактик. При столкновении на большой скорости спиралей происходит их разогрев и свечение.

Особенностью этого объекта является то, что область радиоизлучения не совпадает с видимой галактикой, а располагается двумя эллиптическими лопастями по обе стороны от зоны оптического излучения. Центры областей радиоизлучения находятся от видимого двойного ядра на расстоянии около 80 000 пс, а размеры их значительно больше оптических размеров – двойного ядра и окружающего гало.

У радиогалактики Дева А (Virgo A/M 87/NGC 4486) радиоизображение практически совпадает с оптическим. У видимой туманности хорошо заметен радиально расположенный выброс, состоящий из сгустков светящейся материи. Выброс сам по себе тоже является источником радиоизлучения.

Особый класс объектов представляют собой квазары, открытые голландским астрономом М. Шмидтом в 1963 году. Было установлено, что наподобие точечных источников света – звёзд – во вселенной существуют точечные источники радиоизлучения. Эти объекты назвали первоначально радиозвёздами, а потом *квазизвёздными объектами*, сокращённо *квазарами*. С развитием радиоастрономии и повышением углового разрешения радиотелескопов, точечные источники радиоизлучения были отождествлены с некоторыми оптическими. Эти объекты излучают в оптическом диапазоне с сотни раз мощнее галактик, а основная часть излучения исходит из ядра размером не более 0,1 пс или меньше. Это ядро квазара окружено газовой оболочкой, простирающейся на сотни парсек. Квазары обладают мощным радиоизлучением, а некоторые из них – инфракрасным и рентгеновским.

В 1965 году А. Сэндидж открыл квазаги – объекты, подобные квазарам, но не обладающие заметным радиоизлучением.

Первоначально спектры квазаров не поддавались расшифровке, но затем удалось установить, что их можно объяснить, полагая, что спектральные линии обладают красным смещением, сравнимым или значительно большим, чем у самых далёких из наблюдаемых галактик. Если это красное смещение связано с космологическим расширением, то квазары – самые далёкие из известных объектов Вселенной, а их мощность излучения, достигающая 10^{41} Вт, больше, чем у любых других известных объектов.

В спектрах некоторых квазаров удалось отождествить как линии излучения, так и линии поглощения, и в этих случаях были обнаружены интересные особенности. Оказалось, что в спектрах квазаров может присутствовать несколько групп линий поглощения, имеющих различные красные смещения, которые в свою очередь отличаются от красного смещения линий излучения. Если все эти красные смещения объясняются эффектом Доплера, то относительные скорости областей, излучающих свет, и областей, в которых возникают линии поглощения, могут составлять значительную долю скорости света. Это связано либо с большими относительными скоростями в самом квазаре, либо с существованием облаков межгалактического газа между квазаром и наблюдателем, которые поглощают свет квазара.

Сегодня известно более 1500 квазаров. Они расположены на расстоянии в миллиарды световых лет. Обычные галактики с таких расстояний наблюдаться не могут. Большинство квазаров расположено в пределах некоторого интервала расстояний. Это говорит о том, что они возникли на определённом этапе эволюции Вселенной.

В настоящее время многие исследователи считают, что квазары являются ядрами галактик, находящимися в стадии чрезвычайно сильной активности. Сходство придают переменность излучения, компактность, нетепловой характер спектра, сильное расширение эмиссионных линий, наблюдаемых в

спектрах квазаров. Однако, у большинства квазаров мощность выделения энергии в сотни и тысячи раз больше, чем у активных ядер галактик. Звёзды галактики, окружающей квазар, обычно не видны, так как квазары находятся на больших расстояниях и яркий блеск квазара не позволяет видеть слабый свет звёзд. Вокруг десятков близких квазаров обнаружены слабые протяжённые оптические туманности. Их средний размер около 90 000 пс, а светимость в несколько раз меньше светимости ярчайших галактик. Неизвестно, есть ли в этих туманностях звёзды.

Механизм выделения большого количества энергии квазарами до конца не ясен. Предполагается, что он связан с высвобождением энергии гравитационного взаимодействия тел. Необходимая энергия может выделяться при падении газа в очень глубокую потенциальную яму, например, на массивную чёрную дыру или при сжатии плазменных тел с массой в сотни миллионов масс Солнца под действием собственной гравитации.

Недавно был обнаружен квазар в ядре радиогалактики Лебедь-А. Расстояние от нас всего 600 млн световых лет. Изучая ультрафиолетовый спектр ядра, учёные обнаружили широкие линии излучения ионизованного магния, принадлежащие вращающемуся с большой скоростью газу. Учитывая высокую светимость ядра и большую массу, учёные предположили, что открытый объект является квазаром.

Изучение большого количества квазаров на Космическом телескопе им. Хаббла в 1995 году привело к выводу, что недалёкие квазары ($z = 0,5$) связаны с взаимодействующими эллиптическими галактиками. Многие квазары располагаются в центрах подобных звёздных систем. Это подтверждает мнение, что квазары являются массивными чёрными дырами, на которые происходит аккреция вещества. Исследуемые квазары имеют разнообразную природу, излучают в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах.

25.4 Определение расстояния галактик

Галактики находятся на очень больших расстояниях от Солнца. Только в ближайших из них можно выделить отдельные звёзды, остальные видны в виде туманных пятен. Поэтому долгое время было невозможно определить расстояния до галактик. Лишь в 20-х годах нынешнего столетия удалось различить знакомые типы звёзд в соседних галактиках и по их характеристикам определить приблизительные расстояния.

В настоящее время существует несколько способов определения расстояний до галактик.

Расстояние определяется по изучению объектов хорошо изученных типов, с известной светимостью.

Например, светимость цефеид определяется по соотношению период – светимость.

У новых звёзд абсолютная звёздная величина в максимуме блеска около $-8^m,5$, яркие шаровые скопления имеют абс. зв. величину до -9^m .

Для определения расстояний до такого объекта достаточно найти видимую зв. величину и вычислить модуль расстояния, учтя влияние межзвёздного поглощения света.

Расстояния до очень далёких галактик определяются по видимым угловым размерам или видимой звёздной величине. Для этого нужно знать характерные размеры или светимости галактик различных типов. Такие оценки расстояний называются относительными.

Расстояния до галактик определяются по величине красного смещения линий в их спектрах. Установлено, что все линии в спектрах далёких галактик заметно смещены в сторону красного конца спектра. Это явление связано с происходящим увеличением средних расстояний между галактиками, которое называется расширением Вселенной. Красное смещение интерпретируется как доплеровское смещение, связанное с удалением галактики от нас.

Из наблюдений было установлено, что скорость удаления V_r , соответствующая красному смещению $z = \Delta\lambda/\lambda$, увеличивается в среднем линейно с расстоянием r от галактики:

$$V_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = Hr.$$

Эта зависимость носит название *закона Хаббла*, а коэффициент пропорциональности H – *постоянной Хаббла*.

Если мы наблюдаем объекты с одинаковой абсолютной звёздной величиной, то с увеличением расстояния r их видимая звёздная величина будет меняться пропорционально $5\lg r$. Поэтому, если выполняется закон Хаббла, зависимость между $\lg(\Delta\lambda/\lambda)$ и m должна выражаться прямой линией с коэффициентом пропорциональности между этими величинами, равным 5. Такая зависимость действительно наблюдается для наиболее ярких галактик, светимость которых, как оказалось, примерно одинакова.

Зная красное смещение галактик, легко определить, во сколько раз одна из них дальше другой. Но для оценки расстояния до каждой из них необходимо знать величину постоянной Хаббла.

Оказалось, что для сравнительно близких галактик, до которых расстояние удовлетворительно измеряется различными методами, закон Хаббла не всегда выполняется. А для далёких галактик, обладающих большими скоростями V_r , нет достаточно надёжных критериев определения расстояний без помощи красных смещений. Поэтому до сих пор оценки H , проведённые различными авторами, существенно различаются, хотя практически все они заключены в пределах от 50 до 100 км/(с·Мпс).

Часто используется среднее значение $H = 75$ км/(с·Мпс).

При красных смещениях около 1 закон Хаббла уже не работает, нужно применять более сложные формулы.

В 1995 году была обнаружена самая далёкая от нас галактика 8C 1435+635 в созвездии Дракона. Её красное смещение составляет 4,25. Это

смещение соответствует свету, пришедшему из эпохи, когда возраст Вселенной составлял около 7–10% от современного.

25.5 Скопления галактик. Метагалактика

Большая часть галактик входит в состав скоплений. Сегодня известны тысячи скоплений галактик.

Скопления делятся на правильные и неправильные. Кроме этого деления существуют ещё классификации скоплений по разным параметрам, например, по числу членов с мощным излучением, по наличию ярких галактик в центре, по наличию пекулярных галактик.

Правильные скопления состоят из большого количества галактик (часто более 10^4 членов), обладая сферической симметрией, большой концентрацией к центру. Яркие члены этих скоплений относятся к типам E и S0. В центре скопления обычно находится одна или две ярчайшие эллиптические галактики, окружённые гало. Типичный представитель правильных скоплений – скопление в созвездии Волос Вероники. Его размеры около 4 Мпс. Число галактик – несколько десятков тысяч.

Неправильные скопления имеют неправильную форму, в них часто встречаются отдельные сгущения. Состоят эти скопления из галактик всех типов. Они могут иметь много и мало галактик. Примером такого скопления является скопление в Деве. Содержит несколько тысяч галактик, размеры около 3 Мпс.

В некоторых скоплениях обнаружены большие массы горячего ионизованного газа, нагретого до температуры около 10^8 К. Газ излучает в рентгеновском диапазоне. Общая масса газа составляет заметную долю суммарной массы всех галактик скопления.

Важным является вопрос, существуют ли скопления скоплений галактик. На сегодняшний день всё больше фактов свидетельствует о том, что такие скопления существуют. Измерения космического фонового излучения, являющегося остатком от Большого Взрыва, показали 180-градусную асимметрию, известную как *диполь*. Она проявляется в нагреве на 0.1% космического фонового излучения по сравнению со средним в одном направлении и в таком же охлаждении в противоположной стороне. Эти измерения были подтверждены исследованиями на спутнике Cosmic Background Explorer в период с 1989 по 1990, свидетельствующими о том, что вся Местная группа движется со скоростью 600 км/с в направлении созвездия Гидра. Это направление было подсчитано после поправки за известные движения: вращение Солнца вокруг центра Галактики и движение нашей Галактики по направлению к Туманности Андромеды.

Этот факт свидетельствует о том, что галактики собираются в группы и скопления, которые в свою очередь составляют сверхскопления, оставляя другие области лишенными галактик. Неоднородно распределенная масса вещества, окружающая Местную группу, может вызвать несбалансированное притяжение, тянущее МГ в одном направлении.

Одна исследовательская группа использовала движения сотен галактик для заключения о существовании Великого Аттрактора находящегося на расстоянии около 60 Мпк. Местная группа, по-видимому, поймана в космическое состязание между Великим Аттрактором и находящемся на таком же расстоянии сверхскоплении Персей-Печь.

Самые крупномасштабные неоднородности в распределении галактик носят “ячеистый” характер. В “стенках ячеек” много галактик, их скоплений, а внутри – пустота. Размеры ячеек около 100 Мпс, толщина стенок 3-4 Мпс. Большие скопления галактик находятся в узлах этой ячеистой структуры. Отдельные фрагменты ячеистой структуры иногда называют сверхскоплениями. Сверхскопления часто имеют сильно вытянутую форму, наподобие нитей.

Понятие “Метагалактика” не является вполне ясным. Системы, содержащие различные скопления галактик непосредственно не наблюдаются. Тем не менее, есть основания предполагать, что Метагалактика существует, относительно автономна и является объединением галактик такого порядка, каким для звёзд является Галактика. Реальность Метагалактики будет доказана, если удастся определить её границы и выделить наблюдаемые объекты, не принадлежащие ей. В связи с гипотетичностью представлений о Метагалактике, как об автономной гигантской системе галактик, включающей все наблюдаемые галактики и их скопления, термин “Метагалактика” стал чаще применяться для обозначения обозреваемой части Вселенной.

25.6 Проблема темного вещества

Очень важным для космологии является вопрос о том, всё ли вещество Метагалактики наблюдается с помощью современных приёмников излучения.

От средней плотности вещества во Вселенной зависит её будущее. Если плотность больше некоторого критического значения, то расширение Вселенной сменится сжатием. Если меньше, то расширение будет происходить бесконечно. Значение критической плотности легко вычислить. Известно, что вторая космическая скорость для шара массы M записывается следующим образом:

$$v = \sqrt{2GM/R}.$$

В это выражение подставляем значения массы $M = 4\pi R^3 \rho / 3$ и для скорости $v = HR$.

Находим плотность:

$$\rho = 3H^2 / 8\pi G.$$

Критическое значение средней плотности во Вселенной зависит от постоянной

Хаббла. При значении $H = 75$ км/с·Мпс получаем $\rho = 10^{-29}$ г/см³.

Достаточно легко учесть наблюдаемое вещество, входящее в видимые галактики. Голландский астроном Оорт в 1958 году провёл посвящённое этому исследование. Он определил среднюю плотность вещества во Вселенной.

$$\rho = 4,6 \cdot 10^{-9} M_{\text{sol}} / nc^3 = 3 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3.$$

Эта величина заметно меньше критической плотности. Их соотношение равно 0,03.

Если во Вселенной нет заметных количеств другой материи, усреднённая плотность которой много больше средней галактической плотности, то вселенная будет расширяться.

Однако есть основания подозревать, что в пространстве между галактиками может быть много труднонаблюдаемых форм материи, получивших название “скрытой массы”.

Одним из поводов для такого подозрения являются результаты измерений масс скоплений галактик. Измерения проводились следующим образом.

Правильные скопления имеют симметричную форму, плотность галактик в них плавно спадает от центра к краю и поэтому есть все основания считать, что скопления находятся в равновесном состоянии, когда кинетическая энергия движений галактик, уравновешена силой взаимного тяготения всех масс, входящих в скопление.

В этом случае справедлива теорема вириала, утверждающая, что кинетическая энергия всех членов скопления равна по абсолютной величине половине потенциальной энергии тяготения масс скопления (включая и невидимые массы). Эта теорема позволяет вычислить полную массу скопления, если известны относительные скорости галактик в скоплении и размер скопления. Относительная скорость галактик в скоплении вычисляется по разности их красных смещений, а размер определяется по угловому размеру скопления на небе и расстоянию от нас.

Такое определение, выполненное для скопления в созвездии Волос Вероники приводит к массе около $2 \cdot 10^{15} M_{\text{sol}}$. Это соответствует отношению масса – светимость для всего скопления $M/L = 150 M_{\text{sol}}/L_{\text{sol}}$.

Полученное отношение во много раз больше, чем значение для эллиптических галактик. Если эти выводы правильны, то масса скопления много больше суммы масс галактик, в неё входящих.

По современным подсчётам скрытая масса составляет около 90% всей массы Вселенной.

Роль скрытой массы может играть межгалактический газ, так как он занимает огромные пространства между галактиками.

Кроме того, галактики могут быть окружены огромными массивными коронами слабо светящихся объектов, которые по их свечению обнаружить крайне трудно. Это могут быть звёзды низкой светимости. Правда, в 1995 году были опубликованы исследования Института Передовых исследований (США), где приведены результаты поисков красных карликов в нашей Галактике. Подсчёт этих объектов с помощью Космического Телескопа показал, что звёзды с массой 0,1 массы Солнца составляют не более 6% от массы гало Галактики и не более 15% от массы её диска.

Последние предположения указывают, что скрытая масса может содержаться в карликовых галактиках. Группа учёных из Калифорнийского

университета, используя 10-метровый телескоп на Гавайских о-вах изучали движения звёзд в карликовой галактике Лев II. Эта галактика является спутником нашей Галактики и находится на расстоянии 720 000 световых лет. У звёзд галактики оказались слишком большие скорости. Наблюдаемой материи этой галактики недостаточно, чтобы объяснить такие стремительные движения. Для этого нужно массу вещества увеличить в 7 раз.

Скрытая масса может содержаться также в излучении. Космические лучи, нейтрино, гравитационные волны могут существенно влиять на оценку общей массы Вселенной.

Наблюдения показывают, что плотность массы, соответствующей космическим лучам очень мала. С нейтрино дело обстоит сложнее, так как эти частицы почти не взаимодействуют с обычным веществом. Если масса покоя нейтрино не равна нулю, то масса Вселенной значительно повысится.

Исследования Космическим телескопом им. Хаббла скопления галактик Abell 2218 в созвездии Дракона, удалённом на 1,5 млрд св. лет, привели к открытию светящихся дуг непонятного происхождения. Оказалось, что это гравитационные линзы, образованные скрытой массой скопления.

Исследования П.Сакером спиральной галактики NGC 5907 позволили обнаружить избыточное свечение, уходящее на 3+7 кпс. Оно имеет форму гало и охватывает всю галактику. По последним гипотезам эта светящаяся оболочка может выявить невидимую тёмную материю вне спиральных рукавов.

Наиболее вероятное значение плотности наблюдаемой Вселенной на сегодняшний день приблизительно заключено в пределах 0,1–1 критической плотности.

Тема 26 Элементы космологии и космогонии

26.1 Красное смещение в спектрах галактик

В 1929 году Эдвин Хаббл сообщил об открытии фундаментальной закономерности. Он обнаружил, что все линии в спектрах далёких галактик заметно смещены в сторону красного конца спектра. Так как наша Галактика не может иметь никакого преимущественного положения во Вселенной, наблюдаемое разбегание галактик есть выражение взаимного удаления всех галактик друг от друга.

Это явление связано с происходящим увеличением средних расстояний между галактиками, которое называется расширением Вселенной.

Из наблюдений было установлено, что скорость удаления V_r , соответствующая красному смещению $z = \Delta\lambda/\lambda$, увеличивается в среднем линейно с расстоянием r от галактики:

$$V_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = Hr.$$

Эта зависимость носит название *закона Хаббла*, а коэффициент пропорциональности H – *постоянной Хаббла*.

С принятыми значениями H наблюдающимся скоростям 110 000 км/сек далёких галактик соответствуют расстояния свыше 1 000 Мпс или около 3 млрд световых лет.

Нужно понимать, что закон $c(\Delta\lambda/\lambda) = Hr$ абсолютно верен, так как был многократно проверен наблюдениями. Соотношение же $V_r = Hr$ верно только при допущении, что смещение спектральных линий вызывается эффектом Доплера, чего наблюдениями доказать нельзя. Можно лишь судить о большей или меньшей степени достоверности этого утверждения.

Если бы наблюдаемый мир образовался в результате грандиозного взрыва и галактики формировались из материи, разбросанной взрывом, то те из них, которые зародились в частях материи, получивших в момент взрыва большую скорость, должны были бы к настоящему моменту улететь дальше, в полном согласии с законом Хабла.

Принятие закона Хабла должно привести к выводу, что все галактики вылетели одновременно, но с разными скоростями из некоторого сравнительно малого объёма.

Существует несколько альтернативных объяснений красного смещения, минуя эффект Доплера.

1. Гипотеза “старения кванта” основана на допущении, что фотоны при своём движении в пространстве теряют часть энергии, которая в них заключена. Утверждается, что таков закон движения фотона в пространстве. Энергия фотона пропорциональна частоте, т.е. обратно пропорциональна длине волны излучения. По мере того, как фотон путешествует в пространстве, длина волны излучения становится всё больше и весь спектр далёкого объекта оказывается смещённым в красную сторону. Величина смещения пропорциональна расстоянию. На малых расстояниях эффект старения кванта незначителен и его нельзя обнаружить из наблюдений, поэтому он сказывается только в спектрах далёких галактик.

2. Потеря энергии фотоном не есть просто закон его движения, а вызывается взаимодействием с другими фотонами излучения, заполняющими пространство Метагалактики и движущимися по всевозможным направлениям. Чем больший путь проходит фотон, тем в среднем больше взаимодействий он испытывает, тем больше будет красное смещение галактики.

Слабость этих гипотез состоит в том, что они требуют отказа от закона сохранения энергии. Если старение кванта есть просто закон его движения, то энергия теряется, не передаваясь ничему. Если же фотон теряет часть энергии, передавая её какой-то среде, другим фотонам или вообще каким-либо частицам, то всякая такая передача энергии должна быть связана с возможностью изменения направления полёта фотона. Фотоны, прошедшие большой путь должны заметно изменить направление своего движения в пространстве. Вследствие этого изображения далёких галактик должны быть размытыми, и чем дальше галактика, тем степень размытости её изображения должна быть больше. Но наблюдения показывают, что очертания очень далёких галактик также ясны, как и близких.

В настоящее время гипотезы старения квантов не находят сторонников.

Зная красное смещение галактик, легко определить, во сколько раз одна из них дальше другой. Но для оценки расстояния до каждой из них необходимо знать величину постоянной Хаббла.

Оказалось, что для сравнительно близких галактик, до которых расстояние удовлетворительно измеряется различными методами, закон Хаббла не всегда выполняется. А для далёких галактик, обладающих большими скоростями V_r , нет достаточно надёжных критериев определения расстояний без помощи красных смещений. Поэтому до сих пор оценки H , проведённые различными авторами, существенно различаются, хотя практически все они заключены в пределах от 50 до 100 км/(с·Мпс).

Часто используется среднее значение $H = 75$ км/(с·Мпс).

Первоначальное значение, определённое Хабблом было 540 км/(с·Мпс).

При красных смещениях около 1 закон Хаббла уже не работает, нужно применять более сложные формулы из специальной теории относительности.

$$V = c(z^2 + 2z) / (z^2 + 2z + 2),$$

где $z = \Delta\lambda/\lambda$.

Для очень далёких галактик с большим красным смещением эта формула тоже неприменима. Она не учитывает влияние тяготения на изменение частоты световых волн.

26.2 "Горячая Вселенная". Современные представления о строении и эволюции Вселенной

Признание того, что красное смещение в спектрах вызвано эффектом Доплера приводит к выводу, что масса вещества, содержащаяся в галактиках, находилась ранее в одном месте и была выброшена в пространство в результате взрыва.

До начала 20-х гг. XX века учёные были уверены, что Вселенная стационарна и ограничивается нашей Галактикой.

А. Эйнштейн рассматривал модель Вселенной однородной, изотропной и статичной. Такая Вселенная не получалась в результате решения уравнений теории относительности. Тогда Эйнштейн изменил уравнения, предположив, что в природе существует ещё один, новый тип сил. Так в уравнениях появился новый λ -член, наличие которого означало, что между любыми двумя данными массами во Вселенной действует сила отталкивания, пропорциональная расстоянию между ними.

Величину этой силы характеризует λ -член. Его можно выбрать очень малым, чтобы в пределах Солнечной системы силы отталкивания были ничтожно малы по сравнению с силами притяжения. Но в масштабах Вселенной его наличие сказывается значительно.

В 1917 году Виллем де Ситтер предложил на базе уравнений Эйнштейна другую модель Вселенной. Эта модель описывала пустую Вселенную, однородную, изотропную, но не статическую.

В 1924 году Александр Фридман показал, что можно получить решения первоначальных уравнений Эйнштейна, описывающие заполненную материей однородную и изотропную Вселенную. Модели де Ситтера, Фридмана и Леметра предполагают расширение Вселенной.

Развитие наблюдательной астрономии привело к открытию далёких галактик, не являющихся объектами нашей Галактики. В 1929 году был открыт закон Хаббла и в начале 30-х годов теоретики создали новую модель Вселенной, описывающуюся уравнениями Эйнштейна и получившую наблюдательное подтверждение.

Эта Вселенная оказалась расширяющейся и возникшей в результате Большого Взрыва первоначального вещества. Бесконечно сжатое вещество Вселенной до Большого Взрыва называют сингулярностью.

Наблюдения Вселенной приводят к важным выводам о том, что она однородна и изотропна. Однородность означает одинаковость всех свойств материи всюду в пространстве, а изотропия – одинаковость их в любом направлении. Однородность говорит об отсутствии выделенных областей пространства, а изотропия означает отсутствие выделенного направления.

Однородность подтверждается тем, что средняя плотность вещества одинакова для достаточно больших объёмов пространства во Вселенной. Размеры областей, в пределах которых среднюю плотность вещества можно считать одинаковой, гораздо меньше Метагалактики, но они велики по сравнению с масштабами местных неоднородностей, связанных с существованием галактик и их скоплений.

Изотропия подтверждается одинаковостью разбегания галактик по всем направлениям. Предположения об однородности и изотропии Вселенной называют *космологическим принципом*.

В 1965 году было сделано открытие, подтвердившее предположение об изотропии и однородности Вселенной. Случайно было обнаружено слабое фоновое радиоизлучение с интенсивностью, одинаковой по всем направлениям. Согласно современным наблюдениям это излучение изотропно с точностью до нескольких десятых долей процента. По распределению энергии в спектре оно оказалось тепловым и соответствует температуре 3К.

При такой температуре максимум излучения приходится на диапазон спектра около 1 мм. В настоящее время неизвестны объекты Вселенной, которые бы могли давать такое излучение. На этом основании излучение было отождествлено с излучением Вселенной, сохранившимся с тех времён, когда плотность вещества была очень велика и Среда была сильно непрозрачной. Со временем, в результате расширения вещество охладилось, перешло из ионизированной в нейтральную фазу, стало непрозрачным. Не поглощаясь более средой, излучение как бы “оторвалось” от вещества и сохранилось до нашего времени. Расчёты показывают, что прозрачность вещества должна была наступить при плотности порядка 10^{-20} г/см³, т.е. в миллиард раз превышающую современную. В эту эпоху расстояния во Вселенной были в 1000 раз меньше, во столько же раз была меньше и длина волны. Поэтому кванты, имеющие сейчас длину волны 1 мм, ранее имели длину 1 мкм, что

соответствует максимуму излучения по закону Планка при температуре 3000–4000 К.

Таким образом, существование реликтового излучения является не только указанием на большую плотность Вселенной, но и на её высокую температуру. Вселенная ранее была более горячей.

Свыше 10 млрд лет назад Вселенная находилась в плотном и горячем состоянии. Можно указать момент, когда она начала расширяться из некоторого сверхплотного состояния.

Расширение Вселенной нельзя рассматривать как расширение сверхплотной вначале материи в окружающую пустоту, ибо окружающей пустоты не было. Вселенная – это всё существующее. Вещество Вселенной с самого начала однородно заполняло всё безграничное пространство. И хотя давление было огромным, оно не создавало расширяющей силы, так как везде было одинаковым. Причины начала расширения Вселенной связаны с квантовыми эффектами, возникающими в поле тяготения при огромных плотностях материи.

Различные теоретики построили многочисленные модели Вселенной, которые расширяются анизотропно на ранних стадиях, затем расширение приближается к закону Хаббла, так что по наблюдениям расширения в наше время эти модели не отличимы от модели Фридмана. Однако современная космология создала модели Вселенной, сильно отличающиеся от фридмановских.

Для определения того, как происходило расширение вблизи сингулярности, какие протекали процессы, нужно провести расчёты при разных предположениях о расширении, о состоянии и составе вещества Вселенной и сравнить результаты расчётов с наблюдениями. Это позволит определить, какие из предположений истинны и восстановить картину далёкого прошлого Вселенной.

Решение Фридмана, продолженное в прошлое, формально даёт состояние бесконечной плотности вещества. При сверхвысокой плотности вещества перестаёт работать ОТО. Современная квантовая теория предсказывает возникновение квантовых эффектов тяготения вблизи сингулярности. Теория тяготения Эйнштейна – неквантовая теория, поэтому она не может описывать эффекты, связанные с квантованием в масштабах всей Вселенной. Теория размерностей позволяет приближённо оценить параметры, где существенен тот или иной процесс, даже тогда, когда неизвестна детальная теория процесса.

Нужно установить радиус кривизны пространства-времени, при котором существенны следующие явления: тяготение, кванты, релятивизм. Роль тяготения описывается гравитационной постоянной G , роль квантов – постоянной Планка h , роль релятивизма – скоростью света c . Нас интересует радиус кривизны, величина, имеющая размерность длины, при которой существенны все три рода явлений. По теории размерностей получим:

$$r_n = \sqrt{Gh/c^3} = 10^{-33} \text{ см.}$$

Это расстояние называют планковской длиной.

Можно вычислить, в какой момент времени после начала расширения Вселенной радиус кривизны был равен r_n и какая была при этом плотность физической материи.

$$t_n = r_n / c = 10^{-43} \text{ с.}$$

$$\rho_n = 10^{93} \text{ г/см}^3.$$

Для состояния вещества с такими характеристиками нужно строить новую теорию. Общие законы физики надёжно проверены при плотностях, не превышающих ядерную $\rho_{\text{яд}} = 10^{14} \text{ г/см}^3$.

В раннюю эпоху, называемую *планковской*, должны возникать кванты гравитационного поля – *гравитоны*.

Первые мгновения существования Вселенной очень загадочны. Возможно, что четыре фундаментальные силы природы были вначале слиты воедино. Однако спустя 10^{-44} секунды после начала расширения ОТО становится применимой.

26.3 Первые минуты существования Вселенной. Происхождение химических элементов

Сверхплотное состояние Вселенной длилось недолго, но оно сыграло решающую роль в последующем развитии. При огромных значениях температуры и плотности вещества начались интенсивные процессы взаимопревращения частиц и квантов излучения. На первых порах в одинаковых количествах рождались частицы и соответствующие им античастицы из фотонов высокой энергии. В условиях сверхплотного состояния материи, характерного для раннего этапа жизни Вселенной, частицы и античастицы должны были бы тотчас же после своего рождения снова сталкиваться, превращаясь в гамма-излучение. Это взаимное превращение частиц в излучение и обратно продолжалось до тех пор, пока плотность энергии фотонов превышала значение пороговой энергии образования частиц.

На ранних этапах развития Вселенной могли возникать чрезвычайно короткоживущие и очень массивные гипотетические частицы. С падением температуры и плотности (возраст достиг 0,01 сек, температура 10^{11} К) стали возникать менее массивные частицы, в то время как более массивные “вымиряли” за счёт аннигиляции или распада.

Вымирание частиц происходило не совсем одинаково, так что античастицы практически все исчезли, а ничтожная избыточная доля протонов и нейтронов осталась. В результате этого наблюдаемый мир оказался устроенным из вещества, а не из антивещества, хотя где-то во Вселенной могут быть и области из антивещества.

Без едва заметной ассиметрии свойств частиц и античастиц мир вообще оказался бы лишённым вещества.

Образованием нуклонов (протонов и нейтронов) завершается эра адронов эволюции Вселенной (адроны – частицы, подверженные сильным взаимодействиям: протоны, нейтроны, мезоны и т.д.). После адронной эры

наступает эра леп-тонов, когда среда состоит преимущественно из положительных и отрицательных мюонов, нейтрино и антинейтрино, позитронов и электронов. Нуклоны встречаются редко. По мере дальнейшего расширения Вселенной происходит аннигиляция мюонов, электронов и позитронов. Затем прекращается взаимодействие нейтрино с веществом и к моменту 0,2 секунды после сингулярности, происходит отрыв нейтрино.

Примерно через 10 секунд после сингулярности температура достигает значения около 10^{10} К и начинается эра излучения. На этом этапе по численности преобладают фотоны, всё ещё сильно взаимодействующие с веществом, а также нейтрино.

Огромное число электронов и позитронов превратилось в излучение в катастрофическом процессе взаимной аннигиляции, оставив после себя незначительное количество электронов, достаточное, однако, чтобы объединившись с протонами и нейтронами, дать начало тому количеству вещества, которое мы наблюдаем сегодня во Вселенной.

Через 3 минуты после Большого Взрыва начинаются первые процессы нуклеосинтеза. Некоторая часть протонов успевает соединиться с нейтронами и образовать ядра гелия. В них перешло около 10% общего числа протонов. Эра излучения заканчивается переходом плазмы из ионизованного состояния в нейтральное, уменьшением непрозрачности вещества и “отрывом” излучения. Через минуту почти всё вещество Вселенной состояло из ядер водорода и гелия, находившихся в такой же пропорции, которую мы наблюдаем сегодня. Начиная с этого момента, расширение первичного огненного шара происходило без существенных изменений до тех пор, пока через 700 000 лет электроны и протоны не соединились в нейтральные атомы водорода, тогда Вселенная стала прозрачной для электромагнитного излучения – возникло реликтовое фоновое излучение.

Через миллион лет после начала расширения начинается эра вещества, когда из горячей водородно-гелиевой плазмы с малой примесью других ядер стало развиваться многообразие нынешнего мира.

После того, как вещество стало прозрачно для электромагнитного излучения, в действие вступило тяготение, оно стало преобладать над всеми другими взаимодействиями между массами практически нейтрального вещества, составлявшего основную часть материи Вселенной. Тяготение создало галактики, скопления, звёзды и планеты.

В этой картине остаётся много нерешённых вопросов. Образовались ли галактики раньше первого поколения звёзд или наоборот? Почему вещество сосредоточилось в дискретных образованиях – звёздах, галактиках, скоплениях, тогда как Вселенная как целое разлеталась в разные стороны?

Неоднородности во Вселенной, из которых впоследствии образовались все структурные образования Вселенной, зародились в виде ничтожных флуктуаций, а затем усилились в эпоху, когда ионизованный газ во Вселенной стал превращаться в нейтральный, т.е. когда излучение оторвалось от вещества и стало реликтовым. Такое усиление может привести к возникновению

заметных флуктуаций, из которых впоследствии стали образовываться галактики.

При образовании крупных структур Вселенной существенную роль могли играть нейтрино, если их масса покоя отлична от нуля. Через несколько сотен лет после начала расширения скорость нейтрино, обладающих массой, должна стать заметно меньше световой. Начиная с некоторого момента, крупные сгущения нейтрино уже не рассасываются и дают начало крупным структурным образованиям Вселенной – скоплениям и сверхскоплениям галактик. Сами галактики образуются из обычного вещества, а нейтрино, если они обладают заметной массой, выступают в роли центров притяжения для гигантских сгущений масс, являясь источником скрытой массы скоплений галактик.

В 1978 году М. Рис высказал предположение, что фоновое излучение может быть результатом “эпидемии” образования массивных звёзд, начавшейся сразу после отделения излучения от вещества и до того, как возраст Вселенной достиг млрд лет. Продолжительность жизни таких звёзд не могла превышать 1 млрд лет. Многие из них взорвались как сверхновые и выбросили в пространство тяжёлые химические элементы, которые частично собрались в крупинцы твёрдого вещества, образовав облака межзвёздной пыли. Эта пыль, нагретая излучением догалактических звёзд, могла испускать инфракрасное излучение, которое наблюдается сейчас как микроволновое фоновое излучение. Если эта гипотеза верна, то это означает, что подавляющее количество всей массы Вселенной содержится в невидимых остатках звёзд первого, догалактического, поколения и в настоящее время может находиться в массивных тёмных гало, окружающих яркие галактики.

26.4 Возникновение и эволюция звезд большой и малой массы

Гипотезы формирования звёзд из разреженного газово-пылевого облака. Звёзды и звёздные скопления имеют разный возраст, от величины 10^{10} лет (шаровые скопления) до 10^6 лет для рассеянных скоплений.

Многие исследователи полагают, что звёзды образуются из диффузной межзвёздной среды. Об этом свидетельствует положение молодых звёзд в спиральных ветвях галактик, там, где много газово-пылевой материи. Диффузная Среда удерживается в спиральных ветвях галактическим магнитным полем. Звёзды этим полем не удерживаются и уходят в сферическую часть галактик. Молодые звёзды часто образуют комплексы из тысяч звёзд, окружённым большими массами газа – О-ассоциации.

Процесс формирования звёзд из газа не совсем ясен. Если в некотором объёме, заполненном газом и пылью, масса диффузной материи превзойдёт критическую величину, материя начнёт сжиматься под действием сил тяготения. Происходит гравитационный коллапс. Наиболее плотными областями диффузного облака являются глобулы. Они, видимо, суть прямые предки звёзд.

Для гравитационного сжатия межзвёздной Среды нужно иметь начальную высокую плотность и некий толчок. Таким толчком может явиться взрыв сверхновой звезды. Об этом свидетельствует анализ углистых хондритов – протозвёздного вещества. В них обнаружены радиоактивные изотопы, которые могли образоваться только в атмосфере сверхновой звезды.

Во время процесса гравитационной конденсации пылевые частицы и газовые молекулы падают к центру облака, потенциальная энергия гравитации переходит в кинетическую, а кинетическая в результате столкновений в тепло. Облако нагревается и вследствие увеличения температуры возрастает его излучение. Оно превращается в протозвезду.

Светимость протозвезды может превышать светимость обычной звезды, радиус большой, эффективная температура меньше. На диаграмме спектр-светимость протозвёзды располагаются справа от главной последовательности. Когда температура достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции. Сначала выгорает дейтерий, потом литий, бериллий и бор. При повышении температуры начинаются протон-протонные реакции для звёзд с массой меньше 1,5 солнечной или углеродно-азотный цикл для массивных звёзд. Сжатие прекращается и звезда превращается в звезду главной последовательности. Время гравитационного сжатия невелико. Чем больше масса протозвезды, тем быстрее идёт процесс сжатия. Из-за малого времени сжатия во Вселенной наблюдается немного таких объектов. Предположительно это звёзды типа Т-Тельца и некоторые источники инфракрасного излучения (“звёзды-коконы”). Ядерные реакции в массивных звёздах идут быстрее и время их пребывания на главной последовательности меньше. Звёзды спектрального класса В0 остаются на главной последовательности 10^7 лет, а звёзды типа Солнца – 10^{10} лет. После выгорания водорода в гелий, ядерные реакции идут на внешней границе ядра. Само ядро сжимается, плотность и температура центральной части возрастают, увеличиваются светимость и радиус звезды. Звезда становится красным гигантом.

Внутри ядер массивных звёзд могут идти реакции превращения гелия в углерод. Когда гелиевая реакция внутри ядра и водородные реакции на его границе исчерпывают себя, протяжённая оболочка красного гиганта расширяется, её наружные слои не могут удерживаться силой тяготения и начинают отделяться. Происходит истечение массы из атмосферы. При некоторых условиях происходят вспышки сверхновых звёзд.

При медленном истечении образуются планетарные туманности.

Оставшееся ядро маломассивных звёзд называется белым карликом.

При большой плотности вещества белых карликов, сила гравитационного сжатия уравнивается давлением вырожденных электронов. Если масса ядра меньше 0,5 солнечных масс, оно состоит из гелия, если масса больше – из углерода и кислорода. В таких звёздах ядерные реакции не идут. Они светят за счёт запаса тепловой энергии, накопленной в прошлом, и постепенно остывают, на протяжении нескольких миллиардов лет, превращаясь в ненаблюдаемые чёрные карлики.

Звёзды с массой 6–8 солнечных могут испытать заключительное взрывное сжатие и не оставить после себя никакого ядра.

Массивные звёзды, с изначальной массой 8–50 солнечных, превращаются в нейтронные звёзды после вспышки сверхновой. Звезда коллапсирует до тех пор, пока электроны не соединяются с протонами, образуя нейтроны. Эти нейтроны становятся вырожденными. Давление вырожденных нейтронов уравнивает силу гравитационного сжатия. Нейтроны в ядре расположены вплотную друг к другу. Плотность такая же, как в атомном ядре.

Гипотезы формирования звёзд из сверхплотного вещества. Гипотеза формирования звёзд из сверхплотного вещества была выдвинута академиком В.А. Амбарцумяном. Она говорит о том, что звёзды образуются из некоего сверхплотного вещества.

Основой этой гипотезы является вывод, что в наблюдаемой Вселенной процессы распада преобладают над процессом соединения. Значит, процесс образования звёзд должен быть переходом вещества из более плотного состояния в менее плотное.

Гипотеза требует, чтобы во Вселенной существовал материал – сверхплотное вещество, которого ещё никто не наблюдал и свойства которого остаются неизвестными. Сверхплотная материя, если она существует, должна быть недоступна современным средствам наблюдения, так как она занимает очень малые объёмы пространства и почти не излучает. Основные её свойства – необычайно высокая плотность и огромный запас энергии, которая бурно выделяется при распаде такого вещества.

Пока не существует стройной математической теории, основанной на этой гипотезе. Основной довод её сторонников в том, что она соответствует наблюдательным данным.

26.5 Конечные стадии эволюции звезд.

"Черные дыры"

Звёзды с массой более 50 солнечных масс коллапсируют в чёрные дыры. В ходе сжатия сила тяжести на поверхности возрастает и наступает момент, когда даже свет не может преодолеть гравитационный барьер. Для того чтобы вырваться из поля притяжения чёрной дыры нужно развить скорость большую, чем скорость света. Поэтому чёрная дыра ничего не излучает и исчезает для постороннего наблюдателя.

Чёрная дыра – это замкнутая область пространства, в которую сжато вещество и откуда ничто не может выйти.

Карл Шварцшильд в 1916 году нашёл решение уравнений поля теории относительности, описывающее пространство-время вне тела со сферически симметричным распределением вещества. Это решение можно интерпретировать так: *если тело массой M сжато в сферу определённого радиуса $R_{\text{ш}}$ (радиус Шварцшильда), то пространство – время вблизи него искажается так сильно, что свет не может выйти из этой сферы. Область*

пространства, которую ни одно материальное тело не может покинуть, учёные и называют чёрной дырой.

$$R_{\text{ш}} = 2GM/c^2.$$

Что происходит внутри чёрной дыры пока неизвестно. Высказываются предположения, что вещество сжимается до состояния сингулярности. Это состояние не может описать сегодня ни одна физическая теория.

Теория относительности приводит к выводам, что вещество должно быть сжато в микроскопически малом объёме пространства в центре чёрной дыры. Граница чёрной дыры носит название *горизонта событий*.

Для Солнца радиус Шварцшильда равен 3 км. Массивная звезда с массой 10 солнечных будет иметь радиус 30 км.

Для Земли радиус Шварцшильда равен 1 см.

Высказывалось предположение, что если Вселенная образовалась в результате Большого взрыва из горячего сверхплотного вещества, то на самых ранних стадиях её эволюции могли существовать условия, в которых даже очень небольшие массы материи спрессовывались в чёрные мини-дыры. В чёрной дыре размером с атомное ядро может содержаться масса средней земной горы и вполне допустимо, что такие объекты существуют.

Движение внутри чёрной дыры возможно только в одном направлении – к сингулярности, где происходит разрушение.

Решения уравнений, описывающих пространство – время в окрестности шварцшильдовской чёрной дыры, обладают определённой симметрией, которая указывает на то, что дыра может связывать нашу Вселенную с другим, аналогичным миром. Эта возможность взаимосвязи между двумя мирами через чёрную дыру называется мост Эйнштейна – Розена (или “кротовая нора”). Высказывалось предположение, что этот мост связывает не разные миры, а две точки одного – нашей Вселенной. Но, чтобы воспользоваться этим переходом, необходимо развить сверхсветовые скорости.

Теоретические расчёты показали, что с точки зрения внешнего наблюдателя чёрные дыры могут иметь только три характеристики: свойства чёрной дыры полностью определяются её массой, электрическим зарядом и собственным моментом импульса. Эти три характеристики должны остаться у чёрной дыры, поскольку они связаны с полями дальнодействующих сил, которые оказывают влияние на удалённые объекты. При формировании чёрной дыры гравитационное поле вне горизонта событий продолжает действовать на распространение световых лучей и движение объектов с ненулевой массой покоя. Электромагнитное поле, связанное с зарядом чёрной дыры также будет оказывать влияние на окружающие тела.

Вращающиеся чёрные дыры, описанные Р. Керром имеют ряд интересных свойств. Вне горизонта событий таких дыр простирается область, называемая эргосферой, которая ограничена поверхностью, называемой *пределом стационарности*.

Внутри предела стационарности ничто не может оставаться в покое. Как бы само пространство внутри эргосферы увлекается мощным вращением чёрной дыры и закручивается вокруг её оси.

В 1969 году Роджер Пенроуз доказал, что из эргосферы чёрной дыры можно черпать энергию. Если какая-то частица, обладающая определённой энергией, попадает в эргосферу и разлетится на два осколка, один из которых имеет отрицательную энергию, то этот осколок упадёт в чёрную дыру, тогда как другой осколок (в соответствии с законом сохранения энергии и импульса) вылетит из эргосферы с энергией, превышающей первоначальную энергию всей частицы в целом.

Падение частицы и вылет за пределы эргосферы одного из её осколков приводит к уменьшению полной массы – энергии чёрной дыры, а многократное повторение этого процесса должно вызвать потерю значительной части массы – энергии чёрной дыры. Однако, падение в дыру частиц со спином, противоположным её собственному моменту импульса, вызывает замедление вращения чёрной дыры, и как только вращение прекращается, дальнейшее извлечение энергии таким методом становится невозможным. К моменту полной остановки чёрной дыры можно извлечь 29% её первоначальной массы. Потенциально вращающиеся чёрные дыры могут служить самыми мощными источниками энергии во Вселенной.

В 1971 году С.Хокинг доказал теорему, согласно которой площадь горизонта событий чёрной дыры не может уменьшаться. Площадь поверхности либо увеличивается, либо остаётся неизменной, чтобы не происходило с чёрной дырой. Внутренность вращающейся чёрной дыры существенно отличается от чёрной дыры Шварцшильда. Керровская сингулярность имеет форму кольца, т.е. временноподобна. Это означает, что существует возможность проникнуть в чёрную дыру по пути, минуящую центральную сингулярность. Существуют такие направления, следуя которым, можно удалиться от сингулярности. Можно изменить направление движения, сообщив телу некоторую дополнительную скорость. Двигаясь в сторону от сингулярности, со скоростью меньшей скорости света, можно оказаться в другом пространстве – времени. Через чёрную дыру можно попасть в другую вселенную. При этом существует возможность попасть не в одну, а в бесконечное множество иных вселенных. Однако, astronaut может двигаться только в направлении “вселенной будущего”, т.е. он не сможет вернуться в свою вселенную в то же время.

Была высказана мысль, что множество миров может быть связано путём, следуя по которому, мы вернёмся в нашу Вселенную, возможно даже в её прошлое. Практически мгновенно astronaut может пробраться в другую точку нашей Вселенной, быстрее чем туда долетит свет.

Однако такое развитие событий нарушило бы закон причинно-следственной связи. Если бы эта связь оказалась нарушенной, то Вселенная была бы непредсказуемой и иррациональной.

С практической точки зрения путешествия в пространстве с помощью чёрных дыр вызывает существенное возражение. Космический корабль, приблизившийся к горизонту событий дыры средней массы, будет разорван

приливными силами. Приливные силы слабы лишь в дырах с огромной массой, равной массе галактики.

Последние теоретические исследования свидетельствуют, что внутри керровской чёрной дыры возможны квантовые эффекты, недопускающие пространственно-временных мостов.

Белые дыры. Уравнения общей теории относительности симметричны по отношению к направлению времени. Есть решения, имеющие смысл и в том случае, когда время течёт в направлении, противоположном общепринятому представлению о его течении.

Зная, что чёрные дыры образуются в результате гравитационного коллапса некой массы вещества в скрытую за горизонтом событий сингулярность, которая существует бесконечно долго, можно предположить, что существуют дыры с обращённым временем, т.е. коллапс с обратным ходом развития событий. В таком случае в некоторой области Вселенной вдруг обнаружился бы источник, выбрасывающий вещество – *белая дыра*. Она должна была бы содержать сингулярность, существовавшую с момента начала отсчёта времени Вселенной. Как на чёрную дыру могут падать частицы, так они могут вылетать из белой, образуя облака пыли и газа.

Гипотеза белых дыр могла бы объяснить феномен наблюдающихся взрывающихся галактик, другие явления, сопровождающиеся большим выделением энергии. Квазары могли бы предстать как объекты, из которых происходит истечение вещества в нашу Вселенную.

И.Д. Новиков предположил, что если некоторые области пространства-времени в момент Большого взрыва не приняли участия в немедленном процессе всеобщего расширения, то эти области, или “задержавшиеся ядра”, могут взорваться на более поздней стадии эволюции Вселенной, создав белые дыры.

Возможно, что в одних вселенных происходит коллапс вещества в чёрную дыру, то в других возникают белые дыры.

Теоретически рассматриваются также модели “серых дыр”, вещество которых, выплёскиваясь, как в белых дырах, за горизонт событий, почти тотчас же начинает быстро сжиматься в процессе гравитационного коллапса.

Наличие белых и серых дыр сегодня не доказано и считается маловероятным. Чёрные дыры являются уже почти открытыми объектами. Их существование в какой-то степени предсказывает даже теория тяготения Ньютона. Наблюдательная астрономия в последние годы собрала много материала, подтверждающего существования чёрных дыр во Вселенной. Они могут существовать и наблюдаться как постоянно взаимодействующие с веществом в ядрах галактик, в тесных двойных звёздных парах, в квазарах.

26.6 Эволюция галактик

Соотношение общего количества звёздного и межзвёздного вещества в Галактике со временем изменяется. Из диффузной материи образуются звёзды, а они в конце своего эволюционного пути возвращают в межзвёздную среду

только часть вещества. Некоторая часть остаётся в белых карликах и нейтронных звёздах. Количество межзвёздного вещества в галактиках должно со временем убывать.

Перерабатываясь в звёздных недрах, вещество галактик постепенно изменяет химический состав, обогащаясь гелием и тяжёлыми элементами.

Первоначально галактики образовались из водорода. Гелий и тяжёлые элементы образовались в результате термоядерных реакций внутри звёзд. Самые тяжёлые элементы могут образоваться только при вспышках сверхновых звёзд. Содержание тяжёлых элементов у звёзд сферической составляющей галактик намного меньше, чем у звёзд плоской подсистемы. Звёзды сферической составляющей образовались раньше, когда газ был беден тяжёлыми элементами. В результате вращения галактики, газ собирается в её плоскости. К этому времени он проходит переработку в звёздных недрах и обогатился тяжёлыми элементами. Позднее из этого газа начинают формироваться звёзды. Этот процесс наблюдается и сейчас. Звёзды плоской подсистемы называются звёздами второго поколения, а сферической – первого поколения.

26.7 Строение Солнечной системы.

Общая закономерность

Представления о происхождении и ранней эволюции Солнечной системы до сих пор не приобрели характера законченной теории.

Можно выделить несколько этапов зарождения Солнца и планет:

1. Уплотнение облака межзвёздного вещества, состоящего из молекул (H_2 , H_2O , OH и др.) и пыли. Возможно, что это уплотнение началось в результате взрыва Сверхновой звезды, под действием ударной волны.

2. Наиболее плотные участки облака с массами порядка звёздных начинают сжиматься. Облако распадается на фрагменты, один из которых впоследствии порождает Солнце и солнечную систему. В центре сжимающегося фрагмента образуется сгущение пыли и газа, которое является ядром аккреции. Процесс аккреции – захват окружающей разреженной Среды, приток которой постепенно увеличивает массу ядра.

3. Когда масса центрального сгущения достигает примерно 0,1 солнечной, вещество становится непрозрачным, температура возрастает и пыль испаряется. Это происходит через 10^4 – 10^5 лет после начала сжатия фрагмента.

Вскоре после испарения пыли происходит диссоциация молекулярного водорода. При этом центральное сгущение сжимается, образуя газовую протозвезду. Формирование протозвезды происходит очень быстро, за время 10–100 лет. Аккреция межзвёздного вещества протосолнцем продолжается, его масса и радиус увеличиваются. Ещё примерно через 10^5 лет масса достигает современного уровня, а радиус в 100 раз больший современного. Приток межзвёздного вещества прекращается. Начинается стадия гравитационного сжатия протосолнца. В течение этого периода уже существует дискообразная

газово-пылевая протопланетная туманность, центром которой является протосолнце. Оценки массы туманности находятся в пределах от 0,01 до 2 солнечных масс.

В туманности идёт формирование планет – гигантов по тому же пути, с образованием дисков, из которых впоследствии образуются спутники.

Для преодоления трудности с распределением момента количества движения предполагается, что газ в протопланетной туманности частично ионизован, а протосолнце имеет значительное магнитное поле. В результате взаимодействия плазмы и поля возникают газовые потоки, передающие момент в туманность.

4. Следующий период длится 10^8 лет. Продолжается гравитационное сжатие Солнца. Дует мощный звёздный ветер, выметающий газ из внутренней части протопланетной туманности.

Пылевое облако всё более концентрируется к некоторой средней плоскости. Пылинки сталкиваются, появляются крупные частицы. Идёт процесс аккумуляции твёрдых тел.

Формируются несколько особо крупных тел, они становятся ядрами аккреции, вокруг которых происходит формирование планет земной группы. Планетезимали не только объединяются, но и разрушаются. Такие разрушения породили метеориты.

Рост Земли до современных размеров продолжался 10^8 лет. Некоторые модели рассматривают неоднородную аккрецию. Сначала шло накопление тяжёлых элементов, а силикатная мантия образовалась позже.

Некоторые модели рассматривают образование планет земной группы из планет гигантов, которые теряют свою газовую оболочку из-за приливного взаимодействия с Солнцем.

Тема 27 Современные представления о происхождении Вселенной

27.1 Развитие космологии

В начале 80-х годов особую популярность приобрели теории типа Калуцы – Клейна, согласно которым размерность нашего пространства больше 4-х, но часть измерений “скомпактифицировано”, так что мы не можем двигаться в соответствующих направлениях.

С конца 1984 года была развита теория суперструн, согласно которой основным объектом теории являются не точечные элементарные частицы, а струноподобные образования очень малого размера.

Успехи теории горячей Вселенной, основанной на однородной модели Вселенной Фридмана, постепенно привели к убеждению, что Вселенная всюду устроена так же, как и в окрестностях Солнечной системы. Это убеждение находится в полном соответствии с наблюдательными данными.

Анализ таблиц элементарных частиц и свойств наблюдаемой части Вселенной не оставляет ощущения безусловной гармонии. Почему Вселенная

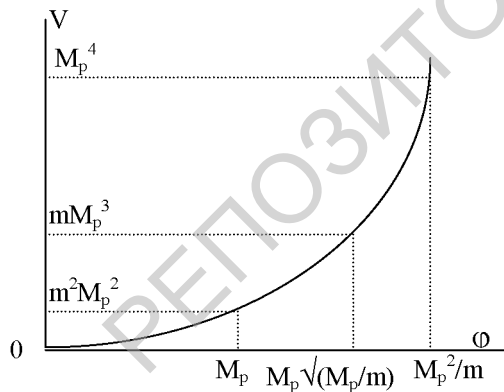
почти однородна и в то же время в ней есть такие неоднородности, как планеты, звёзды, галактики? Эти вопросы наводят на вопрос, мог ли наш мир быть создан по-другому.

Согласно современным единым теориям элементарных частиц свойства наблюдаемого мира связаны с тем, каким именно образом нарушается симметрия между разными типами взаимодействий и какой из многих возможных вариантов компактификации исходного многомерного пространства осуществляется в окружающей нас части Вселенной.

Первоначально подразумевалось, что выбор типа нарушения симметрии и выбор способа компактификации должны происходить одинаково во всей Вселенной. Однако дальнейшее изучение этого вопроса показало, что в рамках сценария раздувающейся Вселенной гипотеза о таком единообразии может быть неверна.

Наиболее простым и естественным сценарием раздувающейся Вселенной сейчас представляется сценарий хаотического раздувания. Раздувание может осуществляться в обычной теории массивного скалярного поля ϕ , характеризуемого массой m , где потенциальная энергия $V(\phi)$ поля ϕ при больших ϕ растёт как любая степень поля $V(\phi) \sim \phi^n$.

Поведение Вселенной зависит от первоначального распределения классического поля ϕ , и в простейшей теории массивного скалярного поля ϕ с $V(\phi) = m\phi^n/2$ оно может быть описано при помощи кривой.



Область начальных значений является запрещённой. Квантовые флуктуации метрики столь велики, что говорить о классическом пространстве – времени нельзя.

В областях пространства, в которых поле изначально находилось в интервале $M_p \phi < M_p / t$, $M_p < \phi < M_p^2/t$, процесс уменьшения поля идёт очень медленно. Вселенная в это время расширяется экспоненциально.

Эта стадия называется стадией раздувания.

В простейших моделях за время раздувания размер Вселенной вырастает в $10^{100\,000}$ – $10^{10\,000\,000\,000}$ раз!

Когда поле уменьшается до $\phi \sim M_p$, где $M_p \sim 10^{-5}$ г – планковская масса, оно начинает быстро колебаться вблизи минимума $V(\phi)$, и при наличии

взаимодействия этого поля с другими физическими полями накопившаяся в нём энергия переходит в тепло, т.е. Вселенная становится горячей.

В области $M_p \sqrt{M_p/m} < \phi < M_p^2/m$ за счёт квантовых эффектов генерируются неоднородности поля с очень большой длиной волны, причём амплитуда этих неоднородностей, возникающих за характерное время $\Delta t \sim H^{-1}$, больше, чем общее уменьшение поля ϕ за это же время из-за “скатывания” поля к минимуму $V(\phi)$. В результате за время $\Delta t \sim H^{-1}$ общий объём Вселенной увеличивается в e^3 раз (из-за раздувания), и почти в половине этого объёма поле ϕ не уменьшается, а растёт, причём скорость раздувания Вселенной в областях с увеличившимся полем ϕ тоже увеличивается.

Это приводит к тому, что большая часть объёма Вселенной, в которой изначально была хотя бы одна область с $\phi > M_p \sqrt{M_p/m}$ находится сейчас в состоянии с максимально возможным полем ϕ и продолжает раздуваться. В этих областях расширение Вселенной никогда не кончается, т.е. Вселенная существует вечно. С другой стороны, те области Вселенной, в которых поле ϕ становится меньше, чем $\phi \sim M_p \sqrt{M_p/m}$, через некоторое время перестают раздуваться, приобретая размер $l > 10^{100000}$ см. В одной из таких областей мы и живём.

Важной особенностью этого сценария являются сильные флуктуации метрики и всех других физических полей в большей части объёма Вселенной, в которой сейчас $\phi \sim M_p^2/m$. Эти флуктуации приводят к разбиению нашей Вселенной на экспотенциально большие области со всеми возможными типами вакуумных состояний и со всеми возможными типами компактификации “лишних” измерений. В каждой из таких областей свойства пространства – времени и низкоэнергетическая физика элементарных частиц будут различными.

В некоторых из этих областей размерность пространства – времени может быть отлична от четырёх, вместо слабых, сильных и электромагнитных взаимодействий могут существовать взаимодействия совершенно других типов с другими константами связи.

Таким образом, согласно этому сценарию, глобальная геометрия нашего мира кардинально отличается от геометрии мира Фридмана. Вселенная оказывается состоящей как бы из отдельных фридмановских мини-вселенных с разными свойствами и жизнь нашего типа может возникнуть в части мини-вселенных, условия в которых достаточно хороши для этого (антропный принцип). Планеты и атомы нашего типа могут возникать только в трёх-мерном пространстве. Силы тяготения в пространствах с другим числом измерений слишком быстро убывают с расстоянием и планетные системы неустойчивы.

$$F \sim 1/R^{N-1}.$$

Эволюция Вселенной не имеет единого (сингулярного) начала. Свойства пространства-времени и законы взаимодействия элементарных частиц в каждом “пузыре” – мини-вселенной могут быть различными.

Каждая область мини-вселенной (домен) имеет размеры ~ 10 млрд св. лет и превышает размеры наблюдаемой нами Вселенной.

27.2 Вакуум

Термин вакуум в современной физике используется в двух смыслах. Первый – наиболее распространённый – соответствует весьма разреженным газам. Второй соответствует состоянию, в котором полностью отсутствуют реальные частицы. В этом случае физический вакуум соответствует конденсату частиц с целым спином (бозонов). Такой конденсат вследствие квантовых эффектов характеризуется следующими свойствами:

1. Он соответствует минимуму в энергетической зависимости системы от функции ϕ , определяющей её состояние.

При существовании реальных частиц конденсат стремится “затащить” их к себе, а не “вытолкнуть”, как это имеет место в реальных газах. Поэтому физический вакуум характеризуется экзотическим уравнением состояния

$$p = -\varepsilon.$$

Вакуумное состояние испытывает непрерывные и противоположные воздействия. С одной стороны, свойства бозонного конденсата таковы, что он стремится удержать все содержащиеся в нём частицы, а с другой – уравнение состояния определяет его нестабильность. Эти полярные свойства вакуума приводят к тому, что для образования реальных частиц из вакуума необходимо затратить энергию и довольно значительную. С другой стороны вакуум непрерывно порождает виртуальные частицы, время жизни которых очень мало, например, для электронов $t = 10^{-22}$ с.

Виртуальные частицы наблюдать непосредственно нельзя, однако, их существование проявляется во взаимодействии с реальными частицами. Можно сказать, что вакуум непрерывно “кипит”, но не “выкипает”. Наиболее известный вакуумный эффект – сдвиг энергетических уровней в атоме водорода, обусловленный взаимодействием движущихся атомарных электронов с виртуальными частицами вакуума (эффект Лэмба – Резерфорда).

Вакуум – абсолютно однородная Среда, характеризуемая своей плотностью энергии и гравитационными характеристиками. Поэтому он эквивалентен по своим свойствам введённому Эйнштейном в уравнения ОТО Λ -члену.

Современные представления о вакууме позволяют по иному взглянуть на проблему сингулярности и первые мгновения существования Вселенной после Большого взрыва.

Вселенная возникает в результате возмущения вакуума. Энергия вакуума переходит в реальные частицы, которые, взаимодействуя между собой, порождают барионную асимметрию. Не все вакуумные возмущения могут преодолеть потенциальный барьер и развиваться в мини-вселенные. Спустя

10^{-35} с после своего возникновения мини-вселенные переходят во фридмановский режим. После этого Вселенная расширяется согласно разработанной модели Большого Взрыва.

При плотности Вселенной больше критической, расширение сменится сжатием, плотность будет увеличиваться и достигнет планковской. В этом малом объёме ($\sim 10^{-10}$ см) будет находиться вакуумообразная материя, которая может вызвать к жизни новую мини-вселенную. И этот процесс будет продолжаться непрерывно и бесконечно. При переходе от одной мини-вселенной к другим аналогичным объектам вовсе не обязательно, чтобы фундаментальные постоянные (константы, число взаимодействий, размерность пространства, массы частиц) повторялись. Каждая новая вселенная может иметь свою размерность и свойства констант.

27.3 Геометрия Вселенной

Со времён Евклида Вселенная мыслилась трёхмерной. СТО Эйнштейна использует в качестве геометрической структуры четырёхмерное псевдоевклидово пространство событий. Интервал между двумя близкими событиями выражается следующим образом:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Время входит в определение физического пространства, являясь собственным для каждой системы отсчёта. Длина отрезка и промежутка времени зависят от взаимного движения систем отсчёта. Структура физического пространства задаётся метрикой евклидова типа, фиксированной вне всякой зависимости от каких-либо материальных взаимодействий.

В ОТО свойства пространства – времени не задаются наперёд, а определяются для каждого конкретного случая в зависимости от материальных обстоятельств. При этом учитываются поля тяготения.

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k,$$

где $i, k = 0, 1, 2, 3$; $g_{ik} = g_{ik}(x^0, x^1, x^2, x^3)$.

На метрику пространства влияют физические процессы. В рамках ОТО тела деформируют пространство. Фундаментальный смысл геометризации тяготения состоит в том, что пространство и время как формы бытия материи находят своё непосредственное представление в объективной реальности физического поля универсального (гравитационного) взаимодействия и сами по себе (без поля) существовать не могут. На место абстрактного пространства Ньютона встаёт поле тяготения, которое образует физическую структуру пространства и проявляется своим удерживающим действием на все материальные объекты. Всякая индивидуализированная частица изменяет гравитационное поле, а поле влияет на её движение.

В начале XX столетия многие физики хотели создать единую теорию взаимодействий, объединяющую электромагнитное и гравитационное взаимодействия. Т. Калуца предложил в 1921 году провести это объединение, постулируя, что пространство – время имеет не четыре измерения, а пять.

Экспериментальные данные свидетельствуют о четырёхмерности, но для успеха объединения не имеют значения размеры пятого измерения пространственно-временного континуума. Попыткой построить единую теорию занимался Эйнштейн в последние годы жизни.

В 70-х годах интерес к многомерной физике оживился. Возникло понимание того, что в единой теории поля могут быть устранены квантовомеханические расходимости и аномалии. В простейшем варианте объединённой теории помимо четырёхмерного пространства-времени возникает семимерное компактное пространство, которое можно для некоторой наглядности отождествить с семимерной сферой.

Фундаментальная физика, соответствующая объединённому взаимодействию, формируется на планковских величинах ($l = 10^{-33}$ см.) Эта величина совпадает с тем критическим расстоянием, на котором теряет смысл квантовая электродинамика. Поэтому естественно предположить, что размеры семимерной компактной сферы совпадают по порядку величины с планковским расстоянием и поэтому не проявляются непосредственно при исследовании физической геометрии.

Некоторый прогресс в этом вопросе наметился после введения идеи суперструн. В основе этой идеи лежит представление о том, что основным элементом физической геометрии является не точка, а одномерное образование – струна. Суперструна – прообраз истинно элементарных частиц (электронов и кварков). Ранее полагали, что такие частицы имеют нулевые размеры, теперь же – планковские.

В теории суперструн удалось ликвидировать многие расходимости. Размерность, которой соответствует непротиворечивая теория суперструн равна 506. Из этого числа четыре относятся к пространственно – временному континууму, а остальные соответствуют компактному объёму с планковскими размерами. В момент образования Метагалактики (15–20 млрд лет назад) все пространственные размерности, кроме трёх, компактифицировались, уменьшились до планковских размеров. Сейчас на больших расстояниях (вплоть до размеров Метагалактики) пространство евклидово и трёхмерно, на очень малых, планков- ских, геометрия многомерна и неевклидова.

Новая теория должна включать как обязательный элемент переменность фундаментальных постоянных – масс, размерности пространства, констант взаимодействий. Непосредственные наблюдения и современная космология свидетельствуют, что начиная со времени расширения Метагалактики (~1с) константы не менялись. Следовательно, значения фундаментальных постоянных могли фиксироваться на очень малых временах, когда возникали минивселенные. Следовательно, полная единая теория элементарных частиц и теория возникновения мини-вселенных – два разных аспекта одного явления. Истинная и полная теория – синтез космологии и теории элементарных частиц.

27.4 Случайная Вселенная

Разнообразие и сложность физических систем, из которых состоит наблюдаемая Вселенная, столь поразительны, что задача открытия простых законов, способных описать все эти системы, кажется безнадежной.

Если бы природа выбрала иную последовательность чисел в фундаментальных постоянных, мир был бы другим.

Такие важные структурные единицы как звёзды типа Солнца своими свойствами обязаны маловероятным совпадениям чисел, которые построены на фундаментальных постоянных, относящихся к разным разделам физики.

Начальные параметры ранней Вселенной были согласованы с поразительной точностью. При совсем незначительном изменении начальных параметров Вселенная не смогла бы стать такой, какой мы её наблюдаем. Вещество структурировалось бы совсем другим способом.

В 1930-х годах Эддингтон и Дирак были поражены любопытным и неожиданным совпадением некоторых очень больших чисел, рассчитанных исходя из атомной физики и космологии. Создаётся впечатление, что Вселенная приведена какими-то способами в равновесие.

Вселенная устроена иерархически и состоит из многих структурных единиц, от атомов до скоплений галактик. Ничто во Вселенной не находится в покое. Везде присутствует противоборство сил. Сила гравитации стремится объединить рассеянное вещество. В веществе происходит противоборство между силой гравитации и другими силами. Гравитация одержала верх в таких малых объектах, как звёзды и планеты. Плотность вещества в них в 10^{30} раз выше, чем во Вселенной. Более крупные системы – галактики и их скопления – избежали гравитационного коллапса, потому что вращаются и движутся друг относительно друга. Гравитационному коллапсу противостоят центробежные силы. Падению скоплений галактик друг на друга мешает непрерывное расширение Вселенной в целом, так что каждое скопление постоянно удаляется от своих соседей.

Скорость удаления двух типичных галактик, находящихся на определённом расстоянии друг от друга характеризуется постоянной Хаббла.

Например, две галактики, расстояние между которыми 1 Мпс удаляются друг от друга со скоростью 50 км/с.

Размерность H – скорость, делённая на расстояние, обратна размерности времени. Следовательно, величина, обратная H даёт фундаментальную единицу времени, определяющую изменение космологических параметров. Величина H^{-1} приблизительно равна 10^{10} лет. Из этого следует, что это время назад крупномасштабная структура Вселенной должна была сильно отличаться от современной, а галактики располагались значительно ближе друг к другу. Скорость космологического расширения постепенно замедляется. Значит, ранее она была значительно выше, чем теперь.

Приблизительно 18 млрд лет назад Вселенная имела бесконечно большую плотность и расширялась бесконечно быстро.

Время Хаббла с точностью до множителя $3/2$ равно возрасту Вселенной. Значит постоянная Хаббла не является постоянной.

Чем менее был объём Вселенной, тем быстрее она расширялась, тем выше была скорость разбегания вещества.

Плотность энергии вещества Вселенной определяет полную силу гравитации Вселенной. При высокой плотности замедление расширения идёт более быстрыми темпами. Если же плотность ρ больше критической ρ_{cr} , то со временем расширение прекратится и сменится сжатием, ведущим к катастрофическому коллапсу. Если ρ значительно превышает ρ_{cr} , то это обращение протекает быстрее. Если же плотность энергии очень низка, то сила гравитации Вселенной мала и расширение протекает беспрепятственно. Чем ниже плотность энергии, тем быстрее в ходе расширения происходит разрежение вещества.

Если ρ очень близко к ρ_{cr} , то Вселенная либо когда-нибудь сколлапсирует, либо будет вечно расширяться.

Чтобы Вселенная приобрела современную структуру при данной плотности вещества, её расширение должно происходить с вполне определённой скоростью. Если эта скорость мала, то Вселенная после короткой стадии расширения начнёт сжиматься и сколлапсирует. С другой стороны, в случае слишком быстрого начального расширения сгустки вещества разлетались бы друг от друга с большой скоростью и вскоре стали бы изолированными и не способными группироваться в галактики. В действительности начальное расширение происходило как раз с такой скоростью, что в результате возникла ситуация, лежащая между описанными альтернативами.

27.5 Антропный принцип

Обычно в физике наблюдатель не принимается во внимание. Анализ свойств наблюдаемой Вселенной привёл к выявлению взаимосвязи между существованием наблюдателя и конкретных физических законов.

В существующем мире очень много совпадений и случайных соотношений, без которых невозможно было бы существование Вселенной в наблюдаемом виде. При малом изменении свойств элементарных частиц во Вселенной или никогда бы не образовались звёзды и галактики, или образовались бы сразу сверхмассивные тела, которые начали бы катастрофически коллапсировать.

При нарушении некоторых резонансных соотношений в ядерных реакциях было бы невозможно создание углерода в недрах звёзд или при создании, он сразу бы выгорал в кислород. И в первом и во втором случае не смогла бы развиваться углеродная жизнь.

Ф. Хойл пишет, что “Если бы вы хотели образовать углерод и кислород примерно в равных количествах в ходе звёздного нуклеосинтеза, то должны были бы задать два уровня резонансов, причём именно там, где эти уровни и

найжены... Здравая интерпретация фактов даёт возможность предположить, что в физике, а также в химии и биологии экспериментировал “сверхинтеллект” и что в природе нет слепых сил, заслуживающих внимания”.

Эти и другие факты привели учёных к созданию антропного принципа.

Слабый антропный принцип: “То, что мы предполагаем наблюдать, должно удовлетворять условиям, необходимым для присутствия человека в качестве наблюдателя” Б.Картер.

Сильный антропный принцип: “Вселенная должна быть такой, чтобы в ней на некотором этапе эволюции мог существовать наблюдатель”.

Этот принцип утверждает, что Вселенная приспособлена для существования жизни и как законы физики, так и начальные условия развития подстраиваются таким образом, чтобы гарантировать появление и эволюцию жизни. Этот принцип совпадает с религиозным мировоззрением, что Бог сотворил мир для человека.

Принцип поставил на научную основу вопрос: почему наш мир устроен таким, каким мы его наблюдаем?

Принцип целесообразности: “Законы физики не только достаточны, но и необходимы для создания и длительного существования основных связанных и устойчивых состояний: атомных ядер, атомов, звёзд и галактик”.

Незначительное изменение численного значения фундаментальных постоянных приводит к радикальному изменению физической структуры Метагалактики. Такая подстройка численного значения фундаментальных постоянных к сложной структуре Метагалактики приводит к необходимости допустить существование многих мини-вселенных с разным набором фундаментальных констант.

Тема 28 Наблюдения и практические работы по астрономии в школе

28.1 Школьные телескопы

Наиболее распространёнными школьными телескопами являются:

1. Телескоп-рефрактор на экваториальной установке с диаметром объектива 80 мм и фокусным расстоянием 800 мм.
2. Телескоп-рефрактор на азимутальной установке с диаметром объектива 60 мм и фокусным расстоянием 600 мм.
3. Телескоп-рефлектор “Алькор” на азимутальной установке с диаметром главного зеркала 65 мм и фокусным расстоянием 502 мм.

Кроме этого для наблюдений звёздного неба могут быть использованы зрительные трубы и бинокли.

Увеличение телескопа определяется из соотношения:

$$W = F / f ,$$

где F – фокусное расстояние объектива, f – фокусное расстояние окуляра. Предельный угол разрешения τ характеризует минимальное угловое расстояние

между двумя звёздами или деталями поверхности планеты, при котором они видны раздельно.

$$r = 140''/D,$$

где D – диаметр объектива.

Проницающая сила телескопа определяется предельной звёздной величиной m видимых в него звёзд в ясную безлунную ночь, которую вычисляют по формуле:

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

где D – диаметр объектива в миллиметрах.

Школьные телескопы позволяют наблюдать звёзды до 11–12 звёздной величины.

Для фотографирования небесных объектов к школьному телескопу – рефрактору можно приспособить с помощью стандартных репродукционных колец зеркальную камеру типа “Зенит”.

Количество колец между объективом и фотоаппаратом подбирают в зависимости от того, какое увеличение нужно получить.

При фотографировании в главном фокусе объектива телескопа, когда объектив фотоаппарата совсем убирают, размеры изображения определяются по формуле:

$$h = F \operatorname{tg} \rho,$$

где F – главное фокусное расстояние объектива телескопа, ρ – видимый угловой диаметр светила в секундах дуги, h – размеры его изображения.

Диаметр диска Луны в школьный 80-мм рефрактор будет равен 7 мм.

При пользовании окулярным увеличением, размеры получаются большими. Увеличение

$$n = f/d,$$

где d – расстояние от объектива фотоаппарата до изображения, которое строится объективом телескопа, f – длина трубки. По формуле линзы получаем:

$$d = F_1 f / (f - F_1),$$

где F_1 – фокусное расстояние объектива фотоаппарата, обычно равно 5 см.

Размеры изображения на негативе:

$$h_1 = (f - F_1) h / F_1.$$

Размеры изображения определяются только количеством колец между объективом и фотоаппаратом, т.е. длиной трубки f .

Если нужно заранее задать увеличение, то длина трубки будет равна:

$$f = F_1 / (n - 1).$$

С помощью школьного телескопа-рефрактора с фокусным расстоянием $F = 800$ мм и при длине трубки $f = 20$ см можно получить на негативе лунный диск размером около 21 мм.

При плохих атмосферных условиях окулярное увеличение оказывается неэффективным.

28.2 Угломерные приборы

Для определения полуденной высоты Солнца, высоты Полярной звезды, измерения углов между светилами можно использовать школьный угломер или простейший угломерный прибор – скафис.

Простейшие угломерные приборы, такие как квадрант и астрономический посох можно сконструировать собственными силами.

28.3 Спектральные приборы

В школе можно проиллюстрировать спектральный анализ с помощью наблюдения солнечного спектра. Для этой цели используют двухтрубный спектроскоп, если у него качественная призма и правильно отрегулирована щель коллиматора.

С помощью этого прибора можно хорошо наблюдать линии поглощения солнечного спектра.

Если убрать окуляр спектроскопа и поместить вместо него фотоаппарат “Зенит”, то можно получить фотографии солнечного спектра. Даже при невысоком качестве можно обнаружить до 15 линий поглощения.

28.4 Простейшие практические работы по астрономии в средней школе

1. Наблюдения видимого суточного вращения звёздного неба.

а) Провести наблюдение в течение одного вечера и отметить, как изменяется положение созвездий Малой и Большой Медведицы.

б) Определить вращение неба по прохождению звёзд через поле зрения неподвижного телескопа. Зная величину поля зрения телескопа, определить с помощью секундомера скорость вращения неба (в градусах в час).

2. Наблюдение годичного изменения звёздного неба.

3. Наблюдение изменения полуденной высоты Солнца.

В течение месяца раз в неделю в истинный полдень провести измерения высоты Солнца. Результаты измерения занести в таблицу:

Дата наблюдения	Полуденная высота	Склонение Солнца.
-----------------	-------------------	-------------------

Построить график изменения полуденной высоты Солнца, откладывая по оси X даты, по оси Y полуденную высоту.

Для определения времени истинного полдня нужно пользоваться формулой:

$$T_{\text{ист.полд.}} = 12 + \eta + (n - \lambda).$$

При этом нужно вводить поправку в 1 час для летнего времени.

4. Наблюдение видимого положения планет относительно звёзд.

5. Наблюдение спутников Юпитера.

Нужно провести наблюдения спутников Юпитера в телескоп и зарисовать их положение относительно диска планеты. Отсутствие некоторых спутников означает их затмение или покрытие.

6. Определение географической широты места.

6.1. По высоте Солнца в полдень.

За несколько минут до наступления истинного полудня установить теодолит в плоскости меридиана. Время наступления полудня вычислить заранее.

С наступлением момента полудня или вблизи него измерить высоту h нижнего края диска. Исправить найденную высоту на величину радиуса Солнца ($16'$). Вычислить широту места пользуясь зависимостью

$$\varphi = 90^\circ - h_c + \delta_c,$$

где h_c – высота центра Солнца, δ_c – склонение Солнца на час наблюдения, проинтерполированное с учётом часового его изменения.

6.2. По высоте Полярной звезды.

Пользуясь теодолитом или другим угломерным инструментом, измерить высоту Полярной звезды над горизонтом. Это и будет приближённое значение широты с ошибкой около 1° .

7. Определение географической долготы места.

7.1. Установить теодолит в плоскости меридиана и по часам определить момент кульминации Солнца (момент прохождения Солнца через вертикальную нить теодолита). Это будет момент T_n выраженный по поясному времени.

7.2. Вычислить местное солнечное время в данный момент на нулевом меридиане T_0 , если номер данного пояса 2.

$$T_0 = T_n - n.$$

7.3. Определить местное среднее время T_m в момент кульминации Солнца, которое равно $12 + \eta$.

7.4. Вычислить долготу места как разность местных времён:

$$\lambda = T_m - T_0.$$

8. Наблюдение поверхности Луны в телескоп.

По карте Луны ознакомиться с некоторыми хорошо наблюдаемыми лунными образованиями.

Сравнить результаты наблюдения с имеющейся картой.

9. Фотографирование Луны.

10. Наблюдение солнечных пятен и вращения Солнца вокруг своей оси.

11. Наблюдение солнечного спектра и отождествление главных фраунгоферовых линий.

12. Фотографирование звёздного неба с помощью самодельного астрографа или школьного телескопа с окулярной насадкой.

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Тематика лабораторного практикума

Лабораторная работа № 1. Основные элементы небесной сферы. Системы небесных координат. Условия видимости светил на различных широтах.

Лабораторная работа № 2. Звездные атласы, подвижная карта звездного неба, астрономические календари и справочники.

Лабораторная работа № 3. Изучение систем счета времени.

Лабораторная работа № 4. Видимое годовое движение Солнца и его следствия.

Лабораторная работа № 5. Законы Кеплера и конфигурации планет.

Лабораторная работа № 6. Изучение небольших оптических телескопов.

Лабораторная работа № 7. Определение положений и условий видимости планет.

Лабораторная работа № 8. Спектры и светимость звезд.

Лабораторная работа № 9. Кратные звезды.

Лабораторная работа № 10. Собственные движения и пространственные скорости звезд. Определение изменения взаимного расположения звезд (видимых фигур созвездий) из-за собственного движения звезд.

Лабораторная работа № 11. Изучение деталей поверхности и определение некоторых характеристик больших планет.

Лабораторная работа № 12. Изучение солнечной активности и общего излучения Солнца.

Лабораторная работа № 13. Изучение карты и рельефа Луны и больших спутников планет.

Лабораторная работа № 14. Изучение движения спутников Юпитера и Сатурна.

Лабораторная работа № 15. Движение Луны. Солнечные и лунные затмения.

Задания лабораторного практикума

Тема 1. Основные элементы небесной сферы. Системы небесных координат. Условия видимости светил на различных широтах

Образец заданий

1. По модели небесной сферы изучить ее основные элементы и изменение их положения относительно наблюдателя в процессе суточного вращения небесной сферы.

2. Начертить мелом на черном глобусе небесный экватор, небесный меридиан, эклиптику, горизонт, северный и южный полюса мира, зенит и надир.

3. Изобразить мелом на черном глобусе:

- а) горизонтальную систему небесных координат;
- б) экваториальную систему небесных координат.
- 4. Изобразить на чертеже землю и положение небесной сферы, ее основных элементов для наблюдателя на широте $\varphi = 30^\circ$.
- 5. Изобразить на чертеже небесную сферу и положения ее основных элементов для широты $\varphi = -15^\circ$ и показать на ней точки, имеющие следующие координаты:
 - а) горизонтальные: $A = 135^\circ$, $h = 45^\circ$;
 - б) экваториальные: $t = 2^h$, $\delta = -45^\circ$ и $\alpha = 12^h$, $\delta = +45^\circ$.
- 6. Определить высоту, зенитное расстояние и азимут точки запада.
- 7. Вычислить зенитное расстояние и высоту в верхней и нижней кульминации звезд Денеб и Толиман на экваторе, северном полюсе и в Минске.
- 8. Определить склонение 5 звезд, доступных наблюдению в Гомеле.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Изобразить на чертеже небесную сферу и положения ее основных элементов для широты $\varphi = -15^\circ$ и показать на ней точки, имеющие следующие координаты:

- а) горизонтальные: $A = 135^\circ$, $h = 45^\circ$;
- б) экваториальные: $t = 2^h$, $\delta = -45^\circ$ и $\alpha = 9^h$, $\delta = +75^\circ$.

Итак, элементы небесной сферы можно условно разделить на две группы: расположение одних – зависит от географической широты φ места наблюдения, других – не зависит. К первым относятся: меридиан, отвесная линия, зенит Z и надир Z' , полуденная линия NS , математический горизонт (точки севера N и юга S). Эти элементы изображаем в первую очередь (рис а). Ко вторым относится в первую очередь ось мира PP' , которую располагаем под углом φ к математическому горизонту. В нашем случае угол географической широты $\varphi < 0$, значит, ось мира располагаем таким образом, чтобы Северный полюс мира P оказался под математическим горизонтом. Дуга PN должна быть равна $|\varphi|$. Далее наносим на чертеж небесный экватор, перпендикулярный оси мира; обозначаем точки пересечения: Q , Q' , востока E , запада W (рис. б).

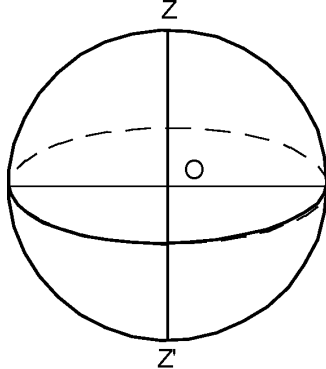


Рис. а.

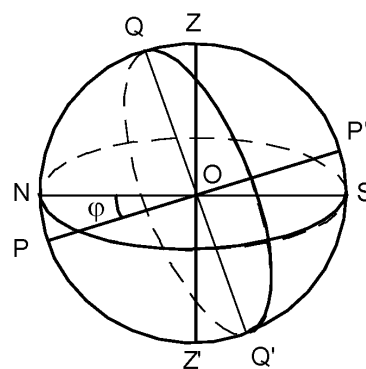


Рис. а.

Теперь найдем точки по заданным координатам. Точка $M1$ ($A=135^\circ$, $h=45^\circ$); $M2$ ($t=2^h$, $\delta=-45^\circ$) и $M3$ ($\alpha=9^h$, $\delta=+75^\circ$). Прямое восхождение α отсчитывается от точки весеннего равноденствия Υ , которая является точкой пересечения эклиптики и небесного экватора. Однако эклиптику мы не имеем, поэтому в качестве точки в. р. Υ можно взять любую точку экватора (рис. в).

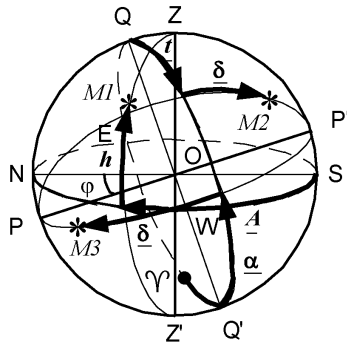


Рис. в.

2. Определить на чертеже небесной сферы примерные положения звезды Денеб в верхней и нижней кульминациях и вычислить зенитное расстояние и высоту в данных положениях для географической широты 60° .

Сначала необходимо сделать чертеж небесной сферы (и основных ее элементов) для указанной широты. Известно, что звезда находится в кульминации, а значит – на небесном меридиане, если в верхней кульминации, то – над осью мира, в нижней – под осью мира.

Точное положение звезды на меридиане указывает ее склонение ($\delta \approx 45^\circ$), которое отсчитывается от небесного экватора (в верхней кульминации – от точки Q, в нижней кульминации – от Q').

В данном случае (рис. г) зенитное расстояние звезды Денеб в верхней кульминации z_v – это угол ZOD_v величина которого равна разности величин углов ZOQ и QOD_v . Угол QOD_v – это склонение δ , а угол ZOQ – широта ϕ .

В нижней кульминации зенитное расстояние звезды Денеб z_n – это угол ZOD_n , величину которого можно найти, если от величины угла ZOZ' (180°) отнять величины угла $Z'OQ'$ (который является вертикальным с ZOQ и равен ϕ) и угла $Q'OD_n$ (который равен δ). Т. е., $z_n = 180^\circ - \phi - \delta = 75^\circ$. Тогда высота звезды Денеб в нижней кульминации (угол NOD_n) $h_n = 90^\circ - z_n = 15^\circ$.

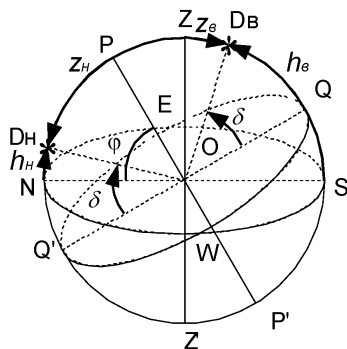


Рис. г.

Тема 2. Звездные атласы, подвижная карта звездного неба, астрономические календари и справочники

Образец заданий

1. По картам звездного атласа определить экваториальные координаты и видимую звездную величину двух наиболее ярких звезд в созвездии Кассиопеи.
2. Выписать названия ярких созвездий, по которым проходит Млечный Путь.
3. Найти на звездной карте созвездие Малого Пса. По карте определить координаты α и δ звезды Процион (α Малого Пса). Найти эту звезду в общем каталоге звезд, определить точные координаты α и δ , звездную величину (mag) и тип спектра (sp).
4. Взять из общего каталога координаты звезды Дубхе и определить ее координаты на 2004 год, пользуясь таблицей прецессии за 100 лет.
5. Установить подвижную звездную карту на день и час занятий для Минска и указать, какие созвездия будут в верхней и нижней кульминации.
6. В день 15 июля найти момент восхода, верхней кульминации и захода звезды Сириус (α Большого Пса).
7. Определить день года, в который в 20h30m в верхней кульминации находится звезда Альдебаран.
8. По таблицам в “Астрономическом календаре” (постоянной части) найти названия и видимую звездную величину звезд, положения которых определяются экваториальными координатами:
 - 1) $\alpha = 46^{\circ}38'1,5''$; $\delta = +40^{\circ}51'38''$
 - 2) $\alpha = 151^{\circ}45'37,5''$; $\delta = +12^{\circ}05'24''$
9. Из эфемерид Солнца и Луны найти моменты времени восхода и захода этих светил в пункте $\lambda = 0^h$, $\varphi = 56^{\circ}$, азимуты точек их восхода и захода, найти моменты их верхней кульминации на текущий день.
10. Из эфемерид Луны выписать даты и моменты времени четырех основных ее фаз в текущем месяце.
11. Найти положение и моменты времени восхода и захода планеты Юпитер в данный день.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Взять из общего каталога звезд атласа координаты (α и δ) звезды Дубхе и определить ее координаты на 2004 год, используя таблицу прецессии за 100 лет.

Итак, прежде всего, необходимо найти примерные координаты данной звезды по звездной карте атласа для того, чтобы определить, в какой части общего каталога звезд искать заданную звезду.

Но сначала определим, какому созвездию принадлежит звезда Дубхе. Ответ находится в таблице «Собственные имена звезд» атласа звездного неба А. А. Михайлова: α Uma. Сокращенное латинское название созвездия (Uma),

найденное в данной таблице, можно расшифровать с помощью следующей таблицы «Названия созвездий»: Uma – Большая Медведица. Здесь же находим номера карт атласа, на которых частично изображена Большая Медведица. На 4-й карте находим α Uma. По верхней и нижней дуговым шкалам определяем прямое восхождение ($\alpha \approx 11^h$), а по левой и правой – склонение ($\delta \approx 62^\circ$). В общем каталоге звезд (в этом же атласе) по прямому восхождению находим α Uma и уточняем координаты ($\alpha_{1950} = 11^h 0.7^m$; $\delta_{1950} = 62^\circ 1'$). Данные координаты в общем каталоге звезд соответствуют равноденствию 1950 года. Поэтому, для уточнения их на заданный год необходимо найти разницу в годах между заданным и 1950-м:

$$\Delta t = 2004 - 1950 = 54 \text{ года}$$

и воспользоваться таблицей прецессии за 100 лет (в конце атласа). Данная таблица состоит из двух частей: “по прямому восхождению”, где содержатся приращения координат $\Delta\alpha_{100}$, и “по склонению”, где – приращения координат $\Delta\delta_{100}$ за 100 лет. В таблице “по прямому восхождению” по координатам ($\alpha_{1950} = 11^h 0.7^m$; $\delta_{1950} = 62^\circ 1'$) находим соответствующее приращение: $\Delta\alpha_{100} = 6.2^m$ (4-й столбец, 8-я строка). В таблице “по склонению” по координате α_{1950} находим соответствующее приращение: $\Delta\delta_{100} = -32'$ (4-я строка снизу). Но нам необходимо приращение координат не за 100 лет, а за $\Delta t = 54$ года, т.е. $\Delta\alpha_{54}$ и $\Delta\delta_{54}$, значения которых находим по формулам:

$$\Delta\alpha_n = (\Delta\alpha_{100}/100) \times n \text{ и } \Delta\delta_n = (\Delta\delta_{100}/100) \times n.$$

Таким образом, $\Delta\alpha_{54} = 3.35^m$ и $\Delta\delta_{54} = -17.3'$, координаты на заданный год $\alpha_{2004} = \alpha_{1950} + \Delta\alpha_{54} = 11^h 0.7^m + 3.35^m = 11^h 3.42^m$, а $\delta_{2004} = 62^\circ 1' - 17.3' = 61^\circ 43.7'$.

Тема 3. Изучение систем счета времени

Образец заданий

1. На модели небесной сферы показать взаимосвязь прямого восхождения и часового угла светила со звездным временем.
2. Найти звездное время в момент захода точки весеннего равноденствия.
3. Определить звездное время в Екатеринбурге и Минске, если в Бишкеке звездное время равно $2^h 40^m 25^s$.
4. Для того же момента времени в тех же городах вычислить часовые углы звезд Альдебаран и Спика, выразив их в угловой мере и в единицах времени.
5. По подвижной карте звездного неба определить приближенное значение звездного времени в среднюю полночь и средний полдень 25 февраля, 25 мая, 25 августа и 25 ноября.
6. По подвижной карте звездного неба определить для тех же дней приближенное значение среднего времени в момент 18^h звездного времени.

7. Определить, с точностью до 1 минуты, момент верхней кульминации Солнца по звездному, истинному солнечному, среднему местному, поясному, декретному времени в Берлине 2 ноября. ($\alpha = 13^\circ 25'$).

8. В момент кульминации звезды Ригель ($\alpha = 5^h 13^m$) часы, идущие точно по звездному гринвичскому времени, показывают $15^h 9^m$; определить долготу данного места.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Определить, с точностью до 1 минуты, момент верхней кульминации Солнца по звездному, истинному солнечному, среднему местному, поясному времени в Берлине 2 ноября. ($\alpha = 13^\circ 25'$).

В данном случае удобнее начать с истинного солнечного времени T_C , т. к. Солнце в верхней кульминации, то по истинному солнечному времени будет полдень, т.е. $T_C = 12^h$. Среднее солнечное время отличается от истинного солнечного на поправку «уравнение времени» ($\eta = T_m - T_C$), которая содержится в эфемеридах Солнца в астрономическом календаре-ежегоднике: $\eta_{0(2)} = -16^m$. Поэтому $T_m = T_C + \eta = 12^h 00^m - 16^m = 11^h 44^m$. Поясное время T_n связано с местным средним солнечным T_m соотношением: $T_m - T_n = \lambda^h - n^h$, где λ^h – географическая долгота пункта, выраженная в часовой мере, а n^h – номер часового пояса в часах. Откуда $T_n = T_m - \lambda^h + n^h$. Но прежде необходимо перевести в часовую меру λ^h , воспользовавшись таблицей перевода (АК, постоянная часть) или соотношениями: $1^h = 15^\circ$, $1^m = 15'$, $1^s = 15''$. Итак, $\lambda^h = 0^h 53^m 40^s$. А поясное время $T_n = 11^h 44^m - 0^h 53^m 40^s + 1^h = 11^h 50^m 20^s$. Звездное время $S = \alpha_C + t_C$, где α_C – прямое восхождение Солнца, содержится в эфемеридах Солнца в астрономическом календаре-ежегоднике: $\alpha_C = 14^h 30^m$. А часовой угол Солнца в верхней кульминации $t_C = 0$. Поэтому звездное время $S = \alpha_C = 14^h 30^m$.

2. В момент верхней кульминации звезды Ригель ($\alpha = 5^h 13^m$) в некотором географическом пункте часы, идущие точно по звездному гринвичскому времени, показывают $15^h 9^m$. Определить долготу данного пункта.

Звездное время на данном меридиане можно найти по координатам звезды: $S = \alpha + t$. Звезда Ригель находится в верхней кульминации, значит, ее часовой угол $t = 0$. Следовательно, в данном пункте $S_1 = \alpha_C = 5^h 13^m$. А по звездному гринвичскому времени в этот момент $S_0 = 15^h 9^m$. Но известно, что $S_0 - S_1 = \lambda_0 - \lambda_1$, поэтому $\lambda_1 = \lambda_0 - S_0 + S_1$. Для Гринвича $\lambda_0 = 0$. Следовательно, $\lambda_1 = 0 - 15^h 9^m + 5^h 13^m = -9^h 56^m$. (Минус показывает, что отсчет долготы происходит к западу от гринвичского меридиана). Долготу можно записать и положительной, но для этого нужно добавить 24^h . То есть,

$24^h - 9^h 56^m = 14^h 4^m$ и отсчет долготы происходит к западу от гринвичского меридиана.

Тема 4. Видимое годовое движение Солнца и его следствия

Образец заданий

1. Определить наклонение эклиптики по измеренному зенитному расстоянию Солнца в верхней кульминации в дни солнцестояний 22 июня – $19^\circ 23'$; 22 декабря – $66^\circ 17'$.

2. По картам звездного атласа найти основные точки эклиптики и определить их экваториальные координаты. Определить названия и границы зодиакальных созвездий, на которые проецируются эти точки.

3. Пользуясь подвижной звездной картой, указать точку эклиптики, в которой Солнце находится в текущий день.

4. Пользуясь небесной сферой, определить полуденную высоту Солнца и азимуты точек восхода и захода его в дни равноденствий и солнцестояний для Витебска.

5. Найти азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$

где δ – склонение Солнца, а φ – широта места наблюдения.

6. Определить наклонение эклиптики около 3000 лет назад, если по наблюдениям в ту эпоху в некотором месте полуденная высота Солнца в день летнего солнцестояния равнялась $+63^\circ 48'$, а в день зимнего солнцестояния – $+16^\circ 00'$ к югу от зенита.

7. Определить, на каких широтах земного шара Солнце бывает точно в зените.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Найти азимуты точек восхода и захода Солнца в день занятий для Минска по формуле:

$$\cos A = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi},$$

где δ – склонение Солнца, а φ – широта места наблюдения.

В эфемеридах Солнца находим на указанную дату склонение Солнца. Например, 1 октября $\delta = -3^\circ 4'$. Широта Минска $53^\circ 54'$. Подставляя в формулу, получаем: $\cos A = -(\sin(-3^\circ 4')/\cos(54^\circ 51')) = 0.09$. Находим $A = \arccos(0.09) = \pm 84^\circ,8 = \pm 84^\circ 48'$. Знак “+” относится к точке захода, а “–” – к точке восхода. Таким образом, $A_{\text{восхода}} = -84^\circ 48'$ или $A_{\text{восхода}} = 360^\circ - 84^\circ 48' = 275^\circ 12'$, а $A_{\text{захода}} = 84^\circ 48'$.

Тема 5. Законы Кеплера и конфигурации планет

Образец заданий

1. Считая орбиты планет круговыми, определить гелиоцентрическую долготу Земли и планет по их конфигурациям:

21 марта – Меркурий в нижнем соединении, Венера в наибольшей западной элонгации, Марс в восточной квадратуре, Юпитер в соединении;

22 июня – Меркурий в верхнем соединении, Венера в наибольшей восточной элонгации, Марс в противостоянии, Юпитер в западной квадратуре. (Сделать схематические рисунки, учитывая масштаб.)

2. С помощью подвижной карты звездного неба определить созвездия, в которых находятся вышеуказанные планеты на данные даты.

3. Используя модель Солнечной системы, установить заданную планету в указанную конфигурацию и определить ее гелиоцентрическую долготу на 1993 год (гелиоцентрическую долготу Земли взять из Астрономического календаря-ежегодника): а) 28 января Меркурий в верхнем соединении; б) 7 января Марс в противостоянии.

4. По известной дате указанной ниже конфигурации вычислить дату очередной такой же конфигурации планеты: а) 27 декабря Марс в соединении; б) 3 октября Юпитер в противостоянии.

5. Вычислить синодический период обращения астероида Офелии. $a = 3.13$ а.е.

6. Считая орбиты планет круговыми, определить линейную скорость движения по орбите планет Меркурий, Земля и Юпитер.

7. Определить звездный период обращения Марса, зная, что его синодический период равен 779.94 суток.

8. По точной формулировке третьего закона Кеплера определить массу Юпитера, зная, что расстояние 1-го спутника от Юпитера равно 422000 км, время его обращения вокруг Юпитера 1.77 суток, расстояние от Луны до Земли равно 384000 км, время обращения Луны вокруг Земли 27.32 суток.

Примеры выполнения некоторых заданий

1. Считая орбиты планет круговыми, определить гелиоцентрическую долготу Земли и планет по их конфигурациям: 21 марта – Венера в наибольшей восточной элонгации, Марс в западной квадратуре.

А. С помощью масштабного чертежа и транспорта.

Б. С помощью вычислений.

А. Масштабный чертеж – это изображение орбит планет в виде концентрических окружностей, радиусы которых соотносятся как большие полуоси орбит данных планет. В данном случае: $a_B : a_3 : a_M = 0.72 : 1 : 1.52$ (рис. а).

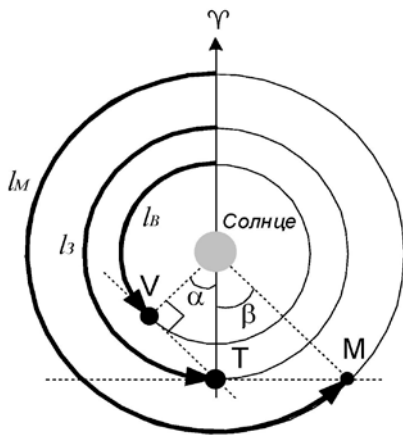


Рис. а.

Допустим, Земля находится в точке T , тогда Венера – в точке V (в наибольшей восточной элонгации), а Марс – в точке M (в западной квадратуре). По условию (21 марта) направление на точку весеннего равноденствия будет проходить через Солнце. А отсчет гелиоцентрической долготы осуществляется от направления на точку весеннего равноденствия по часовой стрелке. Используя транспортир, находим для Земли $l_3 = 180^\circ$, для Венеры – $l_B = 136^\circ$, для Марса $l_M = 229^\circ$.

Б. А теперь определим гелиоцентрическую долготу Земли и данных планет с помощью вычислений. По чертежу видно, что для Земли $l_3 = 180^\circ$.

Для Венеры $l_B = 180^\circ - \alpha$, $a \cos(\alpha) = a_B/a_3$, где a_B – большая полуось орбиты Венеры, а a_3 – большая полуось орбиты Земли. Тогда $l_B = 180^\circ - \arccos(a_B/a_3)$. Итак, $l_B = 136^\circ.3$.

Для Марса $l_M = 180^\circ + \beta$, а $\cos(\beta) = a_3/a_M$. Тогда $l_M = 180^\circ + \arccos(a_3/a_M)$. Итак, $l_M = 228^\circ.86$.

Тема 6. Изучение небольших оптических телескопов

Образец заданий

1. Определить диаметр объектива данного телескопа.
2. Определить фокусное расстояние телескопа.
3. Определить относительное отверстие телескопа.
4. Определить возможные увеличения телескопа с предложенными окулярами.
5. Определить проникающую силу телескопа.
6. Определить диаметр выходного зрачка телескопа с предложенным окуляром.
7. Определить разрешающую способность телескопа для длины волны, к которой более чувствителен глаз $\lambda = 0,555$ мкм по формуле:

$$\theta = \frac{140}{D} (").$$

8. Определить поле зрения телескопа по формуле:

$$W = \frac{w}{M},$$

где w – поле зрения окуляра, M – увеличение телескопа.

Тема 7. Определение положений и условий видимости планет

Образец заданий

1. С помощью программного пакета ASTRONOM определить экваториальные координаты Меркурия (15–20 опорных точек) с 1 октября по 1 декабря 1999 года и Юпитера с 1 августа 1999 года по 1 декабря 2000 года.
2. Нанести по полученным координатам опорные точки на звездную карту зодиакальных созвездий и построить траекторию видимого движения планеты, отмечая даты нахождения планеты в данных точках.
3. Провести анализ полученной траектории. Отметить: даты прямого и попятного движения; созвездия и яркие звезды, среди которых лежит путь планеты, даты максимального углового удаления от Солнца.
4. Определить, в каких конфигурациях находится планета в указанный период.
5. С помощью масштабного чертежа, считая орбиты планет круговыми, определить, наблюдаемы ли 20 декабря планеты, если они ранее были в следующих конфигурациях: а) 15 июня Венера в нижнем соединении; б) 10 мая Юпитер в противостоянии.
6. С помощью подвижной карты звездного неба определить, в какое время суток и в каком направлении наблюдаема Венера в наибольшей восточной элонгации.
7. Используя программный пакет ASTRONOMY LAB, определить даты наилучшей видимости вышеуказанных планет с 1 сентября по 31 декабря текущего года. Найти для данных дат моменты восхода и захода планет, угловое удаление от Солнца, расстояние от Земли и видимую звездную величину.

Тема 8. Спектры и светимость звезд

Образец заданий

1. Классифицировать сфотографированные щелевым спектрографом предложенные спектры звезд.
2. Вычислить расстояние, абсолютную визуальную и фотографическую величину предложенных звезд по формулам, приведенным в описании.
3. Найти значения абсолютной звездной величины и светимости предложенных звезд с помощью программного пакета ASTRONOM.
4. Изучить положение этих звезд на диаграмме Г ерцшпрунга-Рассела, определить, к каким классам светимости они относятся.
5. Перейти к диаграмме “спектр-масса”, найти значение массы, радиуса и плотности.

6. Пользуясь нижеприведенной таблицей, построить график зависимости между показателем цвета и температурой звезд, указав на том же графике основные спектральные классы.

Шкала эффективных температур звезд

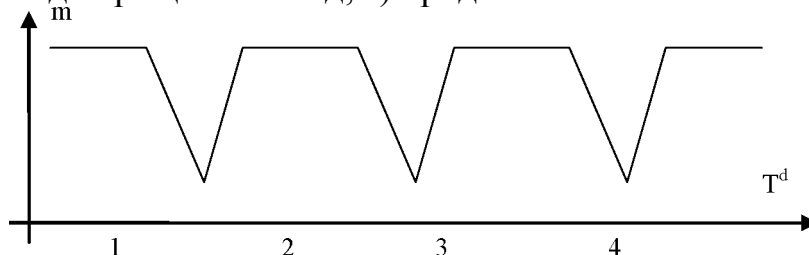
Спектр	Показатель цвета	Эффективная температура
O 5	- 0,45	35 000°
B 0	- 0,31	21 000°
B 5	- 0,117	13 500°
A 0	0,00	10 000°
A 5	+ 0,16	8 100°
F 0	+ 0,30	7 200°
F 5	+ 0,45	6 500°
G 0	+ 0,57	6 000°
G 5	+ 0,70	5 400°
K 0	+ 0,84	4 700°
K 5	+ 1,11	4 000°
M 0	+ 1,39	3 300°
M 5	+1, 61	600°

7. По полученной в предыдущем задании зависимости определить показатель цвета и вычислить абсолютную видимую и фотографическую звездную величину предложенной звезды.

Тема 9. Кратные звезды

Образец заданий

1. По кривой изменения блеска затменной переменной звезды определить: а) характеристики звезд пары: размеры относительно друг друга и относительно их орбиты; составляет ли блеск спутника заметную долю блеска главной звезды; б) форму, характер затмения (полное, частное или кольцеобразное); в) период обращения звезд; г) продолжительность затмения.



2. Вычислить проекцию на картинную плоскость линейного расстояния между компонентами, отношение их светимостей и суммарную видимую

звездную величину (приняв, что если $m_0 = 0$, то $E_0 = 1$), двойных звезд: а) β Скорпиона; б) γ Девы.

3. Определить по таблице общую видимую звездную величину двойных звезд: а) γ Девы; б) γ Дельфина.

4. Определить общую светимость, приняв светимость Солнца = 1, двойной звезды β Скорпиона.

5. Определить видимую звездную величину каждого компонента трехкратной звезды по ее общей видимой звездной величине m и соотношению блеска E между компонентами: $m = 3^m, 74$; первый компонент ярче третьего в 3.5 раза; второй компонент ярче третьего в 1.9 раза.

Тема 10. Собственные движения и пространственные скорости звезд. Определение изменения взаимного расположения звезд (видимых фигур созвездий) из-за собственного движения звезд

Образец заданий

1. С использованием "Каталога звезд ярче $4^m, 5$ в системе V", находящегося в компьютерной базе данных или в Астрономическом календаре (1) найти годовые изменения координат μ_α , μ_δ указанной группы звезд.

2. Найти значение координат звезд через указанный промежуток времени.

3. Нанести на звездную карту новые координаты данной группы звезд и указать стрелками направления движения.

4. Сравнить фигуру созвездия, которая наблюдается сейчас с будущей через заданное количество лет.

5. Вычислить расстояние, параллакс, собственное движение, видимую звездную величину, лучевую и тангенциальную скорости в эпоху наибольшего сближения с Солнцем, а также время, через которое наступит эпоха наибольшего сближения (удаления) звезды Денеб.

Тема 11. Изучение деталей поверхности и определение некоторых характеристик больших планет

Образец заданий

1. По фотографиям планеты Юпитер в эпоху противостояния, определить угловой и линейный диаметр планеты и вычислить ее объем и среднюю плотность.

2. Определить сжатие планеты Юпитер, сравнивая со сжатием Земли и объяснить причину различия в сжатии.

3. Вычислить линейный диаметр и ширину среднего кольца Сатурна.

4. На двух фотографиях Юпитера, снятых в один вечер с небольшим интервалом времени, отождествить одну деталь в умеренной зоне и по ее положению вычислить период вращения, угловую и линейную скорость этих зон.

5. Изучить предложенные фотографии Марса, Венеры, Юпитера и Сатурна и провести сравнительный анализ физических свойств и условий на поверхности этих планет.

6. Вычислить солнечную постоянную для Юпитера.

Тема 12. Изучение солнечной активности и общего излучения Солнца

Образец заданий

1. Пользуясь известными длинами волн спектральных линий водорода, построить дисперсионные кривые $l = f(\lambda)$ и кривые изменения дисперсии $D = F(\lambda)$ для обеих спектрограмм водорода (δ и g), указав принятые обозначения этих линий. Объяснить отличие кривых друг от друга.

2. По спектрам водорода, гелия и натрия отождествить линии в спектре Солнца и по таблицам спектральных линий определить их длину волны.

3. По дисперсионной кривой определить приближенное значение длины волны спектральных линий А, В, Е, в, Н и К солнечного спектра и по таблицам спектральных линий установить их принадлежность к химическим элементам и уточненное значение длины волны.

4. Вычислить угловой и линейный масштабы фотографии Солнца.

5. Определить число Вольфа, а также угловой и линейный диаметры самого большого пятна, сравнив его размеры с диаметром Земли.

6. Измерить высоту протуберанца, выразить ее в радиусах Солнца и в километрах. Вычислить скорость вещества, если фотографии сделаны в моменты:

а) (d) 4 июня, 1ч 00мин.

б) (l) 4 июня, 1ч 30мин.

7. По значению солнечной постоянной вычислить мощность солнечного излучения, энергию солнечного излучения за год и уменьшение массы Солнца за секунду и за год.

8. Вычислить продолжительность современной интенсивности солнечного излучения в будущем, при условии постоянства излучения до момента затухания Солнца.

Тема 13. Изучение карты и рельефа Луны и больших спутников планет

Образец заданий

1. Вычислить угловой и линейный масштабы большой фотографической карты видимого полушария Луны и определить угловые и линейные размеры моря, протяженность горного хребта и диаметры двух кратеров.

2. Установить названия и определить селенографические координаты объектов, значащихся под номерами ...

3. Вычислить угловое и линейное расстояние между теми же объектами.

4. Отождествить кратеры, значащиеся под номерами ...
5. Вычислить высоту двух лунных гор, обозначенных на фотографии лунной поверхности числом и буквой ...
6. Изучить фотографии спутников Юпитера: Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто. Сравнить их внешний вид и определить особенности деталей поверхности.
7. Сравнить фотографии спутников Юпитера с фотографиями Луны. Определить сходство и различие.

Тема 14. Изучение движения спутников Юпитера и Сатурна

Образец заданий

1. С помощью компьютерной «CLEA – Exercise of Jupiter Moons» изучить движение четырех галилеевых спутников Юпитера за указанный период времени.
2. Нарисовать график движения спутников относительно Юпитера.
3. Определить время наступления затмений и покрытий за указанный период времени.
4. Ознакомиться с движением спутников Сатурна с помощью компьютерной программы "Satellites of Saturn" за указанный период времени.
5. Изучить движение колец Сатурна за этот же период времени и оценить степень их раскрытия.

Тема 15. Движение Луны. Солнечные и лунные затмения

Образец заданий

1. Определить фазу Луны, если угловое удаление Луны от Солнца 60° .
2. Определить фазу Луны, если фазовый «возраст» Луны 10 дней.
3. Вычислить средние значения расстояний Солнца и Луны от лунного узла, при которых происходят частные и полные солнечные затмения.
4. Вычислить средние значения расстояний Солнца и Луны от лунных узлов, при которых происходят лунные затмения.
5. По результатам пунктов 3 и 4 вычислить длительность ежегодных периодов, в течение которых могут происходить солнечные и лунные затмения, и сформулировать вывод о возможном количестве каждого типа затмения в пределах одного периода.
6. Вычислить даты двух солнечных затмений, являющихся повторением полного солнечного затмения 11 августа 1999 года.
7. С помощью программы "RedShift 3" определить моменты начала и конца лунного затмения 10 января 2001 года в Минске.

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Тесты для промежуточного контроля

1

Что называется горизонтальным параллаксом планеты?

1. Угол, под которым с планеты, находящейся на горизонте, виден радиус Земли.
2. Угол, под которым с расстояния 1 парсек видна планета.
3. Угол, под которым с Земли видна планета.
4. Угловой диаметр планеты.

Чем объясняется сравнительно большое сжатие планет-гигантов?

1. Быстрым вращением их вокруг осей.
2. Малой плотностью.
3. Большими размерами.
4. Большим удалением от Солнца.

48

В каких местах Земли отвесная линия совпадает с осью мира?

- 1) на экваторе.
- 2) на 45° южной широты.
- 3) на 60° северной широты.
- 4) на гринвичском меридиане.
- 5) на полюсах.

Красный цвет Марса объясняется:

1. Наличием в приповерхностных породах большого количества охры.
2. Распространением на поверхности лишайников специфического цвета.
3. Смещением спектральных линий в красную часть при движении планеты.
4. Большим содержанием окислов железа в почве.

49

Кульминацией называется явление прохождения светилом...

- 1) небесного экватора
- 2) небесного меридиана.
- 3) эклиптики.
- 4) истинного (математического) горизонта.
- 5) оси мира.

Какая из планет не относится к планетам земной группы?

- 1) Меркурий.
- 2) Уран.
- 3) Венера.

4) Марс.

10

Прямое восхождение это:

1. Восхождение светила прямо над горизонтом.
2. Дуга большого круга между точкой весеннего равноденствия и кругом склонения.
3. Дуга большого круга между точкой Q и кругом склонения.
4. Время, прошедшее от момента нижней кульминации светила до его восхода.

Какие причины препятствуют развитию парникового эффекта в атмосфере Марса?

1. отсутствие углекислого газа.
2. малая плотность атмосферы
3. слабые солнечные лучи
4. низкая температура поверхности.

14

На картах звёздного атласа особо выделены ...

1. суточные пути звёзд.
2. Млечный Путь
3. спиральные рукава Галактики
4. видимый путь Луны и планет.

В какой конфигурации Марс имеет самый большой угловой размер?

1. В верхнем соединении
2. В оппозиции
3. В нижнем соединении
4. В западной элонгации

17

В момент верхней кульминации Солнца

1. оно наблюдается в зените.
2. наступает утро.
3. оно пересекает небесный меридиан.
4. высота его для всех точек Земли в данный день одинакова.

Кто создал каналы на Марсе?

1. Древняя марсианская цивилизация.
2. Большие потоки воды, образующиеся от таяния полярных шапок.
3. Воображение земных наблюдателей, ищущих жизнь на Марсе.
4. Большие трещины на поверхности.

18

Плоскость орбиты Земли

1. совпадает с плоскостью экватора Солнца.
2. перпендикулярна оси мира.
3. перпендикулярна плоскости эклиптики.
4. совпадает с плоскостью эклиптики.

Как называется световое явление в атмосфере планеты, возникающее при вторжении в нее метеорного тела с космической скоростью?

- 1) Метеороид.
- 2) Астероид.
- 3) Полярное сияние.
- 4) Метеор.

19

Точки равноденствия ...

1. не участвуют в суточном вращении неба.
2. не перемещаются по небу в течение года.
3. имеют склонение равное 0.
4. имеют прямое восхождение, равное 12^h .

Что приводит к парниковому эффекту на Венере?

1. высокое давление.
2. высокая температура поверхности
3. химический состав атмосферы
4. густые облака.

20

Наклонение эклиптики ...

1. вычисляют из склонения Солнца в дни равноденствия.
2. это угол наклона эклиптики к экватору.
3. равно разности полуденных высот Солнца в дни равноденствий.
4. это угол наклона оси Земли к плоскости эклиптики.

Атмосфера Венеры состоит из ...

1. 96.5% углекислого газа и 3.5% азота.
2. 99% углекислого газа и 1% аргона.
3. 80% азота и 20% кислорода.
4. 89% водорода и 11% гелия

21

В точке осеннего равноденствия ...

1. Солнце переходит из западного полушария в восточное.
2. Солнце переходит из северного полушария в южное.
3. Горизонт пересекается с экватором.
4. Эклиптика пересекается с горизонтом.

Средняя температура поверхности Венеры равна ...

1. 26 °C
2. 260 °C
3. -100 °C
4. 470 °C

24

Звёздный атлас служит для ...

1. определения расстояний до звёзд.
2. знакомства с рисунком звёздного неба.
3. определения горизонтальных координат звёзд.
4. знакомства со спектральными характеристиками звёзд.

В какой конфигурации Венера имеет самый маленький угловой размер ...

1. В верхнем соединении
2. В оппозиции
3. В нижнем соединении
4. В западной элонгации

34

Куда нужно улететь, чтобы рисунки созвездий ощутимо изменились?

1. К Луне.
2. К Солнцу.
3. На границу Солнечной системы.
4. К ближайшей звезде.

Какое из утверждений не отражает различий между планетами гигантами и планетами земной группы?

1. Первые планеты газовые, вторые состоят в основном из камня.
2. Первые планеты большие, вторые маленькие.
3. Первые планеты не имеют атмосферы, а вторые имеют.
4. первые планеты имеют сильные магнитные поля, а вторые слабые.

2

Высота полюса мира ...

1. численно равна географической долготе места наблюдения.
2. это угол между осью мира и плоскостью горизонта.
3. численно равна 90°.
4. измеряется между осью мира и отвесной линией.

Основная масса вещества Солнечной системы сосредоточена ...

- 1) ... в малых телах Солнечной системы.
- 2) ... в планете Юпитер.
- 3) ... в планете Земля.
- 4) ... в Солнце.

3

Небесный экватор и истинный горизонт ...

1. пересекаются в диаметрально противоположных точках E и W .
2. всегда параллельны друг другу.
3. всегда перпендикулярны друг другу.
4. пересекаются под углом φ .

Что свидетельствует о возможной жизни на Европе?

1. Каналы, наблюдаемые на её поверхности.
2. Неизвестные радиосигналы, получаемые с неё.
3. Океан воды, находящийся под ледяной корой.
4. Участки поверхности, на которых миссией Галилео замечена растительность.

4

Ось мира ...

1. перпендикулярна оси суточного вращения Земли.
2. является продолжением радиуса Земли в месте наблюдения.
3. в пространстве параллельна оси суточного вращения Земли.
4. участвует в суточном вращении небесного свода.

Почему на Европе мало ударных кратеров?

1. Ледяная кора спутника очень активна.
2. Поверхность Европы покрыта водой.
3. Вулканические извержения постоянно деформируют поверхность.
4. Из глубин постоянно изливаются потоки лавы.

5

Плоскость небесного меридиана ...

1. касательна поверхности Земли.
2. перпендикулярна плоскости географического меридиана.
3. участвует во вращении небесной сферы.
4. является продолжением плоскости земного меридиана.

Причиной вулканической активности Ио является ...

1. радиоактивный распад элементов мантии.
2. термоядерные реакции в ядре.
3. приливное трение.
4. парниковый эффект в атмосфере.

6

Точки равноденствия являются точками пересечения ...

1. эклиптики и небесного экватора.
2. эклиптики и математического горизонта.

3. небесного экватора и математического горизонта.

Магнитное поле Юпитера генерирует ...

1. газовая атмосфера.
2. каменное ядро.
3. слой металлического водорода.
4. слой молекулярного водорода.

7

Точки солнцестояния находятся на ...

1. небесном экваторе
2. эклиптике
3. математическом горизонте
4. небесном меридиане.

Какие причины создают красные, оранжевые и коричневые облака на Юпитере?

1. Замёрзшие аммиак и вода.
2. Метановый и аммиачовый лёд.
3. Натриевая соль.
4. Перемешивание вещества, вынесенного из глубин, в атмосфере.

8

Видимое годовое движение Солнца происходит ...

1. по небесному экватору.
2. по эклиптике.
3. по разным небесным параллелям.
4. по горизонту.

На какой планете Солнечной системы самые высокие горы?

1. На Юпитере.
2. На Плутоне.
3. На Марсе.
4. На Земле.

9

Следствием годового движения Солнца являются ...

1. изменение угла наклона оси Земли
2. смена дня и ночи
3. смена времён года на Земле.
4. явление рефракции.

Красное пятно Юпитера имеет структуру ...

1. большого ударного кратера.
2. гигантского урагана.

3. потока лавы.
4. большого вулкана.

11

Центр небесной сферы ...

1. обязательно совпадает с центром Земли.
2. совпадает с глазом наблюдателя.
3. лежит в точке пересечения отвесной линии с небесным сводом.
4. совпадает с полюсом мира.

Сколько планет в Солнечной системе?

1. 9
2. 8
3. 13
4. Потенциально большое число.

12

В любом пункте северного полушария Земли ...

1. нельзя увидеть звёзды южной полусферы неба.
2. в зените расположена Полярная звезда.
3. величина области южной полусферы, доступной наблюдению, тем меньше, чем больше широта.

Какой самый распространённый газ в атмосфере Марса?

1. кислород
2. аргон
3. углекислый газ
4. азот

13

Для составления звездных карт применяется...

- 1) ...горизонтальная система небесных координат.
- 2) ...экваториальная система небесных координат.
- 3) ...галактическая система небесных координат.
- 4) ...эклиптическая система небесных координат.

Что придаёт поверхности Марса красный цвет ...

1. углекислый газ в атмосфере
2. частицы пыли, находящиеся в атмосфере.
3. окислы железа в почве
4. красный мох, растущий в марсианских пустынях.

15

Определите, в каких местах на Земле ...

1. ось мира совпадает с отвесной линией.

2. небесный экватор проходит через зенит.
3. северный полюс мира совпадает с точкой севера.
4. полуденная линия проходит через полюсы мира.

Максимальная температура в экваториальных районах Марса равна ...

1. 25 °C
2. 260 °C
3. -100 °C
4. -2 °C

16

Определите, в каких местах на Земле ...

1. Ось мира совпадает с полуденной линией.
2. Небесный экватор совпадает с математическим горизонтом.
3. Отвесная линия совпадает с осью мира.
4. Теряется понятие полуденной линии.

Радиус Марса более близок к радиусу ...

1. Луны
2. Земли
3. Юпитера
4. Плутона

22

Прямое восхождение Солнца ...

1. Увеличивается за каждый день примерно на 3°.
2. Постоянно в течение года.
3. Меняется в течение года от 0^ч до 24^ч.
4. Максимально по величине в точках солнцестояния.

Радиус Венеры более близок к радиусу ...

1. Меркурия
2. Луны
3. Земли
4. Юпитера

23

Истинный полдень – это ...

1. момент прохождения Солнцем зенита.
2. момент пересечения Солнцем небесного меридиана.
3. момент смены календарных дат.
4. момент пересечения Солнцем горизонта.

Какие детали поверхности Венеры дают её высокую отражательную способность?

1. полярные шапки

2. потоки лавы
3. густые облака
4. ледяная кора.

25

Координатными линиями на звёздных картах атласа являются ...

1. круги склонений и вертикалы.
2. небесный меридиан и горизонт.
3. часовые круги и параллели.
4. часовые круги и альмукантараты.

Наблюдатель на обратной стороне Луны никогда не будет видеть ...

1. Солнце
2. Землю
3. другие планеты
4. звёзды

26

Для измерения звёздного времени используется ...

1. вращение Земли вокруг оси.
2. движение Солнца по эклиптике.
3. Обращение Земли вокруг Солнца.
4. видимое положение планет относительно звёзд.

Что является причиной большого перепада температур на Луне и Меркурии?

1. близость к Солнцу
2. скорость вращения
3. отсутствие атмосферы
4. спин-орбитальный резонанс

27

Звёздные сутки начинаются ...

1. в момент верхней кульминации звезды.
2. в полдень.
3. в день весеннего равноденствия.
4. в полночь.
5. в момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия.

Какая из перечисленных планет имеет самую мощную атмосферу?

- 1) Марс.
- 2) Меркурий.
- 3) Венера.
- 4) Земля.
- 5) Плутон.

28

В данный физический момент звёздное время ...

1. всюду на Земле различно.
2. равно прямому восхождению кульминирующих звёзд.
3. численно равно часовому углу Солнца.
4. равно разности прямого восхождения и часового угла светила.

Какие детали поверхности общие для Луны и Меркурия?

1. эскарпы
2. кратеры
3. вулканы
4. моря

29

О продолжительности звёздных суток судят по периоду вращения вокруг наблюдателя ...

1. центра солнечного диска.
2. произвольно выбранной звезды.
3. точки весеннего равноденствия.
4. южной точки экватора.

Расстояние до Луны равно ...

1. 1,54 млн км
2. 0,39 а.е.
3. 200 км.
4. 384 000 км

30

Какое из перечисленных небесных тел не восходит на востоке и не садится на западе?

1. Солнце.
2. Меркурий.
3. звёзды.
4. никакое.

Масса всех известных астероидов Солнечной системы равна 10^{17} кг. Как она соотносится с массой Земли?

1. Земля в 10 000 раз массивнее.
2. Земля в 0,00001 раз имеет большую массу, чем астероиды.
3. Земля в 10 млн раз массивнее всех астероидов.
4. Земля в 10 раз массивнее всех астероидов.

31

Какое из перечисленных явлений приводит к смене времён года?

1. Изменение расстояния от Земли до Солнца.
2. Прецессия земной оси.

3. Направление земной оси в пространстве и обращение Земли вокруг Солнца.

4. Изменение цикла дня и ночи.

Кометы состоят из ...

1. железа
2. каменной глыбы
3. каменного ядра и газовой атмосферы
4. льда с каменными вкраплениями.

32

При каком типе затмения Солнце, Земля и Луна находятся на одной линии в указанном порядке?

1. солнечное затмение
2. лунное затмение
3. кольцеобразное затмение.

Какой из факторов не является важным для удержания планетой атмосферы?

1. Магнитное поле.
2. Радиус планеты.
3. Масса планеты.
4. Температура атмосферы (удаление от Солнца).

33

Что на Земле изменяется вследствие прецессии?

1. Скорость вращения.
2. Наклон эклиптики к экватору.
3. Наклон оси.
4. Направление наклона оси вращения Земли.

Какие из следующих планет не имеют спутников?

- 1) Венера и Меркурий.
- 2) Юпитер и Сатурн.
- 3) Уран и Нептун.
- 4) Земля и Плутон.
- 5) Нептун и Плутон.

35

Вследствие суточного вращения небесной сферы со временем не изменяется ...

- 1) азимут.
- 2) высота.
- 3) склонение.
- 4) часовой угол.

5) зенитное расстояние.

Какая из перечисленных планет не является газовым гигантом?

1. Юпитер.
2. Нептун.
3. Уран.
4. Плутон

36

Для чего астрономы строят большие телескопы?

1. Для национального престижа.
2. Чтобы увидеть объекты больше размером.
3. Чтобы собрать больше света от удалённых объектов.

Появление большого потока знаний о планетах в последнее время вызвано ...

1. постройкой больших земных телескопов.
2. удобным для наблюдения положением планет в пространстве.
3. работой различных межпланетных миссий.
4. использованием большого земного радара.

37

В чём преимущество Космического телескопа им. Хаббла по сравнению с наземными телескопами?

1. Он постоянно находится в темноте.
2. Его наблюдениям не мешает атмосфера.
3. Имея меньший вес в космосе, он может использовать большее зеркало.
4. Он лучше видит небесные объекты, потому что находится ближе к ним.

Какой химический элемент придаёт окраску Нептуну и Урану?

1. Аммиак.
2. Водород.
3. Метан.
4. Водяной лёд.

38

Какие из перечисленных объектов не наблюдаются радиотелескопами?

1. Центр Млечного Пути.
2. Туманности.
3. звёзды.
4. другие галактики.

Какими словами можно описать Миранду?

1. Спутник Урана с очень изломанной поверхностью.
2. Спутник Нептуна с яркой одной стороной и тёмной другой.

3. Спутник Урана с тёмной поверхностью.
4. Спутник Нептуна с негустой атмосферой.

40

Какие из инструментов дают наибольшее разрешение изображений?

1. Оптические телескопы, выведенные в космос.
2. Радиointерферометры.
3. Рентгеновские телескопы.
4. Гамма-лучевые телескопы.

Какая из планет имеет самый большой наклон оси вращения?

1. Нептун
2. Плутон
3. Сатурн
4. Уран

41

Звёздное время в данный момент определяется ...

1. часовым углом любой звезды.
2. часовым углом точки весеннего равноденствия.
3. часовым углом звезды в момент нижней кульминации.
4. разность показаний часов и момента кульминации звезды.

Чем Титан отличается от остальных спутников планет Солнечной системы?

1. Это самый большой спутник.
2. У него обнаружена самая большая вулканическая активность.
3. Он имеет очень густую атмосферу.
4. Это единственный спутник, который имеет собственное кольцо.

42

Звёздное время и прямое восхождение светила ...

1. связаны формулой $s + \alpha = t$.
2. всегда одни и те же для данного пункта наблюдения.
3. совпадают в данный физический момент.
4. связаны формулой $s = \alpha + t$.

Как можно описать спутник Плутона?

1. Нереида вращается вокруг Плутона по очень вытянутой орбите.
2. Харон имеет диаметр равный половине диаметра Плутона.
3. Плутон не имеет спутников.
4. Плутон сам является бывшим спутником Нептуна.

43

На небесной сфере ...

1. суточные пути Солнца совпадают с эклиптической.
2. положение эклиптики не зависит от широты.
3. эклиптика представляет собой малый круг.
4. эклиптика совпадает с горизонтом.

С какой линейной скоростью движутся экваториальные газы Юпитера?

1. 2 м/с
2. 500 км/с
3. 40 000 км/ч
4. 300 км/ч

44

О продолжительности звёздных суток судят по периоду вращения вокруг наблюдателя ...

1. центра солнечного диска.
2. произвольно выбранной звезды.
3. точки весеннего равноденствия.
4. южной точки экватора.

У какой планеты средняя плотность самая низкая?

1. У Меркурия
2. У Плутона
3. У Сатурна
4. У Нептуна.

Вопросы к экзамену по астрономии

1. Прадмет астраноміі, аб'екты вивучэння. Асноўныя раздзелы астраноміі.

2. Сістэмы каардынат на нябеснай сферы.
3. Асноўныя пункты і кругі на нябеснай сферы.
4. Вышыня полюса свету над гарызонтам, вышыня свяціла ў мерыдыяне.

Умовы для ўсходу і захаду свяціл.

5. Задыяк і задыякальныя сузор'і. Гадавы рух Сонца.
6. Вымярэнне часу, зорны час, сапраўдны і сярэдні сонечны час.
7. Вымярэнне часу, мясцовы, паясны і сезонны час.
8. Каляндар, прынцыпы яго пабудовы і розныя віды.
9. Бачны рух планет і яго тлумачэнне. Планетныя канфігурацыі. Раўнанне

сінадатычнага руху.

10. Вызначэнне формы і памераў Зямлі.
11. Фазы месяца. Сінадычнычны, сідырычны і драканічны месяц.
12. Вызначэнне адлегласцей у межах сонечнай сістэмы. Гарызантальны паралакс, астранамічная адзінка.

13. Метады вызначэння адлегласці у астраноміі. Адзінкі адлегласці – парсек і светавы год, суадносіны паміж імі.

14. Сонечныя і месяцовыя затменні, умовы іх наступлення і бачнасці.
15. Задача двух цел.
16. Законы Кеплера.
17. Метады вызначэння мас нябесных цел.
18. Прэцэсія і нутацыя зямной васі.
19. Прылівы і адлівы.
20. Касмічныя хуткасці. Залежнасць формы арбіты спадарожніка ад пачатковай хуткасці.
21. Адкрыцце новых планет. Паняцце аб задачы n цел.
22. Формула Погсана (з вывадам). Шкалы зорных велічынь.
23. Аптычныя тэлескопы і іх характарыстыкі.
24. Рэльеф, фізічныя фарактарыстыкі Маркурыя.
25. Рэльеф, атмасфера і фізічныя умовы на Вянеры.
26. Рэльеф, атмасфера і фізічныя умовы на Марсе. Спадарожнікі Марса.
27. Атмасфера і фізічныя умовы на Юпітэры. Кольцы і спадарожнікі Эпітэра.
28. Атмасфера і фізічныя умовы на Сатурне. Кольцы і спадарожнікі Сатурна.
29. Юліанскі і Грыгарыянскі календары.
30. Атмасфера і фізічныя умовы на Уране і Нептуне. Кольцы і спадарожнікі Урана і Нептуна.
31. Плутон і яго спадарожнік Харон. Фізічныя характарыстыкі.
32. Асноўныя параметры Сонца. Памеры, маса, свяцільнасць, сярэдняя шчыльнасць, тэмпература.
33. Асноўныя характарыстыкі зорак. Тэмпература, радыусы, свяцільнасці.
34. Ёркская класіфікацыя зорак. Класы свяцільнасці. Метад зорных паралаксаў.
35. Падвойныя і кратныя зоркі. Спектральна-падвойныя.
36. Падвойныя і кратныя зоркі. Агульная класіфікацыя. Зацьменна-падвойныя зоркі.
37. Зацьменна-падвойныя зоркі. Крывыя блеску, вызначэнне арбіт і фізічных характарыстык кампанентаў.
38. Пераменныя зоркі. Класіфікацыя пераменных зорак па характару пераменнасці.
39. Новыя і звышновыя зоркі.
40. Пульсары і нейтронныя зоркі.
41. Зорныя скапленні: шаарвыя і рассеяныя. Ацэнкі іх узросту.
42. Малыя целы Сонечнай сістэмы. Астэроіды, метэоры, метэарыты, каметы.
43. Знешнія слаі сонечнай атмасферы: Храмасфера і карона. Прычыны і механізм нагрэву храмасферы і кароны.
44. Мадэль унутранай будовы Сонца.
45. Актыўныя утварэнні ў атмасферы Сонца: плямы, фокулы, пратуберанцы, успышкі.

46. Спектры, спектральная класіфікацыя. Дыяграма Герцшпрунга-Рассела. Асноўныя групы зорак на дыяграме “спектр – свяцільнасць”.
47. Магнітнае поле Сонца. Сонечны вецер і магнітасфера Зямлі. Цыклічнасць сонечнай актыўнасці і яе сувязь са з’явамі на Зямлі.
48. Дыфузная матэрыя ў Галактыцы. Паглыннанне святла. Цёмныя і светлыя туманнасці.
49. Уласны рух і прамяневая хуткасці зорак. Пекулярныя хуткасці зорак і Сонца ў Галактыцы. Вярчэнне Галактыкі.
50. Класіфікацыя галактык.
51. Узаемадзеючыя галактыкі. Ядры галактык. Квазары.
52. Скапленне галактык. Метагалактыка. Праблема цёмнага рэчыва і яго ўплыў на агульную масу Сусвету.
53. Чырвонае зрушэнне ў спектрах галактык. Закон Хаббла.
54. Вялікі выбух. Сучасныя ўяўленні аб эвалюцыі Сусвету.
55. Узнікненне і эвалюцыя зорак вялікай і малой масы. Канчатковыя стадыі эвалюцыі зорак. “Чорныя дзіры”.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Литература

Основная:

1. Засонов, А.В. Общая астрофизика / А.В.Засонов, К.А. Постнов. – М.: Наука, 2006. – 498 с.
2. Галузо, И.В. Астрономия: Сборник разноуровневых заданий / И.В. Галузо, В.А. Голубев, А.А. Шимбалеv. – Минск: Юнипресс, 2005. – 272 с.
3. Голубев, В.А. Астрономия. Основные понятия и таблицы / В.А. Голубев, И.В. Галузо, А.А. Шимбалеv. – Минск: Аверсэв, 2005. – 208 с.
4. Галузо, И.В. Астрономия. Учебное пособие для 11 кл. / И.В. Галузо, В.А. Голубев, А.А. Шимбалеv. – Минск: Аверсэв, 2009. – 256 с.

Дополнительная:

1. Гаврилов, М.Г. Звездный мир: Сборник задач по астрономии и космической физике / М.Г. Гаврилов. – Черногoловка: ННЦ, 1998. – 100 с.
2. Галузо, И.В. Астрономия. Планирование и методика проведения уроков / И.В. Галузо, В.А. Голубев, А.А. Шимбалеv. – Минск: Аверсэв, 2004. – 256 с.
3. Кононович, Э.В. Курс общей астрономии / Э.В. Кононович, В.И. Мороз. – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 544 с.
4. Левитан, Е.П. Дидактика астрономии / Е.П.Левитан. – М.: Эдиториал УРСС, 2004. – 296 с.
5. Шимбалеv, А.А. Атлас созвездий / А.А.Шимбалеv. – Минск: Харвест, 2003. – 223 с.
6. Бакулин, П.И. Курс общей астрономии / П.И. Бакулин, Э.В. Кононович, В.И. Мороз. – М.: Наука, 2001. – 380 с.

7. Андрианов, Н.К. Астрономические наблюдения в школе / Н.К.Андрианов. – М. Просвещение, 1987. – 112 с.

8. Клищенко, А.П. Астрономия / А.П. Клищенко, В.И. Шупляк. – М.: Новое знание, 2004. – 224 с.

9. Шимбалев, А.А. Хрестоматия по астрономии / А.А. Шимбалев, И.В. Галузо, В.А. Голубев. – Минск: Аверсэв, 2005. – 272 с.

10. Шимбалев, А.А. Лабораторный практикум по астрономии / А.А. Шимбалев, В.С. Гончар. – Минск: БГПУ, 2000. – 84 с.

Учебно-тематический план дисциплины «Астрономия»

№№	Наименование раздела, темы	Лекции	Лабо- ра- торный практикум	Самостоя- тельная работа студентов
1	Введение	2	2	1
1.1	Астрономия как наука и учебный предмет			
1.2	История возникновения и развития астроно- мии			
2	Основы сферической и практической аст- рономии			
2.1	Основные точки, круги и системы координат на небесной сфере	2	8	9
2.2	Годовое движение Солнца	2	8	9
3	Основы небесной механики и космонавти- ки			
3.1	Геоцентрическая и гелиоцентрическая систе- мы мира и движение планет	2	1	2
3.2	Движение Луны	2	1	2
3.3	Понятие о задаче N тел	1	1	1
3.4	Влияние масс небесных тел на их движение	1	1	2
4	Методы астрофизических исследований	2		
4.1	Яркость небесных тел		2	3
4.2	Астрономические инструменты		2	2
5	Физика планетной системы			4
5.1	Система Земля – Луна и ее характеристика	2		
5.2	Физические условия на Меркурии и Венере: атмосфера, рельеф, внутреннее строение	1		
5.3	Физические условия на Марсе: атмосфера, рельеф, внутреннее строение	1		
5.4	Физические условия на Юпитере и Сатурне: атмосфера и рельеф планет-гигантов	2		
5.5	Физические условия на Уране и Нептуне: ат- мосфера и рельеф	2		
5.6	Малые тела Солнечной системы	2		
6	Физика Солнца	4		2
6.1	Основные параметры Солнца			
6.2	Внутреннее строение Солнца			

6.3	Атмосфера Солнца			
7	Звезды			
7.1	Звезды и расстояния в межзвездной среде	2	2	2
7.2	Диаграмма Герцшпрунга – Рассела	2	2	3
7.3	Кратные звезды	1	1	2
7.4	Переменные звезды	1	1	2
7.5	Внутреннее строение звезд	2	2	2
7.6	Эволюция звезд большой и малой массы	2	2	3
7.7	Строение Галактики	2	2	3
8	Внегалактическая астрономия	2		2
8.1	Классификация галактик и их пространственное распределение			
9	Элементы космологии и космогонии	4		2
9.1	Модели Вселенной			
9.2	Проблема существования внеземных цивилизаций, возможные уровни их развития			
10	Организация астрономических наблюдений в средних общеобразовательных учреждениях	4		1
10.1	Планирование и оборудование астрономической площадки			
Итого:		50	38	62