

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
**«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф.
Горбачева» в г.Белово**

(филиал КузГТУ в г.Белово)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«АСТРОНОМИЯ»
для студентов СПО специальности «09.02.07 Информационные системы и
программирование»

Составитель

Белов С.В.

Белово, 2021.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция №1. Предмет астрономии. Эволюция взглядов человека на Вселенную. Достижения современной космонавтики. Пилотируемые и автоматические станции	3
Лекция 2. Основы практической астрономии. Движение Земли вокруг Солнца. Видимое движение и фазы Луны.	22
Лекция 3. Солнечные и лунные затмения. Время и календарь	40
Лекция 4. Небесная механика. Законы движения небесных тел. Законы Кеплера. Закон всемирного тяготения.	53
Лекция 5. Закон всемирного тяготения. Определение масс небесных тел. Движение искусственных небесных тел.	67
Лекция 6. Солнечная система. Земля и Луна.	77
Лекция 7. Планеты земной группы. Планеты-гиганты. Спутники и кольца планет. Малые тела Солнечной системы.	101
Лекция 8. Методы астрономических исследований. Электромагнитное Излучение. Космические лучи.	146
Лекция 9. Гравитационные волны как источник информации о природе и свойствах небесных тел.	177
Лекция 10. Наземные и космические телескопы, принцип их работы. Космические аппараты.	200
Лекция 11 . Законы теплового излучения. Спектральный анализ. Абсолютно черное тело.	225
Лекция 12. Звезды: основные физико-химические характеристики и их взаимная связь. Разнообразие звездных характеристик и их закономерности.	250
Лекция 13. Масса и размеры звезд. Двойные и переменные звезды. Двойные звезды.	259
Лекция 14. Наша Галактика - Млечный Путь. Состав и структура Галактики. Звездные скопления. Межзвездный газ и пыль. Вращение Галактики.	273
Лекция 15. Галактики. Открытие других галактик. Многообразие галактик и их основные характеристики Темная материя. Строение и эволюция Вселенной..	285
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	307

Лекция №1

Предмет астрономии. Эволюция взглядов человека на Вселенную.

Достижения современной космонавтики. Пилотируемые и автоматические станции

Астрономия (от греч. «астрон» - «заря, звезда, светило», «номос» - «закон») - наука, изучающая движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем. Астрономия изучает всю совокупность небесных объектов: планеты и их спутники, кометы и метеорные тела, Солнце, звезды, звездные скопления, туманности, галактики, а также вещество и поля, заполняющие пространство между светилами. Слово космос в переводе с греческого означает порядок, в отличие от хаоса, где царит беспорядок. Еще в Древней Греции ученые понимали, что во Вселенной действуют какие-то законы, поэтому на небе существует определенный порядок. В наше время под словом космос мы представляем себе Вселенную.

История развития астрономии.

С давних времен небо поражало воображение людей своей загадочностью, но много веков оно оставалось для них недостижимым, а потому священным. Фантазия людей населила небо могучими существами - богами, которые управляют миром и даже решают судьбу каждого человека. *Ночью призрачное сияние зрение очаровывало людей, поэтому выдумка древних астрономов объединила отдельные звезды в фигуры людей и животных - так появились названия созвездий.* Потом были замечены светила, которые движутся среди звезд, - их назвали планетами (с греческого - блуждающая). Первые астрономические записи, найденные в древнеегипетских гробницах, датируемых XXI-XVIII вв. до н. э. Так, известно, что уже за 3000 лет до н. э. египетские жрецы за первой утренней появлением ярчайшей звезды земного звездного неба Сириус определяли время наступления разлива реки Нил. В древнем Китае за 2000 лет до н. э. видимые движения Солнца и Луны были

настолько хорошо изучены, что китайские астрономы предсказывали наступление солнечных и лунных затмений.

Было по крайней мере три причины, что обусловили и стимулировали зарождение и развитие астрономии. **Первый и, безусловно, самый древний стимул - это практические потребности людей.** Для первобытных кочевых племен, занимавшихся охотой, очень важным обстоятельством было чередование темных безлунных и светлых лунных ночей, что требовало наблюдений за изменением фаз Луны.

С ритмичной сменой времен года связан летний цикл жизни земледельцев. Для народов Междуречья, Египта, Китая очень важным было предсказания разливов крупных рек, в долинах которых они жили. А это требовало, как наблюдений за высотой Солнца над горизонтом в течение года, так и сопоставление событий на Земле с видом звездного неба. Опираясь на эти наблюдения, люди уже издавна разработали определенные системы счета времени - календари.

Наблюдая восход Солнца утром и его закат вечером, они смогли выделить для ориентации в пространстве одно из главных направлений - направление восток-запад. Слово «ориентироваться» происходит от латинского «ориенс», что означает «восток», а также «восход Солнца». Для установки направлению ночью люди запоминали расположение на небе ярких зрение и их отдельных характерных групп, выясняли условия видимости светил на небе в течение года.

- **потребность счета времени, ведение календаря;**
- **земледелие;**
- **ориентация на местности, находить дорогу по звездам, особенно мореплавателям;**

Вторым стимулом для тщательных наблюдений звездного неба, а в целом - для накопления астрономических знаний и развития астрономии, **были астрологические предсказания.**

Уже в III тыс. до н. э. древние вавилоняне внимательно следили за движением так называемых «блуждающих светил», которые, в отличие от неподвижных звезд, не занимали постоянных положений на небе, а двигались, перемещаясь из созвездия в созвездие. От древних греков до нас дошла их общее название-планеты, от римлян - собственные названия: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. К числу планет в те времена относили еще и Солнце и Луна, потому что они также «блуждали» небом по созвездиям.

Не зная истинных причин движения планет на небе, древние наблюдатели составили представление, по которому Солнце, Луна и упомянутые пять светил является «глашатаями воли богов». Более 4000 лет назад зародилась астрология - необоснованное с позиций современной науки попытки за положением планет на небе предвидеть ход событий на земле: погоду и урожай, мир или войну для государства, судьбу правителя, а впоследствии - и каждого человека.

Третьим, наверное, самым главным стимулом для развития астрономии было **неудержимое желание человеческой мысли проникнуть в суть вещей, осознать истинное положение Земли и человека во Вселенной**, познать законы, по которым движутся светила и которые определяют их рождение, строение и развитие. То есть астрономия удовлетворяла потребность человека в объяснении происхождения и развития окружающего мира.

Астрономия зарождалась в разных уголках планеты: в Междуречье, Китае, Египте - везде, где, осознав себя, человек организовывала свою жизнь в определенном сообществе.

Древние славяне почти не изучали звездное небо. Причины этого:

- 1) почти полгода небо на Руси закрыто облаками и туманами;
- 2) в летнее время ночи очень светлые;
- 3) славяне долгое время были изолированы от народов, накопивших богатый наблюдательный материал.

Славяне жили в основном в лесах и по берегам рек, которые давали массу вспомогательных ориентиров по сторонам горизонта: по растениям, по рельефу местности, по направлениям ветров (по сезонам) и т. д. Они иначе воспринимали мир, чем, например, жители южных широт с их открытым небом и пространством пустынь и степей или народы, населявшие морские берега, которые использовали знания звёздного неба в навигационных целях.

Вклад ученых в развитие астрономии.

Николай Коперник (1473-1543) «сдвинул Землю, остановив Солнце». **Иоганн Кеплер** (1618-1621) на основании двадцатилетних наблюдений Тихо Браге (1546-1601) установил законы движения планет.

Галилео Галилей (1564-1642), построив первый телескоп и направив его в небо, открыл четыре спутника Юпитера, фазы Венеры и многое другое. Эти открытия утверждали гелиоцентрическую модель мира Коперника. **Исаак Ньютон** (1643-1727), обобщив законы Кеплера о движении планет, открыл закон всемирного тяготения и заложил основы небесной механики.

Уильям Гершель (1738-1822) создал модель нашей Галактики - гигантские, но конечных размеров системы звёзд.

Йозеф Фраунгофер (1787-1826) впервые использовал спектральный анализ в астрономии.

Эдвин Хаббл (1889-1953) доказал, что за пределами нашей Галактики есть несметное число других таких же звездных систем и что этот мир галактик расширяется.

Альберт Эйнштейн (1879-1955) создал теорию относительности, которая стала фундаментом космологии.

Связь астрономии с другими науками.

Современная астрономия является настолько развитой наукой, что делится на более десяти отдельных дисциплин, в каждой из которых используются только ей присущие методы исследований, типы инструментов, понятийный аппарат:

- Астрометрия разрабатывает методы измерения положений небесных светил и угловых расстояний между ними, она же решает проблемы измерения времени.

- Небесная механика выясняет динамику движения небесных тел.

- Астрофизика изучает физическую природу, химический состав и внутреннее строение звёзд.

- Звездная астрономия изучает строение нашей Галактики и других звездных систем.

- Вопросами происхождения и развития небесных тел занимается космогония.

- Развитием Вселенной в целом - космология (от греч. «космос» - «Вселенная», «гон» - «происхождение», «логос» - «учение»).

Наблюдения – основной источник знаний о небесных телах, процессах и явлениях происходящих во Вселенной.

Особенности астрономических наблюдений: 1) астрономические наблюдения в большинстве случаев пассивны по отношению к изучаемым объектам. Мы не можем активно влиять на небесные тела, ставить опыты (за исключением редких случаев), как это делают в физике, биологии, химии. Лишь использование космических аппаратов дало в этом отношении некоторые возможности.

2) Значительная продолжительность целого ряда явлений. Непосредственно наблюдать многие из происходящих явлений невозможно.

3) Все светила находятся от нас очень далеко, так далеко, что ни на глаз, ни в телескоп нельзя решить, какое из них ближе, какое дальше. Все они кажутся нам одинаково далекими. Поэтому при наблюдениях обычно выполняют угловые измерения и уже по ним часто делают выводы о линейных расстояниях и размерах тел.

Наблюдения проводятся в специализированных учреждениях - обсерваториях, возникших еще на первом этапе развития астрономии до НЭ.

Но настоящее астрономическое исследование началось с изобретением телескопа в 1609г. Телескоп – оптический прибор, увеличивающий угол зрения, под которым видны небесные тела и позволяющий собирать во много раз больше света, приходящего от светила, чем глаз наблюдателя. С помощью телескопов производят не только визуальные и фотографические наблюдения, но и фотоэлектрические и спектральные наблюдения. Фотографические наблюдения (перед визуальными) имеет преимущества:

1. Документальность – способность фиксировать происходящее явление и процессы и долгое время сохранять полученную информацию.
2. Моментальность – способность регистрировать кратковременные события.
3. Панорамность – способность запечатлеть одновременно несколько объектов.
4. Интегральность – способность накапливать свет от слабых источников.
5. Детальность – способность рассматривать детали объекта на изображении.

Последнее время на орбиту Земли выводятся телескопы и целые орбитальные обсерватории: (т.е. развиваются внеатмосферные наблюдения).

Современная астрономия, оставаясь фундаментальной наукой, имеет огромное прикладное значение и непосредственно связана с научно-техническим прогрессом человечества. Изучение разнообразных небесных тел, которые могут находиться в условиях очень высоких и очень низких температур, плотностей и давлений, обогащает важными данными «земные» науки - физику, химию и т.д. Законы небесной механики положен в основу теории движения космических аппаратов, а практическую космонавтику представить без астрономии вообще невозможно. Исследования Луны и планет позволяют значительно лучше изучать нашу Землю. Кроме того, астрономия является одной из главнейших наук, благодаря которым создается научная картина мира - система представлений о самых

общих законах строения и развития Вселенной и ее отдельных частей. И эта научная картина мира, в большей или меньшей степени, становится элементом мировоззрения каждого человека.

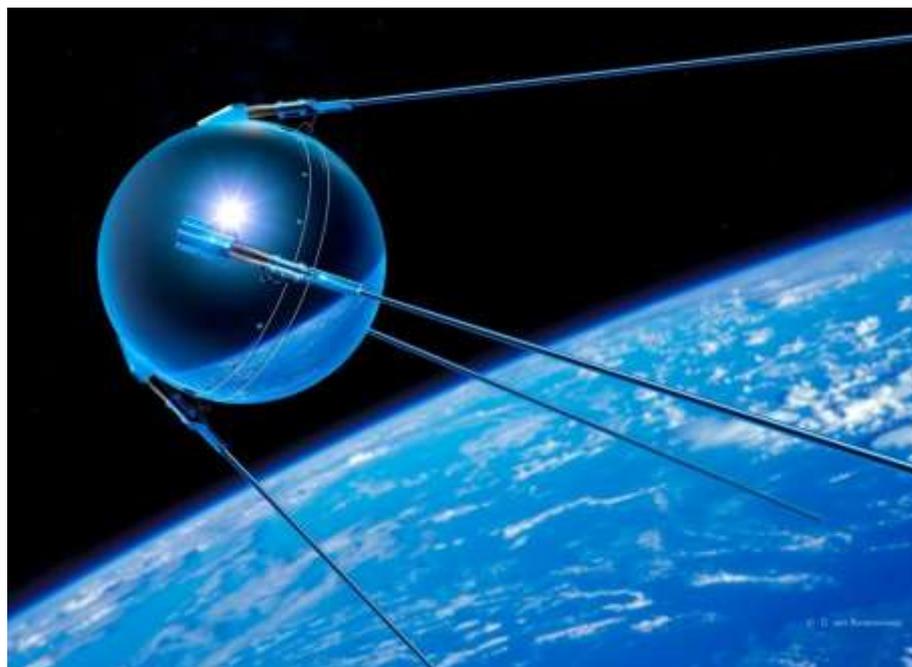
Значение астрономии в народном хозяйстве:

- Ориентирование по звездам для определения сторон горизонта;
- Навигация (мореходство, авиация, космонавтика) - искусство прокладывать путь по звездам;
- Исследование Вселенной с целью понять прошлое и спрогнозировать будущее;
- Космонавтика:
 - Исследование Земли с целью сохранения ее уникальной природы;
 - Получение материалов, которые невозможно получить в земных условиях;
 - Прогноз погоды и предсказание стихийных бедствий;
 - Спасение терпящих бедствие судов;
 - Исследования других планет для прогнозирования развития Земли.

Новые требования к астрономии предъявляет космонавтика. Нужно уметь с большой точностью определять расстояния до небесных тел Солнечной системы, выбирать подходящее для межпланетных перелетов время, знать расположение наиболее опасных участков орбит космических ракет, уметь выбирать оптимальные траектории искусственных небесных тел.

Начало космической эры

4 октября 1957 г. СССР произвел запуск первого в мире искусственного спутника Земли. Первый советский спутник ПС-1 позволил впервые измерить плотность верхней атмосферы, получить данные о распространении радиосигналов в ионосфере, отработать вопросы выведения на орбиту, тепловой режим и др. Спутник представлял собой алюминиевую сферу диаметром 58 см и массой 83,6 кг с четырьмя штыревыми антеннами длиной 2,4-2,9 м (см. рис.).



В герметичном корпусе спутника размещались аппаратура и источники электропитания. Начальные параметры орбиты составляли: высота перигея 228 км, высота апогея 947 км, наклонение 65,1 гр.

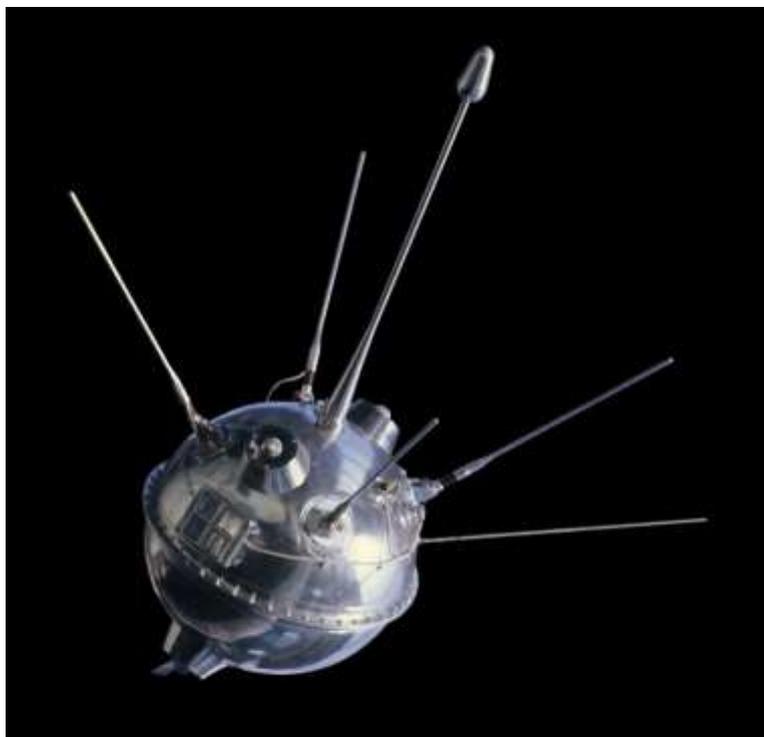
3 ноября Советский Союз сообщил о выведении на орбиту второго советского спутника. В отдельной герметической кабине находились собака Лайка (см. рис.) и телеметрическая система для регистрации ее поведения в невесомости. Спутник был также



снабжен научными приборами для исследования излучения Солнца и космических лучей.

Так же как и при запуске спутника Земли, приоритет в запуске первого зонда принадлежит СССР, 2 января 1959 г. был запущен первый созданный руками человека объект, который был выведен на траекторию, проходящую достаточно близко от Луны, на орбиту спутника Солнца. Таким образом «Луна-1» впервые достигла второй космической скорости. «Луна-1» (см. рис.) имела массу 361,3 кг и пролетела мимо Луны на расстоянии 5500 км. На расстоянии 113000 км от Земли с ракетной ступени, пристыкованной к

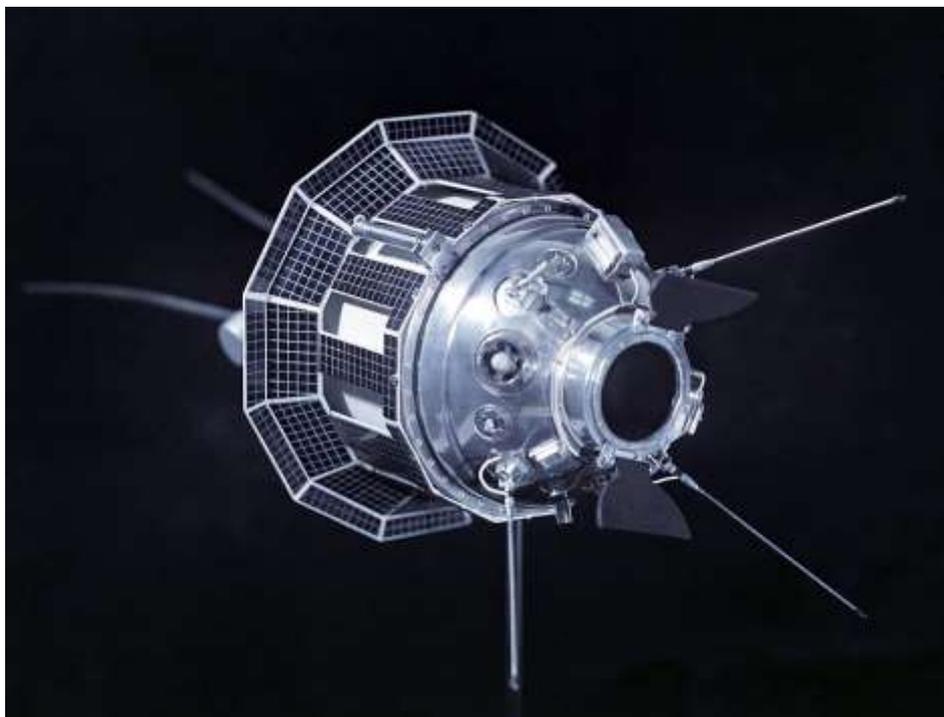
«Луне-1», было выпущено облако паров натрия, образовавшее искусственную комету. Солнечное излучение вызвало яркое свечение паров натрия и оптические системы на Земле сфотографировали облако на фоне созвездия Водолея.



«Луна-2» (см. рис.), запущенная 12 сентября 1959 г. совершила первый в мире полет на другое небесное тело. В 390,2-килограммовой сфере размещались приборы, показавшие, что Луна не имеет магнитного поля и радиационного пояса.



Автоматическая межпланетная станция (АМС) «Луна-3» (см. рис.) была запущена 4 октября 1959 г. Вес станции равнялся 435 кг. Основной целью запуска был облет Луны и фотографирование ее обратной, невидимой с Земли, стороны. Фотографирование производилось 7 октября в течение 40 мин с высоты 6200 км над Луной.



Человек в космосе

12 апреля 1961 г. в 9 ч 07 мин по московскому времени в нескольких десятках километров севернее поселка Тюратам в Казахстане на советском космодроме Байконур состоялся запуск межконтинентальной баллистической ракеты Р-7, в носовом отсеке которой размещался пилотируемый космический корабль «Восток-1» (см. рис.)



с майором ВВС Юрием Алексеевичем Гагариным (см. рис.) на борту. Запуск прошел успешно. Космический корабль был выведен на орбиту с наклоном 65° , высотой перигея 181 км и высотой апогея 327 км и совершил один виток вокруг Земли за 89 мин. На 108-ой мин после запуска он вернулся на Землю, приземлившись в районе деревни Смеловка Саратовской области. Таким образом, спустя 4 года после выведения первого искусственного спутника Земли Советский Союз впервые в мире осуществил полет человека в космическое пространство.



Космический корабль состоял из двух отсеков. Спускаемый аппарат, являющийся одновременно кабиной космонавта, представлял собой сферу диаметром 2,3 м, покрытую абляционным материалом для тепловой защиты при входе в атмосферу. Управление кораблем осуществлялось автоматически, а также космонавтом. В полете непрерывно поддерживалась связь с Землей. Атмосфера корабля – смесь кислорода с азотом под давлением 1 атм. (760 мм рт. ст.). «Восток-1» имел массу 4730 кг, а с последней ступенью ракеты-носителя 6170 кг. Космический корабль (КК) «Восток» выводился в космос 5 раз, после чего было объявлено о его безопасности для полета человека.



18 марта 1965 г. был выведен на орбиту КК «Восход» с двумя космонавтами на борту – командиром корабля полковником Павлом Иваровичем Беляевым и вторым пилотом подполковником Алексеем Архиповичем Леоновым (см. рис.). Сразу после выхода на орбиту экипаж очистил себя от азота, вдыхая чистый кислород. Затем был развернут шлюзовой отсек: Леонов вошел в шлюзовой отсек, закрыл крышку люка КК и впервые в мире совершил выход в космическое пространство. Космонавт с автономной системой жизнеобеспечения находился вне кабины КК в течении 12 мин, временами отдаляясь от корабля на расстояние до 5 м (см. рис.). Во

время выхода он был соединен с КК только телефонным и телеметрическим кабелями. Таким образом, была практически подтверждена возможность пребывания и работы космонавта вне КК.



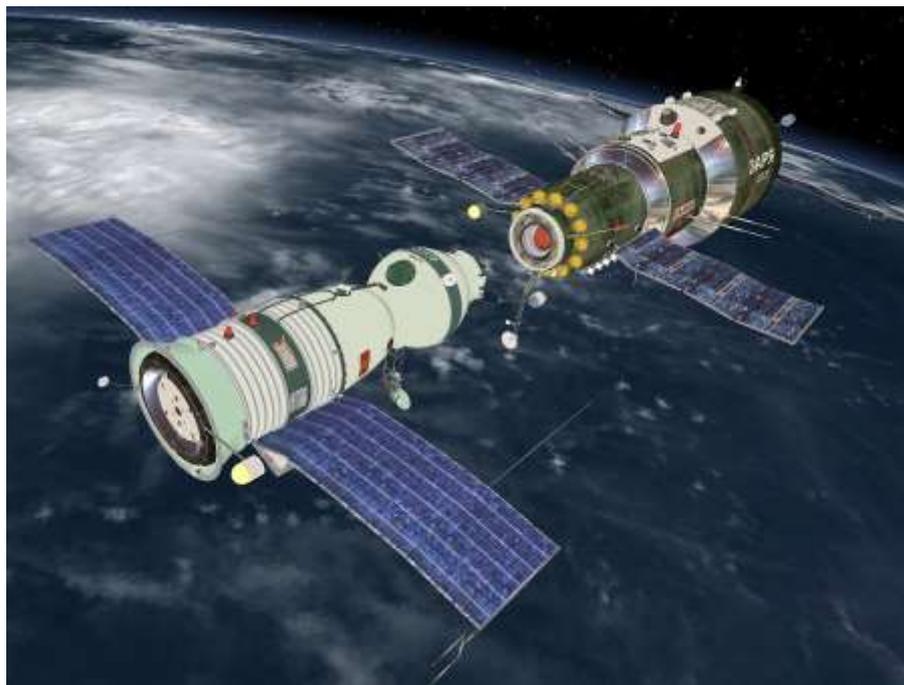
16 января 1969 г. была произведена первая стыковка двух пилотируемых космических кораблей Союз-4 и Союз-5 (см. рис.). Корабль «Союз-4» стартовал 14 января 1969 года. На следующий день, 15 января, с космодрома Байконур стартовал следующий пилотируемый корабль – «Союз-5», на борту которого находились трое космонавтов. 16 января в 08:20 корабли «Союз-4» и «Союз-5» состыковались. Это была первая стыковка двух пилотируемых кораблей. На 35-м витке космонавты



Хрунов и Елисеев вышли в открытый космос из корабля «Союз-5» и перешли в корабль «Союз-4». После стыковки, агентство ТАСС объявило, что впервые на орбите создана экспериментальная космическая станция с четырьмя космонавтами на борту. Корабли «Союз-4» и «Союз-5» находились в состыкованном состоянии 4 часа 35 минут.

19 апреля 1971 г. была запущена первая орбитальная станция Салют-1. Станцию посетили две экспедиции: на КК «Союз-10» и «Союз-11». Станция пробыла на орбите 175 суток. 11 октября 1971 года Центр управления

полётами дал станции команду на вхождение в плотные слои атмосферы, где станция и сгорела, её обломки упали в Тихий океан.



20 февраля 1986 г. был выведен на орбиту базовый модуль орбитальной станции Мир. Затем в течение 10 лет один за другим были пристыкованы ещё шесть модулей. Орбитальная станция «Мир» («Салют-8») стала представлять собой сложный многоцелевой научно-исследовательский комплекс (см. рис.).



С 1995 года станцию стали посещать иностранные экипажи. Также на станции побывало 15 экспедиций посещения, из них 14 международных с участием космонавтов Сирии, Болгарии, Афганистана, Франции (5 раз), Японии, Великобритании, Австрии, Германии (2 раза), Словакии, Канады.

В рамках программы «Мир – Шаттл» было осуществлено семь кратковременных экспедиций посещения с помощью корабля «Атлантис», одна с помощью корабля «Индевор» и одна с помощью корабля «Дискавери», во время которых на станции побывали 44 астронавта (см. рис.).



23 марта 2001 года проработавшая в три раза дольше первоначально установленного срока станция была затоплена в специальном районе в южной части Тихого океана, рядом с островами Фиджи.

Всего на станции работали 104 космонавта из 12 стран.

Космос науке

Запуски метеорологических, геофизических ракет и искусственных спутников позволили начать систематическое изучение структуры, важнейших физико-химических процессов и характера вариаций в верхней атмосфере, что привело к формированию и становлению новой области науки – аэронамии. Было показано, что земная атмосфера простирается на

многие тысячи километров от земной поверхности, при этом постепенно увеличивается доля ионизированных частиц, на которые сильное влияние начинает оказывать геомагнитное поле.

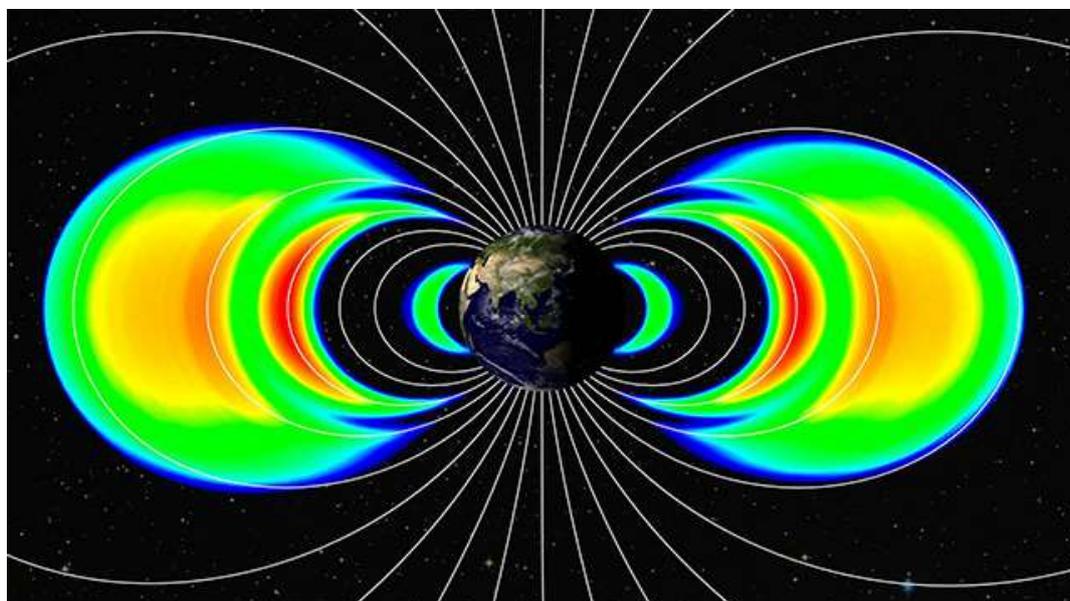
Одним из важных результатов первого периода космических исследований явилось обнаружение исключительно высокой динамичности верхней атмосферы, обусловленной изменчивостью потоков энергии, приходящей к Земле от Солнца. Они вызывают существенные изменения состояния верхней атмосферы и геомагнитного поля.

Из анализа движения спутников удалось обнаружить значительные колебания плотности атмосферы в зависимости от солнечной активности, времени суток и других факторов. Было, например, найдено, что в течение 11-летнего солнечного цикла колебания плотности на высоте 200–300 км достигают 2–5, а на высоте 500–600 км – более 100 раз. Они обусловлены колебаниями температуры верхней атмосферы приблизительно от 600–800 до 2000–2500° К. Эти сведения дали возможность прогнозировать время существования космических аппаратов в верхней атмосфере.

Существенно уточнились наши представления о химическом составе верхней атмосферы Земли. Теперь общепризнано, что молекулярный азот является основной составляющей до высот порядка 200 км, выше преобладает атомарный кислород, а на еще больших высотах атмосфера состоит в основном из гелия и водорода. Гелиевый слой сравнительно тонок и подвержен существенным вариациям. Выше 1000 км всегда преобладает водород.

Установка плазменных зондов и источников когерентного радиоизлучения на спутниках и ракетах позволила получить многочисленные оценки электронной и ионной концентрации в ионосфере, проследить их связь с солнечным ультрафиолетовым излучением, сопоставить распределение электронной концентрации с характером распространения радиоволн.

Одним из наиболее известных результатов космических исследований явилось открытие радиационного пояса Земли – зоны захваченных земным магнитным полем заряженных частиц, простирающейся в экваториальной плоскости на расстояние до 10–12 радиусов Земли (см. рис.).



Внутренняя зона этого пояса была открыта американскими исследователями, а внешняя – при полетах второго и третьего искусственных спутников Земли. Последующие многочисленные измерения, в том числе на спутниках «Электрон», показали, что в области радиационного пояса присутствуют частицы в широком спектре энергий: протоны от единиц кэВ до сотен МэВ и электроны с верхним порогом энергии приблизительно в 10 МэВ. Наблюдаются значительные вариации в распределении частиц различных энергий в зависимости от широты и расстояния от Земли. С помощью спутников были выполнены измерения магнитного поля Земли, проведена детальная магнитная съемка 75% земной поверхности.



Коренным образом были пересмотрены и существовавшие гипотезы о межпланетном пространстве. Исследования, проведенные с помощью различных космических аппаратов, показали, что межпланетное пространство заполнено идущими от Солнца потоками плазмы. Обдувая Землю, эти потоки, называемые солнечным ветром (см. рис.), деформируют магнитное поле Земли. При сверхзвуковом обтекании магнитосферы Земли образуется подобие ударной волны. Между фронтом ударной волны и границей магнитосферы расположена область горячей, сильно турбулизованной солнечной плазмы.

Потоки вытекающей из Солнца плазмы впервые обнаружены и измерены вне земного магнитного поля во время полета автоматической межпланетной станции «Луна-2» в 1959 г. Так называемый магнитный шлейф Земли (см. рис.) был обнаружен американскими учеными с помощью спутника ИМП-1 в 1963 – 1964 гг. на расстоянии до 210 тыс. км. Советские исследования показали, что он простирается намного дальше.



При помощи наземных радиофизических средств советскими учеными была открыта и исследована сверхкорона Солнца, простирающаяся до орбиты Земли и представляющая собой движущиеся облака солнечной плазмы. Получено много новых данных о природе хромосферных вспышек, а также о солнечных магнитных полях, играющих очень большую роль в различных проявлениях солнечной активности и оказывающих влияние на процессы в атмосфере Земли.

На космических станциях «Протон» проводились исследования космических лучей сверхвысоких энергий, не доступных пока еще современным ускорителям. Получены данные, представляющие несомненный интерес для изучения взаимодействия элементарных частиц.

Исследования околоземного космического пространства продолжаются. Вслед за первыми искусственными спутниками были созданы и выведены на орбиту вокруг Земли сотни спутников серии «Космос», космические системы «Электрон», маневрирующие спутники «Полет», тяжелые спутники «Протон». Совершенствуется техника эксперимента в космосе. Созданы унифицированные спутники, рассчитанные на установку на борту различных комплектов аппаратуры. Разработаны системы активной и пассивной ориентации и стабилизации, в том числе с применением маховиков, аэродинамических стабилизаторов и реактивных управляющих органов, системы коррекции орбиты и другие устройства.

Контрольные вопросы к лекции

1. Причины зарождения и развития астрономии.
2. Связь астрономии с другими науками.
3. В чем состоят особенности астрономических наблюдений.
4. Какие преимущества имеют фотографические наблюдения перед визуальными.
5. Требования предъявляемые астрономии космонавтикой.

Лекция 2

Основы практической астрономии. Движение Земли вокруг Солнца.

Видимое движение и фазы Луны.

Созвездия и яркие звезды

Древние наблюдатели видели на звездном небе отдельные сочетания ярких звезд и мысленно объединяли их в различные фигуры. Чтобы было легче ориентироваться на звездном небе, группам звезд, или созвездиям, люди присваивали названия животных, птиц, различных предметов. В некоторых фигурах древнегреческие астрономы «видели» мифических героев. В труде «Альмагест» («Великое математическое построение астрономии в XIII книгах», II в. н. э.) древнегреческий астроном *Клавдий Птолемей* упоминает 48 созвездий. Это Большая Медведица и Малая Медведица, Дракон, Лебедь, Орел, Телец, Весы и др. Наиболее заметные созвездия у многих народов получили свои названия. Так, древним славянам Большая Медведица представлялась в виде Лося или Оленя. Часто ковш Большой Медведицы сравнивался с повозкой, отсюда и названия этого созвездия: Воз, Телега, Колесница. Между Большой Медведицей и Малой Медведицей находится созвездие Дракона. По легенде Дракон (Змей) похищает юную красавицу. А красавица эта — знаменитая Полярная Звезда.

Еще в III в. до н. э. древнегреческие астрономы свели названия созвездий в единую систему, связанную с греческой мифологией.

Однако с течением времени сложилась непростая ситуация — в разных странах использовались различные карты созвездий. Возникла необходимость унифицировать разделение звездного неба. Окончательное число и границы созвездий были определены на I съезде Международного астрономического союза в 1922 г. Вся сферическая поверхность звездного неба была условно разделена на 88 созвездий. В настоящее время под **созвездием** понимается участок звездного неба с характерной наблюдаемой группировкой звезд. Эти площадки-созвездия носят названия либо

древнегреческих созвездий, которые находились (или находятся) в границах современных, либо названия, присвоенные европейскими астрономами. Для облегчения запоминания и поиска созвездий в учебниках по астрономии и астрономических атласах яркие звезды, составляющие созвездия, соединены условными линиями в узнаваемые на небе фигуры. Созвездия, звезды которых образуют легко выделяемую на звездном фоне конфигурацию, или те, которые содержат яркие звезды, относятся к главным созвездиям.

Над горизонтом на ясном звездном небе невооруженным глазом можно увидеть около 3000 звезд. Они различаются по своему блеску: одни заметны сразу, другие едва различимы. Поэтому еще во II веке до н. э. *Гиппарх*, один из основоположников астрономии, ввел условную **шкалу звездных величин**. Самые яркие звезды были отнесены к 1-й величине, следующие по блеску (слабее примерно в 2,5 раза) считаются звездами 2-й звездной величины, а самые слабые, видимые только в безлунную ночь, — звездами 6-й величины. На звездном небе ярких звезд 1-й звездной величины — всего 12.

Многим ярким звездам древнегреческие и арабские астрономы дали названия: Вега, Сириус, Капелла, Альтаир, Ригель, Альдебаран и др. В дальнейшем яркие звезды в созвездиях стали обозначать буквами греческого алфавита, как правило, по мере убывания их блеска. С 1603 г. действует предложенная немецким астрономом *Иоганном Байером* система обозначений звезд. В системе Байера название звезды состоит из двух частей: из названия созвездия, которому принадлежит звезда, и буквы греческого алфавита. При этом первая буква греческого алфавита α соответствует самой яркой звезде в созвездии, β — второй по блеску звезде и т. д. Например, Регул — α Льва — это самая яркая звезда в созвездии Льва.

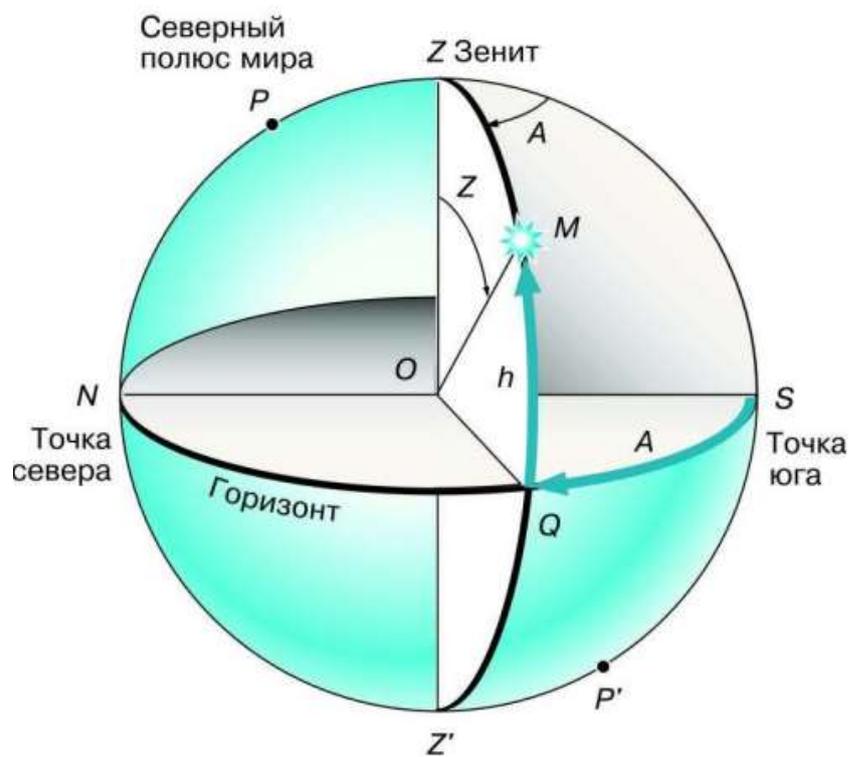
Основные точки, линии и плоскости небесной сферы.

Нам кажется, что все звезды расположены на некоторой шаровой поверхности небосвода и одинаково удалены от наблюдателя. На самом деле

они находятся от нас на различных расстояниях, которые так огромны, что глаз не может заметить эти различия. Поэтому воображаемую шаровую поверхность стали называть небесной сферой. **Небесная сфера** — это воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой в зависимости от решаемой задачи совмещается с той или иной точкой пространства. Центр небесной сферы может быть выбран в месте наблюдения (глаз наблюдателя), в центре Земли или Солнца и т. д.

Системы координат.

Горизонтальная система координат. Основное: **отвесная** или **вертикальная линия**, **зенит**, **надир**, **линия математического горизонта** (линия, образуемая при пересечении со сферой плоскости проходящей через центр сферы перпендикулярно отвесной линии)



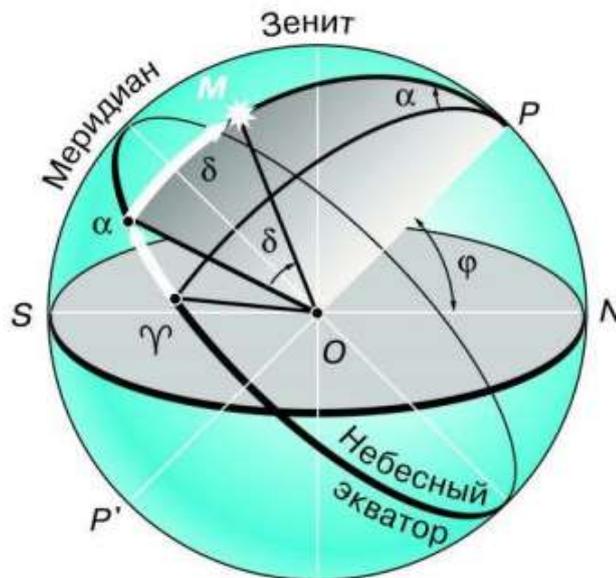
В этой системе координатами являются высота (h) и азимут (A). Высота светила — угловое расстояние светила M от истинного горизонта, **Азимут светила** — угловое расстояние, измеренное вдоль истинного горизонта, от

точки юга до точки пересечения горизонта с вертикальным кругом, проходящим через светило M .

Зенитное расстояние (z). Оно отсчитывается в пределах от 0 до $+180^\circ$ к надиру. Высота и зенитное расстояние связаны соотношением: $z + h = 90^\circ$.

Экваториальная система координат.

Ось мира (линия проходящая через центр небесной сферы параллельная оси вращения земли), **полюсы мира** (северный полюс мира – точка пересечения оси мира с небесной сферой, находящаяся со стороны северного полюса Земли), **круг склонения** (круг проведенный через светило и полюсы мира), **небесный меридиан** (линия пересечения вертикальной плоскости проведенной через зенит и полюсы мира и небесной сферы), плоскость проходящая через центр сферы параллельно экватору земли в сечении со сферой образует **небесный экватор**.



В этой системе координатами служат склонение (δ) и прямое восхождение (α). **Склонение светила** (аналогично географической широте) — угловое расстояние светила M от небесного экватора, измеренное вдоль круга склонения. Склонение отсчитывается в пределах от 0 до $+90^\circ$ к Северному полюсу мира и от 0 до -90° к Южному полюсу мира.

За начальную точку отсчета на небесном экваторе принимается точка весеннего равноденствия, где Солнце бывает в день весеннего равноденствия, около 21 марта.

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

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

$$h_p = \varphi.$$

Пусть OP — ось мира, параллельная оси Земли; OQ — проекция части небесного экватора, параллельного экватору Земли; OZ — отвесная линия. Тогда высота полюса мира над горизонтом $h_p = \angle PON$, а географическая широта $\varphi = \angle Q_1O_1O$. Очевидно, что эти углы (PON и Q_1O_1O) равны между собой, поскольку их стороны взаимно перпендикулярны ($OO_1 \perp ON$, а $OQ \perp OP$). Распространяя это на Южное полушарие Земли, из которого виден Южный полюс мира, получаем правило: *высота видимого полюса мира над горизонтом равна модулю географической широты места наблюдения $h_p = |\varphi|$.*



Суточное движение звезд

При наблюдении звездного неба на протяжении одного-двух часов мы убеждаемся в том, что оно вращается как единое целое таким образом, что с одной стороны звезды поднимаются, а с другой — опускаются. Для нас,

жителей Северного полушария, звезды поднимаются с восточной части горизонта и смещаются вправо. Далее они достигают наивысшего положения в южной части неба и затем опускаются в западной части горизонта. В течение суток звездное небо со всеми находящимися на нем светилами совершает один оборот. Таким образом, *видимое суточное вращение звездного неба происходит с востока на запад, если стоять лицом к югу*, т. е. по часовой стрелке. Очевидно, что **суточное движение звезд** (светил) — наблюдаемое кажущееся явление вращения небесного свода — отражает действительное вращение земного шара вокруг оси.

Видимое движение звезд на различных географических широтах

Вращение небесной сферы может быть доказано при помощи фотографирования звездного неба неподвижным фотоаппаратом. На рисунке показана сфотографированная область звездного неба вблизи Полярной звезды.



Каждая звезда оставила след – светлую дугу. Вблизи общего центра всех дуг выделяется след, оставленный Полярной звездой. Чем продолжительнее экспозиция, тем большую дугу прочерчивает звезда. Любая из дуг составляет одну и ту же часть своей окружности. Например, при

фотографировании с двухчасовой экспозицией длина дуги равна 1/12 окружности.

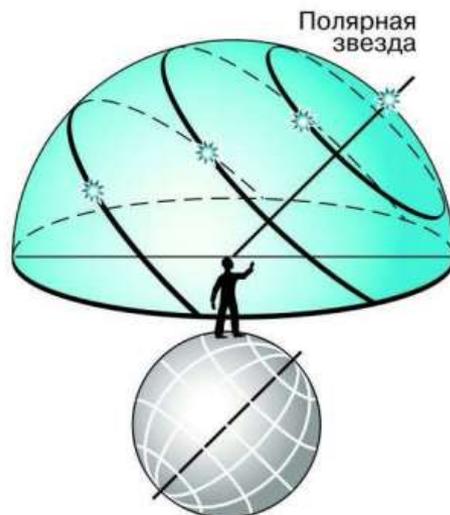
Изменение вида звездного неба в течение суток

Вид звездного неба зависит от положения наблюдателя на поверхности Земли. На Северном полюсе наблюдению доступно только северное полушарие небесной сферы, т. е. половина всех звезд; аналогичная картина открывается взору наблюдателя на Южном полюсе. Но в том и другом случаях доступные наблюдению звезды видны лишь тогда, когда Солнце находится под горизонтом. Звезды вместе с небесной сферой вращаются вокруг соответствующего полюса мира, который расположен прямо над головой – в зените (см. рис.).



Яркая Полярная звезда (α Малой Медведицы) находится вблизи Северного полюса мира, положение же Южного полюса мира, к сожалению, не отмечено никакой яркой звездой.

На других географических широтах наблюдаемы звезды как Северного, так и Южного полушарий небесной сферы (см. рис.).



Например, если смотреть из точки, лежащей на широте 45° с. ш., то Полярная звезда видна под углом 45° к горизонту; в поле зрения попадают и многие южные звезды. Однако в данном случае над горизонтом остаются все время только звезды, лежащие в пределах 45° в окрестности полюса мира. Эти околополярные незаходящие звезды можно видеть в любую ясную ночь. Условия наблюдения остальных звезд – восходящих и заходящих – в течение ночи медленно изменяются в зависимости от сезона.

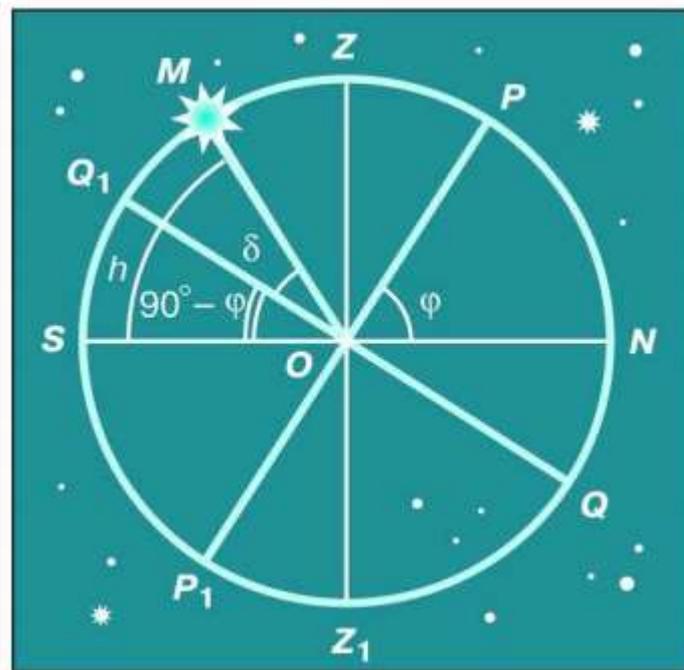
На средних географических широтах ось мира и небесный экватор наклонены к горизонту, суточные пути звезд также наклонены к горизонту. Поэтому наблюдаются **восходящие** и **заходящие** звезды, не восходящие и незаходящие.

На экваторе Земли ось мира совпадает с полуденной линией, а полюсы мира — с точками севера и юга. Небесный экватор проходит через точки востока, запада, точки зенита и надира. Суточные пути всех звезд перпендикулярны горизонту, и каждая из них половину суток находится над горизонтом.



Кульминация светил.

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



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

светила более удалена от точки зенита, чем точка верхней кульминации, и нижняя кульминация происходит через половину суток после верхней кульминации. Точка пересечения суточной параллели светила с восточной частью истинного горизонта называется **точкой восхода светила**, а точка пересечения с западной частью истинного горизонта — **точкой захода светила**.

Найдем зависимость между географическими и небесными координатами.

Высота звезды в верхней кульминации слева от зенита: $h_B = (90^\circ - \varphi) + \delta$

Если $\delta > \varphi$, то верхняя кульминация будет происходить над северным горизонтом

Высота звезды в верхней кульминации справа от зенита: $h_B = (90^\circ + \varphi) - \delta$

Высота звезды в верхней кульминации: $h_B = 90^\circ \pm (\delta - \varphi)$

«+» - если светило кульминирует к югу от зенита;

«-» - светило кульминирует к северу от зенита.

Высота звезды в нижней кульминации: $h_H = \delta - (90^\circ - \varphi)$

Определение географической широты

Первый способ. Определить географическую широту можно из наблюдения Полярной звезды.

Второй способ. Определить географическую широту можно из наблюдения верхней кульминации звезд.

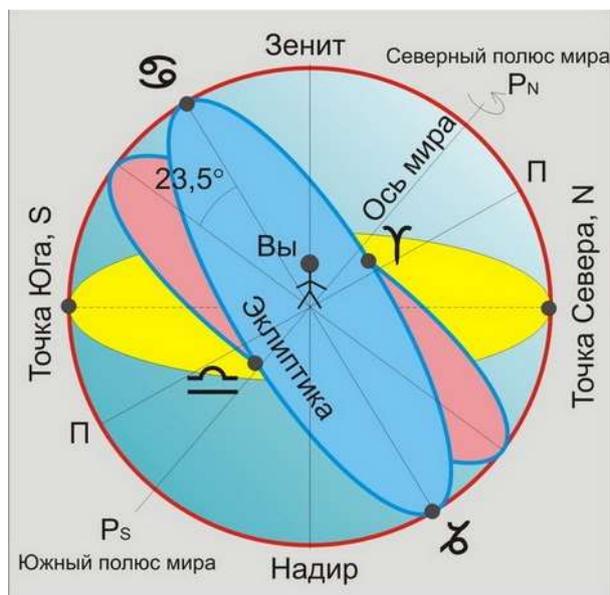
Измерив склонение светила и его высоту в моменты кульминации, легко определить географическую широту, на которой находится наблюдатель:

$$\varphi = \delta \pm (90^\circ - h_B)$$

Изменение вида звездного неба в течение года

Период вращения Земли вокруг оси, измеренный относительно звезд и поэтому получивший название звездные (или сидерические) сутки, примерно на 4 мин короче средних солнечных суток – периода вращения Земли вокруг своей оси, измеренного относительно Солнца. Это отличие обусловлено движением Земли вокруг Солнца. Так как время, по которому мы живем, т.е. обычное гражданское время, связано со средними солнечными сутками, моменты восхода и захода звезд, измеренные по этому времени, сдвигаются каждый день на 4 мин вперед по сравнению с предыдущими сутками: звезды как бы медленно перемещаются по ночному небу в западном направлении. Временами они подходят так близко к Солнцу, что становятся невидимыми – наступает вынужденный сезонный перерыв в наблюдении этих объектов.

Известно, что звезды действительно совершают собственные движения в пространстве, меняя свое положение относительно друг друга. Однако звезды расположены столь далеко от нас, что любые изменения в их положении становятся заметными невооруженному глазу через столетия. Благодаря этому обстоятельству мы можем говорить о движении Солнца, Луны, планет и других небесных тел относительно «неподвижных» звезд. Большой круг небесной сферы, по которому Солнце совершает свой путь среди звезд в течение года, называется эклиптической (см. рис.).

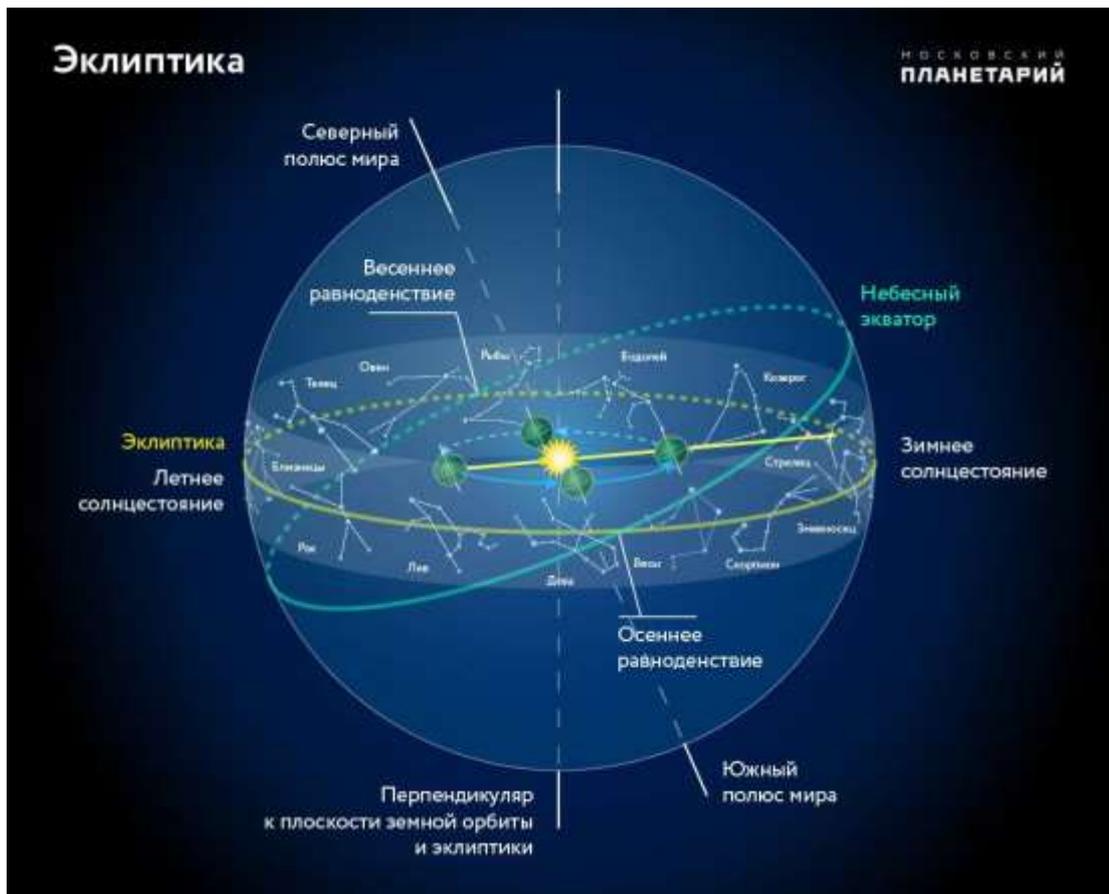


Плоскость эклиптики наклонена под углом $23,5^\circ$ к земному и небесному экваторам; это объясняется тем, что наклон оси вращения Земли к эклиптике составляет $66,5^\circ$. Именно по этой причине высота Солнца над горизонтом меняется в течение года и происходит смена времен года. Пути Луны и больших планет Солнечной системы проходят в пределах области небесной сферы шириной 8° , лежащей по обе стороны от эклиптики. Древние наблюдатели выделили в полосе шириной около 16° , тянущейся вдоль эклиптики, 12 зодиакальных созвездий, которым астрологи придавали особое значение (см. рис.).



По прошествии многих веков вследствие прецессии положение основных точек эклиптики среди окружающих звезд изменилось. Солнце и планеты могут появиться и в созвездии Змееносца; это созвездие, получившее свое название в античные времена, не включено в число зодиакальных. Современные астрономы считают астрологию и «звездные знаки» не более чем религиозными предрассудками и суевериями. Но древние знаки Зодиака используются до сих пор для обозначения зодиакальных созвездий, например знаком созвездия Овен обозначается одна из двух важнейших точек небесной сферы, в которых эклиптика пересекает небесный экватор.

Эклиптика — линия пересечения плоскости орбиты Земли с небесной сферой. Геометрически это большой круг на небесной сфере лежащий в плоскости земной орбиты. Визуально это видимый путь Солнца на фоне звезд в течение тропического года. В течение года Солнце совершает полный оборот по эклиптике, двигаясь против часовой стрелки на небесной сфере. За сутки же Солнце смещается по эклиптике к востоку на $360^\circ/365$, то есть приблизительно на 1° .



Название «эклиптика» происходит от лат. (linea) ecliptica и от др.-греч. ἑκλειψις – затмение, и связано с известным с древних времён фактом, что солнечные и лунные затмения происходят только тогда, когда Луна в своем движении по небосводу пересекает эклиптику. Кроме того, что эклиптика отмечает путь движения Солнца и показывает линию, вдоль которой происходят затмения, она отмечает на небе линию по которой «бродят» планеты, Луна и астероиды в течение года.

Плоскость эклиптики – это плоскость орбиты Земли в ее движении вокруг Солнца. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора на угол около $23,5^\circ$. В отличие от относительно быстро меняющей свой наклон плоскости небесного экватора, плоскость эклиптики более стабильна относительно удалённых звёзд и квазаров, хотя и она подвержена небольшим изменениям из-за возмущений от планет Солнечной системы. Все планеты Солнечной системы движутся практически в плоскости эклиптики, в одном направлении с вращением Солнца.

Эклиптика - большой круг небесной сферы, по которому происходит видимое годичное движение Солнца.

$\delta_N = +23^\circ 26'$ - день летнего солнцестояния.

$\delta_S = -23^\circ 26'$ - день зимнего солнцестояния.

Эклиптические созвездия - созвездия, по которым проходит эклиптика. Их 13: Рыбы, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Змееносец, Стрелец, Козерог, Водолей. 12 созвездий за исключением Змееносца называют **зодиакальными**. Начало отсчёта знаков зодиака было установлено от точки весеннего равноденствия. Точка весеннего равноденствия примерно каждые 2150 лет смещается на один знак зодиака. Это объясняется прецессией. **Прецессия (предварение равноденствий)** - это явление постепенного смещения точек весеннего и осеннего равноденствий навстречу видимому годичному движению Солнца, возникающее из-за медленного раскачивания оси вращения земного шара.

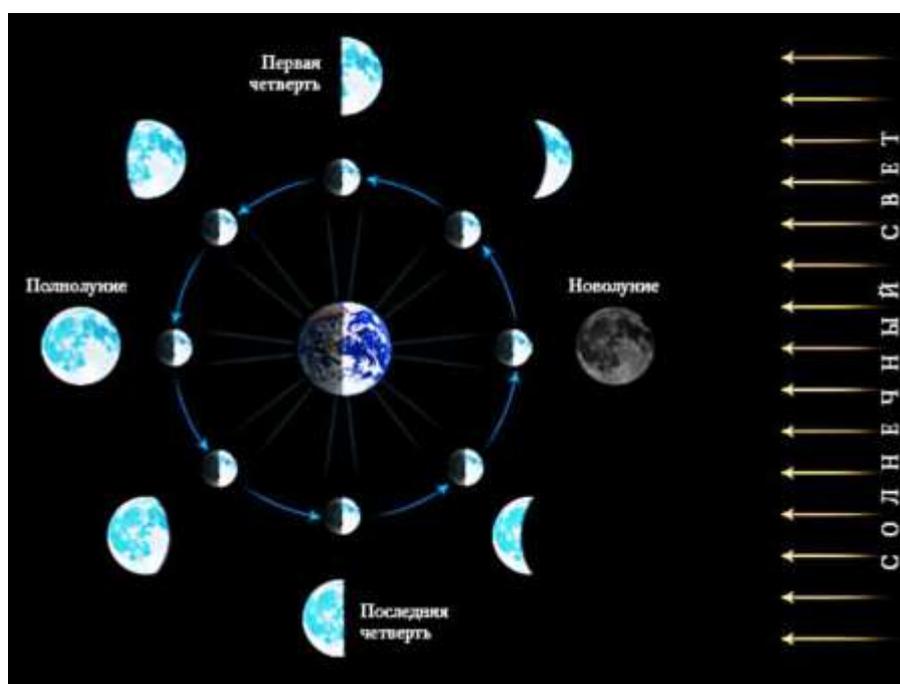
За начало движения Солнца по эклиптике принимается день весеннего равноденствия - 21 марта. **Солнцестояние** - момент прохождения центра Солнца через точки эклиптики, наиболее удалённые от экватора небесной сферы. Летнее солнцестояние 21 июня (самый длинный день в году и самая короткая ночь), зимнее - 22 декабря (самая длинная ночь в году и самый короткий день).

На северном полюсе Солнце не заходит в течение полугода за горизонт, что называют полярным днём, и в течение полугода не восходит из-за горизонта, что называют полярной ночью. На экваторе день всегда равен ночи.

Движение и фазы Луны

Луна – не самосветящееся тело; она светит отраженным солнечным светом. В зависимости от положения, которое Луна занимает по отношению к Земле и Солнцу, мы видим то полную Луну (полнолуние), то половину видимого диска (первая или последняя четверть), то совсем не видим Луны (новолуние).

Наблюдаемая с Земли освещенная часть лунного диска называется фазой Луны (см. рис.). В новолунии Луна бывает в то время, когда она располагается между Землей и Солнцем; в полнолунии Луна находится за Землей. После новолуния Луна «растет» от узкого серпа (направленного выпуклостью вправо) до полудиска (первая четверть) и далее до полного диска (полнолуние). После полнолуния Луна «убывает» до полудиска (выпуклость направлена влево, наступает последняя четверть), затем становится узким серпом и перестает быть видимой в новолунии. Полный цикл смен лунных фаз (синодический месяц) составляет примерно 29,5 сут.

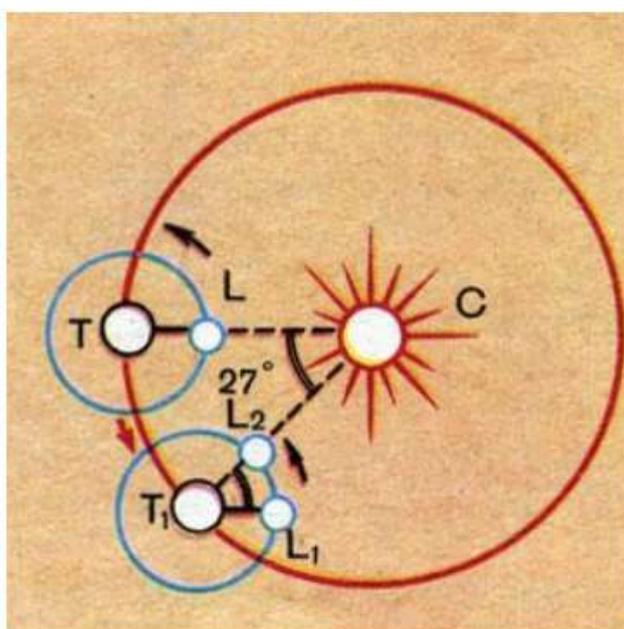


Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите в ту же сторону, в какую Земля вращается вокруг своей оси. Видимое движение Луны среди звёзд происходит навстречу вращению неба - с запада на восток. **Сидерический (звёздный) месяц** - промежуток времени между двумя последовательными возвращениями Луны, при её видимом месячном движении, в одно и то же место небесной сферы; он равен 27 сут 7 ч 43,1

МИН.



Таким образом, синодический месяц длиннее сидерического. Это легко понять, зная, что одинаковые фазы Луны наступают при одинаковых ее положениях относительно Земли и Солнца. На рисунке взаимное расположение Земли Т и Луны L соответствует моменту новолуния. Луна L через 27,3 сут, сделав полный оборот, займет прежнее положение относительно звезд.



Земля Т за это время вместе с Луной пройдет по своей орбите относительно Солнца дугу ТТ1, равную почти 27° , так как каждые сутки она смещается примерно на 1° . Чтобы Луна L1 заняла прежнее положение относительно Солнца и Земли Т1 (пришла в новолуние), потребуется еще двое суток. Действительно, Луна проходит за сутки $360^\circ:27,3 \text{ сут} = 13^\circ/\text{сут}$, чтобы пройти дугу в 27° , ей необходимо. $27^\circ:13^\circ/\text{сут} = 2 \text{ сут}$. Так и получается, что синодический месяц Луны составляет около 29,5 земных суток

Лунный год равен 12 лунным месяцам, или 354 земных суток.

Мнемоническое правило: если лунный серп в небе похож на букву «С», то это Луна «стареющая»; если, мысленно приставив палочку к лунному серпу, можно получить букву «Р», то это Луна «растущая».

Контрольные вопросы к лекции

1. Что понимают под созвездием?
2. Каким образом созвездия получили свои названия? Приведите примеры названий созвездий.
3. Какие системы небесных координат вам известны? В чем заключается принципиальная разница между различными системами небесных координат?
4. Дайте описание горизонтальной и экваториальной системы координат. Какие координаты используются в этой системе?
5. Что такое кульминация светила?
6. Какие точки называются точками восхода и захода светил?
7. Какая зависимость существует между географической широтой места наблюдения и соответствующими горизонтальной и экваториальной координатами светила?
8. Как приближенно определить географическую широту места из наблюдения Полярной звезды?
9. Почему полуденная высота Солнца в течение года меняется?
10. В каком направлении происходит видимое годичное движение Солнца относительно звёзд?

Лекция 3 Солнечные и лунные затмения. Время и календарь

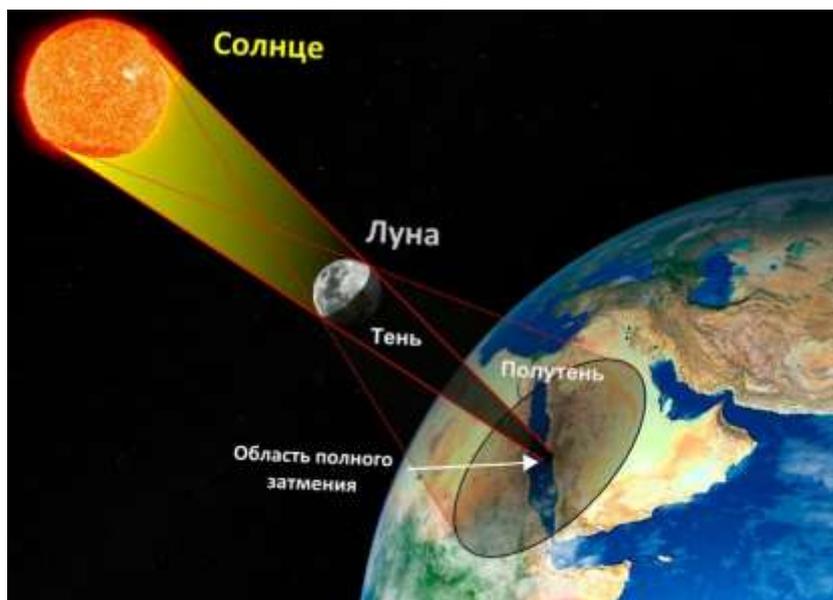
Солнечные и лунные затмения

Затмение – это астрономическое явление, при котором одно небесное тело покрывает другое.

Когда Луна при своем движении вокруг Земли полностью или частично заслоняет Солнце, происходят солнечные затмения (см. рис.).



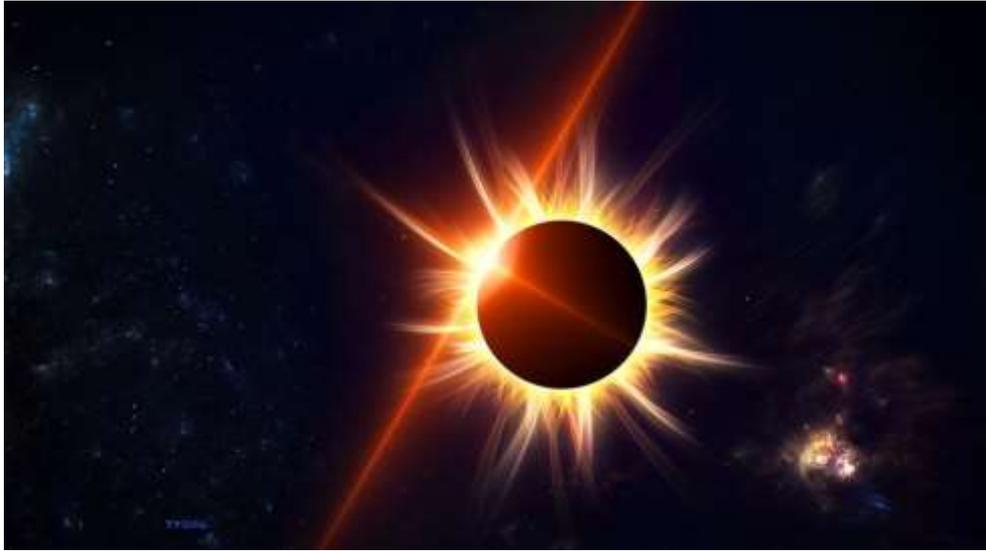
Во время полного солнечного затмения Луна закрывает весь диск Солнца (это возможно благодаря тому, что видимые диаметры Луны и Солнца почти одинаковы). Полное солнечное затмение можно наблюдать лишь из тех точек земной поверхности, где проходит полоса полной фазы. Так называется полоса, которую как бы прочерчивает по земной поверхности сходящийся конус лунной тени (см. рис.).



По обе стороны полосы полной фазы происходит частное затмение Солнца, во время которого Луна заслоняет не весь солнечный диск, а лишь часть его. Наблюдается частное солнечное затмение из тех мест земной поверхности, которые охватывает расходящийся конус лунной полутени (см. рис. выше).

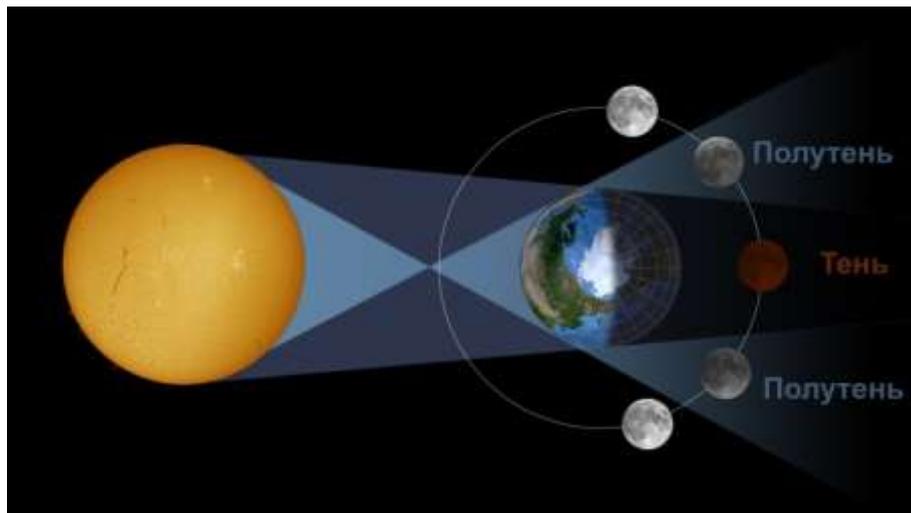
Ширина полосы полной фазы солнечного затмения и его продолжительность зависят от взаимных расстояний Солнца, Земли и Луны. Вследствие изменения расстояний видимый угловой диаметр Луны тоже изменяется. Когда он чуть больше солнечного, полное затмение Солнца может длиться до 7,5 мин, когда равен, то одно мгновение, если же он меньше, то Луна вообще не закрывает Солнце полностью. В последнем случае происходит кольцеобразное затмение: вокруг темного лунного диска видно узкое яркое солнечное кольцо.

Полное солнечное затмение – очень красивое явление. Во время затмения Солнце имеет вид черного диска, окруженного нежным сиянием (коронай) (см. рис.). Дневной свет настолько ослабевает, что иногда можно видеть на небе яркие звезды и планеты.



Когда при движении вокруг Земли Луна попадает в конус земной тени, которую отбрасывает освещаемый Солнцем земной шар, происходит полное лунное затмение (см. рис.). Если же в тень Земли погружается лишь часть Луны, то происходит частное затмение Луны.

Полное лунное затмение может длиться примерно 1,5 – 2 ч (столько времени, сколько требуется Луне, чтобы пересечь конус земной тени). Его можно наблюдать со всего ночного полушария Земли, где Луна в момент затмения находится над горизонтом. Поэтому в данной местности полные лунные затмения удастся наблюдать значительно чаще солнечных.



Во время полного лунного затмения Луны лунный диск остается видимым, но он приобретает обычно темно-красный оттенок (см. рис.). Это явление объясняется преломлением солнечных лучей в земной атмосфере. Проходя через земную атмосферу, солнечные лучи рассеиваются и

преломляются. Причем рассеивается в основном коротковолновое излучение (соответствующее синему и голубому участкам спектра, чем и обусловлен голубой цвет нашего дневного неба), а преломляется длинноволновое (соответствующее красному участку спектра). Преломляясь в земной атмосфере, длинноволновое солнечное излучение попадает в конус земной тени и освещает Луну.



Легко сообразить, что солнечное затмение происходит, когда Луна бывает в новолунии, а лунное – когда в полнолунии. Однако далеко не в каждое новолуние и полнолуние происходят затмения. Дело в том, что плоскость, в которой Луна движется вокруг Земли, наклонена к плоскости эклиптики под углом примерно 5° . Чаще всего в году бывает только два солнечных и два лунных затмения. В 1982 г. было семь затмений – четыре частных солнечных и три полных лунных (это максимально возможное число затмений в год).

Еще древние астрономы заметили, что через определенный промежуток времени лунные и солнечные затмения повторяются в определенном порядке. Этот промежуток времени был назван саросом (в переводе с египетского – повторение). Существование сароса объясняется закономерностями, наблюдаемыми в движении Луны. Сарос составляет 6585,32 сут (≈ 18 лет 11 дней). В течение каждого сароса происходит 70 затмений, из них 42 солнечных и 28 лунных. Однако в данном месте Земли лунные затмения наблюдаются чаще, чем солнечные, так как лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли. Полные солнечные

затмения в данной точке земной поверхности видны не чаще одного раза в 200–300 лет.

Зная продолжительность сароса, можно приближенно предсказывать время наступления затмений. В настоящее время разработаны очень точные методы предсказания солнечных и лунных затмений. Астрономы неоднократно помогали историкам уточнять даты исторических событий, которые, по свидетельству летописей, совпадали с затмениями. В Анадыре очередное полное солнечное затмение будет наблюдаться 30 марта 2033 г. Наблюдения затмений позволяют ученым получать важные сведения об атмосферах Земли и Солнца, а также о движении Луны. Во время полных затмений Солнца создаются условия, благоприятные для наблюдения отклонения луча света звезды в поле тяготения Солнца. Это позволяет получить одно из важнейших доказательств теории тяготения Эйнштейна (общей теории относительности).

Время и календарь

Связь с географической долготой. Тысячи лет назад люди заметили, что многое в природе повторяется. Именно тогда возникли первые единицы времени - день, месяц, год. С помощью простейших астрономических приборов было установлено, что в году около 360 дней, и приблизительно за 30 дней силуэт Луны проходит цикл от одного полнолуния к следующему. Поэтому халдейские мудрецы приняли в основу шестидесятеричную систему счисления: сутки разбили на 12 ночных и 12 дневных часов, окружность - на 360 градусов. Каждый час и каждый градус были разделены на 60 минут, а каждая минута - на 60 секунд.

Однако последующие более точные измерения безнадежно испортили это совершенство. Оказалось, что Земля делает полный оборот вокруг Солнца за 365 суток 5 часов 48 минут и 46 секунд. Луне же, чтобы обойти Землю, требуется от 29,25 до 29,85 суток.

Периодические явления, сопровождаемые суточным вращением небесной сферы и видимое годовое движение Солнца по эклиптике лежат в основе различных систем счета времени.

Время – основная физическая величина, характеризующая последовательную смену явлений и состояний материи, длительность их бытия.

Короткие - сутки, час, минута, секунда

Длинные - год, квартал, месяц, неделя.

Солнечное время, связанное: с видимым движением центра диска Солнца по эклиптике (истинное солнечное время) или движением "среднего Солнца" - воображаемой точки, равномерно перемещающейся по небесному экватору за тот же промежуток времени, что и истинное Солнце (среднее солнечное время)

Истинные солнечные сутки - промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями центра Солнца. Неравномерное движение Земли по своей орбите вызывает неравномерное видимое перемещение Солнца по небесной сфере.

Средние солнечные сутки - промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными кульминациями среднего экваториального Солнца (воображаемой точки, которая движется равномерно по небесному экватору).

Время, измеренное на данном меридиане, называется его местным временем, и оно одинаково для всех пунктов, находящихся на нём. Чем восточнее земной меридиан, тем раньше на нём начинаются сутки.

Местное время в двух пунктах будет отличаться ровно на столько, на сколько отличается их географическая долгота:

$$T_1 - T_2 = \lambda_1 - \lambda_2$$

Местное среднее солнечное время Гринвичского меридиана называется **всемирным временем Universal Time (UT)**.

$$T_1 = UT + \lambda_1$$

Всемирное время определяется как местное среднее солнечное время на нулевом (Гринвичском) меридиане (T_0 , UT - Universal Time). Так как в повседневной жизни местным временем пользоваться нельзя (так как в Колыбельке оно одно, а в Новосибирске другое (разные ?)), поэтому и утверждено было Конференцией по предложению канадского инженера-железнодорожника Сэнфорда Флеминга (8 февраля 1879 при выступлении в Канадском институте в г.Торонто) поясное время, разделив земной шар на 24 часовых зоны (по $360:24=15^{\circ}$, по $7,5^{\circ}$ от центрального меридиана). Нулевой часовой пояс расположен симметрично относительно нулевого (гринвичского) меридиана. Нумерация поясов дается от 0 до 23 с запада на восток. Реальные границы поясов совмещены с административными границами районов, областей или государств. Центральные меридианы часовых поясов отстоят друг от друга ровно на 15° (1 час), поэтому при переходе из одного часового пояса в другой время изменяется на целое число часов, а число минут и секунд не изменяется. **Новые календарные сутки (и Новый год) начинаются на линии перемены даты (демаркационной линии), проходящей в основном по меридиану 180° восточной долготы вблизи северо-восточной границы Российской Федерации**

Линия перемены даты - условная линия на поверхности земного шара, проходящая от полюса до полюса, по разные стороны которой местное время отличается на сутки.

Западнее линии перемены дат число месяца всегда на единицу больше, нежели к востоку от нее. При пересечении этой линии с запада на восток календарное число уменьшается на единицу, а при пересечении линии с востока на запад календарное число увеличивается на единицу, что исключает ошибку в счете времени при кругосветных путешествиях и перемещениях людей из Восточного в Западное полушария Земли.

Поясное время - местное среднее солнечное время на срединном меридиане географического часового пояса. Поясное время, которое принято в конкретном месте, отличается от всемирного на число часов, равных номеру его часового пояса.

$$T = UT + n$$

Декретное время - это поясное время, измененное на целое число часов правительственным распоряжением. Для России равно поясному, плюс 1 час.

Московское время - это декретное время второго часового пояса (плюс 1 час): $T_m = T_0 + 3$ (часа).

Летнее время - декретное поясное время, изменяемое дополнительно на плюс 1 час по правительственному распоряжению на период летнего времени с целью экономии энергоресурсов. По примеру Англии, которая в 1908г впервые вводит переход на летнее время, сейчас 120 стран мира, в том числе и Российская Федерация осуществляет ежегодно переход на летнее время.

Система счета времени в нашей стране.

1) С 1 июля 1919г вводится поясное время (декрет СНК РСФСР от 8.02.1919г)

2) В 1930г устанавливается **Московское (декретное) время** 2-го часового пояса в котором находится Москва, переводом на один час вперед по сравнению с поясным временем (+3 к Всемирному или +2 к средневропейскому). Отменено в феврале 1991г и опять восстановлено с января 1992г.

3) Этим же Декретом 1930г отменяется действующее с 1917г переход на летнее время (20 апреля и возврат 20 сентября), впервые введено в Англии в 1908г.

4) В 1981г возобновляется в стране переход на летнее время.

5) В 1992г восстановлено Указом Президента, отмененное в феврале 1991г, декретное (Московское) время с 19 января 1992г с сохранением перевода на летнее время в последнее воскресенье марта в 2 часа ночи на час вперед, а на зимнее время в последнее воскресенье сентября в 3 часа ночи на час назад.

6) В 1996г Постановлением Правительства РФ №511 от 23.04.1996г летнее время продлевается на один месяц и заканчивается теперь в последнее воскресенье октября. Новосибирская область переводится из 6-го часового пояса в 5-й.

Итак, для нашей страны в зимнее время $T = UT + n + 1ч$, а в летнее время $T = UT + n + 2ч$

Служба точного времени

Для точного счета времени необходим эталон, из-за неравномерности движения Земли по эклиптике. В октябре 1967г в Париже 13 Генеральная конференция Международного комитета мер и весов определяет продолжительность атомного секунды - промежутка времени, за который совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих частоте излучения (поглощения) атомом Цезия - 133. Точностью атомных часов - ошибка в 1с за 10000 лет.

Международное атомное время - время, в основу измерения которого положены электромагнитные колебания, излучаемые атомами или молекулами при переходе из одного энергетического состояния в другое.

С 1 января 1972г СССР и многие страны мира перешли на атомный стандарт времени. Транслируемые по радио сигналы точного времени передаются по атомным часам для точного определения местного времени (т.е географической долготы - местонахождения опорных пунктов, находя моменты кульминации звезд), а также для авиационной и морской навигации

Календарь - система счёта длительных промежутков времени, в которых устанавливается определённая продолжительность месяцев, их порядок в году и начальный момент отсчёта лет. В основе любого календаря лежат периодические астрономические явления: вращение Земли вокруг своей оси, изменения лунных фаз, вращение Земли вокруг Солнца.

В **лунном календаре за основу взят синодический месяц** - промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами Луны. Он равен 29 сут. 12 ч 44 мин. Год делится на 12 лунных месяцев, которые попеременно содержат в себе 30 или 29 суток. Лунный календарь короче солнечного года примерно на 10 суток. Распространен в современном исламском мире.

Лунно-солнечный календарь - календарь, в основе которого лежит периодичность видимых движений Луны и Солнца. 19 солнечных лет = 235 лунным месяцам. Такая система сохранилась в еврейском календаре.

Солнечный календарь - разновидность календаря, в основе которого лежит тропический год, т. е. период смены времён года. **Тропический год** - промежуток времени между двумя последовательными прохождением центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Он равен 365 д 05 ч 48 мин 45,19 с.

Предшественником современного календаря был календарь, получивший название юлианского. **Високосный год в юлианском календаре** - это каждый четвёртый год, продолжительность которого равна 366 дням. Продолжительность года в юлианском календаре отличалась от тропического года на 11 мин 14 с.

Григорианский календарь - система исчисления времени, в которой продолжительность года принята равной 365,2425 суток.

Россия вплоть до 1918 года жила по юлианскому календарю. Переход на григорианский календарь в России произошёл 26 января 1918 г. Новый стиль календаря начал в России свой отсчет с 1 февраля 1918 года. Декретом СНК

(аббревиатура Совета Народных Комиссаров) от 24.01.1918 было предписано 1 февраля 1918 года считать 14-м февраля.

Нумерация лет и по новому, и по старому стилю ведётся от года Рождества Христова, наступления новой эры. В России новая эра была введена указом Петра I, согласно которому после 31 декабря 7208 г. «от сотворения мира» наступило 1 января 1700 г. от Рождества Христова.

Дополнительные сведения

Таблица соотношений между юлианскими и григорианскими датами

юлианская дата	григорианская дата	разница
с 1582, 5.X по 1700, 18.II	1582, 15.X –1700, 28.II	10дн ей
с 1700, 19.II по 1800, 18.II	1700, 1.III –1800, 28.II	11дн ей
с 1800, 19.II по 1900, 18.II	1800, 1.III –1900, 28.II	12дн ей
с 1900, 19.II по 2100, 18.II	1900, 1.III –2100, 28.II	13дн ей

Как правильно переводить из старого стиля в новый исторические даты? Надо воспользоваться тем правилом, которое действовало в данную эпоху. Например, если событие произошло в XVI–XVII веках, прибавлять 10 дней, если в XVIII веке – 11, в XIX веке – 12, наконец, в XX и XXI веках – 13 дней.

При этом следует помнить, что переход на григорианский календарь происходил в разных странах в разное время: если католические страны почти сразу же ввели «папский» календарь, то Великобритания приняла его только в 1752 году, Швеция – в 1753-м.

Однако ситуация меняется, когда речь заходит о событиях русской истории. Следует учитывать, что в православных странах при датировании того или иного события уделялось внимание не только собственно числу месяца, но и обозначению этого дня в церковном календаре (празднику, памяти святого). Между тем церковный календарь не подвергся никаким изменениям, и Рождество, к примеру, как праздновалось 25 декабря 300 или 200 лет назад, так празднуется в этот же день и теперь. Иное дело, что в гражданском «новом стиле» этот день обозначается как «7 января».

Обратим внимание, что при переводе дат праздников и памятных дней на новый стиль Церковь руководствуется текущим правилом пересчета (+13). Например: перенесение мощей святителя Филиппа, митрополита Московского, празднуется 3 июля ст. ст. – или 16 июля н. ст. – хотя в 1652 году, когда произошло это событие, теоретически юлианское 3 июля соответствовало григорианскому 13 июля. Но именно теоретически: в то время эту разницу могли бы заметить и зафиксировать разве что послы иностранных государств, уже перешедших на «папский» календарь. Позднее связи с Европой стали более тесными, и в XIX – начале XX века в календарях и периодических изданиях ставили двойную дату: по старому и новому стилю. Но и здесь при исторических датировках приоритет должен отдаваться юлианской дате, так как именно на нее ориентировались современники. А поскольку юлианский календарь как был, так и остается календарем Русской Церкви, нет никаких оснований переводить даты иначе, чем это принято в современных церковных изданиях, – то есть с разницей в 13 дней независимо от даты конкретного события.

Русский флотоводец Федор Федорович Ушаков скончался 2 октября 1817 года. В Европе этот день обозначался как (2+12 =) 14 октября. Однако Русская Церковь празднует память праведного воина Феодора именно 2 октября, что в современном гражданском календаре соответствует (2+13 =) 15 октября.

Бородинская битва произошла 26 августа 1812 года. В этот день Церковь празднует Сретение Владимирской иконы Божией Матери в память чудесного избавления от полчищ Тамерлана. Поэтому, хотя в XIX веке 12 юлианское августа соответствовало 7 сентября (и именно этот день закрепился в советской традиции как дата Бородинской битвы), для православных людей славный подвиг русского воинства был совершен в день Сретения – то есть 8 сентября по н.ст.

Таким образом, даты событий русской истории до 1918 года следует давать по юлианскому календарю, в скобках указывая соответствующую дату современного гражданского календаря — так, как это делается для всех церковных праздников. Например: 25 декабря 1XXX г. (7 января н.ст.).

Контрольные вопросы к лекции:

1. Почему затмения Луны и Солнца не происходят каждый месяц?
2. Каков минимальный промежуток времени между солнечным и лунным затмениями?
- 3) Каким календарем мы пользуемся?
- 4) Чем старый стиль отличается от нового?
- 5) Что такое всемирное время?
- 6) Что такое полдень, полночь, истинные солнечные сутки?
- 7) Чем объясняется введение поясного времени?
- 8) Как определить поясное, местное время?

Лекция 4

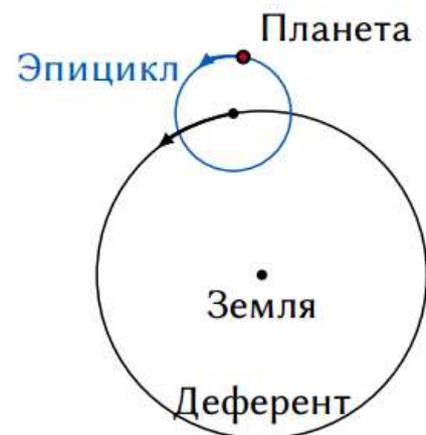
Небесная механика. Законы движения небесных тел. Законы Кеплера. Закон всемирного тяготения.

Развитие представлений о строении мира. Геоцентрическая система мира. Становление гелиоцентрической системы мира.

Системы мира – это представления о расположении в пространстве и движении Земли, Солнца, Луны, планет, звёзд и других небесных тел. Одна из первых гипотез построения Солнечной системы была предложена древнегреческим астрономом Клавдием Птолемеем во II в. н.э. Он предположил, что все небесные тела движутся по круговым орбитам вокруг неподвижной Земли. Земля является центром вращающейся системы Вселенной. Эта система Мира получила название *геоцентрической*.

Клавдий Птолемей (ок. 87–165 гг. н.э.)

1. Земля шарообразна и находится в центре Вселенной;
2. Земля неподвижна;
3. все небесные тела движутся вокруг Земли;
4. движения небесных тел происходят по окружностям с постоянной скоростью



Система мира Птолемея называется **геоцентрической**. Солнце и Луна движутся вокруг Земли по деферентам без эпициклов.

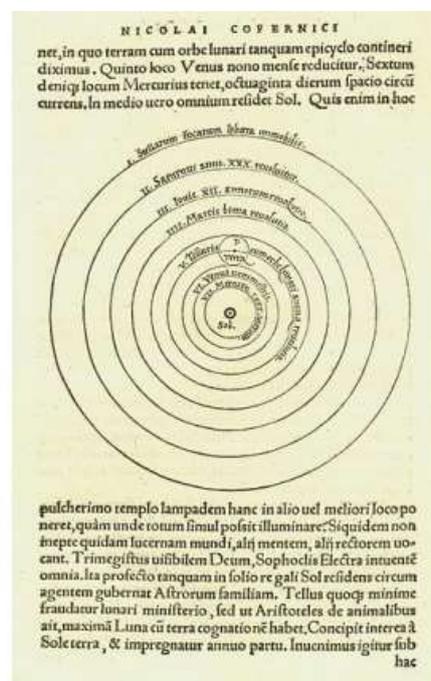
Система мира Птолемея объясняла видимые движения планет и позволяла предвычислять их положения с точностью, удовлетворявшей наблюдениям невооруженным глазом.

Разногласия же теории с наблюдениями, которые обнаруживались по мере повышения точности наблюдений, устранялись путем усложнения системы.

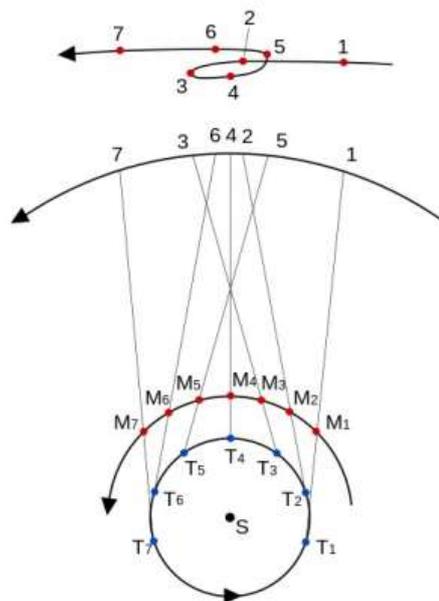
В 1543 г. польский астроном **Николай Коперник** опубликовал сочинение «Об обращениях небесных сфер», в котором развил представление о *гелиоцентрической системе* Мира. Согласно этому представлению, центром вращающейся системы является Солнце, вокруг него по круговым орбитам движутся планеты, в том числе и Земля.

1. В центре мира находится Солнце, а не Земля;
2. Земля вращается вокруг своей оси;
3. Земля и другие планеты, обращаются вокруг Солнца по окружности;
4. Все движения представляются в виде комбинации равномерных круговых движений;
5. кажущиеся прямые и попятные движения планет принадлежат не им, но Земле.

К началу XVI в. геоцентрическая система Птолемея настолько усложнилась, что не могла уже удовлетворять практическим требованиям и, в первую очередь, мореплаванию. Нужны были более простые методы вычисления положения планет, и такие методы были созданы гениальным польским ученым Николаем Коперником



Сложные видимые прямые и попятные движения планет являются результатом сочетания двух действительных движений — движения планеты и движения Земли по их орбитам вокруг Солнца.



Последователь Коперника **Джордано Бруно** (1548–1600) утверждал, что во Вселенной нет и не может быть центра, что Солнце – это только центр Солнечной системы.

Конфигурации планет и условия их видимости. Синодический и сидерический (звездный) периоды обращения планет.

В состав Солнечной системы входят восемь больших планет, включая Землю.

Нижние (или внутренние) планеты (Меркурий, Венера) - это планеты, орбиты которых расположены ближе к Солнцу, чем орбита Земли. **Верхние** (или внешние) планеты (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) - это планеты, орбиты которых расположены за земной орбитой.

Все они, как и наша планета, обращаются вокруг центрального тела нашей системы — Солнца. Все планеты Солнечной системы принято разделять на **нижние и верхние**.



Нижними называются планеты, орбиты которых расположены ближе к Солнцу, чем орбита Земли (это Меркурий и Венера).

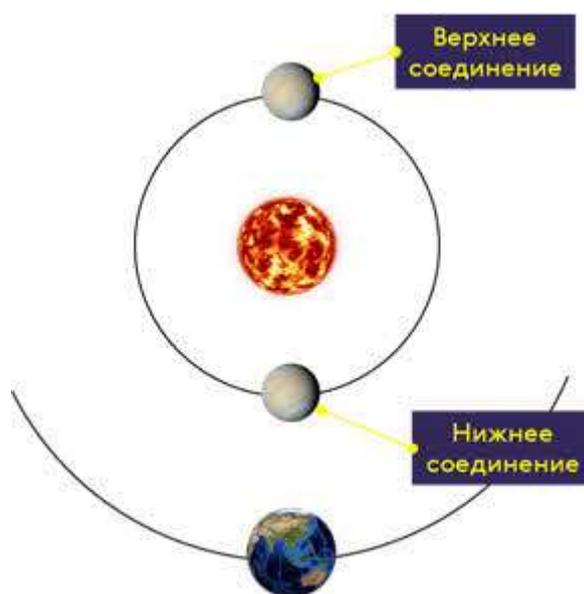
Следовательно, если орбита планеты будет находиться за орбитой Земли, то она будет называться **верхней** (это Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун).

Конечно же из-за разной удалённости от Солнца, а также различной орбитальной скорости, условия видимости всех планет с Земли меняются по-разному. Поэтому принято выделять некоторые характерные взаимные расположения планет, Земли и Солнца, которые называются **конфигурациями**.

Ясно, что условия видимости планеты в той или иной конфигурации зависят от её расположения по отношению к Солнцу, которое освещает планету, и Земли, с которой мы эту планету наблюдаем.

В связи с этим, например, для нижних планет выделяют **верхние** и **нижние соединения**, а также **элонгации**.

Соединением называется расположение небесных тел, при котором имеет место совпадение их долгот (обычно планет или планеты и Солнца), с точки зрения земного наблюдателя.

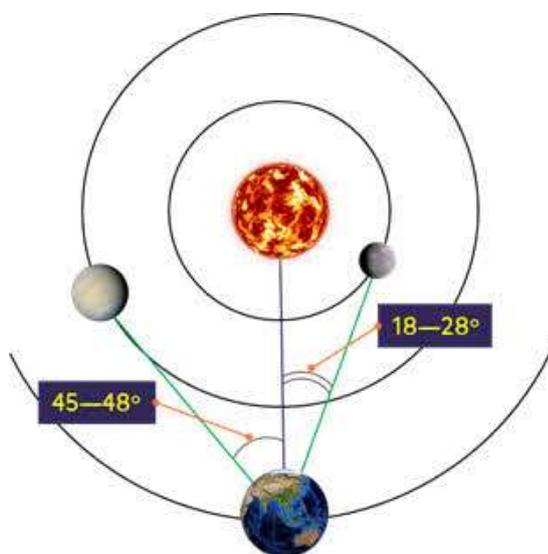


В нижнем соединении планета находится ближе всего к Земле. А в верхнем — наиболее удалена от неё.

При соединениях, как правило, планеты не видны, поскольку они прячутся либо за Солнцем, либо в его лучах.

Элонгацией называется такое положение планеты, при котором для земного наблюдателя её угловое расстояние от Солнца максимально.

Из-за того, что орбиты планет не являются круговыми, наибольшие элонгации не имеют постоянного значения. Так у Венеры они колеблются в пределах от 45° до 48° градусов. А у Меркурия всего от 18° градусов до 28° . Так как Меркурий и Венера не отходят далеко от Солнца, то ночью они не видны.



При этом продолжительность их утренней или вечерней видимости не превышает четырёх часов для Венеры и полутора часов для Меркурия. Иногда Меркурий и вовсе не виден, так как его время восхода и захода приходится на светлое время суток.

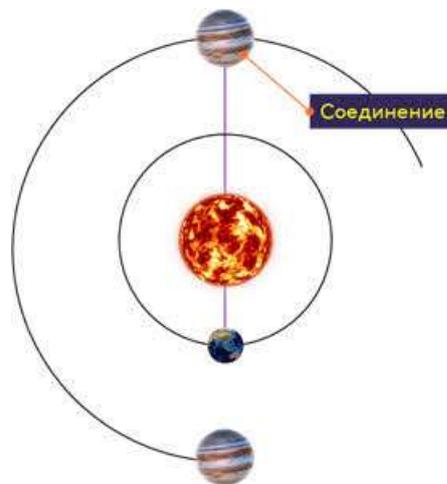
Также принято различать **восточную и западную элонгации**. В восточной элонгации планету можно наблюдать на небе вечером после захода Солнца, а в западной — утром перед восходом Солнца.

Что касается верхних планет, то для них конфигурация несколько иная. Так, например, если планета находится вблизи точки, диаметрально противоположной Солнцу, то такая конфигурация называется **противостоянием**.



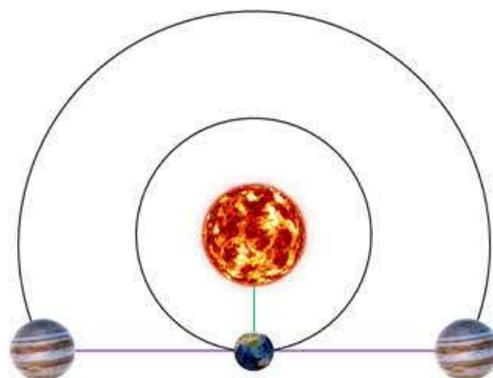
Это наиболее благоприятное время для наблюдения планеты, так как она располагается ближе всего к Земле и повернута к ней своей освещённой стороной. При этом её верхняя кульминация часто происходит около полуночи.

В **верхнем соединении** планета наиболее удалена от Земли и наблюдать её в это время невозможно, так как она теряется в лучах нашей звезды.



Внешняя планета может находиться на любом угловом расстоянии от Солнца (в пределах $0—180^\circ$). Но если угол между направлениями с Земли на верхнюю планету и на Солнце составляет 90° , то говорят, что планета находится в **квадратуре**.

Как и в случае с элонгацией, принято различать **западную** и **восточную квадратуры**.



В западной квадратуре восход планеты происходит где-то около полуночи. Соответственно в восточной квадратуре около полуночи планета заходит.

Конечно же из-за обращения всех планет вокруг Солнца их конфигурации периодически повторяются. А промежуток времени между двумя последовательными одноименными конфигурациями планеты (например, верхними соединениями) называется её **синодическим периодом**. Проще говоря, это промежуток времени, по истечении которого планета (или другое тело Солнечной системы) для наблюдателя с Земли возвращается в прежнее положение относительно Солнца.

Планета	Синодический период, лет
Меркурий	0,317
Венера	1,599
Марс	2,135
Юпитер	1,092
Сатурн	1,035
Уран	1,012
Нептун	1,006

Синодические периоды планет были рассчитаны ещё в глубокой древности, когда считалось, что все тела обращаются вокруг Земли. Однако мы уже знаем, что Земля не является неподвижным телом, а вместе с остальными планетами движется вокруг Солнца. Так вот, промежуток времени, в течение которого планета совершает один полный оборот вокруг

Солнца по орбите относительно звёзд, называется **звёздным** или **сидерическим периодом обращения планеты**.

Часто, для простоты, сидерический период называют **годом**. К примеру, Земной год, Меркурианский год, Юпитерианский год и так далее.

Сидерический период обращения планеты вокруг Солнца с движущейся Земли определить невозможно, так как к его окончанию Земля успеет сместиться в новую точку пространства, и проекция планеты на фон неподвижных звёзд также оказывается смещённой. Получится, что планета может не дойти либо перейти ту точку среди звёзд, откуда было замечено начало её движения. Но между синодическим (то есть видимым) и сидерическим (то есть истинным) периодами планет существует взаимосвязь. Установим её.

VIDEOUROKI

Взаимосвязь синодического и сидерического периодов

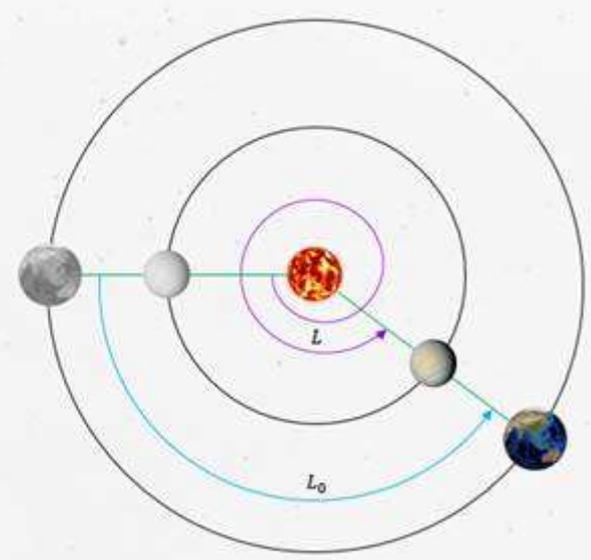
P — сидерический период обращения планеты.
 S — синодический период обращения планеты.
 T — сидерический период обращения Земли.

$n = \frac{360^\circ}{T}$ — среднее движение планеты.
 $n_0 = \frac{360^\circ}{P}$ — среднее движение Земли.

Для нижних планет: $P < T \Rightarrow n > n_0$.

Угловой путь Земли за S : $L_0 = n_0 S = \frac{360^\circ}{P} S$.

Угловой путь планеты за S : $L = 360^\circ + L_0$;

$$L = nS = \frac{360^\circ}{T} S.$$


Взаимосвязь синодического и сидерического периодов

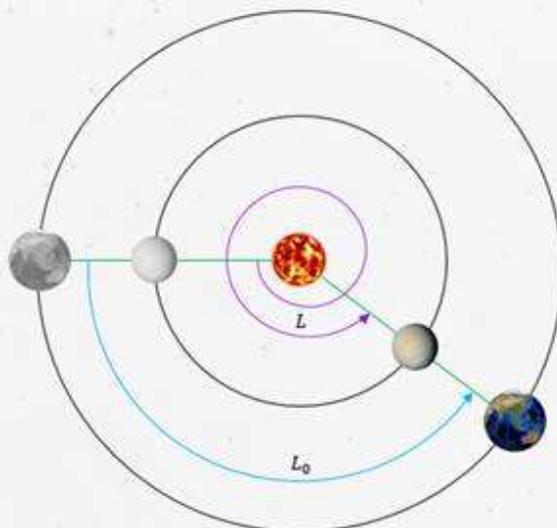
Угловой путь Земли за S : $L_0 = n_0 S = \frac{360^\circ}{P} S$.

Угловой путь планеты за S : $L = 360^\circ + L_0$;

$$L = nS = \frac{360^\circ}{T} S.$$

$$\frac{360^\circ}{T} S = 360^\circ + \frac{360^\circ}{P} S \quad | : 360^\circ S$$

$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{T}$ — уравнение синодического движения для нижних планет.



Уравнение синодического движения верхних планет можно получить аналогичными рассуждениями. Единственное отличие состоит в том, что их сидерический период обращения больше сидерического периода Земли. Поэтому для верхних планет уже Земля, забега вперёд, совершает один оборот вокруг Солнца и догоняет планету.

Взаимосвязь синодического и сидерического периодов

$n = \frac{360^\circ}{T}$ — среднее движение планеты.

$n_0 = \frac{360^\circ}{P}$ — среднее движение Земли.

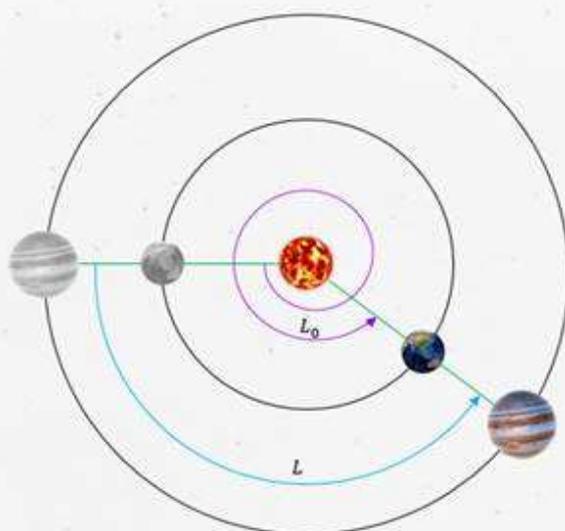
Для нижних планет: $P > T \Rightarrow n < n_0$.

Угловой путь Земли за S : $L_0 = 360^\circ + L = \frac{360^\circ}{P} S$.

Угловой путь планеты за S : $L = \frac{360^\circ}{T} S$.

$$\frac{360^\circ}{P} S = 360^\circ + \frac{360^\circ}{T} S \quad | : 360^\circ S$$

$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{P}$ — уравнение синодического движения для верхних планет.



Полученные нами два уравнения дают средние значения синодических периодов обращения планет. Не трудно увидеть, что, зная синодический

период планеты, можно определить и её звёздный период обращения вокруг Солнца.

Для примера давайте определим звёздный период Меркурия, если известно, что его нижние соединения повторяются через 116 суток.

ДАНО

$$S = 116 \text{ сут}$$

$$T = 365 \text{ сут}$$

$$P = ?$$

РЕШЕНИЕ

Уравнение синодического движения для нижних планет: $\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{T}$.

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{S} + \frac{1}{T} = \frac{T+S}{TS}$$

$$\text{Звёздный период Меркурия: } P = \frac{TS}{T+S}$$

$$P = \frac{365 \text{ сут} \cdot 116 \text{ сут}}{365 \text{ сут} + 116 \text{ сут}} = \frac{42\,340 \text{ (сут)}^2}{481 \text{ сут}} \cong 88 \text{ сут.}$$



ОТВЕТ: период обращения Меркурия вокруг Солнца составляет 88 сут.

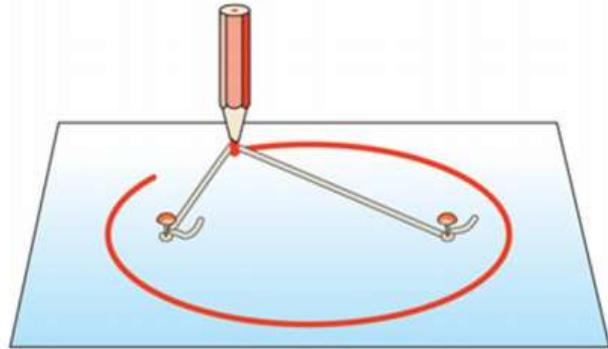
Законы Кеплера

С древнейших времен считалось, что небесные тела движутся по «идеальным кривым» - окружностям. В теории Николая Коперника, создателя гелиоцентрической системы мира, круговое движение также не подвергалось сомнению. Наблюдаемое положение планет не соответствовало предвычисленному в соответствии с теорией кругового движения планет вокруг Солнца. В XVII веке ответ на этот вопрос дал немецкий астроном Иоганн Кеплер, который используя многолетние наблюдения Тихо Браге, сформулировал **законы движения планет**:

1. Все планеты обращаются по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

Эллипс определяется как геометрическое место точек, для которых сумма расстояний от двух заданных точек (фокусов F1 и F2) есть величина постоянная.

Эллипс определяется как геометрическое место точек, для которых сумма расстояний от двух заданных точек есть величина постоянная.



Проходящий через фокусы эллипса отрезок, концы которого лежат на эллипсе, называется его **большой осью**. Отрезок, проходящий через центр эллипса перпендикулярно большой оси, называется **малой осью эллипса**. Отрезки, проведённые из центра эллипса к вершинам на большой и малой осях, называются большой и малой полуосями эллипса.

Линия, соединяющая любую точку эллипса с одним из его фокусов, называется **радиусом-вектором** этой точки.

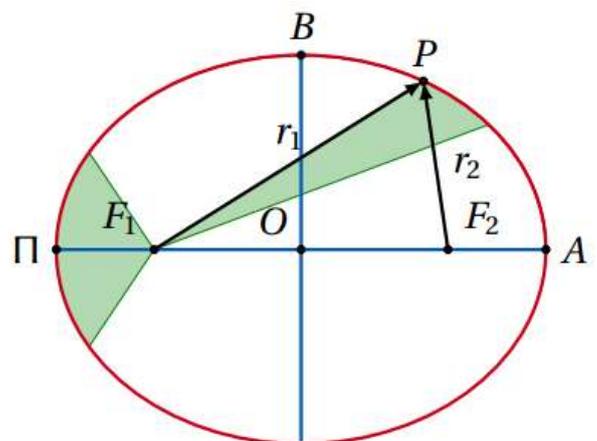
Эксцентриситет - числовая характеристика эллипса, показывающая степень его отклонения от окружности. Он равен отношению расстояний между фокусами к большой оси:

$$e = \frac{F_1F_2}{2a} = \frac{OF_1}{a} = \frac{OF_2}{a}$$

При совпадении фокусов ($e = 0$) эллипс превращается в *окружность*.

F_1, F_2 – фокусы эллипса
 $a = OA$ – большая полуось
 $e = \frac{F_1F_2}{2a}$ – эксцентриситет
 A – афелий
 Π – перигелий

Орбиты планет мало отличаются от окружностей, т. е. их эксцентриситеты невелики.



Наименьший эксцентриситет имеет орбита Венеры ($e = 0,007$), наибольший — орбита Плутона ($e = 0,249$). Эксцентриситет земной орбиты $e = 0,017$.

Перигелий - ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты. **Афелий** - наиболее удалённая от Солнца точка орбиты планеты.

Большая полуось орбиты Земли принята за астрономическую единицу.

1 а.е.=150 000 000 км.

Линия апсид – большая ось орбиты АП.

Радиус-вектор планеты r – вектор, соединяющий Солнце и планету P на ее орбите.

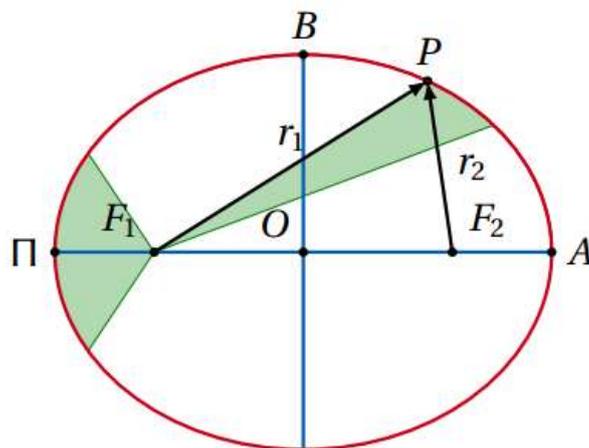
Расстояние планеты от Солнца в перигелии

$$q = a(1 - e)$$

в афелии

$$Q = a(1 + e)$$

Среднее расстояние планеты от Солнца – большая полуось орбиты a



2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равновеликие площади.

Скорость движения планеты по орбите меняется, принимая максимальное значение в перигелии и минимальное в афелии.

Скорость движения планеты в перигелии

$$v_q = v \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}$$

и в афелии

$$v_Q = v \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}$$

Второй закон Кеплера

Радиус-вектор планеты в равные промежутки времени описывает равновеликие площади

Движение планеты вокруг Солнца неравномерно

$v = \sqrt{v_q v_Q}$ – средняя или круговая скорость планеты при $r = a$.

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

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

Чем дальше находится планета от Солнца, тем больше её период обращения.

Теория движения планет, изложенная Кеплером полностью применима к движению искусственных спутников Земли и космических кораблей.

Третий закон Кеплера

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

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi}{G(M+m)}$$

T_1, T_2 – сидерические периоды обращений планет, a_1, a_2 – большие полуоси их орбит

Если большие полуоси выражать в единицах в астрономических единицах, а периоды обращений планет — в годах, то для Земли $a = 1$ и $T = 1$:

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

Третий закон Кеплера устанавливает зависимость между расстояниями планет от Солнца и периодами их обращения.

Третий (уточнённый) закон Кеплера: Квадраты сидерических периодов планет, умноженные на сумму масс Солнца и соответствующей планеты, относятся как кубы больших полуосей орбит планет:

$$\frac{T_1^2(M_S + m_1)}{T_2^2(M_S + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Закон применим не только для планет, но и спутников и позволяет определить массу любого тела в связанной системе движущихся тел (в сумме масс всегда ставится объект и его спутник).

Закон всемирного тяготения

Каждые две частицы материи притягивают взаимно друг друга, или тяготеют друг к другу, с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

– гравитационная постоянная

Контрольные вопросы к лекции:

1. Что называется конфигурацией планеты?
2. Какие планеты считаются внутренними, какие — внешними?
3. В какой конфигурации может находиться любая планета?
4. Какие планеты могут находиться в противостоянии? Какие — не могут?
5. Сформулируйте законы Кеплера.
6. Как меняется скорость планеты при её перемещении от афелия к перигелию?
7. В какой точке орбиты планета обладает максимальной кинетической энергией; максимальной потенциальной энергией?

Лекция 5

Закон всемирного тяготения. Определение масс небесных тел. Движение искусственных небесных тел.

Закон всемирного тяготения

Согласно закону всемирного тяготения, изученному в курсе физики, все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 и m_2 — массы тел; r — расстояние между ними; G — гравитационная постоянная.

Открытию закона всемирного тяготения во многом способствовали законы движения планет, сформулированные Кеплером, и другие достижения астрономии XVII в.

Так, знание расстояния до Луны позволило *Исааку Ньютону* (1643—1727) доказать тождественность силы, удерживающей Луну при её движении вокруг Земли, и силы, вызывающей падение тел на Землю.

Ведь если сила тяжести меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения, то Луна, находящаяся от Земли на расстоянии примерно 60 её радиусов, должна испытывать ускорение в 3600 раз меньшее, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли, равное $9,8 \text{ м/с}^2$. Следовательно, ускорение Луны должно составлять $0,0027 \text{ м/с}^2$.

В то же время Луна, как любое тело, равномерно движущееся по окружности, имеет ускорение

$$a = \omega^2 r,$$

где ω — угловая скорость Луны; r — радиус её орбиты. Если считать, что радиус Земли равен 6400 км, то радиус лунной орбиты будет

составлять $r = 60 \cdot 6\,400\,000 \text{ м} = 3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$. Звёздный период обращения Луны $T = 27,32$ суток, в секундах составляет $2,36 \cdot 10^6 \text{ с}$. Тогда ускорение орбитального движения Луны

$$a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = \left(\frac{2 \cdot 3,14}{2,36 \cdot 10^6 \text{ с}}\right)^2 \cdot 3,84 \cdot 10^8 \text{ м} = 0,0027 \text{ м/с}^2.$$

Равенство этих двух величин ускорения доказывает, что сила, удерживающая Луну на орбите, есть сила земного притяжения, ослабленная в 3600 раз по сравнению с действующей на поверхности Земли.

Можно убедиться и в том, что при движении планет, в соответствии с третьим законом Кеплера, их ускорение и действующая на них сила притяжения Солнца обратно пропорциональны квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения. Действительно, согласно третьему закону Кеплера отношение кубов больших полуосей орбит d и квадратов периодов обращения T есть величина постоянная:

$$\frac{d_1^3}{T_1^2} = \frac{d_2^3}{T_2^2} = \frac{d_3^3}{T_3^2} = \dots = \text{const.}$$

Ускорение планеты равно

$$a = \frac{v^2}{d} = \left(\frac{2\pi d}{T}\right)^2 \frac{1}{d} = 4\pi^2 \frac{d}{T^2}.$$

Из третьего закона Кеплера следует

$$\frac{d}{T^2} = \frac{\text{const}}{d^2},$$

поэтому ускорение планеты равно

$$a = 4\pi^2 \cdot \text{const} \frac{1}{d^2}.$$

Итак, сила взаимодействия планет и Солнца удовлетворяет закону всемирного тяготения.

Возмущения в движении тел Солнечной системы

Законы Кеплера строго выполняются, если рассматривается движение двух изолированных тел (Солнце и планета) под действием их взаимного притяжения. Однако в Солнечной системе планет много, все они взаимодействуют не только с Солнцем, но и между собой. Поэтому движение планет и других тел не в точности подчиняется законам Кеплера. Отклонения тел от движения по эллипсам называются *возмущениями*.

Возмущения эти невелики, так как масса Солнца гораздо больше массы не только отдельной планеты, но и всех планет в целом. Наибольшие возмущения в движении тел Солнечной системы вызывает Юпитер, масса которого в 300 раз превышает массу Земли. Особенно заметны отклонения астероидов и комет при их прохождении вблизи Юпитера.

В настоящее время возмущения учитываются при вычислении положения планет, их спутников и других тел Солнечной системы, а также траекторий космических аппаратов, запускаемых для их исследования. Но ещё в XIX в. расчёт возмущений позволил сделать одно из самых известных в науке открытий «на кончике пера» — открытие планеты Нептун.

Проводя очередной обзор неба в поиске неизвестных объектов, *Вильям Гершель* в 1781 г. открыл планету, названную впоследствии Ураном. Спустя примерно полвека стало очевидно, что наблюдаемое движение Урана не согласуется с расчётным даже при учёте возмущений со стороны всех известных планет. На основе предположения о наличии ещё одной «заурановой» планеты были сделаны вычисления её орбиты и положения на небе. Независимо друг от друга эту задачу решили *Джон Адамс* в Англии и *Урбен Леверье* во Франции. На основе расчётов Леверье немецкий астроном *Йоганн Галле* 23 сентября 1846 г. обнаружил в созвездии Водолея неизвестную ранее планету — Нептун. Это открытие стало триумфом гелиоцентрической системы, важнейшим подтверждением справедливости закона всемирного тяготения. В дальнейшем в движении Урана и Нептуна были замечены возмущения, которые стали основанием для предположения о

существовании в Солнечной системе ещё одной планеты. В 1930 г. после просмотра большого количества фотографий звёздного неба был обнаружен Плутон, который, как оказалось, является одним из множества объектов, расположенных за орбитой Нептуна.

Масса и плотность Земли

Закон всемирного тяготения позволил определить массу нашей планеты. Исходя из закона всемирного тяготения, ускорение свободного падения можно выразить так:

$$g = G \frac{M}{R^2}.$$

Подставим в формулу известные значения этих величин: $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $R = 6370 \text{ км}$ — и получим, что масса Земли $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

Зная массу и объём земного шара, можно вычислить его среднюю плотность: $5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. С глубиной за счёт увеличения давления и содержания тяжелых элементов плотность возрастает.

Определение массы небесных тел

Более точная формула третьего закона Кеплера, которая была получена Ньютоном, даёт возможность определить одну из важнейших характеристик любого небесного тела — массу. Выведем эту формулу, считая (в первом приближении) орбиты планет круговыми.

Пусть два тела, имеющие массы m_1 и m_2 , взаимно притягивающиеся и обращающиеся вокруг общего центра масс, находятся от центра масс на расстоянии r_1 и r_2 и обращаются вокруг него с периодом T . Расстояние между их центрами $R = r_1 + r_2$. На основании закона всемирного тяготения ускорение каждого из этих тел равно:

$$a_1 = G \frac{m_2}{R^2}, \quad a_2 = G \frac{m_1}{R^2}.$$

Угловая скорость обращения вокруг центра масс составляет $\omega = \frac{2\pi}{T}$.
 Тогда центростремительное ускорение выразится для каждого тела так:

$$a_1 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_1, a_2 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_2.$$

Приравняв полученные для ускорений выражения, выразив из них r_1 и r_2 и сложив их почленно, получаем:

$$G \frac{(m_1 + m_2)}{R^2} = \frac{4\pi^2}{T} (r_1 + r_2),$$

откуда

$$\frac{T^2 (m_1 + m_2)}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G}.$$

Поскольку в правой части этого выражения находятся только постоянные величины, оно справедливо для любой системы двух тел, взаимодействующих по закону тяготения и обращающихся вокруг общего центра масс, — Солнце и планета, планета и спутник.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

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

M_1, M_2 - массы каких-либо небесных тел
 m_1, m_2 - соответственно массы их спутников
 a_1, a_2 - полуоси орбит спутников
 T_1, T_2 - периоды обращения спутников

Определим массу Солнца, для этого запишем выражение:

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

где M — масса Солнца; m_1 — масса Земли; m_2 — масса Луны; T_1 и a_1 — период обращения Земли вокруг Солнца (год) и большая полуось её орбиты; T_2 и a_2 — период обращения Луны вокруг Земли и большая полуось лунной орбиты.

Пренебрегая массой Земли, которая ничтожно мала по сравнению с массой Солнца, и массой Луны, которая в 81 раз меньше массы Земли, получим:

$$\frac{M}{m_1} = \frac{a_1^3 T_2^2}{a_2^3 T_1^2}.$$

Подставив в формулу соответствующие значения и приняв массу Земли за единицу, мы получим, что Солнце примерно в 333 тыс. раз по массе больше нашей планеты.

Массы планет, не имеющих спутников, определяют по тем возмущениям, которые они оказывают на движение астероидов, комет или космических аппаратов, пролетающих в их окрестностях.

Движение искусственных спутников Земли и космических аппаратов к планетам

Возможность создания искусственного спутника Земли теоретически обосновал ещё Ньютон. Он показал, что существует такая горизонтально направленная скорость \vec{v}_1 , при которой тело, падая на Землю, тем не менее на неё не упадёт, а будет двигаться вокруг Земли, оставаясь от неё на одном и том же расстоянии. При такой скорости тело будет приближаться к Земле вследствие её притяжения как раз на столько, на сколько из-за кривизны поверхности нашей планеты оно будет от неё удаляться. Эта скорость, которую называют первой космической (или круговой), известна вам из курса физики:

$$v_1 = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$



Орбита искусственного спутника Земли

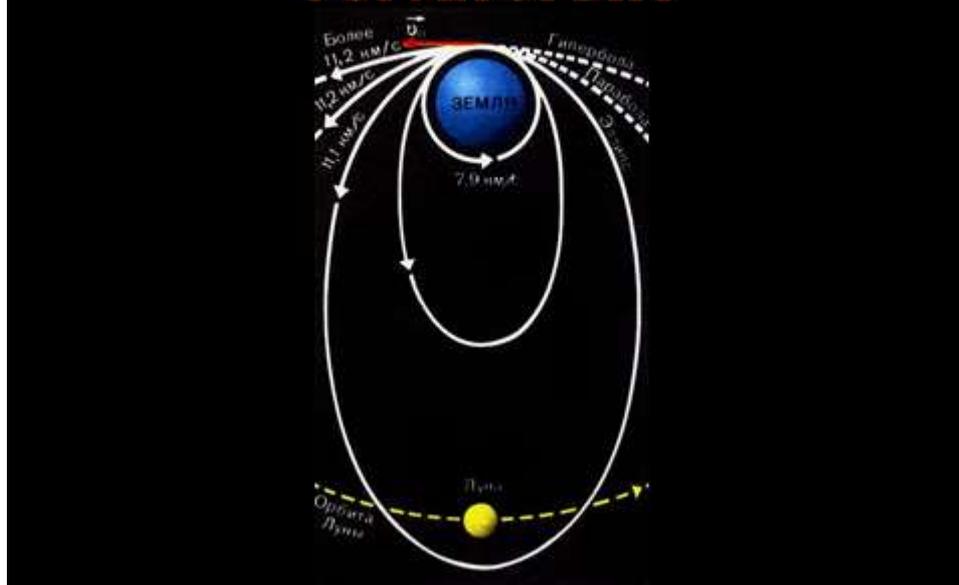
Космическая скорость

— минимальная начальная скорость, которую необходимо придать материальной точке на поверхности небесного тела в отсутствие атмосферы, чтобы:

- v_1 — объект стал вращаться по круговой орбите вокруг тела на пренебрежительно малой высоте относительно поверхности;
- v_2 — объект преодолел гравитационное притяжение небесного тела, уйдя на бесконечность
- v_3 — при запуске с планеты объект покинул планетную систему, преодолев притяжение звезды;
- v_4 — при запуске из планетной системы объект покинул галактику.

Ньютон доказал, что под действием взаимного тяготения тела могут двигаться друг относительно друга по эллипсу (в частности, по кругу), по параболе и по гиперболе. Ньютон установил, что вид орбиты, которую описывает тело, зависит от его скорости в данном месте орбиты.

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ И ФОРМА ОРБИТ



КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ	ФОРМУЛА	ЗНАЧЕНИЕ	ВИД ТРАЕКТОРИИ
	v_1	>7,9 км/с	эллипс, $0 < e < 1$
Первая	$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{r+h}}$	≈7,9 км/с	круг, $e=0$
		7,9 км/с < v < 11,2 км/с	эллипс, $0 < e < 1$
Вторая	$v_2 = v_1 \sqrt{2}$	≈11,2 км/с	парабола, $e=1$
		v > 11,2 км/с	гипербола, $e > 1$

Практически осуществить запуск искусственного спутника Земли оказалось возможно лишь через два с половиной столетия после открытия Ньютона — 4 октября 1957 г. За время, прошедшее с этого дня, который нередко называют началом космической эры человечества, искусственные спутники самого различного устройства и назначения заняли важное место в нашей повседневной жизни. Они обеспечивают непрерывный мониторинг погоды и других природных явлений, трансляции телевидения и т. п.

Спутниковая навигационная система ГЛОНАСС и другие системы глобального позиционирования позволяют в любой момент с высокой степенью точности определить координаты любой точки на Земле. Пожалуй, нет в наши дни ни одной глобальной проблемы, в решении которой не принимали участие искусственные спутники Земли (ИСЗ).

Космические аппараты (КА), которые направляются к Луне и планетам, испытывают притяжение со стороны Солнца и согласно законам Кеплера так же, как и сами планеты, движутся по эллипсам. Скорость движения Земли по орбите составляет около 30 км/с. Если геометрическая сумма скорости космического аппарата, которую ему сообщили при запуске, и скорости Земли будет больше этой величины, то КА будет двигаться по орбите, лежащей за пределами земной орбиты. Если меньше — то внутри орбиты Земли.



В первом случае, если аппарат летит к Марсу (рис) или другой внешней планете, энергетические затраты будут наименьшими, если КА достигнет орбиты этой планеты при своём максимальном удалении от Солнца — в афелии. Кроме того, необходимо так рассчитать время старта КА, чтобы к этому моменту в ту же точку своей орбиты пришла планета. Иначе говоря, начальная скорость и день запуска КА должны быть выбраны таким образом, чтобы КА и планета, двигаясь каждый по своей орбите, одновременно подошли к точке встречи. Во втором случае — для внутренней планеты — встреча с КА должна произойти в перигелии его орбиты (рис.). Такие траектории полётов называются *полуэллиптическими*. Большие оси этих

эллипсов проходят через Солнце, которое находится в одном из фокусов, как и полагается по первому закону Кеплера.

Конструкция и оборудование современных КА обеспечивают возможность совершения ими весьма сложных манёвров — выход на орбиту спутника планеты, посадка на планету, передвижение по её поверхности и т. п.

Контрольные вопросы к лекции:

1. Почему движение планет происходит не в точности по законам Кеплера?
2. Как было установлено местоположение планеты Нептун?
3. Какая из планет вызывает наибольшие возмущения в движении других тел Солнечной системы и почему?
4. Какие тела Солнечной системы испытывают наибольшие возмущения и почему?
5. По каким траекториям движутся космические аппараты к Луне; к планетам?

Лекция 6 Солнечная система. Земля и Луна.

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

С древности в Солнечной системе было известно пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, видимые невооруженным глазом. В начале XVII в. астрономы окончательно доказали, что Земля – равноправный представитель планет, и их «стало» шесть. В 1781 г. случайно был открыт Уран, а в 1846 г. был теоретически предсказан и сразу же обнаружен на небе Нептун – восьмая и, по-видимому, последняя крупная планета Солнечной системы. Но в те же годы были открыты малые планеты – астероиды, в основном «обитающие» между орбитами Марса и Юпитера. Однако обнаружить что-либо за орбитой Нептуна долго не удавалось.

Однако настойчивые поиски новых планет принесли успех: в 1930 г. за орбитой Нептуна была открыта небольшая планета Плутон. И хотя своим малым размером и сильно вытянутой и наклоненной орбитой Плутон выделялся среди других планет, его все же «записали» в это семейство, поскольку он был заметно крупнее любого из астероидов. До конца XX в. принято было считать, что в Солнечной системе девять планет. Но последнее десятилетие принесло нам открытие множества объектов за орбитой Нептуна, причем некоторые из них похожи на Плутон, а иные даже превосходят его размерами. Поэтому в 2006 г. астрономы уточнили классификацию: 8 крупнейших тел – от Меркурия до Нептуна – считаются классическими планетами, а Плутон стал прототипом нового класса объектов – карликовых планет.

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

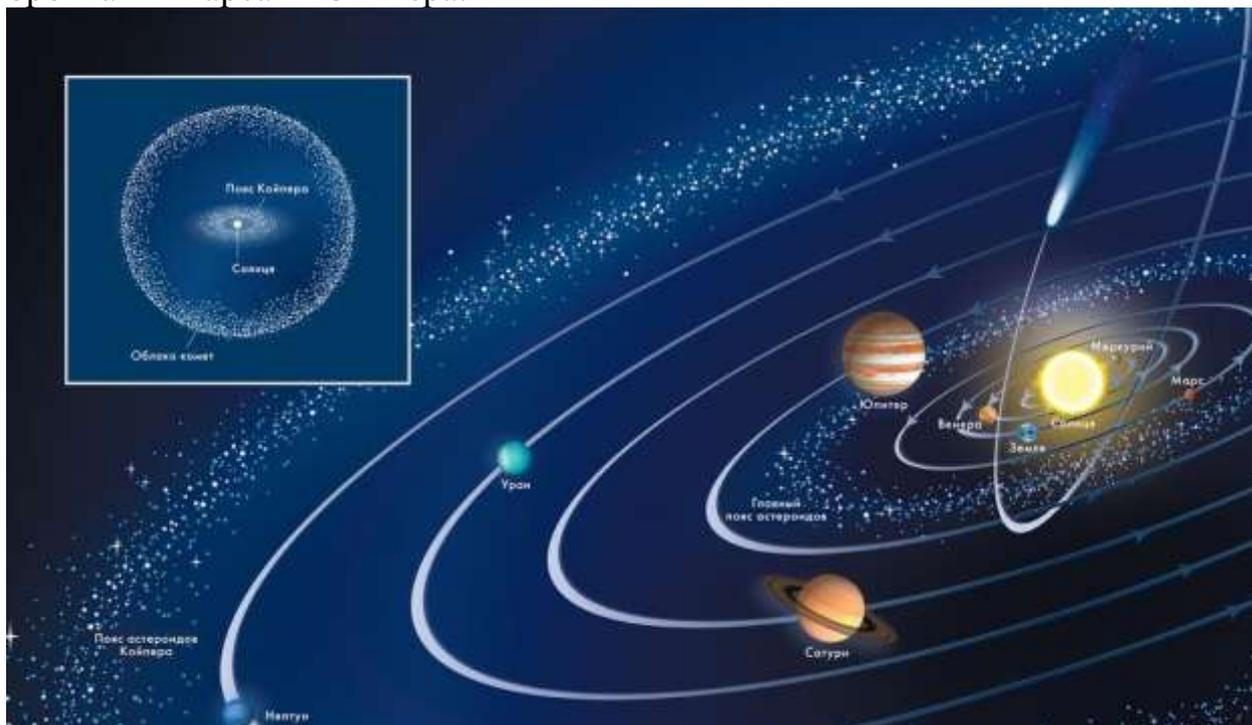
Планетой называют небесное тело, движущееся вокруг звезды в её гравитационном поле, имеющее форму, близкую к сферической, светящееся отражённым от звезды светом и расчистившее область своей орбиты от других мелких объектов. Выделяют планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и планеты-гиганты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

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

Большинство планет движутся вокруг Солнца в прямом направлении – с запада на восток. Исключение составляют Венера и Уран, которые вращаются в обратном направлении. Солнце вращается вокруг своей оси в ту же сторону, в какую движутся планеты вокруг Солнца. По физическим характеристикам все планеты Солнечной системы делятся на 2 группы:

1. Планеты земной группы: Земля, Меркурий, Венера, Марс. Эти планеты расположены во внутренней области Солнечной системы.

2. Планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, расположенные за пределами пояса астероидов. Пояс астероидов располагается между орбитами Марса и Юпитера.



Карликовые планеты в основном населяют область за орбитой Нептуна – пояс Койпера. Точно определить границу Солнечной системы невозможно, но многие исследователи проводят ее на расстоянии 100 тыс. астрономических единиц (1 а. е. – среднее расстояние от Земли до Солнца) от Солнца.

Наиболее характерными чертами Солнечной системы являются:

1. Почти все крупные тела Солнечной системы – планеты и астероиды, а также кометы – вращаются вокруг Солнца в одном направлении – против часовой стрелки, если смотреть со стороны Северного полюса мира, находящегося в бесконечности на северном продолжении оси вращения Земли.

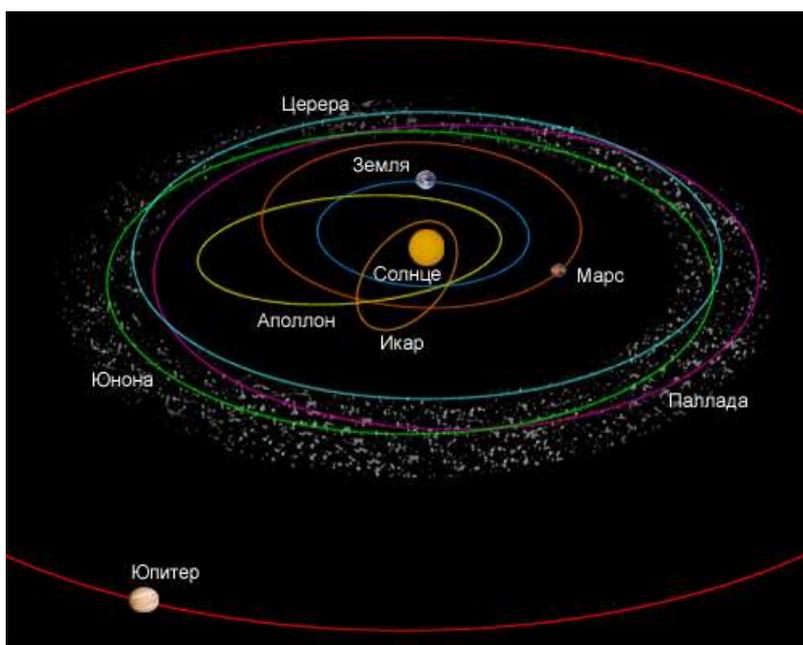
2. Все планеты (кроме Венеры и Урана) и большинство спутников (кроме некоторых спутников Юпитера и Сатурна) вращаются вокруг своих осей в том же направлении.

3. Плоскости орбит планет близки к плоскости видимого с Земли годового движения Солнца – эклиптике, отклоняясь от нее всего на несколько градусов. Орбитальная плоскость Земли совпадает с эклиптикой. Только Меркурий имеет наклоненную орбиту 7° по отношению к орбите Земли. Но это объясняется тем, что Меркурий формировался как спутник Венеры и лишь потом стал самостоятельной планетой.

Планеты обладают различной скоростью движения по своим орбитам, в чем наблюдается определенная закономерность: чем ближе планета находится к Солнцу, тем орбитальная скорость у нее больше. Меркурий, ближайшая к Солнцу планета, движется по орбите со скоростью 47,9 км/с; Сатурн со скоростью – 9,6 км/с, а бывшая планета Плутон, самое удаленное от Солнца тела, – со скоростью 4,7 км/с. Время облета планетой светила, т. е. продолжительность ее года, зависит от длины пути (орбиты) и скорости движения. Меркурий совершает свой полный облет вокруг Солнца за 88 земных суток, а Плутон – за 247 земных лет.

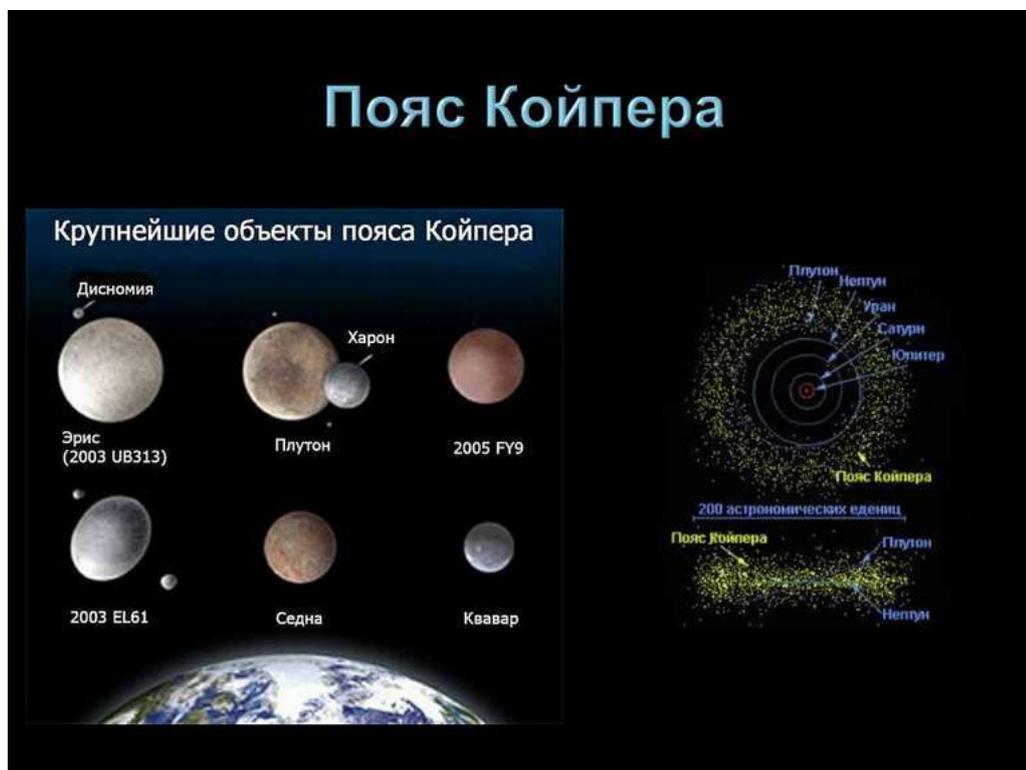
Малые планеты, или астероиды, имеют диаметр от 1 до 1000 км. Их общая масса, несмотря на огромное их число, не превышает 1/100 массы Земли. Орбиты большинства астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера, образуя пояс астероидов (см. рис.).

Орбиты некоторых из них сильно вытянуты. Так,



астероид Гидальго удаляется от Солнца за пределы орбиты Сатурна, а Икар заходит внутрь орбиты Меркурия. Некоторые астероиды могут сближаться с Землей. Например, в 1976 г. Икар приблизился к Земле на расстояние всего 7 млн. км. Хотя есть сообщения, что некоторые небольшие астероиды заходили внутрь орбиты Луны, столкновение Земли с астероидом настолько маловероятно, что происходит раз в несколько сотен миллионов лет. В настоящее время неизвестно ни одного астероида, столкновение с которым может произойти в сколько-нибудь обозримое время.

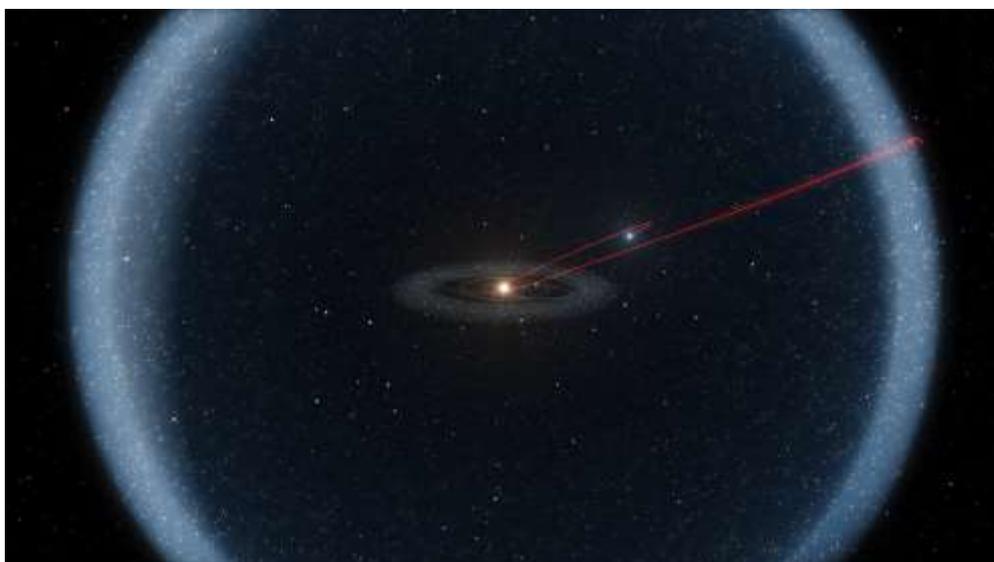
Кроме известного с начала XIX в. пояса астероидов между Марсом и Юпитером, на краю Солнечной системы за орбитой Нептуна находится еще один пояс астероидов – пояс Койпера. Обнаружение этих астероидов чрезвычайно сложная задача. Они очень далеки от Солнца и очень слабы. Тем не менее, уже открыто более 100 объектов пояса Койпера (см. рис.). По мнению многих исследователей, Плутон является одним из самым большим представителем этого семейства астероидов.



Еще дальше, в пределах 100 000 а. е., расположено Облако Орта (см. рис.), которое иногда называют банком комет. Сами будущие кометы представляют собой глыбы «грязного», т. е. с включениями твердых частиц,

водяного, водородного и углеводородного снега. Это остатки того материала, из которого образовались планеты. Время от времени в результате столкновений между собой или под действием возмущения со стороны ближайших звезд глыбы изменяют свое движение и попадают в центральные области Солнечной системы. Если этим телам придется «встретиться» с Нептуном, Ураном, Сатурном или Юпитером, они могут быть выброшены в область внутренних планет. Так возникают кометы.

Орбиты комет отличаются разнообразием. Как правило, они очень сильно вытянуты (иногда практически неотличимы от параболических). Не исключено, что эти кометы покидают Солнечную систему. В то же время не обнаружено ни одной кометы, орбита которой была бы гиперболической, т. е. такой, которая заведомо пришла бы к нам из другой планетной системы. Встречаются также кометы, орбиты которых близки к круговым (например, комета Швассмана – Вахмана движется между орбитами Марса и Юпитера). Среди комет встречаются объекты, движущиеся по орбите в направлении, обратном движению планет (в том числе известная комета Галлея).



Метеорные тела (размером от долей миллиметра до километра в диаметре) и межпланетная пыль (частички, размер которых не превышает сотни микрометров) заполняют практически все пространство Солнечной системы. Метеорные тела и пыль образуются при распаде комет, при столкновениях астероидов между собой, а также между кометами и мелкими

талами. Мелкие метеорные тела и пылинки недолговечны. Световое давление и солнечный ветер оказывают на них тормозящее действие, и они медленно падают на Солнце. На расстоянии в несколько радиусов Солнца метеорные тела нагреваются до тысячи кельвин и испаряются. Для больших метеоритов этот процесс практически незаметен. Для пылинки размером в доли миллиметра он продолжается столетия, а частички размером в несколько микрометров просто «выметаются» давлением света из пределов Солнечной системы.

Происхождение Солнечной системы

Возраст Солнечной системы – около 4,5-5 млрд. лет; возраст Солнца 5 млрд. лет.

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

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

планеты. Данные физико-химических исследований метеоритов и земных пород подсказывали, что эти тела образовались не из газовых сгустков, а из твёрдого вещества.

В 1944 г. систематической разработкой теории образования планет из твёрдых частиц околосолнечного допланетного облака занялся О. Ю. Шмидт. Эта теория развивается и в настоящее время. Можно выделить следующие основные этапы происхождения и ранней эволюции Солнечной системы.

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



2. Постепенно в диске газопылевого облака мельчайшие пылинки стали объединяться, захватывая газы из окружающего пространства. Из мелких частичек образовывались более крупные комки, а из них формировались зародыши будущих планет (размерами в несколько километров) —

планетезимали, а позднее и сами планеты. Во внутренней зоне лёгкие элементы (водород, гелий) под действием светового давления покидали центральные области диска, уходя на периферию. Поэтому вблизи Солнца планетезимали формировались полностью из каменных минералов и соединений металлов и, в конце концов, превратились в планеты земной группы. Частички в средней холодной зоне покрывались льдом, ядра будущих планет-гигантов быстро росли, захватывая окружающий газ. В самой холодной внешней части диска конденсирующее вещество почти всё было ледяным. Множество отдельных ледяных планетезималий и глыб породили ядра комет и ледяные астероиды. Планеты земной группы почти достигли своих размеров примерно через 100 млн. лет.



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

что и сами планеты. Спутники, обладающие обратным движением, были захвачены планетой.

Весь процесс формирования Солнечной системы представлен на рисунке.



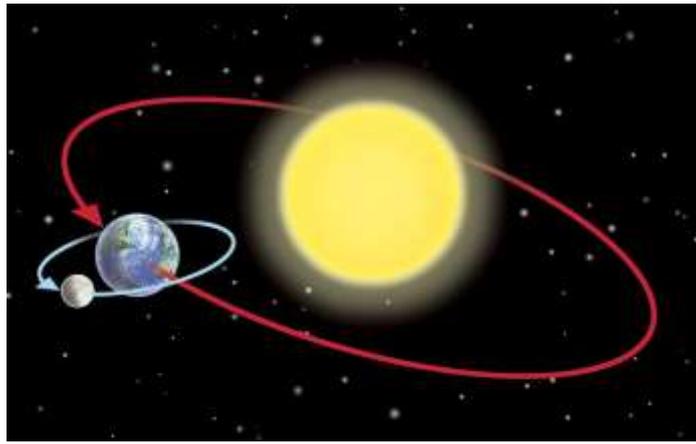
Систему Земля – Луна можно считать двойной планетой.

Двойная планета - это система, состоящая из двух объектов, каждый из которых является достаточно массивным, чтобы оказывать гравитационный эффект, превосходящий гравитационный эффект Солнца (система Плутон – Харон подобная).

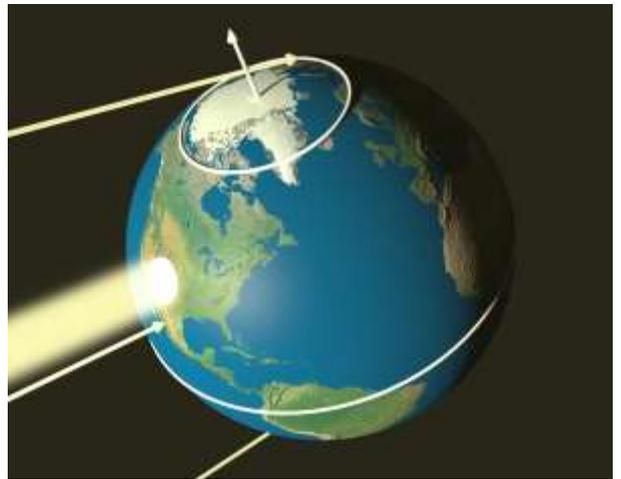
Основные движения Земли

Земля – третья по удаленности от Солнца и наибольшая из планет земной группы планета.

Земля совершает в пространстве множество сложных движений, некоторые из них заметны для наблюдателей, другие, наоборот, почти неощутимы. Главной силой, определяющей все эти движения, служит гравитация – притяжение Земли другими космическими телами.

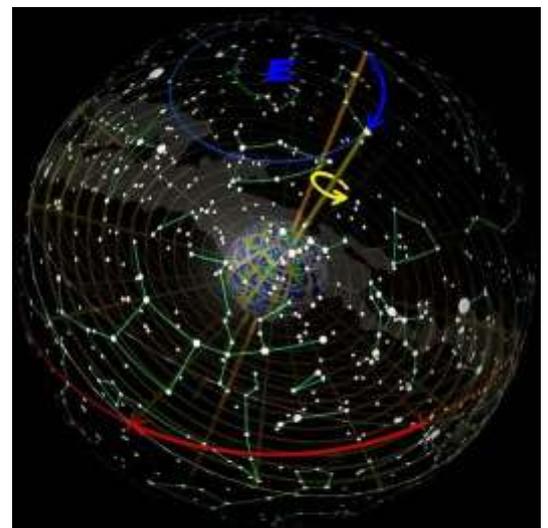


Первое основное движение – движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите (см. рис.). Когда она проходит через перигелий – ближайшую к Солнцу точку своей орбиты, от Солнца ее отделяет почти 147 млн. км. Через полгода расстояние от Земли до Солнца становится близким к 152 млн. км. При этом скорость движения Земли все время меняется. Вблизи Солнца она увеличивается, с удалением от него – уменьшается. В среднем же Земля летит по своей орбите в 36 раз быстрее пули – 30 километров в секунду. Но эта скорость кажется огромной лишь по земным меркам.



Второе основное движение Земли – вращение вокруг оси, наклоненной к плоскости орбиты под углом $66,5^\circ$ (см. рис.).

Земной шар часто сравнивают с волчком. Такое сравнение имеет более глубокий смысл. Если раскрутить волчок, а потом слегка толкнуть его ось – она начнет описывать конус, причем со скоростью, значительно меньшей скорости вращения волчка. Это движение называется прецессией. Оно свойственно и земному шару, являясь его третьим движением



(см. рис.). Период прецессии 26 тыс. лет. Прецессия приводит к смещению

полюсов мира. В ближайшие сотни лет северный полюс мира будет находиться недалеко от Полярной звезды, затем начнет удаляться от нее, и название последней звезды в ручке ковша Малой Медведицы – Полярная – утратит свой смысл. Через 12 тыс. лет полюс мира приблизится к самой яркой звезде северного неба – Веге из созвездия Лиры.

Луна вызывает еще и четвертое движение Земли. Из-за воздействия Луны на различные точки земного эллипсоида земная ось описывает маленький конус с периодом в 18,6 года. Благодаря этому движению, называемому нутацией (см. рис.), небесный полюс вычерчивает на фоне звездного неба крошечный эллипс.



Всего Земля совершает более 13 движений.

Земля

Природа Земли достаточно подробно изучается в курсе географии. Напомним вкратце лишь те сведения, которые необходимы для её сравнения с другими планетами.

Строение. Основными оболочками земного шара являются *атмосфера, гидросфера и литосфера*. Соответствующие этим оболочкам три агрегатных состояния вещества — газообразное, жидкое и твёрдое — являются привычными для нас, жителей Земли. Атмосферой обладает большинство больших планет Солнечной системы, твёрдая

оболочка характерна для планет земной группы, спутников планет и астероидов. Гидросфера поверхности Земли — особое явление в Солнечной системе. Вода в жидком виде может существовать лишь при определённых значениях температуры и давления газовой среды. Будучи весьма распространённым во Вселенной химическим соединением, вода на других телах Солнечной системы встречается в основном в виде льда, хотя подлёдные океаны из жидкой воды могут присутствовать на некоторых спутниках Юпитера.

Литосфера. На протяжении миллиардов лет существования Земли в твёрдом теле планеты происходили процессы, существенно изменившие первоначальный состав вещества и его распределение в литосфере. За счёт энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных элементов, происходило расплавление и дифференциация вещества. В результате лёгкие соединения, в основном силикаты, оказались наверху и образовали *кору Земли*, а более тяжёлые остались в центральной части — *ядре*.

Толщина коры относительно невелика и меняется от 4—10 км под океанами до 30—70 км под материками. Радиус ядра составляет примерно половину радиуса планеты, причём в его внутренней части вещество находится в твёрдом состоянии, а во внешней — в жидком. Между ядром и корой располагается промежуточная оболочка — *мантия*. Плотность вещества по мере удаления от центра планеты уменьшается от 17 000 кг/м³ (в ядре) до 2700 кг/м³ (в коре).

Результаты исследований, выполненных с помощью космических аппаратов, показали, что внутреннее строение планет земной группы и Луны в общих чертах схожи, лишь твёрдое ядро у Луны практически отсутствует



Внутреннее строение планет земной группы и Луны: 1 — кора; 2 а, б, в — мантия; 3 — ядро

Атмосфера. Определённое сходство свойственно также и атмосферам планет земной группы, среди которых атмосфера Земли выделяется своим уникальным химическим составом.

Атмосфера рассеивает и поглощает солнечное излучение, она во многом определяет тепловой баланс планеты благодаря так называемому парниковому эффекту. Так, нагретая солнечным излучением поверхность суши и океана Земли сама излучает в инфракрасном диапазоне. Оно поглощается углекислым газом и парами воды земной атмосферы, которая тем самым удерживает тепло

Схема парникового эффекта



На протяжении миллионов лет существования Земли установилось равновесие между потоком энергии, поступающей от Солнца, и потоком

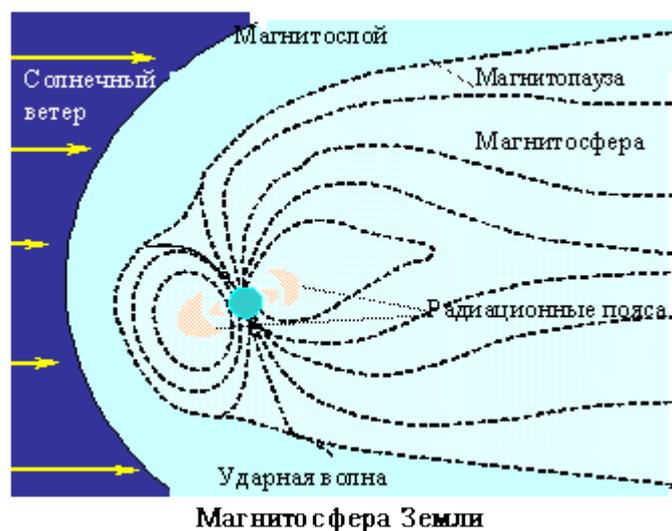
энергии, излучаемой планетой обратно в космическое пространство. Чем плотнее атмосфера планеты и чем больше в ней парниковых газов (углекислый газ, водяной пар и др.), тем сильнее проявляется парниковый эффект. Эта закономерность хорошо прослеживается для планет земной группы. На Земле равновесие установилось при температуре $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (около 290 К), а на Венере — при значительно более высокой, $+470\text{ }^{\circ}\text{C}$ (около 740 К). Увеличение содержания парниковых газов антропогенного происхождения (сжигание топлива) считается наиболее вероятной причиной потепления климата Земли, наблюдаемого в настоящее время. Сильная облачность также влияет на температуру поверхности Земли: задерживая видимое излучение Солнца днём и инфракрасное излучение Земли ночью, оно существенно уменьшает амплитуду суточных колебаний температуры. На суточный ход температуры также влияет испарение и конденсация влаги, происходящие с обменом энергии между поверхностью Земли и атмосферой. В результате при пасмурной погоде почва и воздух ночью охлаждаются не столь интенсивно, как при ясном безоблачном небе, когда могут случиться ночные заморозки.

Нижний слой атмосферы, который называется *тропосферой*, в средних широтах имеет высоту 10—12 км, а в экваториальных — 16—17 км. В тропосфере содержится более 90% всей массы атмосферы и практически все водяные пары. Именно здесь в основном происходят явления, которые определяют погоду. По мере удаления от земной поверхности температура снижается и на верхней границе тропосферы составляет примерно $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Над тропосферой до высоты 50—55 км простирается *стратосфера*, в которой находится слой озона (O_3). Здесь, начиная с высоты около 25 км, температура атмосферы растёт за счёт поглощения озоном ультрафиолетового излучения Солнца. Выше — в *мезосфере* — температура снова уменьшается и на высоте около 90 км достигает абсолютного минимума $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в летние месяцы в умеренных и полярных широтах — иногда до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$!

Плотность атмосферы с высотой уменьшается: на высоте 5,2 км она вдвое меньше, чем у поверхности, а на высоте порядка 100 км в миллион раз меньше. Примерно до этих высот состав атмосферы остаётся неизменным — смесь газов, получившая название воздуха. На больших высотах, в *термосфере* (80—800 км), состав атмосферы существенно меняется. С ростом высоты возрастает доля гелия и водорода. За счёт поглощения ультрафиолетового излучения Солнца температура значительно возрастает (до 1500 °С на высоте 600 км). Поглощение излучения вызывает диссоциацию молекул, а также ионизацию молекул и атомов с образованием свободных электронов. Таким образом, термосфера планеты является вместе с тем её *ионосферой*. Самый внешний слой атмосферы называется *экзосферой*, откуда атомы и молекулы могут беспрепятственно ускользать в космическое пространство.

Магнитосфера Земли. На высотах более 1000 км поведение и распределение заряженных частиц неразрывно связано с магнитным полем Земли. В околоземном космическом пространстве существует область, которую называют магнитосферой, хотя по своей форме она вовсе не является сферой. Структура геомагнитного поля на дневной и ночной стороне Земли благодаря наличию солнечного ветра существенно отличается. Этот поток плазмы, непрерывно обдувающий Землю, имеет собственное магнитное поле, которое взаимодействует с геомагнитным полем и вызывает его значительную деформацию. При набегании потоков солнечного ветра на магнитное поле Земли они прежде всего тормозятся, и в результате возникает ударная волна. В целом магнитосфера принимает форму цилиндра с выпуклым в сторону Солнца дном. Она сжата с дневной стороны и вытянута в виде сигарообразного шлейфа с ночной. Этот шлейф диаметром немногим менее 250 тыс. км простирается за Землёй на 5,6 млн км.



Небольшая часть захваченных геомагнитным полем заряженных частиц образует вокруг нашей планеты *радиационный пояс*. Здесь движутся протоны, ионы и электроны, обладающие самой высокой энергией. Эти частицы, попадая из радиационного пояса в верхние слои атмосферы в районе полюсов, заставляют светиться её основные составляющие — азот и кислород, вызывая полярные сияния.

Размеры и форма Земли

Кривизна земной поверхности меньше в полярных областях, чем экваториальных. Следовательно, Земля отличается от шара и имеет несколько сплюснутую форму, близкую к эллипсоиду вращения.

На протяжении последних полутора столетий неоднократно определялись элементы земного эллипсоида, размеры и форма которого наилучшим образом согласовывались с наиболее точными измерениями дуг. Согласно этим данным малая полуось земного эллипсоида, совпадающая с осью вращения Земли, равна $b = 6356,86$ км, а большая полуось, лежащая в плоскости экватора, $a = 6378,24$ км. Отношение $\varepsilon = (a - b) / a$ называемое сжатием, равно $1 / 298,3$. Данные, основанные на наблюдениях движения искусственных спутников Земли, позволили уточнить результаты наземных геодезических измерений сжатия Земли.

Поскольку различие в экваториальном ($6378,24$ км) и полярном ($6356,86$ км) радиусах Земли небольшое ($21,38$ км), то при решении многих

астрономических задач Землю можно считать шаром со средним радиусом, равным 6371 км.

Зная средний радиус Земли и ее массу, легко вычислить среднюю плотность нашей планеты ($5,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Луна - естественный спутник Земли. Представляет собой тело шарообразной формы, слегка сплюснутое к полюсам. Расстояние до Луны – 484400 км. Её масса в 81 раз меньше; поперечные размеры в 4 раза меньше; а ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле. Луна — второй по плотности спутник в Солнечной системе после Ио. Продолжительность суток около месяца (29,5 дня) – две недели день, две недели ночь. Резкий перепад температур в 300К (+116°C днем до -173°C ночью) из-за отсутствия атмосферы. Атмосферы у Луны нет.



Луна практически лишена атмосферы. Если допустить, что в прошлом у Луны была атмосфера, то легко понять, почему ее нет сейчас. Дело в том, что сравнительно небольшие (по массе) небесные тела (подобные Луне) не могут длительное время удерживать атмосферу. Уже при скорости 2,38 км/с

(вторая космическая скорость для Луны) молекулы газа способны покинуть Луну.

Нет на Луне и воды. Испарение воды образовало бы вокруг Луны газовую оболочку, которая быстро бы рассеялась.

На небе Луны видны те же самые созвездия, что и на небе Земли. Из-за отсутствия атмосферы яркие звезды и планеты видны на Луне и днем. Поэтому космонавты могут ориентироваться на Луне по звездам и днем и ночью. Ориентировка по звездам приобретает на Луне особое значение, так как там магнитный компас бесполезен. (Луна не имеет магнитного поля, подобного земному.)

Меркурий и Венеру можно наблюдать с Луны даже в непосредственной близости от Солнца. Эффектное украшение неба Луны – наша Земля (см. рис.). Диск Земли примерно в 3,5 раза больше солнечного диска.



На протяжении лунного дня, длящегося около двух земных недель, поверхность Луны сильно нагревается, а затем охлаждается в ночное время (ночь на Луне тоже длится почти две земные недели). Отсутствие атмосферы на Луне приводит к резким колебаниям температуры в течение лунных суток. В районе «подсолнечной» точки, т. е. там, где Солнце днем находится в зените, температура превышает 400 К (+130 °С). На противоположной

стороне Луны вблизи «антисолнечной» точки поверхность Луны охлаждается почти до 100 К (-170 °С), т. е. на протяжении одних лунных суток (29,5 земных суток) температура изменяется на 300 К. Резкие колебания температуры, происходящие на Луне, относятся только к ее поверхности. Уже на глубине в несколько десятков сантиметров температура в течение лунных суток практически не изменяется. Это объясняется плохой теплопроводностью лунного грунта, который не успевает ни прогреться днем, ни охладиться ночью.

Луна сейчас обращена к Земле одной стороной. Так было не всегда. Миллиарды лет назад Луна была ближе к Земле, чем сейчас, а периоды вращения Земли и обращения вокруг нее Луны составляли лишь несколько часов. На нынешнем этапе эволюции системы «Земля – Луна» период вращения Луны совпал с периодом ее обращения. Это привело к двум важным следствиям. Во-первых, продолжительность солнечных суток на Луне равна синодическому месяцу (день и ночь на Луне делятся почти по две земные недели). Во-вторых, к Земле Луна всегда обращена одним полушарием (мы с Земли видим всегда одну и ту же сторону Луны).

Поверхность Луны

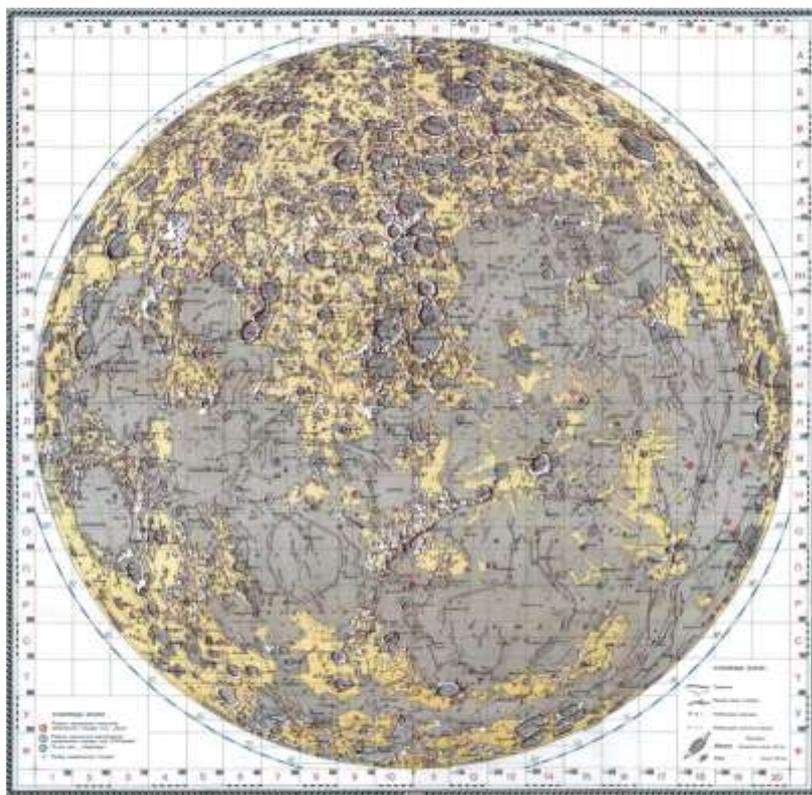
В рельефе Луны отмечают лунные моря и материки. **Лунные моря** - это тёмные и относительно ровные пониженные участки лунной поверхности, покрытые застывшей лавой. Они занимают около 16% всей её поверхности. Воды в морях нет, это залитые лавой низины. Море: Дождей, Кризиса, Холода, Влажности, океан Бурь и т.д. Возраст морей больше 3 млрд. лет. 84% поверхности Луны покрывают материки. **Лунными материками** называют гористые, более светлые части лунной поверхности. Лунные хребты имеют земные названия – Альпы, Апеннины, Кавказ. Кратеры, находящиеся на обратной стороне Луны, получили имена учёных и космонавтов: Циолковский, Гагарин, Королёв и т.д. Характерная особенность лунного рельефа – кольцевые структуры (кратеры). Название кратеров - это в большинстве фамилии ученых: Аристарх, Тихо, Коперник, Кеплер и т.д.



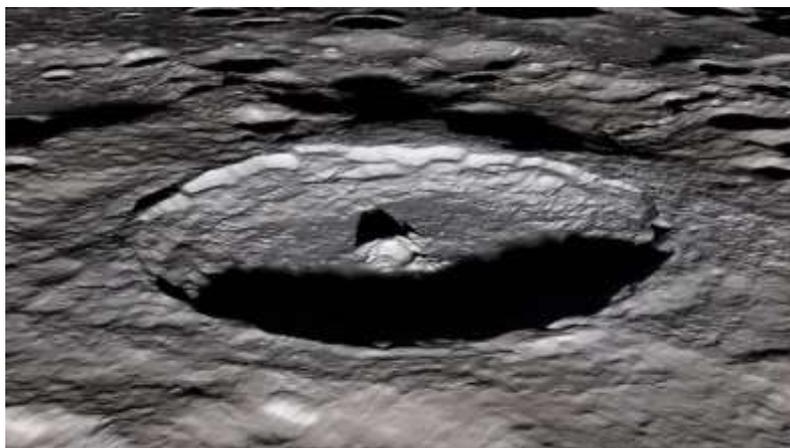
На обращенной к Земле стороне Луны материки занимают около 70%, а моря – 30% территории видимого с Земли полушария Луны (см. рис.).

Характерная особенность лунного рельефа – кольцевые структуры (кратеры). Только на видимой стороне кратеров диаметром более 1 км примерно 300 000. Среди них есть такие, диаметры которых превышают 200 км. Большинство крупных лунных кратеров имеют ровное дно, в центре которого возвышается горка.

Многие лунные моря окаймлены протяженными горными хребтами. Хребты получили названия земных горных цепей (Кавказ, Альпы, Пиренеи и др.).



В полнолуние в небольшой телескоп хорошо видны Океан Бурь, Море Дождей, Море Ясности, а также кратеры (Тихо (см. рис.), Коперник, Кеплер), от которых расходятся протяженные лучевые системы.



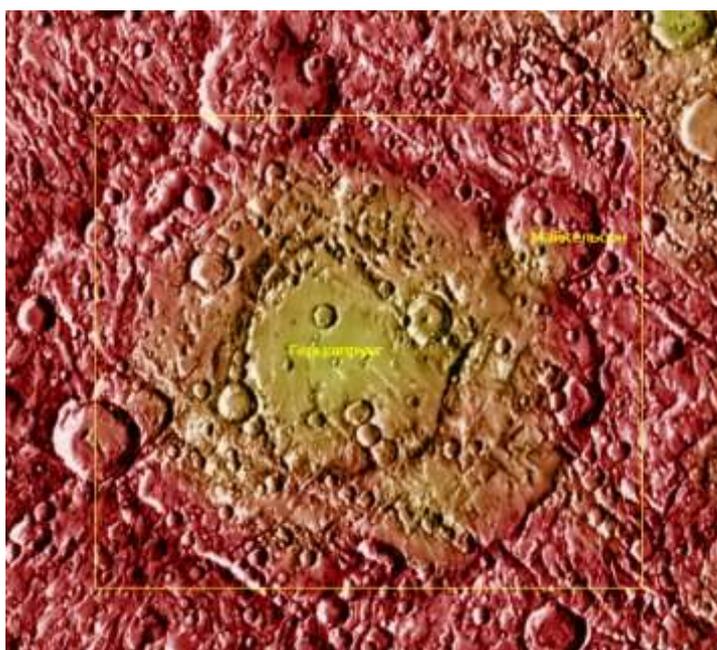
В отличие от продолжающихся несколько столетий телескопических исследований видимой стороны Луны, исследование обратной ее стороны началось, когда впервые в истории науки обратная сторона Луны была сфотографирована автоматической станцией «Луна-3» 7 октября 1959 г. Примерно через 6 лет (июль 1965 г.) другая наша автоматическая межпланетная станция (АМС) «Зонд-3», выведенная на гелиоцентрическую орбиту, передала новые фотографии. Полученные снимки позволили составить карты и атласы обратной стороны Луны, лунные глобусы и полные карты, охватывающие почти всю поверхность Луны.



На невидимом с Земли полушарии Луны преобладают материки. Средний диаметр крупного моря – Моря Москвы (см. рис.) – достигает 460 км. Обнаружены мореподобные круглые или овальные образования,

занимающие промежуточное место между лунными морями и крупнейшими кратерами. Много на обратной стороне Луны и кратеров (крупным присвоены имена выдающихся деятелей науки – Ломоносов, Джордано Бруно, Циолковский, Жолио Кюри и др.). Самым крупным является кратер Герцшпрунг диаметром 570 км, карта высот которого (красное – возвышенности, зелёное – низменности) показана на рисунке. Нередко кратеры образуют длинные цепочки, тянущиеся на сотни километров.

Большинство мелких и средних лунных кратеров образовалось в результате падения метеоритов, которые, достигая поверхности Луны, обладают такой кинетической энергией, что при ударе происходит взрыв. Метеорит разрушается, дробится; лунный грунт разлетается в разные стороны от места взрыва. Так образуются первичные кратеры. Чем их больше на данном участке лунной поверхности, тем больше возраст этого участка. Выброшенные при образовании первичных кратеров большие камни могут, падая на поверхность Луны, создавать вторичные кратеры. Возможно, что из таких вторичных кратеров состоят лучевые системы, которые хорошо видны в полнолуние у некоторых крупных молодых кратеров. Образование крупных кратеров, вероятно, связано и с бурной вулканической деятельностью, характерной для далекого прошлого Луны.



Лунные породы



Благодаря мягким посадкам автоматических станций на Луну, а затем и полетам на Луну американских астронавтов стали известны механические свойства лунного грунта и его химический состав. На Луне не оказалось толстого слоя пыли, которого когда-то опасались многие конструкторы лунников, но пыль на Луне есть. Она темно-серого цвета и по внешнему виду напоминает цемент (см. рис. выше).

Образцы лунных пород внешне похожи на земные изверженные базальты. В состав их входят хорошо известные на Земле химические элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg и др.). Но в лунных породах больше, чем в земных, содержится тугоплавких элементов (Ti, Zr, Sr и др.) и меньше – легкоплавких (Rb, K, Na и др.). Химический состав различных участков



поверхности Луны неодинаков.

В поверхностном слое Луны (реголите) содержатся осколки магматических пород, шлакообразные частицы с оплавленными гранями. Многие образцы как бы обработаны песком. Их вид свидетельствует о том, что они длительное время подвергались своеобразной эрозии (ударам мелких метеоритов и обработке потоками частиц, непрерывно исходящими от Солнца).

Из-за отсутствия воды минералов на Луне значительно меньше, чем на Земле. Микроорганизмов на Луне не обнаружено.

Лунные породы относятся к очень древним – их возраст составляет примерно 4 млрд. лет, причем самыми «молодыми» (несколько более 3 млрд. лет) оказались образцы, доставленные из морских районов.

На Луне давно завершилась эпоха активного вулканизма. С течением времени уменьшалась и интенсивность метеоритной бомбардировки лунной поверхности. Благодаря этому на протяжении последних 2–3 млрд. лет вид Луны практически не изменялся. А на Земле под воздействием воды и воздуха древний рельеф не мог сохраниться. Сравнение лунного и современного земного рельефа помогает воссоздать условия, в которых на Земле формировались запасы полезных ископаемых. Это необходимо знать для разработки научных основ поиска полезных ископаемых.

Еще и сейчас происходят лунотрясения (напоминающие слабые землетрясения). Они зарегистрированы сейсмографами, установленными на Луне астронавтами. Данные этих приборов позволили исследовать внутреннее строение Луны, выделив кору (толщиной около 60 км), мантию (до 1000 км) и ядро (его радиус около 750 км).

Контрольные вопросы к лекции:

1. Каков возраст планет Солнечной системы?
2. Какие процессы происходили в ходе формирования планет?
3. Почему при ясной погоде ночью происходит наиболее сильное похолодание?
4. Назовите основные формы рельефа Луны.
5. Каковы физические условия на поверхности Луны? Чем и по каким причинам они отличаются от земных?

Лекция 7

Планеты земной группы. Планеты-гиганты. Спутники и кольца планет. Малые тела Солнечной системы.

Планеты земной группы

Общие характеристики планет земной группы:

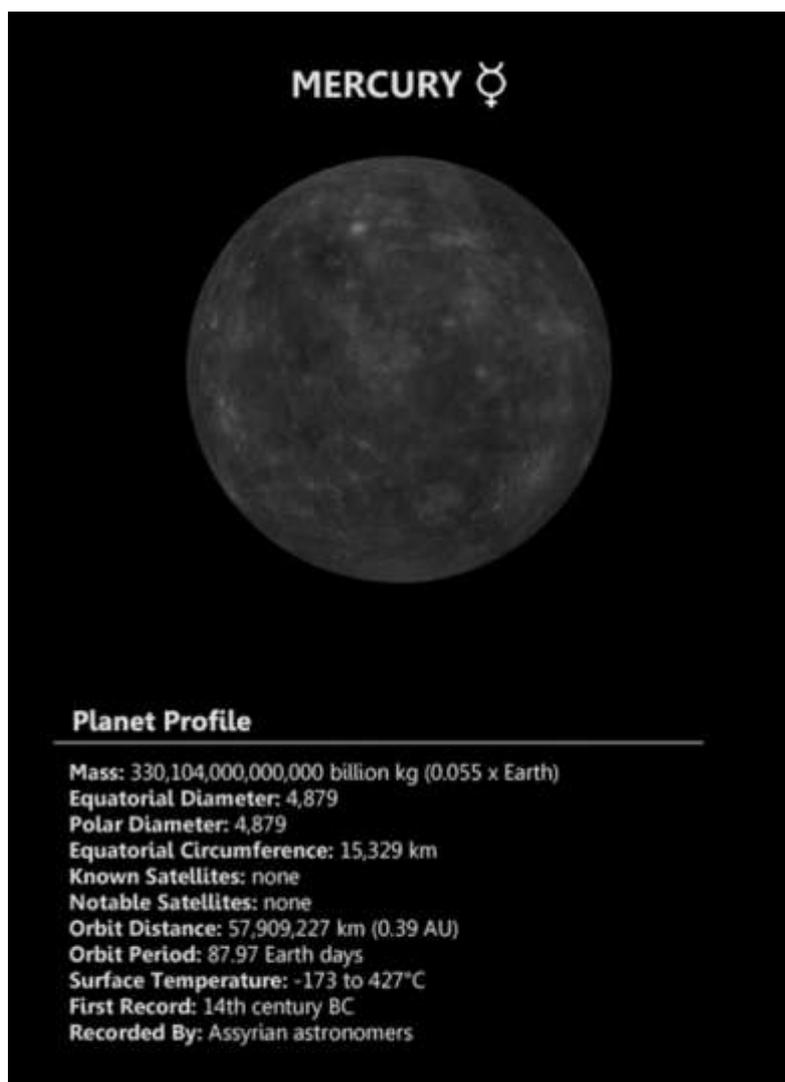
1. Большая плотность (в несколько раз больше плотности воды);
2. Медленное вращение вокруг своей оси;
3. Малое число спутников: Меркурий и Венера - нет, Земля - 1 (Луна), Марс - 2 (Фобос и Деймос);
4. Твердая поверхность;
5. Небольшие размеры и массы: небольшие – Меркурий и Марс, большие (в 2 раза) – Венера и Земля.
6. Наличие литосферы – характерная черта всех планет земной группы.

Отличительные характеристики планет земной группы:

1. Венера вращается ретроградно, т.е. в обратном направлении относительно других планет.
2. Углы наклона осей к плоскости орбиты (смена времен года). У Земли и Марса почти одинаковы, но каждое время года на Марсе почти в 2 раза длиннее, Меркурий и Венера - почти перпендикулярны орбите.
3. Сильное отличие в атмосфере: Венера имеет очень плотную, Земля - плотную, Марс разреженную, а Меркурий - только признаки.

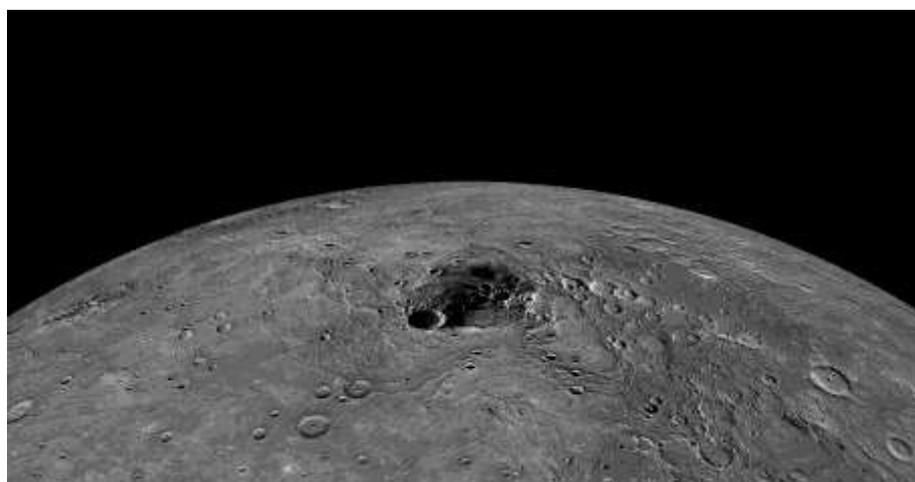
Меркурий

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



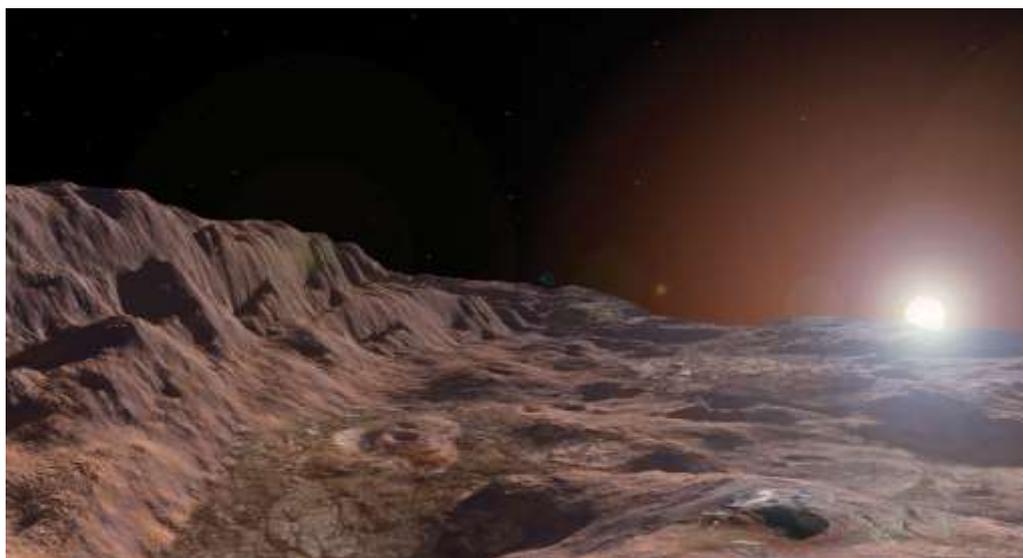
У Меркурия нет атмосферы, и его поверхность не защищена от палящих солнечных лучей днём и космического холода ночью. Днём на поверхности планеты температура поднимается до +427 °С, а ночью опускается до -173 °С. Перепад температур происходит медленно, потому что солнечные сутки (промежуток между двумя последовательными полуднями) на Меркурии равны 176 земным.

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



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

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



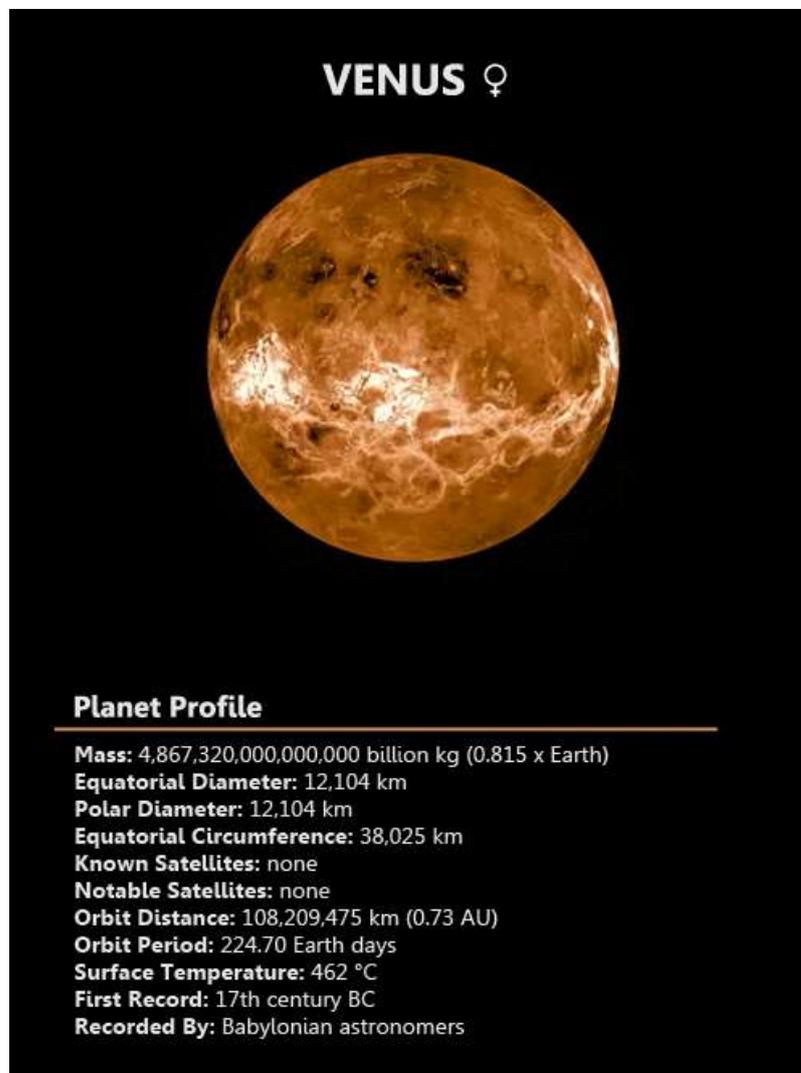
Вблизи поверхности Меркурия обнаружены атомы гелия и водорода, а также аргона и натрия. Их источниками являются солнечный ветер и вещество планеты, подверженное нагреванию и облучению Солнца.

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

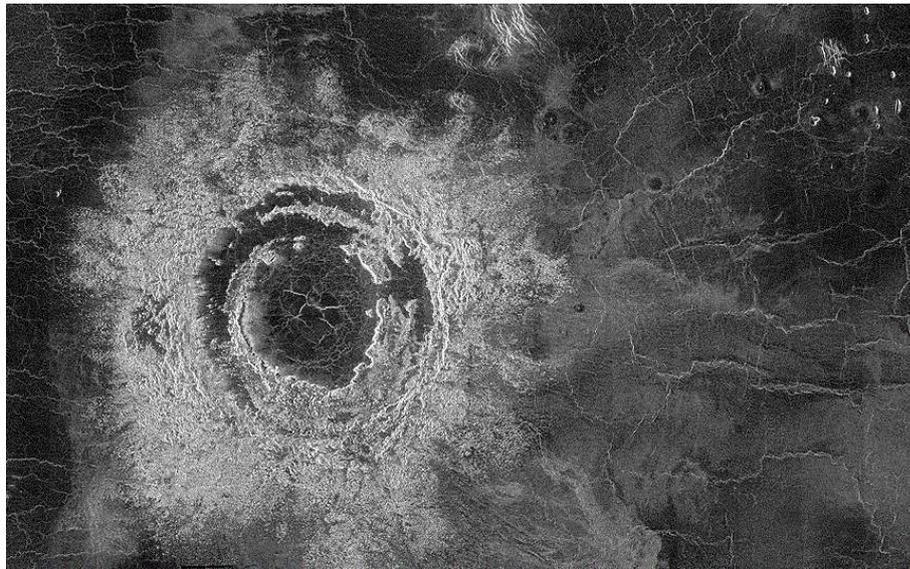
Венера

Венера – вторая от Солнца планета Солнечной системы (см. рис.). Она почти такого же размера, как и Земля, а её масса составляет около 80 % земной массы. На небе её можно наблюдать утром или вечером в виде очень яркого светила. Густая атмосфера Венеры долго скрывала тайны её поверхности. Учёные ещё в середине XX в. думали, что планета покрыта тропическими лесами. Но достигшие её советские космические аппараты «Венера» сфотографировали безжизненную раскалённую пустыню.

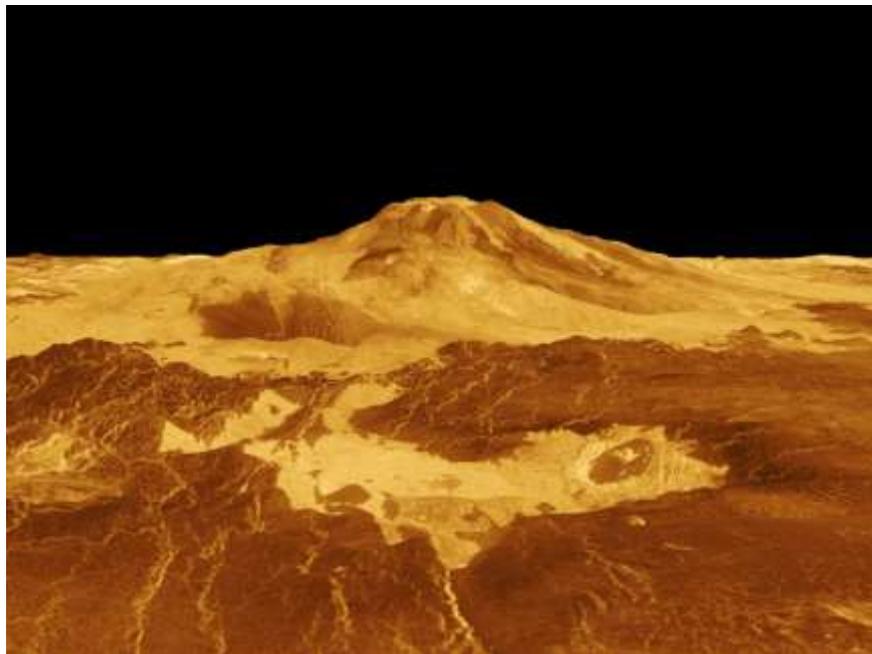
Температура поверхности достигает 462 °С и почти не изменяется в течение суток. Густые облака пропускают мало солнечного света и создают «сумеречную» освещённость даже тогда, когда Солнце находится высоко над горизонтом.



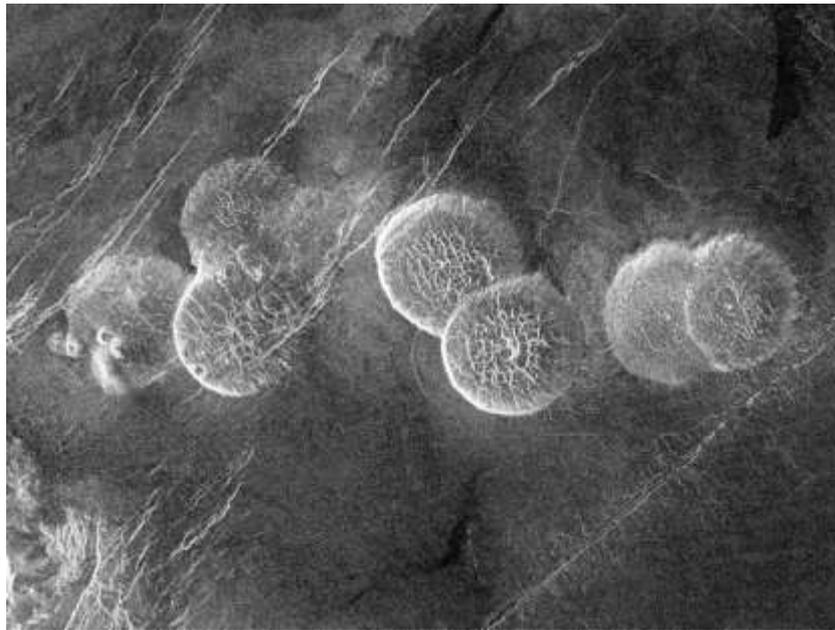
Большую часть поверхности Венеры занимают равнины. Самые высокие горы поднимаются на 11 км над средним уровнем поверхности – Горы Максвелла. Обнаружены на Венере кратеры диаметром до сотен километров. Крупные кратеры названы в честь выдающихся женщин мира (Ахматова, Войнич, Дункан, Мона Лиза (см. рис.),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



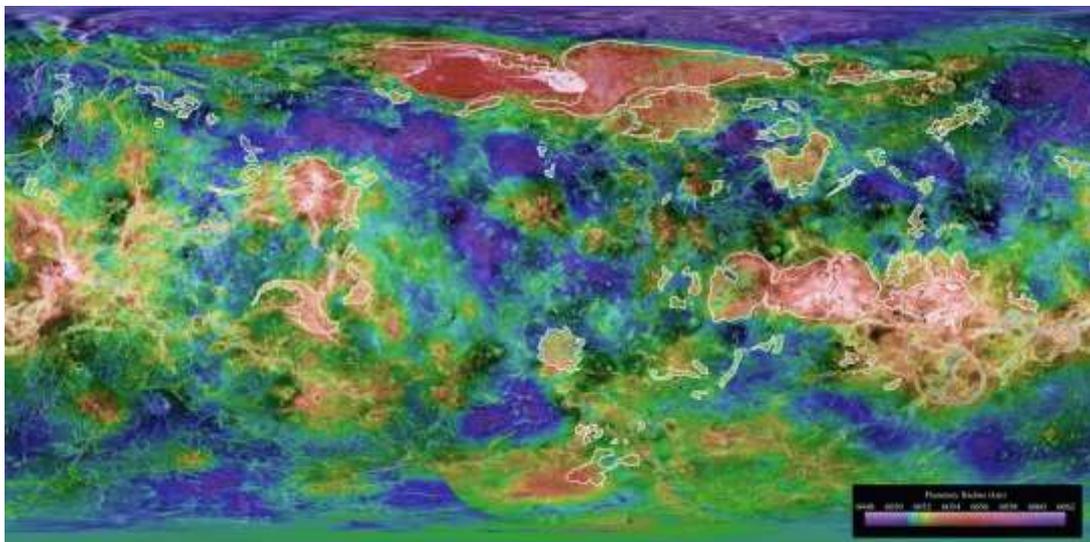
Около 500 млн. лет назад на Венере произошла глобальная геологическая катастрофа. Сотни тысяч действующих вулканов извергли огромное количество лавы, которая покрыла всю поверхность планеты. Самый высокий потухший вулкан (см. рис.) – гора Маат, названная так в честь египетской богини истины и порядка, – вздымается над окружающей её равниной почти на 8 км.



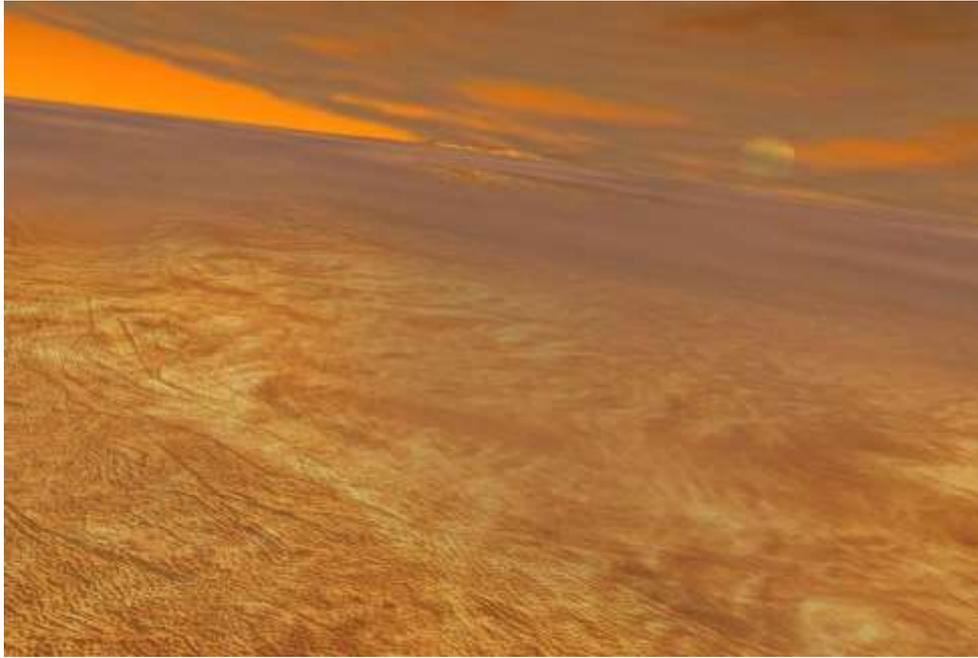
Отдельные вулканы достигают высоты 3 км при ширине у подножия 500 км. Многочисленные застывшие пузыри лавы имеют куполообразную форму (см. рис.).



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



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



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

Магнитное поле Венеры очень мало по причине медленного вращения планеты вокруг оси с востока на запад. Его напряжённость в 104 раз меньше земного. Магнитосфера почти полностью отсутствует, поэтому поток заряженных частиц, идущий от Солнца, сталкивается с атмосферой планеты и увлекает за собой её вещество, формируя ионный шлейф, который растягивается на 45 млн. км, т. е. достигает Земли.

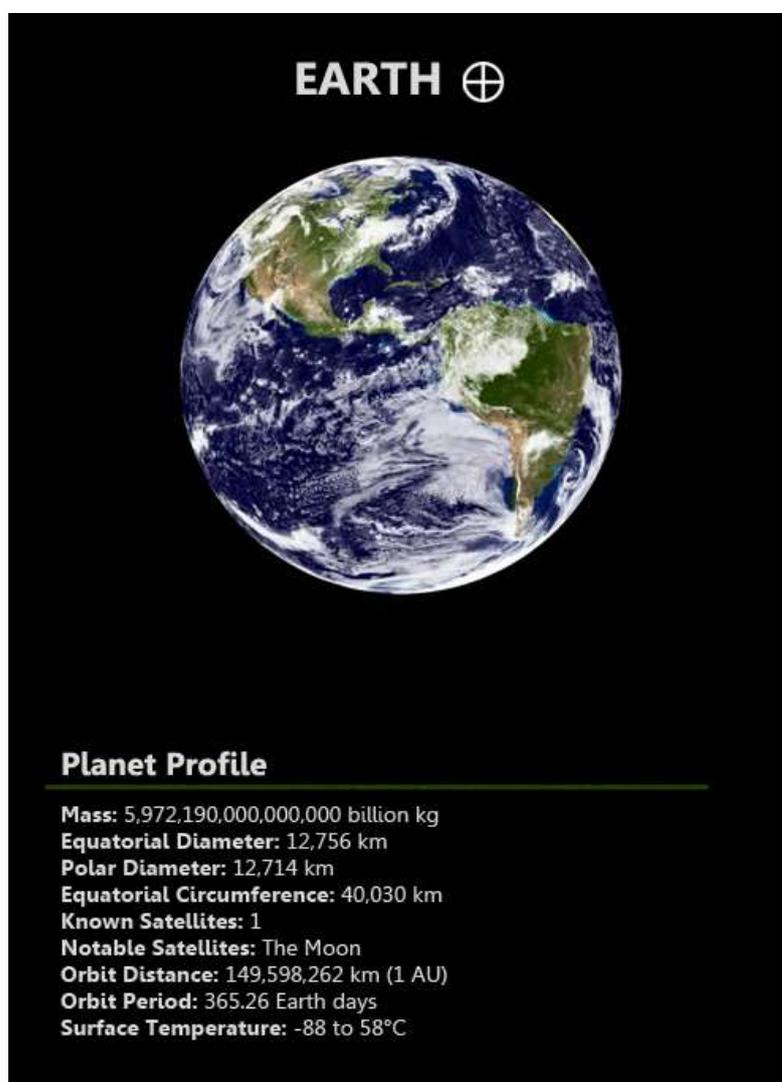
Земля

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

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

По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях – сейсмограммам – было установлено, что внутреннее строение планеты по

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



Ядро – наиболее плотная часть планетных недр. В центре Земли плотность вещества достигает $13\,500\text{ кг/м}^3$, а температура оценивается в 6000 К. Радиус ядра составляет 55 % радиуса Земли, а масса – около 30 % массы планеты. Земное ядро подразделяется на внешнее и твёрдое внутреннее

радиусом 1270 км. Переходная зона между внешней и внутренней частями ядра очень тонкая – около 5 км. У Венеры аналогичное ядро. Наиболее мощным ядром обладает Меркурий, радиус которого составляет 70 % радиуса планеты, а масса – 60 % массы всей планеты. У Марса небольшое ядро массой всего 7 % от всей массы планеты, а его радиус составляет 28 % радиуса Марса. Ядра планет в основном состоят из железа с примесью сернистого железа. Жидкий внешний слой ядра, вероятно, есть у Меркурия и Венеры.

Источниками нагрева недр планет служат:

- 1) выделение тепла при распаде радиоактивных элементов;
- 2) энергия, выделяющаяся при ударах тел различного размера (астероидов и др.) о поверхность планеты;
- 3) нагревание за счёт сжатия вещества планеты и гравитационной дифференциации.

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

Магнитное поле Земли генерируется в жидком металлическом слое ядра.

Земная атмосфера состоит в основном из азота и кислорода.

Марс

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



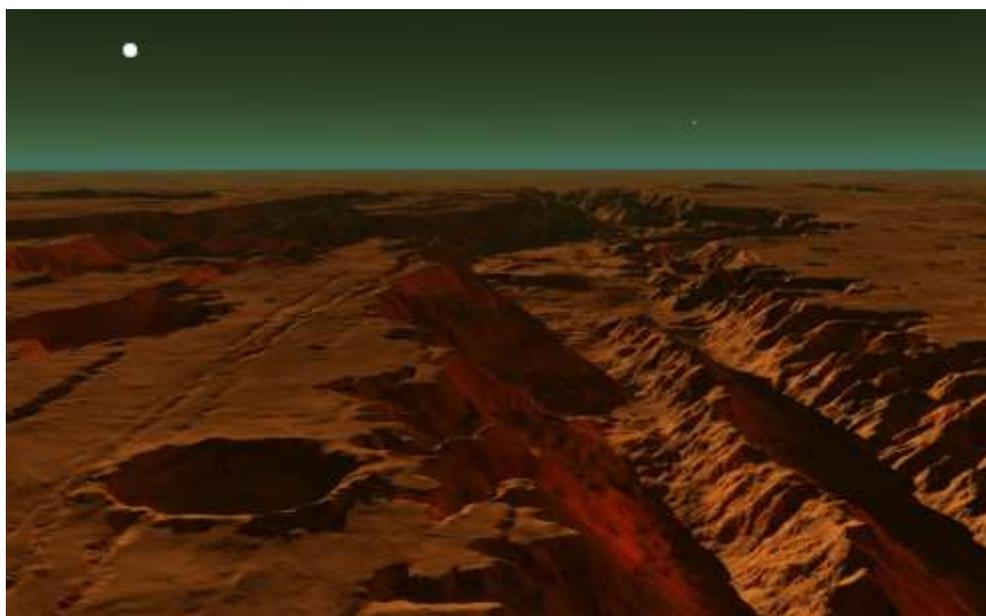
Полученные с помощью космических аппаратов изображения поверхности Марса показали, что планета представляет собой безжизненную пустыню, значительная часть которой покрыта красноватым песком и усеяна камнями. Красный цвет поверхности Марса объясняется высоким содержанием в почве оксидов железа.

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

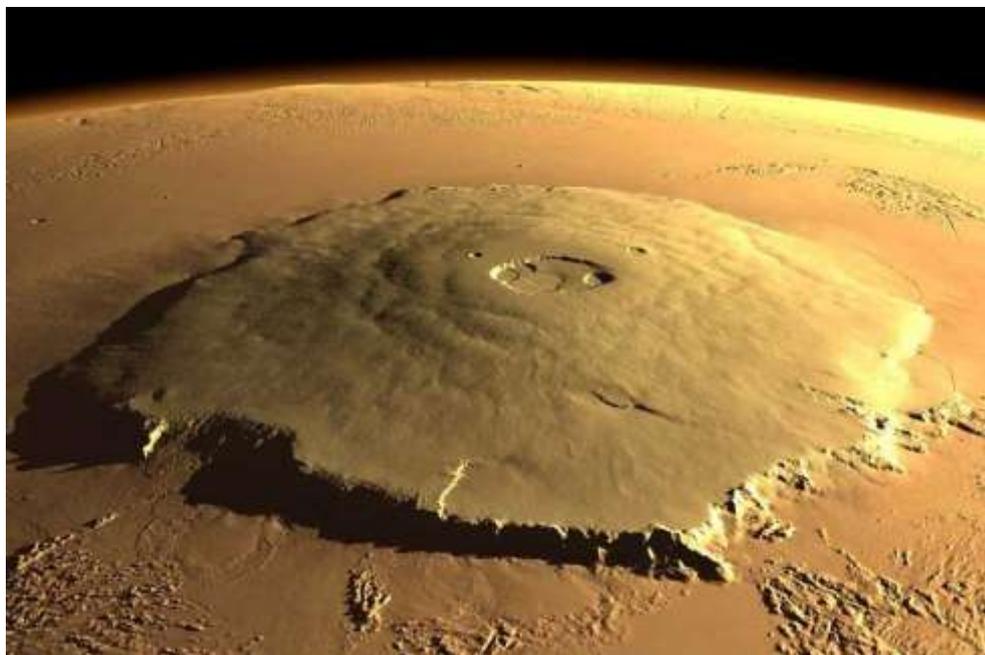


На Марсе очень много ударных кратеров большого размера. Это свидетельствует о том, что планета пережила множество катастроф, которые изменили условия её поверхности. Кратеры на Марсе названы в честь учёных, посвятивших свою деятельность изучению Марса и планет Солнечной системы (например, кратер Тихов).

Поверхность Марса характеризуется чётко выраженной асимметрией. Южное гористое полушарие в среднем на 5 км выше Северного. На снимках марсианской поверхности хорошо видны многочисленные крупные и мелкие каньоны. Их ширина достигает 600 км, глубина – 5 км. Самый большой каньон – Долина Маринера – тянется почти на 5000 км (см. рис.).



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



Знаменитые полярные шапки Марса образованы толстыми, порядка 3 км, слоями льда, смешанного с пылью. Верхний слой полярных шапок состоит из «сухого льда» (замёрзшего углекислого газа – CO_2) с небольшой примесью обычного льда (H_2O). Температура здесь опускается ниже -110°C . Когда на одном из полушарий начинается зима, соответствующая полярная шапка начинает расти и достигает 57° широты в Северном полушарии и 45° – в Южном. С приходом весны шапки начинают таять. Осенью, когда формируются полярные шапки, можно наблюдать голубовато-белые облака в атмосфере планеты.

Загадочные марсианские долины, похожие на высохшие русла рек (см. рис.), были созданы водными потоками, которые иссякли более миллиарда лет назад. Об обилии воды на Марсе в давние времена свидетельствуют многие факты. В 1999 г. были опубликованы исследования, доказывающие, что на Марсе раньше существовал океан воды. Это удалось установить с помощью фотоснимков по особенностям рельефа, представляющим древнюю

береговую линию. Океан мог существовать, пока температура поверхности Марса была достаточно высока. Планета начала охлаждаться около миллиарда лет назад. Тонкая атмосфера Марса не препятствовала «улетучиванию» воды в межпланетное пространство. При понижении температуры замёрзшая вода вперемешку с песком образовала подповерхностную ледяную оболочку – криосферу. Криосфера Марса содержит количество воды, эквивалентное слою толщиной около 1 км по всей планете.



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

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

Спутники планет земной группы

Из планет земной группы, кроме Земли, только Марс имеет два спутника. Это небольшие каменные тела неправильной формы размером 27 x 19 км – Фобос и 16 x 11 км – Деймос (см. рис.).



Зонд «Маринер-7» сфотографировал Фобос на фоне Марса в 1969 г., а «Маринер-9» передал множество снимков обоих спутников, на которых видно, что их поверхности неровные, обильно покрытые кратерами. Несколько близких подлетов к спутникам совершили зонды «Викинг-1», «Викинг-2» и «Фобос-2». На лучших фотографиях Фобоса видны детали рельефа размером до 5 м.

Они очень близки к планете, особенно Фобос, удаленный от центра Марса менее чем на 2,8 его радиуса. Поэтому угловая скорость его обращения (период менее 7 ч 40 мин) больше скорости суточного вращения самого Марса (период которого на 37 мин превышает земные сутки). Поэтому Фобос быстро перемещается по марсианскому небу с запада на восток! Средняя плотность Фобоса – менее 2 г/см^3 , а ускорение свободного падения на его поверхности составляет $0,5 \text{ см/с}^2$. Человек весил бы на Фобосе всего несколько десятков граммов и мог бы, бросив камень рукой, заставить его навсегда улететь в космос: скорость отрыва на поверхности Фобоса – около 13 м/с. Самый большой кратер на Фобосе имеет диаметр,

сопоставимый с наименьшим поперечником самого спутника, – 8 км. На Деймосе крупнейшая впадина имеет диаметр 2 км.

Небольшими кратерами поверхности спутников усеяны примерно так же, как Луна. При общем сходстве, обилии мелко раздробленного материала, покрывающего поверхности спутников, Фобос выглядит более «ободраным», а Деймос имеет более сглаженную, засыпанную пылью поверхность. На Фобосе обнаружены загадочные борозды, пересекающие почти весь спутник. Борозды имеют ширину 100-200 м и тянутся на десятки километров. Глубина их от 20 до 90 м. Есть несколько гипотез о происхождении этих борозд, но пока нет достаточно убедительного объяснения, как, впрочем, и объяснения происхождения самих спутников. Скорее всего, это захваченные Марсом астероиды.

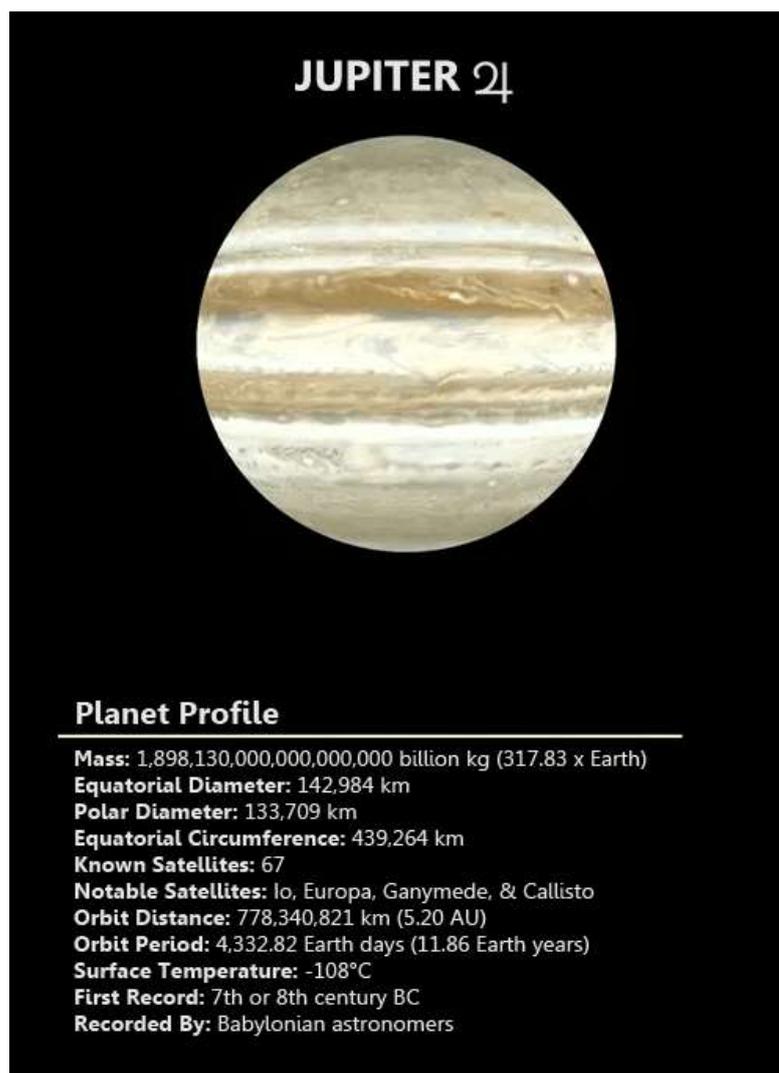
Планеты-гиганты

Планеты-гиганты – это крупные массивные образования с относительно малой средней плотностью. К этой группе планет относятся: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

Общие характеристики планет-гигантов

1. Большие размеры и масса;
2. Малая плотность ($\approx \text{H}_2\text{O}$);
3. Быстрое вращение вокруг оси (экваториальные зоны вращаются быстрее полярных, большое сжатие планет);
4. Очень удалены от Солнца – поэтому на них низкая температура;
5. Большое число спутников;
6. Имеются кольца (предсказаны в 1960 г. С.К. Всехсвятским);
7. Не имеют твердой поверхности;
8. Все планеты-гиганты обладают магнитным полем;
9. Плотная. Не - Н атмосфера.

Юпитер



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

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

В экваториальной зоне (от $+9^\circ$ до -9°) газовые течения направлены строго с запада на восток. Скорость движения газовых масс достигает 180 м/с. Вблизи широт от $+20^\circ$ до -20° вещество движется в противоположную сторону, с востока на запад, со скоростью около 50 м/с. Между основными течениями существуют вихри и струи.

Для Юпитера, как и для всех планет-гигантов, характерны светлые и тёмные овальные пятна. Наиболее примечательное из них – большое красное пятно (см. рис.), наблюдающееся в течение трёх веков. Это огромный и очень устойчивый вихрь, похожий на земной ураган.



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

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

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

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

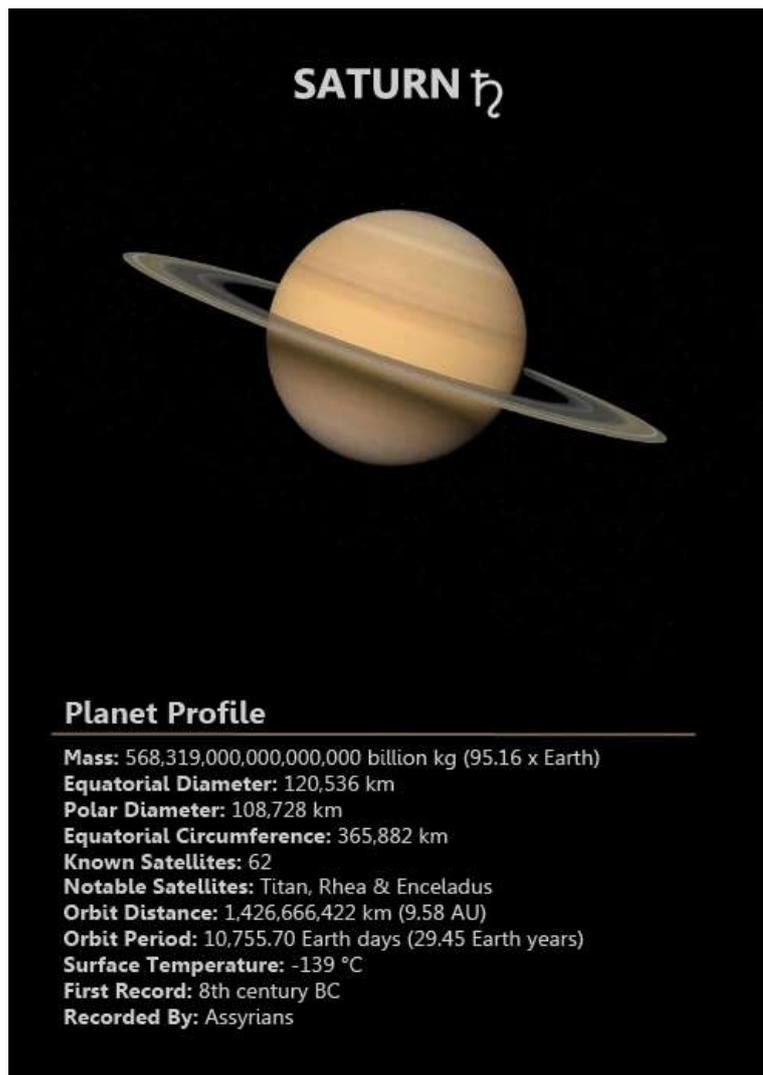


В центре Юпитера находится твёрдое ядро, состоящее из оксидов кремния, магния и железа с примесями. Диаметр внутреннего ядра – около 25 тыс. км, температура в его центре составляет 23 000 К. Такая высокая температура объясняется медленным гравитационным сжатием планеты.



В 1979 г. космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» обнаружили у Юпитера кольца (см. рис.). Они состоят из очень мелких пылинок (0,2–200 мкм). Эти пылинки постепенно падают в атмосферу Юпитера, а их место занимают другие, которые образуются при столкновении малых спутников, особенно Амальтеи, с метеоритными телами.

Сатурн



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

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

На основе спектральных исследований в 1895 г. русский учёный А. А. Белопольский установил, что кольца не монолитные, а состоят из отдельных мелких тел. Снимки, полученные космическим аппаратом «Вояджер-2»,

показали, что систему колец образуют тысячи тонких колец. Каждое из них состоит из бесчисленного множества обломков льда размером от мельчайших пылинок до нескольких метров. Толщина колец не превышает 2 км, а толщина отдельного кольца – не больше 30 м.

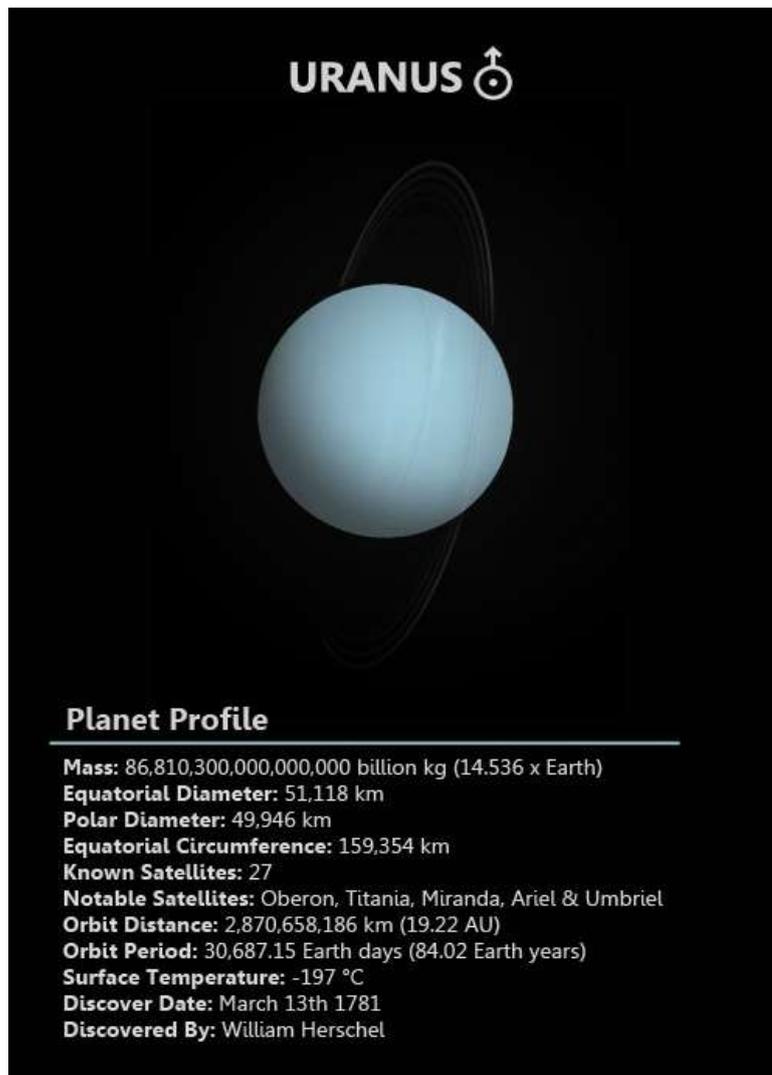


Плоскость колец расположена в плоскости экватора Сатурна, которая имеет наклон 27° к плоскости орбиты. При движении Сатурна по орбите кольца, сохраняя положение в пространстве, дважды за одно обращение планеты вокруг Солнца оказываются повернутыми к Земле своим ребром. А так как толщина их мала, то в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

Напряжённость магнитного поля Сатурна близка к земной.

Уран

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



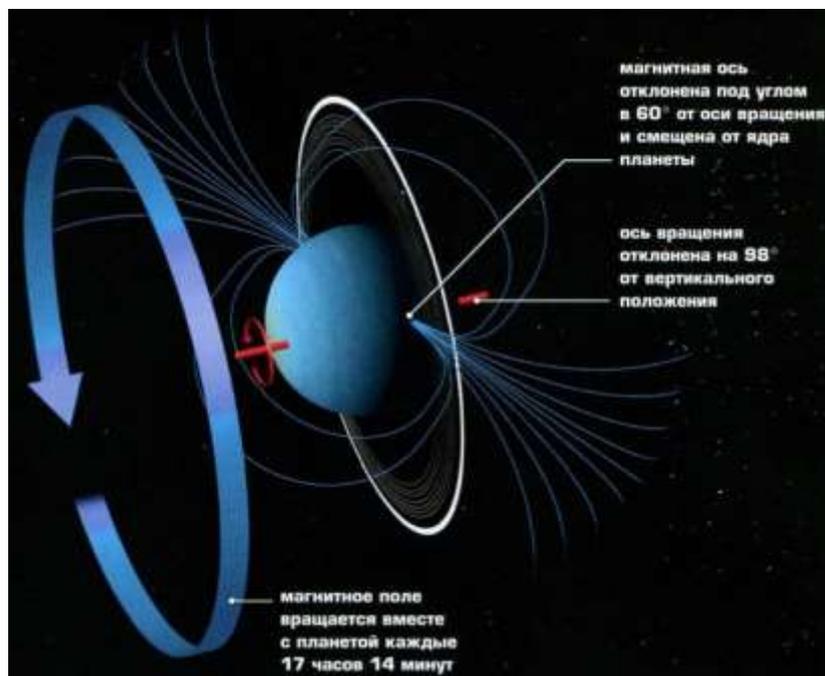
В 1977 г. были открыты кольца Урана (см. рис.). Снимки, сделанные «Вояджером-2» в 1986 г., подтвердили их существование.



Уран окружён одиннадцатью узкими кольцами, располагающимися в плоскости экватора на расстоянии от 42 до 51,4 тыс. км (или 1,65–2,02 радиуса) от центра планеты.

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

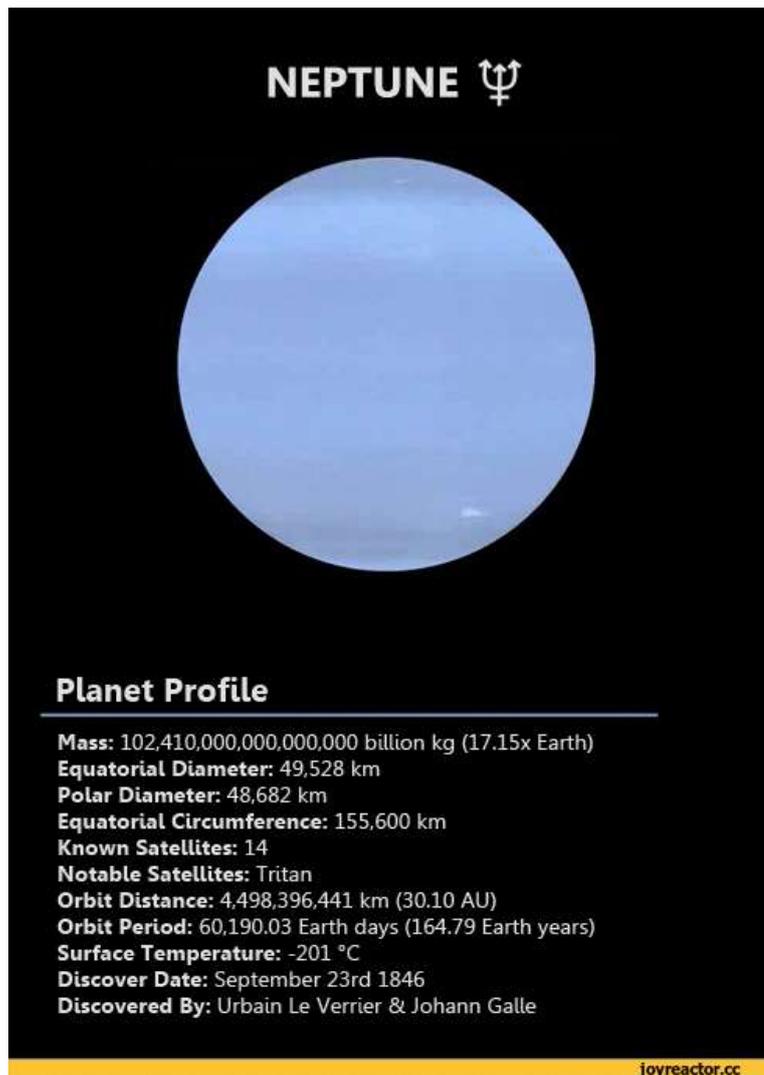
Магнитное поле Урана имеет одну интересную особенность. Ось вращения планеты почти лежит в плоскости орбиты, и линии магнитного поля скручены вращением Урана в длинный штопор позади планеты (см. рис.).



Напряжённость магнитного поля приблизительно равна земной.

Нептун

Нептун – самый маленький гигант (см. рис.). Находится почти на краю Солнечной системы и получает очень мало солнечной энергии. Но, несмотря на это, планета очень активна. На фотографиях Нептуна хорошо видны облака, появляющиеся и исчезающие в атмосфере планеты.

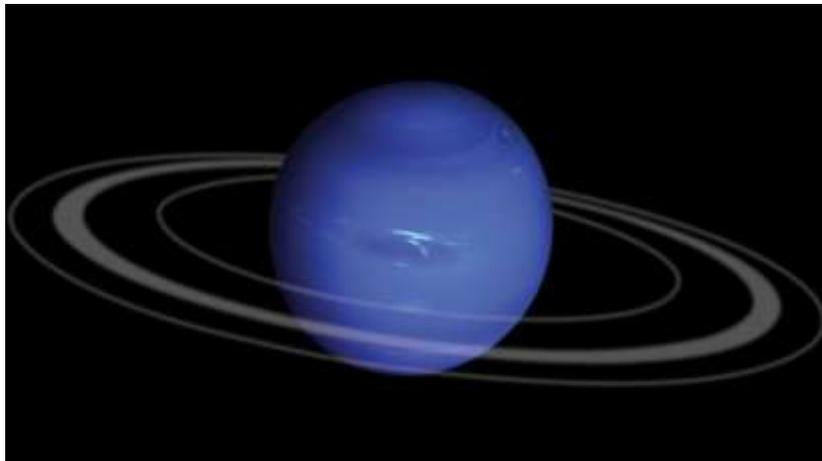


Примечательной деталью Нептуна является и Большое Тёмное Пятно (см. рис.), схожее по структуре с Большим Красным Пятном Юпитера.



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

Предположение о существовании колец у Нептуна было выдвинуто в 1984 г. на основе наблюдений по покрытию звёзд планетой. Четыре кольца видны на снимках, полученных космическим кораблём «Вояджер-2» в 1989 г (одно из колец очень слабое) (см. рис.).



Располагаются кольца на расстоянии от 1,7 до 2,5 радиуса планеты. Ширина колец – 1700, 150, 5000 и 50 км соответственно. Они состоят из мелких силикатных пылинок, отражающих 6 % солнечного света.

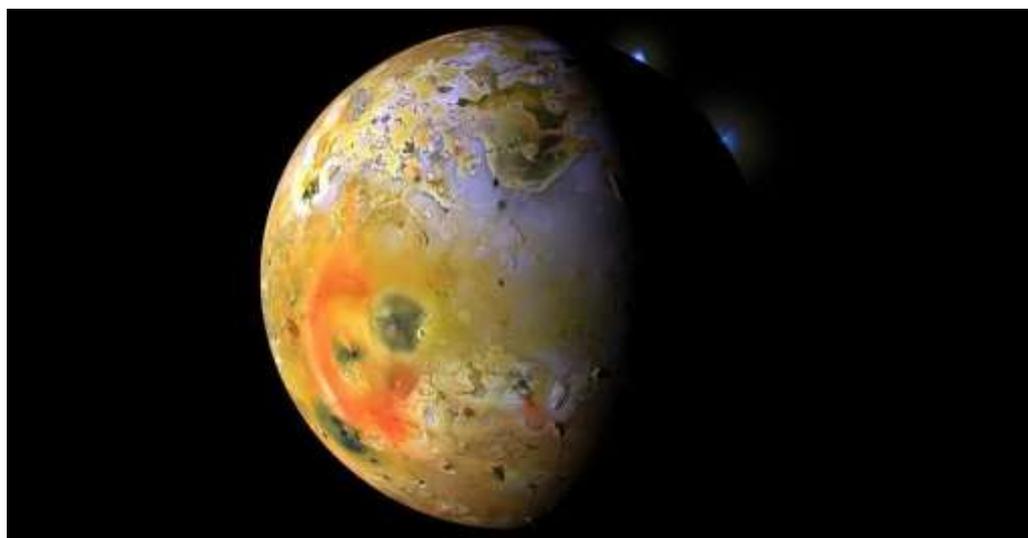
Напряжённость магнитного поля у Нептуна в 3 раза меньше, чем у Земли.

Спутники планет-гигантов



В Солнечной системе на начало 2014 г. известно 173 естественных спутника планет и практически все они являются спутниками планет-гигантов. Шесть спутников планет-гигантов – Ио, Европа, Ганимед и Каллисто (спутники Юпитера), Титан (спутник Сатурна) и Тритон (спутник Нептуна), имеют диаметр больше 2500 км, а Ганимед и Титан даже превосходят по размеру Меркурий (см. рис. выше).

Небольшие спутники размером в десятки километров представляют собой каменные или ледяные тела неправильной формы. Их поверхности усеяны кратерами и покрыты мелкой пылью. Средние спутники (в несколько сотен километров) в основном шарообразные и имеют малую плотность. По внешнему виду их поверхность напоминает лунную.



Отличаются разнообразием 6 крупнейших спутников. По своему строению они больше похожи на планеты земной группы. Крупнейшие спутники Юпитера: Ио (см. рис. выше), Европа, Ганимед (см. рис.) и Каллисто были открыты ещё в 1610 г. Галилеем. Однако основные сведения о природе крупных спутников планет-гигантов получены в результате исследований с помощью космических аппаратов.

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

Ио, Европа и Ганимед. У Тритона и Каллисто каменные ядра такого же или даже большего размеров.

Силикатная (каменистая) кора Ио имеет толщину 30 км. Под ней на глубине 100 км находится жидкая магма, температура которой достигает 2000 К. Магма питает многочисленные вулканы Ио.

Остальные спутники покрыты ледяной оболочкой разной толщины, под которой расположена каменная мантия.



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

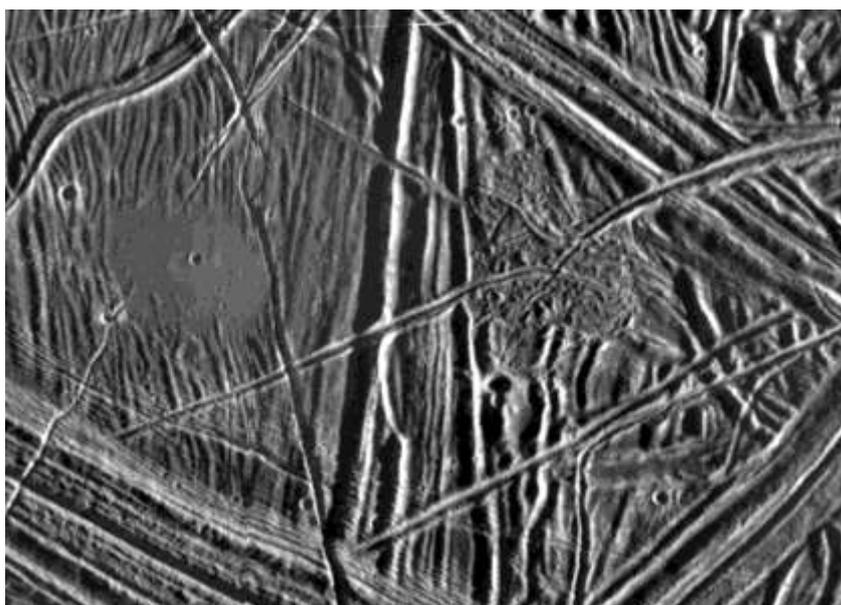


Ледяную оболочку Европы (см. рис.) пересекает сеть светлых и тёмных узких полос. Это трещины в толстой ледяной коре, вызываемые приливными

воздействиями Юпитера. Многолетние наблюдения за рисунком, который образуют трещины, показали, что ледяные массы немного смещаются относительно друг друга. Это значит, что подо льдом находится вода.



В некоторых местах ледяного панциря Европы космический аппарат «Галилео» сфотографировал странные хаотические нагромождения старых льдин, замороженных в свежий лёд. Эти структуры называются «хаосами» (см. рис.). Они свидетельствуют о том, что время от времени лёд подтаивает, но потом снова застывает. Не успевшие растаять льдины оказываются замороженными в новый лёд. О том, что ледяная поверхность Европы молода, свидетельствует и почти полное отсутствие на ней ударных кратеров.



На Ио нет признаков существования значительного количества воды ни внутри спутника, ни тем более на его поверхности. Зато там открыты

многочисленные вулканические извержения. Выброшенные вулканами и оседающие на поверхности соединения серы придают спутнику окраску от белой до ярко-красной и чёрной (см. рис.).



При этом цвет зависит от температуры вещества. Из жерла вулканов газы выбрасываются на высоту около 200 км со скоростью примерно 1 км/с. Газовые гейзеры замечены над полярной шапкой Тритона (см. рис.). Струи тёмного вещества вырываются вверх с его поверхности и достигают высоты 8 км.



Наиболее мощную атмосферу имеет Титан (см. рис.).



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

Разреженную атмосферу из азота и метана имеет Тритон (10^{-5} земной).

Слабая атмосфера из молекулярного кислорода окутывает Ганимед и Европу (10^{-9} и 10^{-11} земной). Образуется она так: солнечный свет, космические лучи и микрометеориты выбивают с ледяной поверхности молекулы воды, которые под действием ультрафиолетового излучения распадаются на атомы водорода и кислорода. Атомы водорода сразу же покидают атмосферу, а атомы кислорода объединяются в молекулы. Разреженная атмосфера из углекислого газа есть у Каллисто, такой же разреженной атмосферой из оксидов серы и вулканических газов обладает Ио (10^{-9} земной).

У нескольких крупных спутников обнаружены собственные магнитные поля.

Карликовые планеты и малые тела Солнечной системы

Карликовые планеты

В августе 2006 г. на Ассамблее Международного астрономического союза было принято новое определение планеты и впервые введено понятие

«карликовая планета». **Карликовыми планетами считаются объекты, вращающиеся вокруг звезды, имеющие гидростатически равновесную форму (шарообразную), но не расчистившие близлежащее пространство и не являющиеся спутниками больших планет.**

До августа 2006 г. Плутон, открытый в 1930 г., считался девятой планетой Солнечной системы. Однако по динамическим и физическим характеристикам он существенно отличался от других планет.

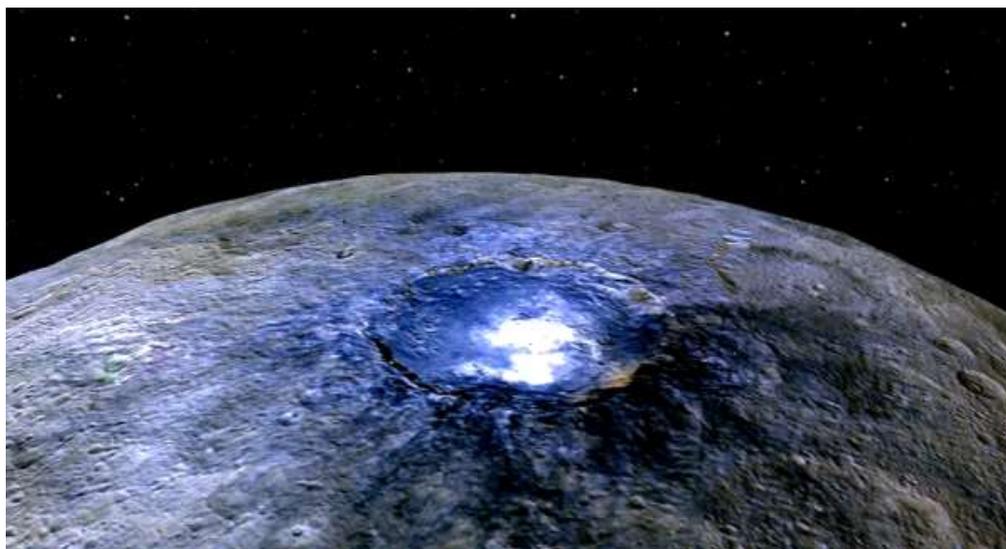
В 1978 г. у Плутона был открыт спутник – Харон. Его диаметр составляет 1205 км, чуть больше половины диаметра Плутона, а соотношение масс – 1:8 (см. рис.). Одни астрономы причисляли Харон к спутникам, другие считали систему Плутон – Харон двойной планетой. Согласно решению Международного астрономического союза отличие двойной планеты от системы планета – спутник (например, Земля – Луна) кроется в расположении барицентра – общего центра масс. В первом случае этот центр находится в открытом космосе, во втором – внутри основной планеты, имеющей спутники.



Стало очевидным, что Плутон – лишь один из наиболее крупных известных до настоящего времени объектов пояса Койпера, причём по крайней мере один из объектов пояса (Эрида) является более крупным телом, чем Плутон. Карликовыми планетами считаются также «бывший» астероид Церера, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, и объекты пояса Койпера – Эрида, Хуамеа и Макемаке.

В 2015 году зонд НАСА под названием «Рассвет» посетил Цереру – ледяной мир, который сразу вызвал необыкновенный интерес у ученых, благодаря наличию на его поверхности загадочных белых пятен (см. рис.).

На сегодняшний день, исследователи считают, что наблюдаемые на поверхности Цереры пятна представляют собой лед или солевые залежи.



Планеты и карликовые планеты – это два разных класса объектов Солнечной системы. На рисунке показаны крупнейшие карликовые планеты в сравнении с Землей (см. рис.). По мнению астрономов, в области пояса Койпера находятся десятки карликовых планет, подобных Плутону, их обнаружение лишь вопрос времени.

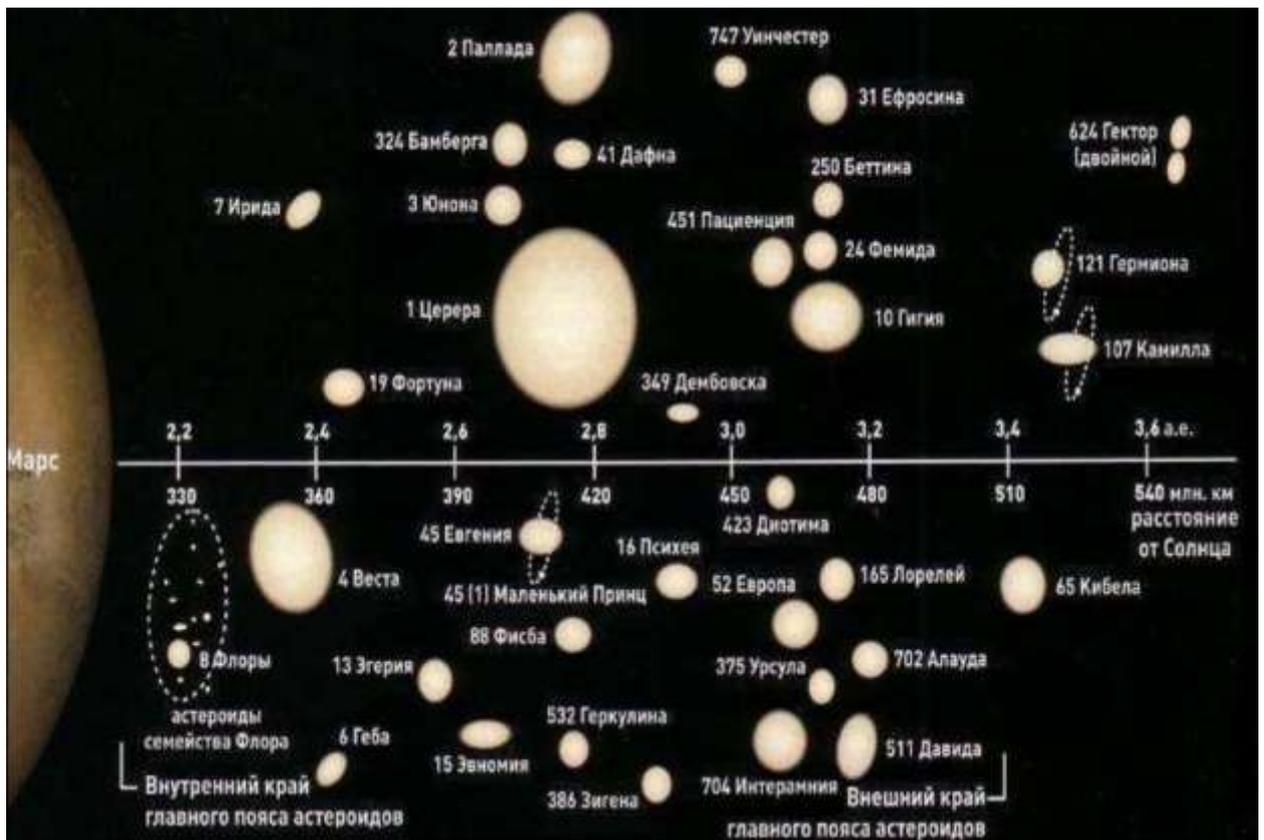


Астероиды

Все другие объекты, кроме карликовых планет, обращающиеся вокруг Солнца и не являющиеся спутниками, называются малыми телами Солнечной системы. К данному типу относится большинство астероидов между Марсом и Юпитером, а также транснептуновые объекты (**Транснептуновые объекты** – это тела, вращающиеся вокруг Солнца за орбитой Нептуна) пояса Койпера, кометы и все остальные тела, обращающиеся вокруг Солнца. После 1801 г. между орбитами Марса и Юпитера были обнаружены карликовая планета Церера и множество астероидов. **Астероид (малая планета) – малое тело Солнечной системы, имеющее неправильную форму и находящееся на гелиоцентрической орбите.** На рисунке показан астероид Хирон.



К началу XX в. было обнаружено около 500 астероидов с диаметрами от нескольких десятков километров и больше. В настоящее время каталог пронумерованных астероидов содержит более 380 тыс., а всего открыто около 600 тыс. объектов. Крупнейшие астероиды показаны на рисунке.



Значительная часть (98 %) астероидов движется в плоскостях, близких к эклиптике, по орбитам с малым эксцентриситетом, располагаясь между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии 2,2–4,5 а. е. от Солнца.

Вокруг Солнца астероиды движутся в ту же сторону, что и большие планеты. Область пространства между орбитами Марса и Юпитера, где находится подавляющее большинство астероидов, **называется Главным поясом астероидов.**

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

В 1951 г. Джерард Койпер предсказал существование пояса астероидов за орбитой Нептуна. Теоретически этот пояс должен быть расположен на расстоянии 35–50 а. е. от Солнца. Возможно, это остаток первоначальной туманности, из которой сформировалась Солнечная система.

Суммарная масса тел пояса Койпера сопоставима с массой Земли.

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



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



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

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

Первоначально астероидам давали имена мифологических богинь, потом просто женские имена. Когда иссякли и они, астероиды стали называть в честь известных учёных, различных стран и городов.

Метеориты

В межпланетном пространстве движется огромное количество *каменных и железных тел самых разнообразных по размерам, форме и составу*. Эти тела получили название **метеоритных тел**.

При вторжении такого тела в атмосферу Земли с космической скоростью в результате трения о воздух оно нагревается, начинает плавиться и светиться – на небе появляется яркий огненный шар. Это явление получило название болид (греч. *bolidos* – метательное копьё) (см. рис.).

Болид – яркий огненный шар на небе, образовавшийся в результате вторжения метеоритного тела в атмосферу Земли.



В ночное время болид ярко освещает местность на десятки и сотни километров вокруг. Очень яркие болиды видны даже днём при полном солнечном освещении. За огненным шаром вдоль его траектории остаётся след, представляющий в своём начале свечение ионизированных молекул воздуха и заканчивающийся струями пыли. Пылинки – это продукты разрушения метеоритного тела во время его движения в атмосфере, так как при полёте с огромной скоростью тело нагревается до нескольких тысяч градусов. Вещество на его поверхности непрерывно расплавляется и частично испаряется: немедленно срывается потоками воздуха и разбрызгивается в виде мельчайших капелек. Они и составляют пылевой след болида. Нарастающее уплотнение воздуха создаёт вокруг метеоритного тела ударную волну. Она вызывает такие звуковые явления, как грохот и гул.

Уцелевший от полного разрушения остаток метеоритного тела падает на поверхность Земли. Это и есть метеорит.

Метеорит - тело космического происхождения, упавшее на поверхность крупного небесного объекта.

Метеориты представляют собой обломки небесных тел Солнечной системы. Как правило, они получают свои названия по ближайшему к месту падения населённому пункту или географическому объекту.

Метеоритное тело, имеющее огромную начальную массу в десятки и сотни тысяч тонн, проходит всю толщу атмосферы, сохраняя космическую

скорость в несколько километров в секунду. В результате удара происходит взрыв, на месте удара образуется метеоритный кратер, который может иметь размеры от нескольких метров до 100 км. Наиболее известен Аризонский кратер диаметром 1200 м, глубиной 180 м и высотой вала около 50 м (см. рис.). Возможно, он появился 30 тыс. лет назад. Кратеры большого размера (хорошо сохранившиеся на поверхности Луны) на Земле обнаружить сложно. Они быстро разрушаются под воздействием воздуха, воды, ветра, растительности, заносятся слоем песка и грунта. Учёные с помощью космических снимков научились находить древние метеоритные кратеры на Земле. Сегодня обнаружено более 150 астроблем – «звёздных ран», как их образно называют учёные.



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

Каменные метеориты близки по составу к земным горным породам: содержат оксиды железа, кремния, магния. Около 85 % каменных метеоритов содержат хондры – сферические частицы размером от микроскопических зёрен до горошины. Такие каменные метеориты называются хондритами, остальные – ахондритами.

Самый крупный метеорит найден в 1920 г. близ населённого пункта Гоба в Юго-Западной Африке (см. рис.). Это железный метеорит массой около 60 т. Однако, такие крупные тела падают редко. Как правило, массы

большинства метеоритов колеблются от сотен граммов до нескольких килограммов.



Кометы

Кометы – непрочные тела, представляющие сгустки замёрзшего газа и пыли, которые вращаются вокруг Солнца по сильно вытянутым эллиптическим орбитам.

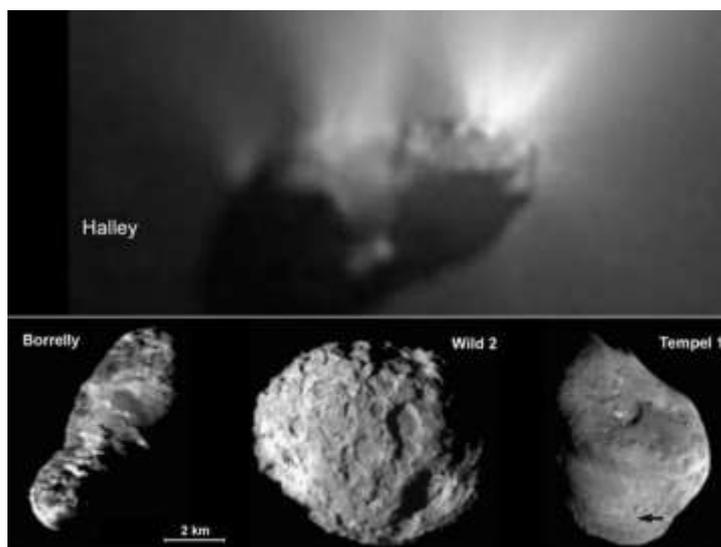
О кометах, «хвостатых звёздах», было известно с давних времён. Первые китайские записи о кометах относятся к третьему тысячелетию до нашей эры. Вдали от Солнца комета выглядит слабым туманным объектом. По мере приближения к Солнцу она становится ярче, увеличивается в размерах, у неё появляется хвост,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

За историю человечества уже наблюдалось около 3500 комет. Зарегистрированы в каталогах около 1000 таких объектов и определены элементы их орбит. Почти все кометы движутся по вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом, близким к единице. Кометы подразделяются на короткопериодические (с периодом обращения меньше 200 лет) и

долгопериодические. Первую периодическую комету обнаружил английский астроном Эдмунд Галлей. Он вычислил орбиты 24 ярких комет. Анализируя свой кометный каталог, Галлей заметил сходство элементов орбит комет 1531, 1607 и 1682 гг. и предположил, что это последовательное возвращение одной и той же кометы, которая движется по сильно вытянутой эллиптической орбите с периодом почти 76 лет. В полном соответствии с предсказанием Галлея её обнаружили в 1758 г. За этой кометой закрепилось название «комета Галлея» (см. рис.). Она движется по орбите с большей полуосью $a = 17,94$ а. е. в направлении, противоположном движению Земли.



В строении кометы выделяются следующие составные элементы: ядро, голова и хвост. Ядро кометы (см. рис.) – это небольшое твёрдое ледяное тело, включающее тугоплавкие частички и органические соединения.



До 80 % ядра кометы состоит из водяного льда, а также из замёрзшего углекислого газа, угарного газа, метана, аммиака и вкраплённых в лёд металлических частиц.

Есть в кометных льдах и более сложные вещества, вплоть до аминокислот. По результатам исследований, выполненных космическими аппаратами, ядро кометы Галлея (см. рис.) представляет собой монолитное тело неправильной формы размерами 16x8 км, массой $3 \cdot 10^{14}$ кг и малой плотностью порядка 600 кг/м^3 .



При приближении к Солнцу, на расстоянии нескольких астрономических единиц, у кометы образуется голова. Она возникает в результате нагрева ядра, испарения и выделения с его поверхности газов и пыли.

Видимые поперечники голов комет с приближением к Солнцу достигают размеров 10^4 – 10^6 км. Под действием давления солнечного излучения на газы, окружающие голову кометы, образуется хвост. Хвосты ярких комет тянутся на сотни миллионов километров. Например, хвост кометы Хиякутаки наблюдался растянутым на 300 млн км (см. рис.).



Концентрация частиц в хвостах комет очень низкая, её можно сравнить с межпланетной средой.

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

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

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

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

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

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

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



Метеоры и метеорные потоки

Метеор («падающая звезда») - явление, возникающее при сгорании в атмосфере Земли мелких метеорных тел (метеороидов).

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

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

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

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

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

Метеоры, появляющиеся в определённое время года и падающие десятками в час, принадлежат метеорным потокам, или «звёздным дождям». Метеорные потоки наблюдаются, когда Земля пересекает орбиту метеорного роя. Видимые пути метеоров одного потока, спроектированные на небесную сферу и продолженные в обратном направлении, пересекаются в одной области на небе, называемой радиантом (см. рис.).



Метеорный поток носит имя того созвездия, в котором находится радиант, например Дракониды, Ориониды и др. Среди метеорных потоков встречаются такие, интенсивность которых из года в год не меняется. Это значит, что метеорные частички распределены почти равномерно вдоль орбиты роя. Наиболее известным таким потоком является «поток Персеиды», наблюдающийся ежегодно в августе (см. рис.).



Орбита этого роя совпадает с орбитой кометы 1862III. Один раз в 33 года наблюдаются метеорные дожди с радиантом в созвездии Льва, когда Земля встречается с самой плотной частью роя. Этот рой вызывает метеорный поток Леониды (см. рис.), наблюдающийся в середине ноября.



Орбита данного метеорного роя практически совпадает с орбитой кометы 1866I. Таким образом, точно установлено родство метеорных роев с кометами. Комета, разрушаясь, порождает метеорный рой.

Контрольные вопросы к лекции:

1. Чем объясняется отсутствие атмосферы у планеты Меркурий?

2. В чем причина различий химического состава атмосфер планет земной группы?
3. Какие формы рельефа поверхности обнаружены на поверхности планет земной группы?
4. Почему атмосферы планет-гигантов отличаются по химическому составу от атмосфер планет земной группы?
5. Каковы особенности внутреннего строения планет-гигантов?
6. Каковы по своему строению кольца планет-гигантов?
7. Как отличить при наблюдении астероид от звезды?
8. Каковы форма и размеры большинства астероидов?
9. Какие типы метеоритов выделяются по химическому составу?
10. Чем обусловлено образование хвостов комет?

Лекция 8

Методы астрономических исследований. Электромагнитное Излучение. Космические лучи.

Цель астрофизики - изучение физической природы и эволюции отдельных космических объектов, включая и всю Вселенную.

Задачи астрофизики:

- **Исследование индивидуальных небесных объектов**
- **Изучение общих физических принципов астрофизических процессов**
- **Установка общих закономерностей развития Вселенной**

Источники информации в астрономии

1. **Электромагнитное излучение**
2. **Космические лучи**
3. **Гравитационные волны**

Основным источником информации о небесных телах остается электромагнитное излучение.

Исследуя электромагнитное излучение, можно узнать температуру, плотность, химический состав и другие характеристики интересующего нас объекта.

Полное описание свойств электромагнитного излучения и его взаимодействия с веществом дается квантовой электродинамикой — одной из самых сложных теорий современной физики. Согласно этой теории, *электромагнитное излучение обладает как волновыми свойствами, так и свойствами потока частиц, называемых фотонами или квантами электромагнитного поля.*

Волновые свойства электромагнитного излучения определяются взаимодействующими переменными электрическими и магнитными полями. Так же как и любая волна, электромагнитное излучение характеризуется частотой, обозначаемой обычно буквой ν , и длиной волны λ .

Длина волны и частота связаны друг с другом формулой $V = c/\lambda$,

где c — скорость света. Очень важным свойством электромагнитного излучения является то, что скорость его распространения в вакууме не зависит ни от длины волны, ни от скорости движения источника и всегда равна 300 000 км/с.

Если рассматривать электромагнитное излучение как поток фотонов, то его основная характеристика определяется энергией фотонов E , связанной с частотой формулой Планка:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка, ν — частота излучения.

Хотя физическая природа и основные свойства одинаковы для всех электромагнитных волн, характер взаимодействия с веществом и методы исследования излучения, имеющего разную длину волны, сильно отличаются. В связи с этим электромагнитное излучение небесных тел условно делится на несколько диапазонов.



Излучение с длиной волны от 390 нм до 760 нм человеческий глаз воспринимает как свет, причем разным длинам волн соответствуют разные цвета: фиолетовый, синий и голубой — от 390 нм до 500 нм; зеленый и

желтый — от 500 нм до 590 нм; оранжевый и красный — от 590 нм до 760 нм..

Глаз – это естественный измерительный прибор, регистрирующий электромагнитное излучение в видимой области спектра.

Площадь зрачка может изменяться в 100 раз, тем самым регулируя поток света, поступающего на сетчатку в дневное время. Днем освещенность от Солнца составляет 10^5 лк; в то время как ночью звездное небо создает освещенность всего в 10^{-5} лк. Поэтому для того, чтобы видеть в темноте, регистрировать излучение должны не колбочки, а палочки – другие элементы глаза. Максимальная чувствительность глаза при дневном зрении приходится на длину волны $\lambda = 555$ нм и соответствует желто-зеленому цвету. Ночью она сдвигается в коротковолновую часть спектра $\lambda = 513$ нм. Лабораторные исследования показали, что ночью глаз может зарегистрировать изменение звездной величины на $0,1^m$.

С древнейших времен и до середины XX века астрономические наблюдения проводились исключительно в оптическом диапазоне электромагнитного спектра (длина волны 4000–8000 ангстрем (Å)).

Для обнаружения излучения из других диапазонов требуются специальные приборы

В радиодиапазоне через атмосферу Земли проникают радиоволны с длиной волны от 1 до 4 мм и от 8 до 20 м. Длины электромагнитных волн радиодиапазона заключены в пределах от 10 км до 1 мм. Существование радиоволн было предсказано Максвеллом в 1873 году, а первый радиотелескоп появился в 1929 году.

Радионаблюдения космических источников начались только после второй мировой войны во многом благодаря развитию радиотехники для целей связи и радиолокации.

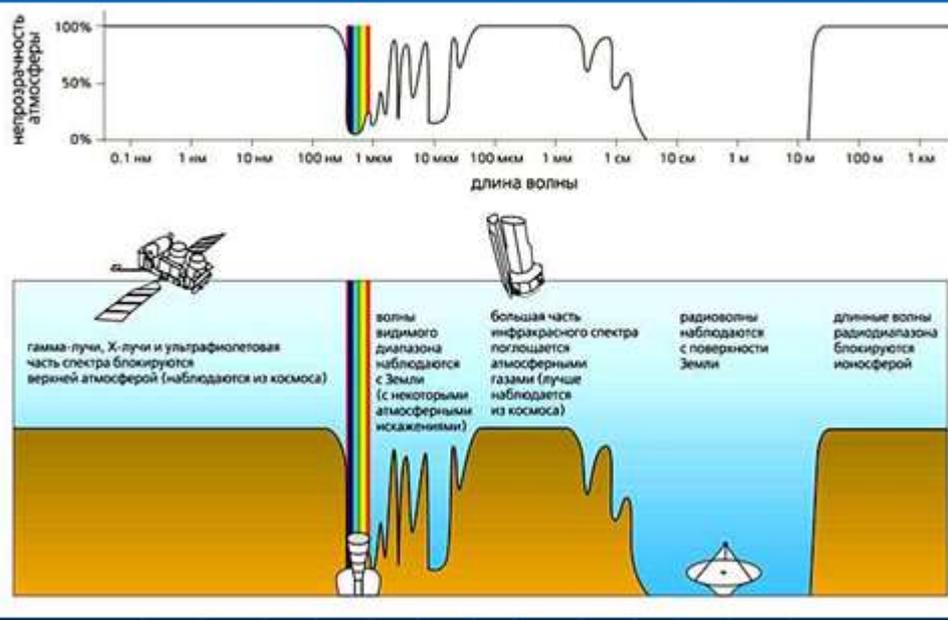
Земная атмосфера не пропускает коротковолновое излучение

В табл. приведена краткая характеристика диапазонов электромагнитных волн для астрономических наблюдений

Область спектра	Длины волн	Прохождение сквозь атмосферу	Методы исследований	Приемники излучения
Гамма-излучение	< 0,01 нМ	Сильное поглощение	Внеатмосферные (космич. ракеты, ИСЗ)	Счетчики фотонов, ионизационные камеры и пр.
Рентгеновское излучение	0,01–10 нМ	– // –	– // –	– // –
Далекий ультрафиолет (УФ)	10–310 нМ	– // –	– // –	Фотоэмульсии, ФЭУ
Ближний УФ	310–390 нМ	Слабое поглощение	Частично с поверхности Земли	– // –
Видимый свет	390–760 нМ	– // –	С поверхности Земли	Глаз, фотоэмульсии ПЗС («Цифра»)
Инфракрасное (ИК)	0,76–1 мм	Поглощение H ₂ O, CO ₂ и др.	Частично с поверхности Земли, аэростаты	Болометры, термопары, фотокатоды
Радиоволны	1 мм – 1 км	Пропускается излучение с длиной волны 1 мм, 4,5 мм, 8 мм и от 1 см до 20 м	С поверхности Земли	Радиотелескопы

Как видно из табл. существует три «окна прозрачности» для наблюдения с поверхности Земли: видимый свет, радиоизлучение, инфракрасное излучение.

Прохождения электромагнитных волн через земную атмосферу



Инфракрасное излучение

Небезызвестный [Вильям Гершель](#), проводя измерения энергии различных лучей видимого света, случайно обнаружил, что используемые им термометры нагреваются и за границей красного конца спектра. Ученый сделал вывод, что существуют некоторые лучи, продолжающие спектр за красным светом. Эти лучи он назвал **инфракрасными**. Еще их называют тепловыми, так как инфракрасные лучи излучает любое нагретое тело, даже если оно не светится для глаза. Диапазон инфракрасных волн заключен между $7\ 000\ \text{А}$ и $5\ 000\ 000\ \text{А}$. $5\ 000\ 000\ \text{А}$ — это уже полмиллиметра. Итак, диапазон тепловых лучей гораздо шире, чем видимый спектр.

Земная атмосфера пропускает совсем небольшую часть инфракрасного излучения. Оно поглощается молекулами воздуха, и особенно в этом преуспевает углекислый газ. Этот же газ повинен в том, что тепло не столь охотно покидает нашу планету. Световое излучение нагревает поверхность, та излучает тепло, которому обратно в космос выйти не удастся. Такой эффект называют парниковым. В космосе углекислого газа немного, поэтому

тепловые лучи с небольшими потерями проходят сквозь пылевые облака. Именно благодаря инфракрасному излучению в нашей стране была получена первая фотография центра Галактики, который закрыт от Земли газопылевыми облаками.

УФ, рентгеновское и гамма-излучение от небесных объектов стало изучаться лишь начиная с 1960-х гг., когда стали возможны запуски детекторов жесткого излучения в высокие слои атмосферы (20 км и выше – баллонные эксперименты) и за ее пределы на специализированных искусственных спутниках Земли (“УХУРУ”, 1972).

Ультрафиолетовое излучение

Излучение, длина волны которого короче, чем у видимых лучей фиолетового цвета, называют **ультрафиолетовым**.

Ультрафиолетом считают электромагнитные волны с длиной волны от 100 А до 7 000 А.

Это излучение, по большей части, вредно для живых организмов, однако по той же большей части ультрафиолет не проходит сквозь атмосферу Земли. Виной тому небезызвестный озоновый слой, который активно поглощает небезопасные лучи.

Та часть ультрафиолета, которая примыкает к видимым лучам, доходит до поверхности и вызывает у нас с Вами загар. У чернокожих этот загар генетически врожден, ведь загар – защитная реакция кожи на ультрафиолет.

Ультрафиолет, как Вы, наверное, догадываетесь, щедро и во все стороны «разбрасывается» Солнцем. Но как уже говорилось, Солнце сильнее всего излучает в видимых лучах. Напротив, горячие голубые звезды – мощный источник ультрафиолетового излучения. Именно это излучение нагревает и ионизует излучающие туманности, благодаря чему мы их и видим. Ультрафиолет, тем самым, легко поглощается газовой средой и из далеких областей Галактики и Вселенной почти к нам не доходит, если на пути лучей есть газопылевые преграды.

Рентгеновское излучение

Физик Рентген открыл еще более коротковолновое излучение. Недолго думая, эти лучи назвали в честь самого Рентгена. Обладая хорошей проникающей способностью, **рентгеновское излучение** нашло применение в медицине и кристаллографии. Как Вы, наверное, слышали, рентгеновские лучи опять-таки вредны живым организмам. И атмосфера Земли из-за их проникаемости, упомянутой только что, им не помеха. Нас выручает магнитосфера Земли. Она задерживает многие опасные излучения космоса.

В астрономии рентгеновские лучи чаще всего упоминаются в разговорах о [черных дырах](#), [нейтронных звездах](#) и [пульсарах](#). При [аккреции](#) вещества вблизи магнитных полюсов релятивистской звезды выделяется много энергии, которая и излучается в рентгеновском диапазоне ([здесь](#) – подробнее). Мощные вспышки на Солнце также являются источниками рентгеновского излучения.

Длины волн лучей Рентгена заключены между 0,1 А и 100 А.

Гамма-излучение

Самые короткие волны (меньше 0,1 А) у **гамма-лучей**. Это самый опасный вид радиоактивности, самое опасное электромагнитное излучение. Энергия фотонов гамма-лучей очень высока, и их излучение происходит при некоторых процессах внутри [ядер](#) атомов. Примером такого процесса может быть аннигиляция – взаимоуничтожение частицы и античастицы с превращением их массы в энергию. Регистрируемые, время от времени, таинственные гамма-вспышки на небе пока никак не объяснены астрономами. Ясно, что энергия явления, производящего вспышки, просто грандиозна. По некоторым подсчетам, за секунды, которые длится такая вспышка, она излучает больше энергии, чем вся остальная Вселенная.

Гамма-излучение не пропускается к Земле ее магнитосферой.

Открытие спектрального анализа и изобретение фотографии в 19 веке, возникновение фотоэлектрики, 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.

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

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

Приборы для собирания и исследования космического электромагнитного излучения называются телескопами. В зависимости от диапазона регистрируемого космического излучения телескопы могут быть: оптические, радиотелескопы, рентгеновские, инфракрасные, субмиллиметровые, телескопы для гамма-астрономии.

Разграничение по диапазонам более или менее условно. Например, телескопы, предназначенные для наблюдений в видимых лучах, могут применяться, если они имеют отражательную оптику, для наблюдений в участках инфракрасной и субмиллиметровой областей, где прозрачность атмосферы достаточно велика («окна прозрачности»). В зависимости от того, ведутся наблюдения с Земли, из космоса, с самолета или с аэростата, телескоп называется наземным, космическим и т. Д

Обсерватории

Астрономические исследования проводятся в научных институтах, университетах и обсерваториях. Пулковская обсерватория под Санкт-Петербург существует с 1839 г. и знаменита составлением точнейших звездных каталогов. Ее в прошлом веке называли астрономической столицей мира. В ходе развития науки в нашей стране было построено много других обсерваторий, в том числе в союзных республиках. К крупнейшим следует отнести Специальную астрофизическую обсерваторию на Северном Кавказе, обсерватории Крымскую (вблизи Симферополя), Бюраканскую (вблизи Еревана), Абастуманскую (вблизи Боржоми), Голосеевскую (в Киеве), Шемахинскую (вблизи Баку). Из институтов крупнейшие - Астрономический институт имени П. К. Штернберга при МГУ и Астрономический

научноисследовательский институт в Санкт-Петербурге. Обсерватории обычно специализируются на проведении определенных видов астрономических исследований. В связи с этим они оснащены различными типами телескопов и других приборов, которые предназначены, например, для определения точного положения звезд на небе, для изучения Солнца или решения других научных задач. Часто для изучения небесных объектов их фотографируют при помощи телескопов, предназначенных специально для этих целей. Положения звезд на полученных негативах измеряют при помощи соответствующих приборов в лаборатории. Хранящиеся на обсерватории негативы образуют "стеклянную фототеку". Исследуя астрономические фотографии, можно измерить медленные перемещения сравнительно близких звезд на фоне более далеких, увидеть на негативе изображения очень слабых объектов, измерить величину потоков излучения от звезд, планет и других космических объектов. Для высокоточных измерений энергии световых потоков используют фотоэлектрические фотометры. В них свет от звезды, собираемый объективом телескопа, направляется на светочувствительный слой электронного вакуумного прибора - фотоумножителя, в котором возникает слабый ток, усиливаемый и регистрируемый специальными электронными приборами. Пропуская свет через специально подобранные различные светофильтры, астрономы количественно и с большой точностью оценивают цвет объекта.



Космические лучи. Их состав и происхождение

Космические лучи были открыты в 1912 г. [В. Гессом](#). Различают первичные космические лучи - космические лучи до входа в атмосферу и вторичные космические лучи, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли.

Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)		
	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ядерная компонента - $\sim 90\%$ протонов, $\sim 10\%$ ядер гелия, $\sim 1\%$ более тяжелых ядер 2. Электроны ($\sim 1\%$ от числа ядер) 3. Позитроны ($\sim 10\%$ от числа электронов) 4. Антиадроны $< 1\%$ 	98-99% протоны, $\sim 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц – пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется **широким атмосферным ливнем**.

В одном акте взаимодействия протон обычно теряет $\sim 50\%$ своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят

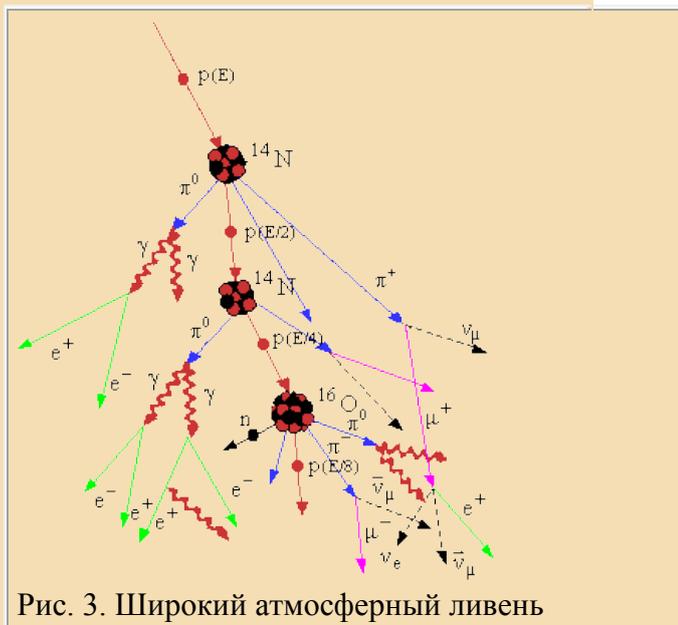


Рис. 3. Широкий атмосферный ливень

преимущественно по направлению первичной частицы, образуя адронный кор ливня

Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, а могут распадаться, формируя мюонную и электронно-фотонную компоненты ливня. Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и γ -кванты.

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

Мюоны в свою очередь могут распадаться

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Образующиеся при распаде нейтральных пионов γ -кванты вызывают каскад электронов и γ -квантов, которые в свою очередь образуют электрон-позитронные пары. Заряженные лептоны теряют энергию на ионизацию и радиационное торможение. Поверхности Земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее.

Один протон с энергией $> 10^{14}$ эВ может создать 10^6 - 10^9 вторичных частиц. На поверхности Земли адроны ливня концентрируются в области порядка нескольких метров, электронно-фотонная компонента – в области ~ 100 м, мюонная – нескольких сотен метров.

Поток космических лучей на уровне моря примерно в 100 раз меньше потока первичных космических лучей ($\sim 0.01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

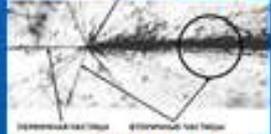
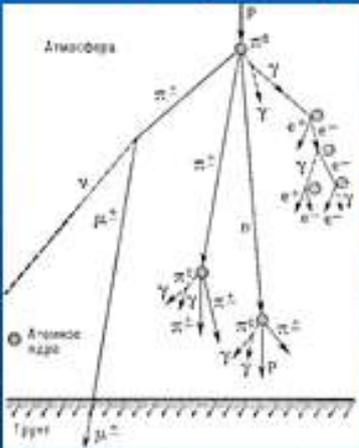
Основными источниками первичных космических лучей являются взрывы сверхновых звезд (галактические космические лучи) и Солнце. Большие энергии (до 10^{16} эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся взрывах сверхновых.

Природа космических лучей сверхвысоких энергий пока не имеет однозначной интерпретации.

Интенсивность космических лучей на больших интервалах времени была постоянна в течение $\sim 10^9$ лет. Однако, появились данные, что 30-40 тыс. лет тому назад интенсивность космических лучей заметно отличалась от современной. Пик интенсивности связывают со взрывом близкой к Солнечной системе (~ 50 пк) Сверхновой.

Неоптическая астрономия
Космические лучи

Космические лучи (первичное излучение) – элементарные частицы, преимущественно протоны, движущиеся с высокими энергиями (~ 1 ГэВ, до 10^{20} – 10^{21} эВ) в космосе.



Различают несколько типов космических лучей (первичное излучение): галактические космические лучи (ГКЛ), частицы радиационных поясов, солнечные космические лучи (СКЛ).

Частицы ГКЛ появляются при вспышках сверхновых звёзд, а также за счет ускорения заряженных частиц электромагнитными полями пульсаров.

Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.

Когда высокоэнергетичная частица входит в атмосферу, она, взаимодействуя с атомами воздуха на первых 100 г/см², рождает целый шквал частиц (вторичное излучение), в основном пионов и мюонов, которые, в свою очередь, рождают другие частицы и т.д. – так называемый ливень. Эти частицы могут регистрироваться газоразрядными счётчиками. А так как частицы движутся со скоростью, превышающей скорость света в воздухе, благодаря чему возникает черенковское свечение, регистрируемое современными обсерваториями.

Нейтрино

Нейтрино (с итал. – нейтрончик) – нейтральная элементарная частица с полуцелым спином, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях и относящаяся к классу лептонов. Нейтрино малой энергии чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом.

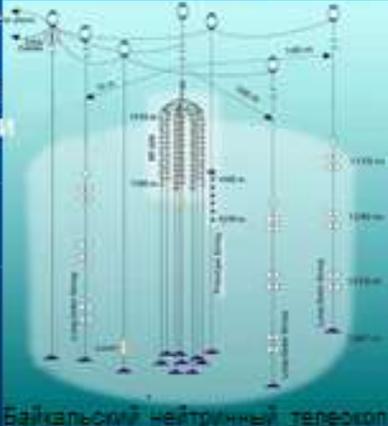
$$p + p \rightarrow {}^2D + e^+ + \nu_e$$

где p – протон, 2D – ядро дейтерия, e^+ – позитрон, ν_e – электронное нейтрино.

Нейтринные телескопы



Детектор Super-Kamiokande (Япония)



Байкальский нейтринный телескоп

Пролетающие сквозь воду нейтрино, при взаимодействии с ней выделяют заряженные частицы – мюоны или каскады электронов и позитронов

Такааки Кадзита (Япония) и Артур Макдональд (Канада) получили Нобелевскую премию по физике 2015 года «за открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу».



Электронное нейтрино,
Мюонное нейтрино,
Тау-нейтрино

Дополнительный материал.

Космические лучи, поток частиц высокой энергии, преимущественно протонов, приходящих на Землю из мирового пространства (первичное излучение), а также рожденное ими в атмосфере Земли в результате взаимодействия с атомными ядрами вторичное излучение, в котором встречаются практически все известные элементарные частицы.

К. л. — уникальный природный источник частиц высоких и сверхвысоких энергий, позволяющих изучать процессы превращения элементарных частиц и их структуру. Наряду с этим К. л. дают возможность обнаруживать и изучать астрофизические процессы большого масштаба, связанные с ускорением и распространением частиц космического излучения в межпланетной, межзвёздной, а возможно, и в межгалактической среде.

Большинство частиц первичного космического излучения имеет энергию больше 10^9 эв (1 Гэв), а энергия отдельных частиц достигает 10^{20} —

10^{21} эв (а может быть, и выше). До создания мощных [ускорителей заряженных частиц](#) К. л. были единственным источником частиц высоких энергий. В К. л. были впервые обнаружены многие неизвестные ранее элементарные частицы и получены первые данные об их распадах и взаимодействиях с атомными ядрами. Хотя современные ускорители (в особенности ускорители на встречных пучках) позволяют проводить тщательное изучение процессов взаимодействия частиц вплоть до энергий 10^{11} — 10^{12} эв, К. л. по-прежнему являются единственным источником сведений о взаимодействиях частиц при ещё более высоких энергиях.

Подавляющая часть первичных К. л. приходит к Земле извне Солнечной системы — из окружающего её галактического пространства ([Галактики](#)), т. н. галактические К. л., и лишь небольшая их часть, преимущественно умеренных энергий (<1 Гэв), связана с активностью Солнца, т. н. солнечные К. л. Однако в периоды высокой солнечной активности могут происходить кратковременные сильные возрастания потоков солнечных К. л. в межпланетном пространстве. Частицы самых высоких энергий ($>10^{17}$ эв) имеют, возможно, внегалактическое происхождение (приходят из [Метагалактики](#)).

В физике К. л. четко выделяются 2 основных направления исследований: **ядерно-физическое** (взаимодействие К. л. с веществом; генерация, свойства и взаимодействия элементарных частиц) и **космо-физическое** (состав и энергетический спектр первичных К. л.; генерация и распространение солнечных и галактических К. л.; изменение во времени интенсивности К. л. и взаимодействие К. л. с [магнитосферой Земли](#), с [солнечным ветром](#) и ударными волнами в межпланетном пространстве и др.).

По мере развития техники ускорителей область исследований на первом направлении постепенно сдвигается в сторону высоких энергий. Всё более глубокое изучение ближнего космоса прямыми методами с помощью спутников и космических ракет перемещает центр тяжести второго

направления на более далёкие космические объекты. Поэтому научные результаты, получаемые с помощью К. л., носят, как правило, разведывательный, первооткрывательский, характер и имеют фундаментальное значение как для развития физики микромира (в области характерных размеров $\sim 10^{-13}$ см), так и для развития физики космоса (10^8 — 10^{28} см).

Открытие и основные этапы исследования К. л. Существование К. л. было установлено в 1912 В. [Гессом](#) по производимой ими ионизации молекул воздуха; возрастание ионизации с высотой доказывало их внеземное происхождение. Наблюдения следов частиц К. л. в [Вильсона камере](#), помещенной в поле лабораторного магнита (Д. В. [Скобельцын](#), 1927), и отклонения их в магнитном поле Земли с помощью газоразрядных счётчиков, поднимаемых в [стратосферу](#) на баллонах (С. Н. [Вернов](#) и Р. [Милликен](#), 1935—37), доказали, что **первичные К. л. представляют собой поток заряженных частиц, в основном протонов (ядер атомов водорода)**. При этом были измерены и энергии большей части К. л. (до 15 Гэв). С помощью [ядерных фотографических эмульсий](#), поднятых на высоту ~ 30 км (Б. Питерс и др., 1948), в составе первичных К. л. были обнаружены следы ядер более тяжёлых элементов, чем водород, вплоть до ядер железа (*рис. 1*).

Детальное изучение зарядов и масс частиц вторичных К. л. привело к открытию многих новых элементарных частиц, в частности [позитрона](#), [мюона](#), [пи-мезона](#), [К-мезона](#), Λ -[гиперона](#) (1932—49). В 1932 П. [Блэкетт](#) и Дж. Оккиалини впервые обнаружили в камере Вильсона группы близких по направлению генетически связанных частиц космического излучения — т. н. ливни. В опытах 1945—49 на высокогорных станциях К. л. (В. И. [Векслер](#), Н. А. Добротин и др.) и в стратосфере (С. Н. Вернов и др.) было установлено, что вторичное космическое излучение образуется в результате взаимодействия первичных К. л. с ядрами атомов воздуха. Позднее Г. Т. [Зацепин](#) показал, что тот же механизм, но при более

высоких энергиях ($\approx 10^{14}$ эв) объясняет развитие открытых ранее в К. л. (П. [Оже](#), 1938) широких атмосферных ливней — потоков из многих миллионов частиц, покрывающих на уровне моря площади порядка 1 км^2 и более.

Для правильного подхода к проблеме происхождения К. л. большую роль сыграли успехи [радиоастрономии](#). Связанное с К. л. нетепловое космическое радиоизлучение позволило обнаружить их возможные источники. В 1955 В. Л. [Гинзбург](#) и И. С. [Шкловский](#) на основе радиоастрономических наблюдений и энергетических оценок впервые количественно обосновали гипотезу о [сверхновых звёздах](#) как одном из основных галактических источников К. л.

Базой для космофизического направления исследований явилась созданная в 50—60-е гг. обширная мировая сеть станций К. л. (свыше 150), на которых проводится непрерывная регистрация космического излучения. Многие станции находятся высоко в горах, на некоторых станциях проводятся подземные наблюдения, регулярно посылаются в стратосферу баллоны с приборами автоматической регистрации К. л.

Новые возможности прямого изучения первичных К. л. в очень широком диапазоне энергий открылись в связи с подъёмом регистрирующей аппаратуры на искусственных спутниках Земли и межпланетных автоматических станциях. В частности, с помощью [калориметра ионизационного](#) на спутниках серии «Протон» был впервые непосредственно измерен энергетический спектр первичных К. л. до энергии $\sim 10^{15}$ эв (советский физик Н. Л. Григоров и др., 1965—1969). Позднее с помощью искусственных спутников Луны и Марса, а также на советском «Луноходе-1» (1970—71) были проведены длительные измерения вариаций состава и интенсивности К. л. за пределами магнитосферы Земли,

Первичные галактические К. л. Геомагнитные эффекты. Все экспериментальные данные согласуются с тем, что поток первичных К. л., летящих к Земле из Галактики, с высокой степенью точности ($\sim 0,1\%$)

изотропен, т. е. не зависит от направления. Попадая в магнитное поле Земли, заряженные частицы космического излучения отклоняются от первоначального направления (в результате действия на них Лоренца силы). Поэтому интенсивность К. л. и их энергетический спектр в околоземном пространстве зависят как от геомагнитных координат места наблюдения, так и от направления прихода К. л. Отклоняющее действие геомагнитного поля проявляется тем сильнее, чем больше угол α между направлением движения частицы и направлением силовой линии поля, т. е. чем меньше геомагнитная широта λ места наблюдения. Т. о., при одной и той же энергии частиц отклонение максимально в экваториальных областях и минимально вблизи магнитных полюсов. У экватора этот «геомагнитный барьер» не пропускает к Земле летящие перпендикулярно её поверхности протоны с энергией меньше ~ 15 Гэв и ядра с энергией $\sim 7,5$ Гэв на нуклон (протон или нейтрон). С увеличением геомагнитной широты пороговая энергия частиц быстро уменьшается ($\sim \cos^4 \lambda$), и в полярных областях геомагнитный барьер практически отсутствует. Наряду с регулярной широтной зависимостью на интенсивности К. л. заметно сказываются аномалии геомагнитного поля (особенно в районе Южной Атлантики). В результате распределение интенсивности К. л. по земному шару имеет довольно сложный характер. В полярных областях ($\lambda \approx 60^\circ$) интенсивность К. л. у границы атмосферы составляет в годы минимума солнечной активности около 0,4 частицы на 1 см^2 в 1 сек в единице телесного угла.

Более 90% частиц первичных К. л. всех энергий составляют протоны, примерно 7% — α -частицы и лишь небольшая доля ($\sim 1\%$) приходится на ядра элементов более тяжёлых, чем водород и гелий. Несмотря на это, ядра с $Z > 1$ несут около 50% всей энергии К. л. Уменьшение распространённости с ростом атомного номера элемента в К. л. идёт медленнее, чем для вещества небесных тел во Вселенной вообще. Особенно велико в К. л. содержание ядер лёгких элементов Li, Be, B, естественная распространённость которых чрезвычайно мала ($\approx 10^{-7}\%$). Имеется также избыток тяжёлых ядер ($Z \approx 6$).

Из этого следует, что в источниках К. л. преобладает ускорение тяжёлых ядер, а более лёгкие ядра возникают за счёт расщепления тяжёлых ядер (фрагментации) при их взаимодействии с межзвёздным веществом. В период 1966—71 с помощью ядерных фотоэмульсий и твердотельных детекторов заряженных частиц в К. л. обнаружены ядра значительно тяжелее железа — вплоть до урана, а возможно и ещё более тяжёлые, причём их потоки падают с ростом Z примерно как Z^7 — Z^8 . В наиболее изученной области энергий ($>2,5$ Гэв на нуклон) ядерный состав К. л. таков: протоны — около 92%, π -частицы — около 7%, ядра с $Z = 3$ —5 — около 0,1—0,15%, с $Z = 6$ —9 — около 0,5% с $Z = 10$ —15 — около 0,1—0,15%, с $Z = 16$ —25 — около 0,04%, с $Z = 26$ (железо) — 0,025%, с $Z > 30$ — $\sim 10^{-5}\%$.

В состав первичных К. л. входят также электроны и позитроны ($\sim 1\%$) и фотоны высоких энергий — γ -кванты ($\sim 0,01\%$ при энергиях > 100 Мэв). Несмотря на незначительную долю в К. л., γ -кванты представляют особый интерес, поскольку, не отклоняясь магнитными полями межзвёздного пространства, они позволяют обнаруживать отдельные квазиточечные источники К. л. Найдено уже около 20 таких источников. Из них наиболее интересен [пульсар](#) NP 0532 в Крабовидной туманности, дающий поток γ -квантов 0,1—0,5 на 1 м^2 в 1 сек и являющийся одновременно мощным пульсирующим источником рентгеновского излучения. Кроме того, обнаружен диффузный поток γ -квантов из центра Галактики с интенсивностью ~ 1 частица на 1 м^2 в 1 сек в расчёте на единицу телесного угла.

Солнечные К. л. Наиболее сильные возрастания интенсивности К. л. в виде нерегулярных кратковременных всплесков связаны с [хромосферными вспышками](#) на Солнце. При таких вспышках происходит ускорение заряженных частиц. солнечной [плазмы](#) электромагнитными полями (по-видимому, у границ солнечных пятен), т. е. генерация солнечных К. л. Предложен, в частности, весьма вероятный механизм ускорения частиц электрическими полями, индуцируемыми при быстром сближении областей

солнечной плазмы с противоположно направленными магнитными полями (советский физик С. И. Сыроватский, 1965).

Потоки солнечных К. л. во время некоторых хромосферных вспышек в сотни раз превышают потоки галактических К. л. Так, при рекордном всплеске 23 февраля 1956 наблюдалось 300-кратное возрастание потока К. л. с энергией $> 3 \text{ Гэв}$, что могло бы представлять серьёзную угрозу безопасности космических полётов. Поэтому очень важны систематические наблюдения хромосферных вспышек, всплесков радио- и рентгеновского излучения и др. проявлений солнечной активности, позволяющие в тесной связи с измерениями интенсивности К. л. прогнозировать радиационную обстановку на трассах космических полётов.

В среднем вклад солнечных К. л. в общую интенсивность космического излучения составляет несколько процентов.

Химический состав солнечных К. л. очень близок к составу солнечной атмосферы. В отличие от галактич. К. л., в них отсутствуют ядра Li, Be, B. Это показывает, что количество вещества, проходящее солнечными К. л., чрезвычайно мало ($< 0,1 \text{ г/см}^2$) и что их генерация не может происходить в глубине солнечной атмосферы, где плотность вещества слишком велика (вероятнее всего ускорение происходит в верхней хромосфере и нижней короне Солнца).

Частицы солнечных К. л. по сравнению с галактическими обладают более низкими энергиями (их энергетический спектр более мягкий). Энергии протонов обычно ограничиваются долями Гэв , и лишь при очень редких мощных хромосферных вспышках генерируются протоны с энергиями до 100 Гэв ; нижняя граница энергии регистрируемых электронов солнечных К. л. составляет десятки кэв (т. е. близка к энергии частиц солнечного ветра). Солнечные К. л. малой энергии оказывают существенное воздействие на состояние ионосферы Земли в высоких широтах, вызывая дополнительную ионизацию её нижних слоев. Это приводит к ослаблению радиоволн, а в некоторых случаях — к полному прекращению радиосвязи на коротких

волнах. Данные о распространении солнечных К. л., их энергетическом спектре и угловой анизотропии позволяют получить информацию о структуре магнитного поля в межпланетном пространстве. Изучение пространственных и временных вариаций (изменений) потоков солнечных К. л. помогает лучше понять такие геофизические явления, как геомагнитные бури, полярные сияния и пр.

Характер возрастания потока солнечных К. л. на Землю показывает, что в начальный период после вспышки поток существенно анизотропен, причём его максимум направлен под углом примерно 45° к западу от направления на Солнце. Это явилось первым прямым доказательством изогнутости силовых линий межпланетного магнитного поля в виде спиралей Архимеда

Происхождение и возраст галактических К. л. Основным источником К. л. считаются взрывы сверхновых звёзд. При каждом таком взрыве происходит расширение с огромной скоростью оболочки звезды и возникают ударные волны в плазме, приводящие к ускорению заряженных частиц до энергий $\sim 10^{15}$ эв и выше. Главным экспериментальным доводом в пользу гипотезы происхождения К. л. от взрывов сверхновых явилось впервые прямое радиоастрономическое наблюдение частично поляризованного радиоизлучения от Крабовидной туманности (1957), возникшей в результате взрыва в 1054 сверхновой, сравнительно близкой к Солнечной системе. Свойства этого излучения таковы, что его следует приписать синхротронному излучению (магнитотормозному излучению) — излучению быстрых электронов в магнитных полях, «вмороженных» в потоки звёздной плазмы, выброшенной при взрыве этой сверхновой. Позднее удалось наблюдать магнитотормозное радиоизлучение и от других, более далёких туманностей, рожденных взрывами сверхновых. Дальнейшие наблюдения показали, что спектр магнитотормозного излучения электронов простирается до оптического, рентгеновского и даже γ -диапазонов, и это связано с очень высокими энергиями электронов (до $\sim 10^{12}$ эв). Естественно,

что наряду с электронами в расширяющихся оболочках сверхновых происходит интенсивное ускорение и тяжёлых заряженных частиц — протонов и ядер (однако вследствие своей большой массы они не испытывают заметных потерь энергии на излучение в магнитных полях). При этом чем тяжелее ядро, тем благоприятнее могут быть начальные условия ускорения (т. н. инжекция): тяжёлые ядра могут находиться в не полностью ионизованном состоянии и поэтому сравнительно слабо отклоняться в магнитных полях, что облегчает их «утечку» за пределы плотной оболочки звезды (в которой магнитное поле велико). Если учесть среднюю частоту взрывов сверхновых в Галактике вообще (1 раз в 30—50 лет) и полное энерговыделение в каждом взрыве (10^{51} — 10^{52} эрг, или 10^{63} — 10^{64} эв) и предположить, что $\sim 1\%$ этой энергии тратится на ускорение заряженных частиц, то можно объяснить как среднюю плотность энергии К. л. (~ 1 эв/см³), так и отсутствие заметных колебаний потока К. л.

Методами радиоастрономии были зарегистрированы и ещё более мощные источники К. л. (точнее, их электронной компоненты), находящиеся далеко за пределами нашей Галактики. Такими источниками являются, в частности, интенсивно излучающие квазизвёздные объекты малой протяжённости — *квazarы*, ядра некоторых *галактик*, испытывающие резкое расширение взрывного типа, а также *радиогалактики* с характерными для них мощными выбросами вещества (сопровождающимися радиоизлучением в масштабе целых галактик).

Ускоренные в галактических источниках тяжёлые заряженные частицы распространяются затем по сложным траекториям в межзвёздном пространстве, где на них действуют слабые $[(3—6)10^{-6}$ гс] нерегулярные и неоднородные магнитные поля облаков межзвёздной плазмы. Заряженные частицы «запутываются» в этих магнитных полях (напряжённость которых значительно повышается в областях спиральных рукавов Галактики, одновременно с увеличением концентрации межзвёздной плазмы). При этом движение К. л. носит характер диффузии, при которой частицы с энергиями

до 10^{17} — 10^{18} эв могут удерживаться в пределах нашей Галактики в течение десятков млн. лет. Диффузионное движение частиц К. л. обуславливает практически полную изотропию их потока. Лишь при более высоких энергиях радиусы кривизны траекторий частиц (особенно протонов) становятся сравнимыми с размерами галактик и происходит интенсивная «утечка» К. л. в метagalактическое пространство. Несмотря на высокую степень разреженности вещества, длительные странствия частиц в Метагалактике приводят к потерям энергии в новых процессах — фотоядерных реакциях на фоновом электромагнитном излучении (оно называется реликтовым излучением), оставшемся от ранних стадий расширения некогда горячей Вселенной. Наличие этого процесса сильно снижает вероятность того, что наиболее энергичная часть спектра К. л. обусловлена метagalактической компонентой.

Принципиально новые возможности экспериментального изучения источников наиболее энергичной части спектра К. л. (вплоть до энергий 10^{20} — 10^{21} эв) открылись после обнаружения уникальных астрофизических объектов — пульсаров. По современным представлениям, пульсары — это небольшие (~ 10 км в диаметре) нейтронные звёзды, возникшие в результате быстрого гравитационного сжатия (коллпаса гравитационного) неустойчивых звёзд типа сверхновых. Гравитационный коллапс приводит к колоссальному увеличению плотности вещества звезды (до ядерной плотности и выше), магнитного поля (до 10^{13} гс) и скорости вращения (до 10^3 оборотов в сек). Всё это создаёт благоприятные условия для ускорения тяжёлых заряженных частиц до исключительно высоких энергий $\sim 10^{21}$ эв и электронов до энергий $\sim 10^{12}$ эв. И действительно, наблюдения показали, что наряду с радиоизлучением пульсары испускают (с тем же периодом) световое, рентгеновское, а иногда и γ -излучение, которые можно объяснить только процессом магнитотормозного излучения очень быстрых электронов. Т. о., синхротронное излучение электронов К. л., обусловленное сильными магнитными полями, локализованными вблизи неустойчивых «горячих»

объектов — источников К. л., позволяет решать проблему происхождения К. л. методами наблюдательной астрономии (радиоастрономии, [рентгеновской астрономии](#), [гамма-астрономии](#)).

Важную дополнительную информацию об источниках и возрасте К. л. дают исследования ядерного состава К. л. Из небольшого относительного содержания в К. л. ядер Ве следует, что радиоактивный изотоп ^{10}Be (среднее время жизни которого около 2 млн. лет) успевает практически полностью распасться, откуда получается оценка верхнего предела возраста К. л. 20—50 млн. лет. Примерно того же порядка (10—30 млн. лет) оценки получаются из относительного содержания группы лёгких ядер (Li, Be, B) в целом, а также по среднему времени, которое требуется электронам К. л. для диффузного распространения от внутригалактических источников до границ Галактики. Анализ состава сверхтяжёлой ядерной компоненты ($Z > 70$) даёт средний возраст К. л. не более 10 млн. лет.

Ещё один способ проверки различных гипотез происхождения К. л. — измерение интенсивности К. л. в далёком прошлом, в частности в периоды известных вспышек ближайших сверхновых (например, вспышки в 1054). Существуют два метода, с помощью которых можно было бы обнаружить эффекты возрастания интенсивности К. л. в прошлом не только в результате взрыва сравнительно недалёких от Солнечной системы сверхновых звёзд, но и в результате возможных гораздо более мощных взрывных процессов в ядре Галактики. Это радиоуглеродный метод, в котором по концентрации изотопа ^{14}C в различных годовых кольцах очень старых деревьев определяют темп накопления в атмосфере ^{14}C , образующегося в результате ядерных реакций под действием К. л., и метеоритный метод, основанный на изучении состава стабильных и радиоактивных изотопов метеоритного вещества, подвергавшегося длительному воздействию К. л. Эти методы свидетельствуют о том, что средняя интенсивность К. л. сравнительно мало отличалась от современной в течение десятков тысяч и миллиарда лет соответственно. Постоянство интенсивности К. л. в течение миллиарда лет

делает маловероятной гипотезу о происхождении всех К. л. в процессе взрыва ядра нашей Галактики, который считается ответственным за образование галактического гало (пока не доказанного прямыми наблюдениями).

Взаимодействие К. л. с веществом.

1. Ядерно-активная компонента К- л. и множественная генерация частиц. При взаимодействии протонов и др. ядер первичных К. л. высокой энергии (\sim несколько Гэв и выше) с ядрами атомов земной атмосферы (главным образом азота и кислорода) происходит расщепление ядер и рождение нескольких нестабильных элементарных частиц (т. н. множественные процессы), в основном π -мезонов (пионов) — заряженных (π^+ , π^-) и нейтральных (π^0) с временами жизни $2,5 \cdot 10^{-8}$ сек и $0,8 \cdot 10^{-16}$ сек соответственно. Со значительно меньшей вероятностью (в 5—10 раз) рождаются К-мезоны и с ещё меньшей — гипероны и практически мгновенно распадающиеся резонансы. Среднее число вторичных частиц, образующихся в одном акте взаимодействия протона (или π -мезона) с лёгким ядром или одним нуклоном такого ядра, возрастает с ростом энергии E сначала по степенному закону, близкому к $E^{1/3}$ (вплоть до $E \approx 20$ Гэв), а затем (в области энергий $2 \cdot 10^{10}$ — 10^{13} эв) этот рост замедляется и лучше описывается логарифмической зависимостью. В то же время косвенные данные по широким атмосферным ливням указывают на процессы значительно более высокой множественности при энергиях $\approx 10^{14}$ эв.

Угловая направленность потока рожденных частиц в широком интервале энергии первичных и рожденных частиц такова, что составляющая импульса, перпендикулярная направлению первичной частицы (т. н. поперечный импульс), составляет в среднем 300—400 Мэв/с, где c — скорость света в вакууме (при очень высоких энергиях E частицы, когда энергией покоя частицы mc^2 можно пренебречь по сравнению с её

кинетической энергией, импульс частицы $p = E/c$; поэтому в физике высоких энергий импульс обычно измеряют в единицах $Mэв/c$).

Первичные протоны при столкновении теряют в среднем около 50% начальной энергии (при этом они могут испытывать перезарядку, превращаясь в нейтроны).

Образующиеся при расщеплении ядер вторичные нуклоны (протоны и нейтроны) и рожденные в столкновениях заряженные пионы высокой энергии будут также (вместе с потерявшими часть энергии первичными протонами) участвовать в ядерных взаимодействиях и вызывать расщепление ядер атомов воздуха и множественное образование пионов. Средний пробег, на котором осуществляется одно ядерное взаимодействие, принято измерять удельной массой пройденного вещества он составляет для первичных протонов $\sim 90 \text{ г/см}^2$ воздуха, т. е. $\sim 9\%$ всей толщи атмосферы. С ростом атомного веса вещества A средний пробег постепенно возрастает (примерно как $A^{1/3}$), достигая $\sim 160 \text{ г/см}^2$ для свинца. Рождение пионов происходит в основном на больших высотах (20—30 км), но продолжается в меньшей степени по всей толще атмосферы и даже на глубине нескольких м грунта.

Вылетающие при ядерных столкновениях нуклоны ядер и не успевшие распасться заряженные пионы высокой энергии образуют ядерно-активную компоненту вторичных К. л. Многократное повторение последовательных, каскадных взаимодействий нуклонов и заряженных пионов с ядрами атомов воздуха, сопровождающихся множественной генерацией новых частиц (пионов) в каждом акте взаимодействия, приводит к лавинообразному возрастанию числа вторичных ядерно-активных частиц и к быстрому уменьшению их средней энергии. Когда энергия отдельной частицы становится меньше 1 $Гэв$, рождение новых частиц практически прекращается и остаются (как правило) только процессы частичного (а иногда полного) расщепления атомного ядра с вылетом нуклонов сравнительно небольших энергий. Общий поток частиц ядерно-активной компоненты по мере дальнейшего проникновения в глубь атмосферы уменьшается (*рис. 7*, кривая

1), и на уровне моря ($\sim 1000 \text{ г/см}^2$) остаётся менее 1% ядерно-активных частиц.

2. Электронно-фотонные ливни и мягкая компонента вторичных К. л. Образующиеся при взаимодействиях частиц ядерно-активной компоненты с атомными ядрами нейтральные пионы практически мгновенно распадаются (вследствие их очень малого времени жизни) на два фотона ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$) каждый: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Этот процесс даёт начало электронно-фотонной компоненте К. л. (она называется также мягкой, т. е. легко поглощаемой, компонентой).

В сильных электрических полях атомных ядер эти фотоны рождают электронно-позитронные пары $e^- e^+$ ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$), а электроны и позитроны, в свою очередь, путём тормозного излучения испускают новые фотоны ($e^- \rightarrow e^- + \gamma$ и $e^+ \rightarrow e^+ + \gamma$) и т. д. Такие процессы, носящие каскадный характер, приводят к лавинообразному нарастанию общего числа частиц — к образованию электронно-фотонного ливня. Развитие электронно-фотонного ливня приводит к быстрому дроблению энергии E_0 на всё большее число частиц, т. е. к быстрому уменьшению средней энергии каждой частицы ливня. После максимального развития мягкой компоненты, достигаемого на высоте около 15 км ($\sim 120 \text{ г/см}^2$), происходит её постепенное затухание (*рис. 7*, кривая 2). Когда энергия каждой частицы становится меньше некоторого критического значения (для воздуха критическая энергия составляет около 100 Мэв), преобладающую роль начинают играть потери энергии на ионизацию атомов воздуха и комптоновское рассеяние (см. Комптона эффект); увеличение числа частиц в ливне прекращается, и его отдельные частицы быстро поглощаются. Практически полное поглощение электронно-фотонной компоненты происходит на сравнительно небольших толщах вещества (особенно большой плотности); в лабораторных условиях для этого достаточно иметь свинцовый экран толщиной 10—20 см (в зависимости от энергии частиц).

Наряду с π^0 -мезонами в К. л. существуют и др. источники образования электронно-фотонных ливней. Это электроны и π -кванты высокой энергии ($> 100 \text{ Мэв}$) первичных К. л., а также π -электроны, т. е. атомарные электроны, выбиваемые за счёт прямого электрического взаимодействия проходящих сквозь вещество быстрых заряженных частиц К. л.

При очень высоких энергиях ($\pi 10^{14} \text{ эв}$) электронно-фотонные ливни в земной атмосфере приобретают специфические черты широких атмосферных ливней. В таких ливнях очень большое число последовательных каскадов размножения приводит к сильному росту общего потока частиц (исчисляемого в зависимости от энергии многими миллионами и даже миллиардами) и к их широкому пространственному расхождению — на десятки и сотни м от оси ливня. В широких атмосферных ливнях у поверхности Земли одна частица ливня приходится примерно на несколько (2—3) Гэв энергии первичной частицы, вызвавшей ливень. Это даёт возможность оценивать по полному потоку частиц в ливне энергию приходящих на границу земной атмосферы «предков» этих ливней, что невозможно сделать непосредственно из-за крайне малой вероятности их прямого попадания в точку наблюдения.

Вследствие большой плотности потока частиц в широком атмосферном ливне испускается сравнительно интенсивное направленное электромагнитное излучение как в оптической области спектра, так и в радиодиапазоне. Оптическая часть свечения определяется процессом Черенкова — Вавилова излучения, поскольку скорости большинства частиц превышают фазовую скорость распространения света в воздухе. Механизм радиоизлучения более сложен; он связан, в частности, с тем, что магнитное поле Земли вызывает пространственное разделение потоков отрицательно и положительно заряженных частиц, что эквивалентно возникновению переменного во времени электрич. диполя.

3. Космические мюоны и нейтрино. Проникающая компонента вторичного излучения. Возникающие в атмосфере под действием К. л.

заряженные пионы участвуют в развитии ядерного каскада лишь при достаточно больших энергиях — до тех пор, пока не начинает сказываться их распад на лету. В верхних слоях атмосферы процессы распада становятся существенными уже при энергиях $\approx 10^{12}$ эв.

Заряженный пион (с энергией $\approx 10^{11}$ эв) распадается на мюон μ^\pm (заряженную нестабильную частицу с массой покоя $m_\mu \approx 207 m_e$, где m_e — масса электрона, и средним временем жизни $\tau_0 \approx 2 \cdot 10^{-6}$ сек) и нейтрино ν (нейтральную частицу с нулевой массой покоя). В свою очередь, мюон распадается на позитрон (или электрон), [нейтрино](#) и [антинейтрино](#). Т. к. скорости мюонов (как и всех остальных частиц К. л.) очень близки к скорости света c , то, в соответствии с теорией относительности, среднее время до их распада τ достаточно велико — пропорционально полной энергии E , $\tau = \frac{E}{m_\mu c^2}$. Кроме того, мюоны, не являясь ядерно-активными частицами, слабо взаимодействуют с веществом (посредством [электромагнитного взаимодействия](#)) и теряют свою энергию в основном на ионизацию атомов (~ 2 Мэв на толщине 1 г/см²). Поэтому поток мюонов представляет собой проникающую компоненту К. л. Даже при сравнительно умеренной энергии ~ 10 Гэв мюон может не только пройти сквозь всю земную атмосферу (см. [рис. 7](#), кривая 3), но и проникнуть далеко в глубь Земли на расстояния порядка 20 м грунта ([рис. 10](#)). Максимальная глубина, на которой регистрировались мюоны наиболее высокой энергии, составляет около 8600 м в переводе на водный эквивалент. Благодаря своей большой проникающей способности именно мюоны образуют «скелет» широких атмосферных ливней на больших (сотни м) расстояниях от их оси.

Высокая проникающая способность в сочетании с прямо пропорциональным плотности вещества коэффициент поглощения при умеренных энергиях (десятки и сотни Гэв) делает проникающую компоненту К. л. очень удобным средством для подземной геофизической и инженерной разведки. Измеряя интенсивность К. л. [телескопом счётчиков](#) в штольнях и

сравнивая полученные данные с известными кривыми поглощения К. л. в воде или грунте, можно обнаруживать или уточнять положения рудных пластов и пустот, а также измерять весовую нагрузку на грунт от стоящих на нём сооружений.

При энергиях порядка 10^{12} эв и выше наряду с ионизационными потерями энергии мюонов становятся всё более существенными потери энергии на образование электронно-позитронных пар и тормозное излучение, а также на прямые взаимодействия с атомными ядрами вещества. Вследствие этого на глубинах ≈ 8 км водного эквивалента под углами $\approx 50^\circ$ к вертикали поток космических мюонов оказывается ничтожно малым. Эксперименты, проводившиеся с 1964 в шахтах Индии и Южной Африки с установками огромной площади, позволили обнаружить на этих глубинах под углами $> 50^\circ$ дополнительный поток мюонов, единственным источником которых могли быть только взаимодействия нейтрино с атомными ядрами вещества. Эти опыты представили собой уникальную возможность изучения свойств самой проникающей — нейтринной — компоненты К. л. Наиболее важной проблемой при этом является изучение взаимодействия нейтрино сверхвысоких энергий с веществом; в частности, для выяснения структуры элементарных частиц особый интерес представляет исследование увеличения поперечного сечения взаимодействия (уменьшения «прозрачности» вещества) с ростом энергии нейтрино. Такое возрастание сечения взаимодействия нейтрино установлено на ускорителях до энергий 10^{10} эв. Очень важно исследовать, будет ли продолжаться этот рост сечения вплоть до энергий 10^{15} эв (соответствующих характерному расстоянию слабых взаимодействий $6 \cdot 10^{-17}$ см).

Измерения потоков солнечных нейтрино значительно более низких энергий (~ 1 Мэв) позволят подойти к решению и другой, космофизической, проблемы нейтринной физики. Это связано с использованием огромной проникающей способности нейтрино для косвенного измерения температуры недр Солнца, от которой зависит характер протекающих в нём ядерных

реакций — основного источника солнечной энергии (см. [Нейтринная астрономия](#)).

Проблемы и перспективы. Дальнейшее изучение К. л. в лабораториях и на космических станциях продолжается в двух направлениях. На космофизическом направлении выясняется природа тех основных процессов, в которых может происходить ускорение частиц до высоких и сверхвысоких энергий (в сверхновых звёздах, пульсарах, отчасти на Солнце), а также свойства межпланетной и межзвёздной среды по вариациям интенсивности К. л., особенностям их состава, углового и энергетического распределения. Особенно большие надежды возлагаются на исследования в области рентгеновской и гамма-астрономии в тесной связи с радиоастрономическими и астрономическими наблюдениями возможных источников К. л.

Интересен также вопрос о роли нейтрино как одной из компонент первичных К. л. при энергиях $\sim 10^{20}$ эв. Возникновение широких атмосферных ливней столь высоких энергий уже трудно объяснить заряженными частицами, ускоряемыми в пределах нашей Галактики, а частицы межгалактического происхождения не могут набрать таких энергий из-за столкновений с фотонами реликтового излучения, заполняющего Метагалактику. Поэтому приходится учитывать возможность непрерывного роста непрозрачности вещества (в частности, атмосферного воздуха) для потоков космического нейтрино, которые в этом случае смогли бы стать «предками» самых мощных широких ливней.

Делаются попытки окончательно решить неясную пока проблему существования фэйрболов — гипотетических частиц (с массами $\sim 3\text{—}5$ Гэв, а иногда и значительно выше), почти мгновенно распадающихся после своего рождения на отдельные частицы (в основном пионы) по законам статистической физики. Далеко не закончены дискуссии о степени применимости описания множественного рождения частиц моделями гидродинамических и термодинамических типов, в которых образуемая при ядерных столкновениях высоковозбуждённая «адронная материя» с

неопределённым числом частиц расширяется вплоть до её распада на отдельные свободные частицы.

Лекция 9

Гравитационные волны как источник информации о природе и свойствах небесных тел..

Гравитационные волны

Гравитационные волны — это распространяющиеся в пространстве-времени колебания геометрической структуры (метрики) пространства-времени, которые движутся со скоростью света. Их существование было предсказано общей теорией относительности Эйнштейна сто лет тому назад

Теории гравитации можно придумывать разные. Все они будут одинаково хорошо описывать наш мир, пока мы ограничиваемся единственным ее проявлением — **ньютоновским законом всемирного тяготения**. Но существуют и другие, более тонкие гравитационные эффекты, которые были экспериментально проверены на масштабах солнечной системы, и они указывают на одну конкретную теорию — общую теорию относительности (ОТО).

ОТО — это не просто набор формул, это принципиальный взгляд на суть гравитации. Если в обычной физике пространство служит лишь фоном, **вместилищем для физических явлений**, то в ОТО оно само становится явлением, динамической величиной, которая меняется в согласии с законами ОТО. Вот эти искажения пространства-времени относительно ровного фона — или, на языке геометрии, искажения метрики пространства-времени — и ощущаются как гравитация.

У ОТО есть важнейшее предсказание: гравитационные волны. *Это искажения пространства-времени, которые способны «оторваться от источника» и, самоподдерживаясь, улететь прочь. Это гравитация сама по себе, ничья, своя собственная.* Альберт Эйнштейн окончательно сформулировал ОТО в 1915 году и почти сразу понял, что полученные им уравнения допускают существование таких волн.

Как и для всякой честной теории, такое четкое предсказание ОТО должно быть проверено экспериментально. Излучать гравитационные волны могут любые движущиеся тела: и планеты, и брошенный вверх камень, и взмах руки. Проблема, однако, в том, что гравитационное взаимодействие столь слабое, что никакие экспериментальные установки не способны заметить излучение гравитационных волн от обычных «излучателей».

Чтобы «погнать» мощную волну, нужно очень сильно исказить пространство-время. Идеальный вариант — две черные дыры, вращающиеся друг вокруг друга в тесном танце, на расстоянии порядка их гравитационного радиуса (рис). *Искажения метрики будут столь сильными, что заметная часть энергии этой пары будет излучаться в гравитационные волны.* Теряя энергию, пара будет сближаться, кружась всё быстрее, искажая метрику всё сильнее и порождая еще более сильные гравитационные волны, — пока, наконец, не произойдет кардинальная перестройка всего гравитационного поля этой пары и две черных дыры не сольются в одну.

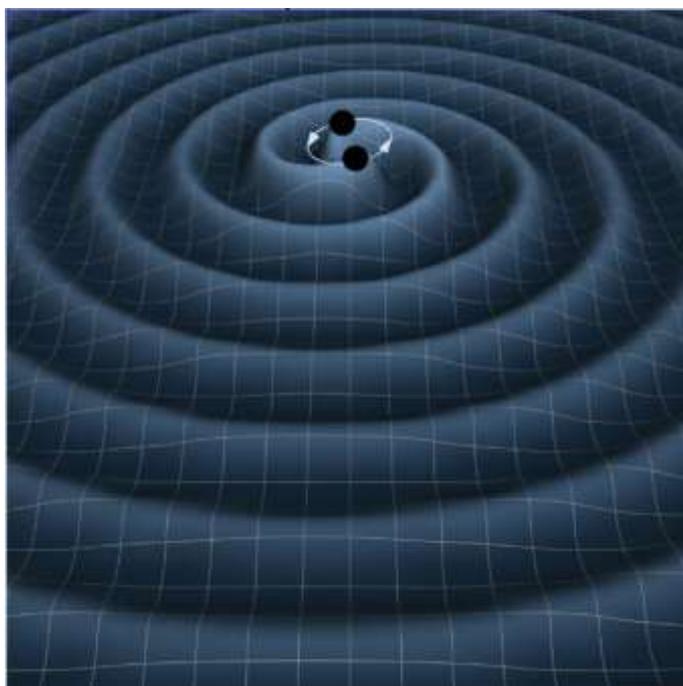


Рис. Тесная пара черных дыр за мгновение до слияния. Изображение с сайта ligo.org

Такое слияние черных дыр — взрыв грандиозной мощности, но только уходит вся эта излученная энергия не в свет, не в частицы, а в колебания

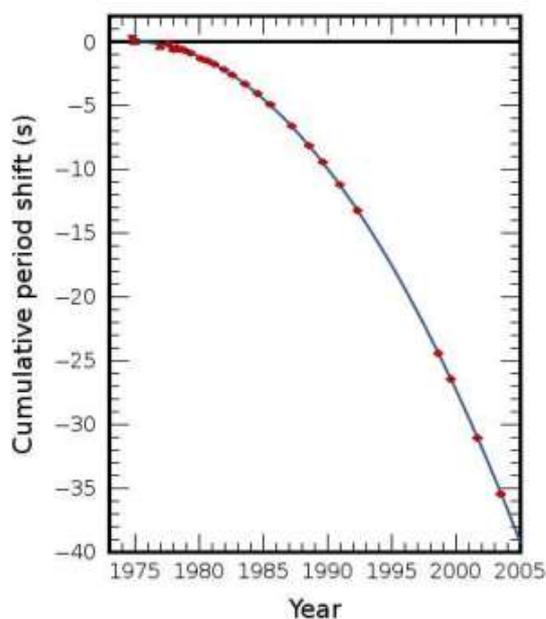
пространства. Излученная энергия составит заметную часть от исходной массы черных дыр, и выплеснется это излучение за доли секунды.

Аналогичные колебания будут порождать и слияния нейтронных звезд. Чуть более слабый гравитационно-волновой выброс энергии сопровождается и другие процессы, например коллапс ядра сверхновой.

Здесь надо добавить, что косвенное указание на существование гравитационных волн уже было обнаружено, и за него даже присудили Нобелевскую премию по физике за 1993 год. Многолетние наблюдения за пульсаром в двойной системе **PSR B1913+16** показали, что период обращения уменьшается ровно такими темпами, которые предсказывает ОТО с учетом потерь энергии на гравитационное излучение.

Непрямая регистрация гравитационных волн

1974 г открыт двойной пульсар, с периодом 7.75 часа. Период уменьшался на 76.6 микросекунд в год в согласии с гравитационным излучением: согласие 0.997 ± 0.002 .



Mass of companion: $1.387 M_{\odot}$
Total mass of the system: $2.828378(7) M_{\odot}$
Semi-major axis: $\sim 2 \cdot 10^6$ km
 $P_{\text{гп}} = 7.35 \times 10^{24}$ Вт

Nobel Prize on Physics 1993



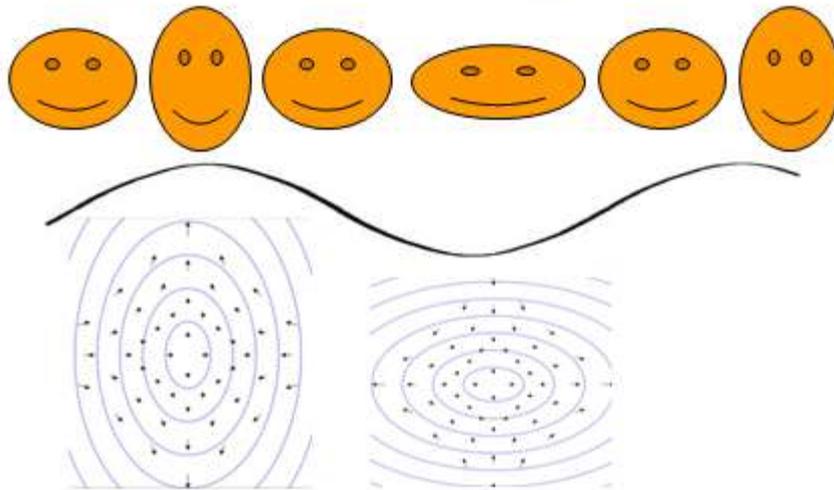
Russell Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

Действие волн

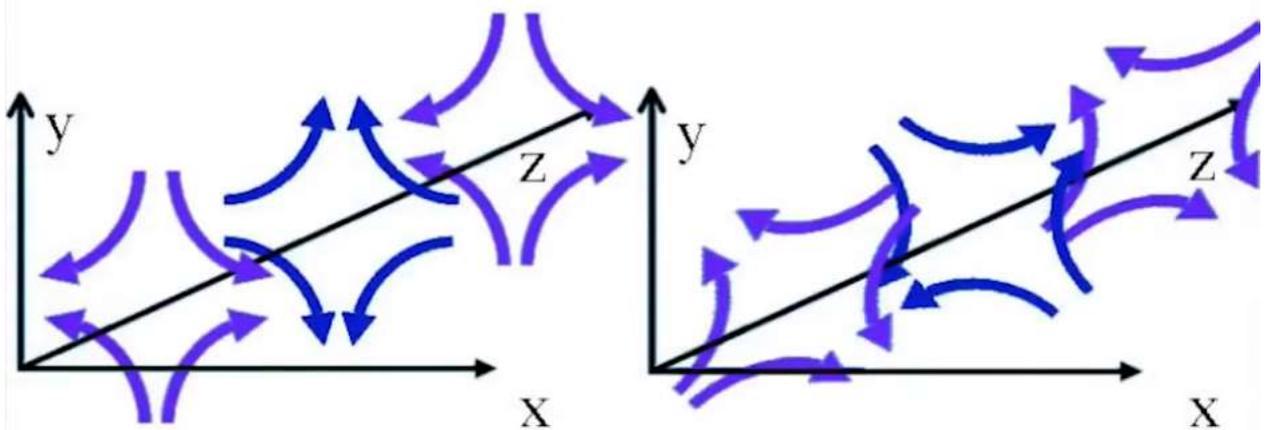
Гравитационные волны искажают пространство
одновременно по двум координатам



Под действием гравитационной волны твердое тело начнет вибрировать. И эти вибрации можно зафиксировать.

У гравитационных волн существует две поляризации. + и х

**поле относительных ускорений ГВ
падающей в направлении оси z
поляризации (+) и (х)**



расположенные под 45 градусов друг к другу.

Но это не имеет значение если детектор симметричен – например круглая твердая болванка.

Колебания метрики пространства-времени — гравитационно-волновое эхо грандиозного взрыва — разлетятся по Вселенной во все стороны от источника. Их амплитуда ослабевает с расстоянием, по аналогии с тем, как падает яркость точечного источника при удалении от него. **Когда всплеск из далекой галактики долетит до Земли, колебания метрики будут порядка 10^{-22} или даже меньше. Иными словами, расстояние между физически не связанными друг с другом предметами будет периодически увеличиваться и уменьшаться на такую относительную величину.**

Порядок величины этого числа легко получить из масштабных соображений (см. статью В. М. Липунова «Гравитационно-волновое небо»). В момент слияния нейтронных звезд или черных дыр звездных масс искажения метрики прямо рядом с ними очень большие — порядка 0,1, на то это и сильная гравитация. Столь суровое искажение затрагивает область порядка размеров этих объектов, то есть несколько километров. При удалении от источника амплитуда колебания падает обратно пропорционально расстоянию. **Это значит, что на расстоянии $100 \text{ Мпк} = 3 \cdot 10^{21} \text{ км}$ амплитуда колебаний упадет на 21 порядок и станет порядка 10^{-22} .**

Конечно, если слияние произойдет в нашей родной галактике, дошедшая до Земли дрожь пространства-времени будет куда сильнее. Но такие события происходят раз в несколько тысяч лет. Поэтому по-настоящему рассчитывать стоит лишь на такой детектор, который способен будет почувствовать слияние нейтронных звезд или черных дыр на расстоянии в десятки-сотни мегапарсек, а значит, охватит многие тысячи и миллионы галактик.

По этой причине практически никто из ученых в реальности гравитационных волн не сомневается; вопрос лишь в том, как их поймать.

История поисков



Рис Джозеф Вебер настраивает свой детектор гравитационных волн. Изображение с сайта physics.aps.org

Поиски гравитационных волн стартовали примерно полвека назад — и почти сразу обернулись сенсацией. **Джозеф Вебер** из **Мэрилендского университета** сконструировал первый резонансный детектор: **цельный двухметровый алюминиевый цилиндр с чувствительными пьезодатчиками по бокам и хорошей виброизоляцией от посторонних колебаний (рис)**. При прохождении гравитационной волны цилиндр резонирует в такт искажениям пространства-времени, что и должны зарегистрировать датчики. Вебер построил несколько таких детекторов, и в 1969 году, проанализировав их показания в ходе одного из сеансов, он прямым текстом сообщил, что зарегистрировал «звучание гравитационных

волн» сразу в нескольких детекторах, разнесенных друг от друга на два километра (J. Weber, 1969. Evidence for Discovery of Gravitational Radiation). Заявленная им амплитуда колебаний оказалась неправдоподобно большой, порядка 10^{-16} , то есть в миллион раз больше типичного ожидаемого значения. Сообщение Вебера было встречено научным сообществом с большим скепсисом; к тому же другие экспериментальные группы, вооружившись похожими детекторами, не смогли в дальнейшем поймать ни одного подобного сигнала.

Намного более перспективными казались детекторы, в которых используется не один резонирующий объект, а отслеживается расстояние между двумя не связанными друг с другом, независимо подвешенными телами, например двумя зеркалами. Из-за колебания пространства, вызванного гравитационной волной, расстояние между зеркалами будет то чуть больше, то чуть меньше. При этом чем больше длина плеча, тем большее абсолютное смещение вызовет гравитационная волна заданной амплитуды. Эти колебания сможет почувствовать лазерный луч, бегающий между зеркалами. Такая схема способна регистрировать колебания в широком диапазоне частот, от 10 герц до 10 килогерц, и это именно тот интервал, в котором будут излучать сливающиеся пары нейтронных звезд или черных дыр звездных масс.

Современная реализация этой идеи на основе интерферометра Майкельсона выглядит следующим образом (рис. 5). В двух длинных, длиной в несколько километров, перпендикулярных друг другу вакуумных камерах подвешиваются зеркала. На входе в установку лазерный луч расщепляется, идет по обеим камерам, отражается от зеркал, возвращается обратно и вновь соединяется в полупрозрачном зеркале. Добротность оптической системы исключительно высока, поэтому лазерный луч не просто проходит один раз туда-обратно, а задерживается в этом оптическом резонаторе надолго. В «спокойном» состоянии длины подобраны так, чтобы два луча после воссоединения гасили друг друга в направлении датчика, и тогда

фотодетектор оказывается в полной тени. Но стоит лишь зеркалам под действием гравитационных волн сместиться на микроскопическое расстояние, как компенсация двух лучей станет неполной и фотодетектор уловит свет. И чем сильнее смещение, тем более яркий свет увидит фотодатчик.

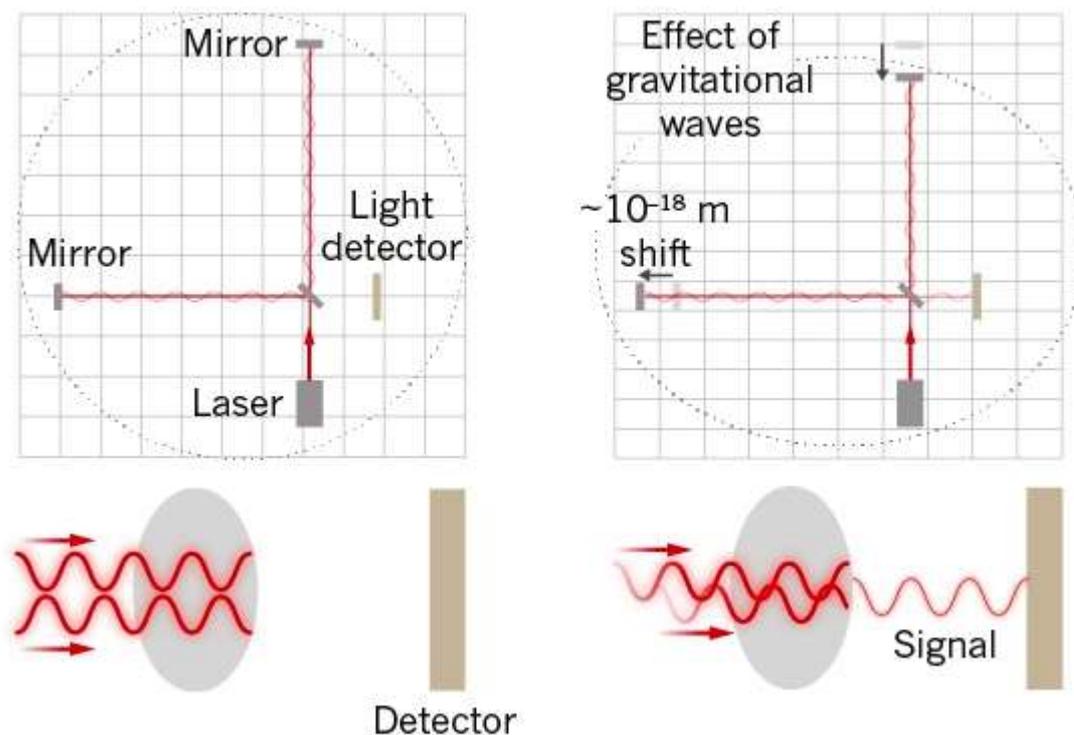


Рис Принцип интерферометрического детектирования гравитационных волн. Гравитационная волна искажает длину двух плечей в противофазе, из-за чего точная компенсация света нарушается и фотодетектор регистрирует периодический сигнал. Изображение из статьи D. Castelvecchi & A. Witze, 2016. [Einstein's gravitational waves found at last](#)

Слова «микроскопическое смещение» даже близко не передают всей тонкости эффекта. Смещение зеркал на длину волны света, то есть микрон, заметить проще простого даже без каких-либо ухищрений. Но при длине плеча 4 км это отвечает колебаниям пространства-времени с амплитудой 10^{-10} . Заметить смещение зеркал на диаметр атома тоже не представляет проблем — достаточно запустить лазерный луч, который пробежит туда-сюда тысячи раз и получит нужный набег фазы. Но и это дает от силы 10^{-14} . А нам нужно спуститься по шкале смещений еще

в миллионы раз, то есть научиться регистрировать сдвиг зеркала даже не на один атом, а на тысячные доли атомного ядра!

На пути к этой поистине поразительной технологии физикам пришлось преодолевать множество трудностей. Некоторые из них чисто механические: требуется повесить массивные зеркала на подвесе, который висит на другом подвесе, тот на третьем подвесе и так далее — и всё для того, чтобы максимально избавиться от посторонней вибрации. Другие проблемы тоже инструментальные, но оптические. ***Например, чем мощнее луч, циркулирующий в оптической системе, тем более слабое смещение зеркал можно будет заметить фотодатчиком. Но слишком мощный луч будет неравномерно нагревать оптические элементы, что пагубно скажется на свойствах самого луча.*** Этот эффект надо как-то компенсировать, и для этого в 2000-х годах была запущена целая исследовательская программа по этому поводу (рассказ об этом исследовании см. в новости Преодолено препятствие на пути к высокочувствительному детектору гравитационных волн, «Элементы», 27.06.2006). Наконец, есть чисто фундаментальные физические ограничения, связанные с квантовым поведением фотонов в резонаторе и принципом неопределенности. ***Они ограничивают чувствительность датчика величиной, которая называется стандартный квантовый предел. Однако физики с помощью хитро приготовленного квантового состояния лазерного света уже научились преодолевать и его*** (J. Aasi et al., 2013. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light).

В гонке за гравитационными волнами участвует целый список стран; своя установка есть и в России, в Баксанской обсерватории, и о ней, кстати, рассказывается в документальном научно-популярном фильме Дмитрия Завильгельского «В ожидании волн и частиц». Лидерами этой гонки сейчас являются две лаборатории — американский проект **LIGO** и итальянский детектор **Virgo**. LIGO включает в себя два одинаковых

детектора, расположенных в Ханфорде (штат Вашингтон) и в Ливингстоне (штат Луизиана) и разнесенных друг от друга на 3000 км. Наличие двух установок важно сразу по двум причинам. Во-первых, сигнал будет считаться зарегистрированным, только если его увидят оба детектора одновременно. А во-вторых, по разности прихода гравитационно-волнового всплеска на две установки — а она может достигать 10 миллисекунд — можно примерно определить, из какой части неба этот сигнал пришел. Правда, с двумя детекторами погрешность будет очень большой, но когда в работу вступит Virgo, точность заметно повысится.



Рис Гравитационно-волновой детектор в Ханфорде — один из двух детекторов обсерватории LIGO. Изображение из статьи М. Mitchell Waldrop, 2016. [The hundred-year quest for gravitational waves — in pictures](#)

Строго говоря, впервые идея интерферометрического детектирования гравитационных волн была предложена советскими физикам М. Е. Герценштейном и В. И. Пустовойтом в далеком 1962 году. Тогда только-только был придуман лазер, а Вебер приступил к созданию своих резонансных детекторов. Однако эта статья не была замечена на западе и,

говоря по правде, не повлияла на развитие реальных проектов (см. исторический обзор [Physics of gravitational wave detection: resonant and interferometric detectors](#)).

Создание гравитационной обсерватории LIGO было инициативой трех ученых из Массачусетского технологического института (MIT) и из Калифорнийского технологического института (Калтеха). Это Райнер Вайсс ([Rainer Weiss](#)), который реализовал идею интерферометрического гравитационно-волнового детектора, Рональд Дривер ([Ronald Drever](#)), добившийся достаточной для регистрации стабильности лазерного света, и [Кип Торн](#), теоретик-вдохновитель проекта, ныне хорошо известный широкой публике в качестве научного консультанта фильма «Интерстеллар». О ранней истории создания LIGO можно прочитать в [недавнем интервью Райнера Вайсса](#) и в [воспоминаниях Джона Прескилла](#).

Деятельность, связанная с проектом интерферометрического детектирования гравитационных волн, началась в конце 1970-х годов, и поначалу реальность этой затеи тоже у многих вызывала сомнения. Однако после демонстрации ряда прототипов был написан и одобрен нынешний проект LIGO. Его строили в течение всего последнего десятилетия XX века.

Хотя первоначальный импульс проекту задали США, обсерватория LIGO является по-настоящему международным проектом. В него вложились, финансово и интеллектуально, 15 стран, и членами коллаборации числятся свыше тысячи человек. Важную роль в реализации проекта сыграли советские и российские физики. С самого начала активное участие в реализации проекта LIGO принимала уже упомянутая группа Владимира Брагинского из МГУ, а позже к коллаборации присоединился и Институт прикладной физики из Нижнего Новгорода.

Обсерватория LIGO заработала в 2002 году и вплоть до 2010 года на ней прошло шесть научных сеансов наблюдений. Никаких гравитационно-волновых всплесков достоверно обнаружено не было, и физики смогли лишь установить ограничения сверху на частоту таких событий. Это, впрочем, не

слишком их удивляло: оценки показывали, что в той части Вселенной, которую тогда «прослушивал» детектор, вероятность достаточно мощного катаклизма была невелика: примерно один раз в несколько десятков лет.

Финишная прямая

С 2010 по 2015 годы коллаборации LIGO и Virgo кардинально модернизировали аппаратуру (Virgo, впрочем, еще в процессе подготовки). И вот теперь долгожданная цель находилась в прямой видимости. LIGO — а точнее, aLIGO (*Advanced LIGO*) — теперь была готова отлавливать всплески, порожденные нейтронными звездами, на расстоянии 60 мегапарсек, и черными дырами — в сотни мегапарсек. Объем Вселенной, открытой для гравитационно-волнового прослушивания, вырос по сравнению с прошлыми сеансами в десятки раз.

Конечно, нельзя предсказать, когда и где будет следующий гравитационно-волновой «бабах». Но чувствительность обновленных детекторов позволяла рассчитывать на несколько слияний нейтронных звезд в год, так что первый всплеск можно было ожидать уже в ходе первого четырехмесячного сеанса наблюдений. Если же говорить про весь проект aLIGO длительностью в несколько лет, то вердикт был предельно ясным: либо всплески посыплются один за другим, либо что-то в ОТО принципиально не работает. И то, и другое станет большим открытием.

С 18 сентября 2015 года до 12 января 2016 года прошел первый сеанс наблюдений LIGO. В течение всего этого времени по интернету гуляли слухи о регистрации гравитационных волн, но коллаборация хранила молчание: «мы набираем и анализируем данные и пока не готовы сообщить о результатах». Дополнительную интригу создавало то, что в процессе анализа сами члены коллаборации не могут быть полностью уверены, что они видят реальный гравитационно-волновой всплеск. Дело в том, что в LIGO в поток настоящих данных изредка искусственно внедряется сгенерированный на компьютере всплеск. Он называется «слепой вброс», blind injection, и из всей группы только три

человека (!) имеют доступ к системе, которая осуществляет его в произвольный момент времени. Коллектив должен отследить этот всплеск, ответственно проанализировать его, и только на самых последних этапах анализа «открываются карты» и члены коллаборации узнают, было это реальным событием или же проверкой на бдительность. Между прочим, в одном таком случае в 2010 году дело даже дошло до написания статьи, но обнаруженный тогда сигнал оказался именно «слепым вбросом».

Открытие

11 февраля всё открылось. Коллаборация LIGO провела пресс-конференцию, и одновременно с этим в журнале *Physical Review Letters* вышла совместная статья коллабораций LIGO и Virgo Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, прямым текстом сообщающая об открытии гравитационных волн. **Причем любопытно, что событие, получившее рядовое обозначение GW150914, было зарегистрировано еще 14 сентября, то есть за четыре дня до официального старта наблюдательного сеанса, когда детекторы уже находились в полностью рабочем режиме и завершались последние технические проверки.** Полный любопытных подробностей рассказ о том, что творилось в те дни в самой коллаборации LIGO, читайте в заметке Here's the first person to spot those gravitational waves.

Гравитационно-волновой всплеск от слияния двух компактных объектов имеет очень конкретный, хорошо вычисляемый профиль, показанный на рис.

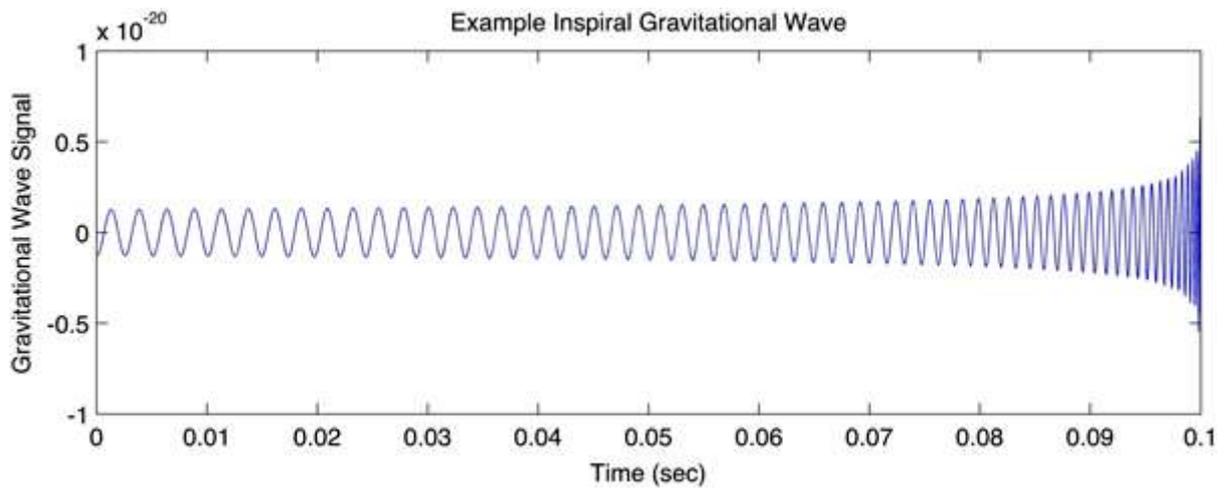


Рис. Гравитационно-волновой всплеск от слияния двух черных дыр. Изображение с сайта ligo.org

Период колебаний задается орбитальным движением двух объектов друг вокруг друга. Гравитационные волны уносят энергию; как следствие, объекты сближаются и крутятся быстрее — и это видно как по убыстрению колебаний, так и по усилению амплитуды. В какой-то момент происходит слияние, выбрасывается последняя сильная волна, а затем следует высокочастотный «послезвон» (*ringdown*) — дрожание образовавшейся черной дыры, которая «сбрасывает» с себя все несферические искажения (эта стадия на картинке не показана). Знание этого характерного профиля помогает физикам искать слабый сигнал от такого слияния в сильно зашумленных данных детекторов.

На рис. показан главный результат: профиль сигнала, зарегистрированного обоими детекторами.

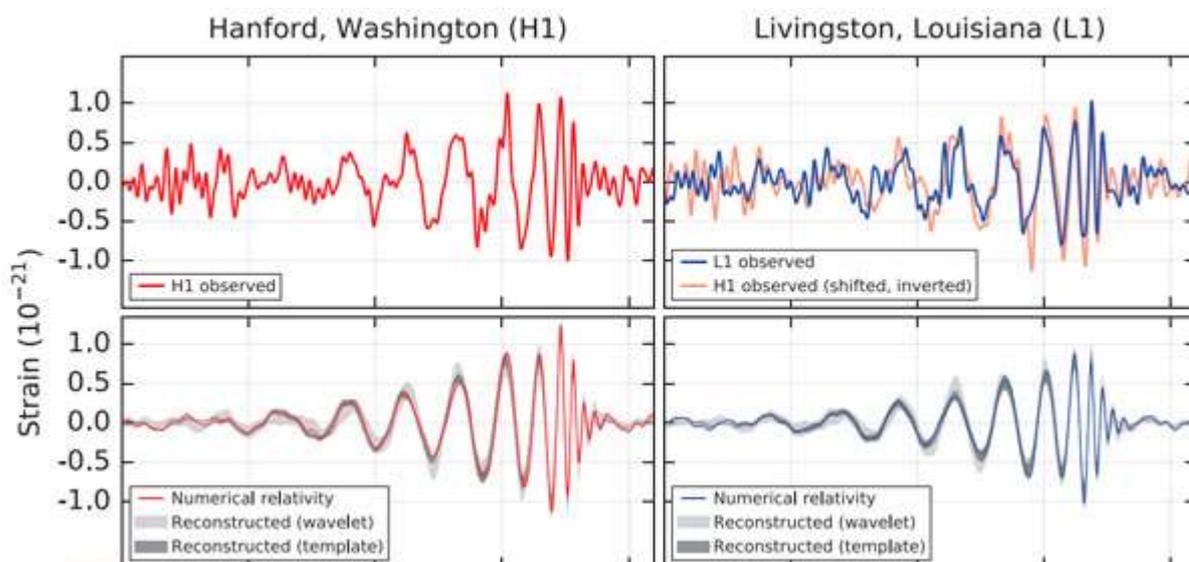


Рис. 7. Вверху: сигнал от события GW150914, зарегистрированный двумя детекторами LIGO, внизу: результат численного моделирования процесса для наиболее подходящих масс черных дыр. Изображение из обсуждаемой статьи в *Physical Review Letters*

Видно, что на фоне шумов сначала слабо проступает, а потом нарастает по амплитуде и по частоте колебание нужной формы. **Сравнение с результатами численного моделирования позволило выяснить, слияние каких объектов мы наблюдали: это были черные дыры с массами примерно 36 и 29 солнечных масс, которые слились в одну черную дыру массой 62 солнечных массы (погрешность всех этих чисел, отвечающая 90-процентному доверительному интервалу, составляет 4 солнечных массы).** Авторы мимоходом замечают, что получившаяся черная дыра — самая тяжелая из когда-либо наблюдавшихся черных дыр звездных масс. **Разница между суммарной массой двух исходных объектов и конечной черной дырой составляет $3 \pm 0,5$ солнечных масс.** Этот гравитационный дефект масс примерно за 20 миллисекунд полностью перешел в энергию излученных гравитационных волн. Расчеты показали, что пиковая гравитационно-волновая мощность достигала $3,6 \cdot 10^{56}$ эрг/с, или, в пересчете на массу, примерно 200 солнечных масс в секунду.

Статистическая значимость обнаруженного сигнала составляет $5,1\sigma$. Иными словами, если предположить, что это статистические флуктуации наложились друг на друга и чисто случайно выдали подобный всплеск, такого события пришлось бы ждать 200 тысяч лет. Это позволяет с уверенностью заявить, что обнаруженный сигнал не является флуктуацией.

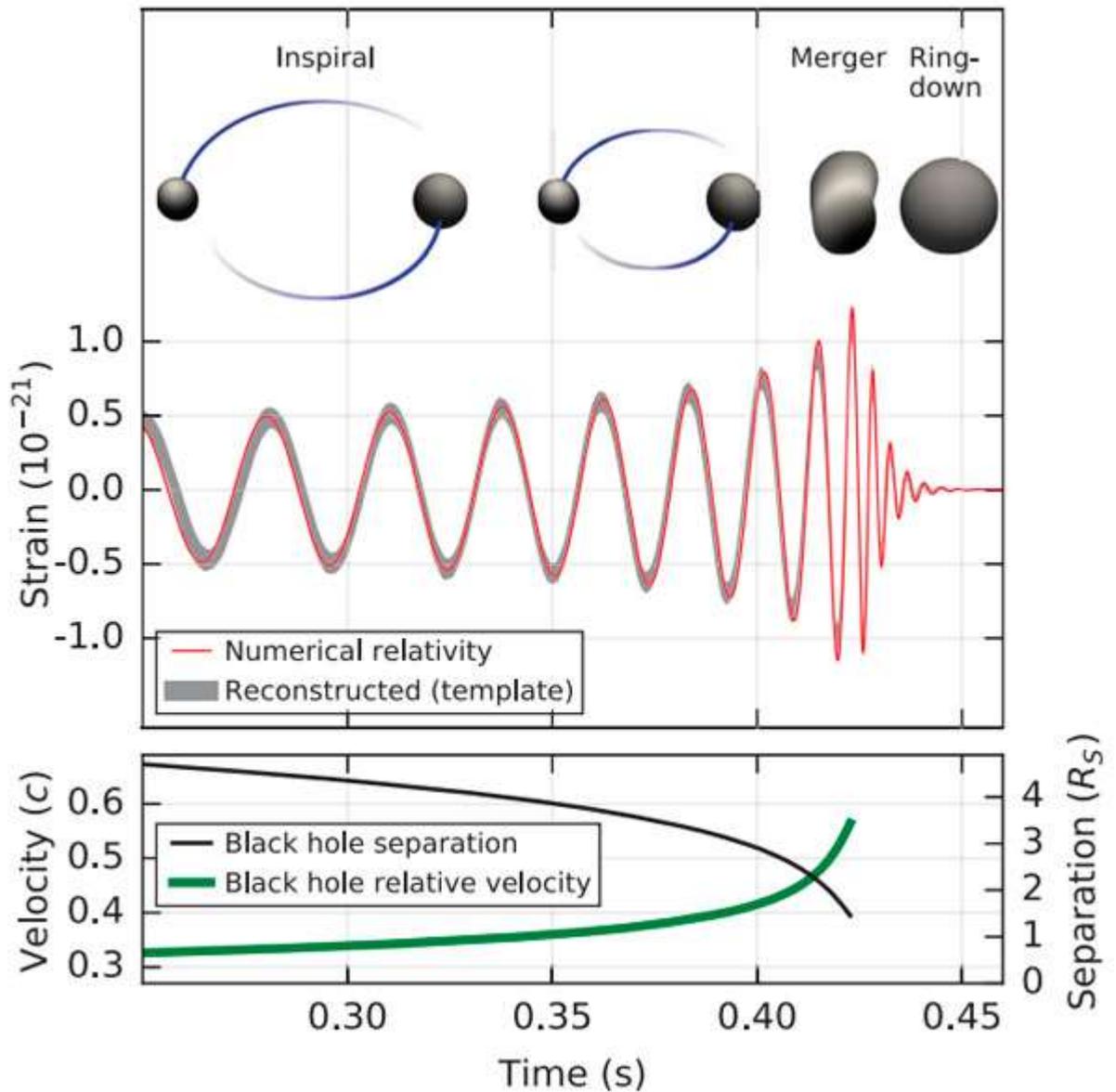


Рис. Интерпретация зарегистрированного сигнала. *Вверху*: профиль гравитационно-волнового излучения и соответствующие ему стадии слияния двух черных дыр; *внизу*: изменение эффективных орбитальных параметров пары с течением времени до момента слияния. Изображение из обсуждаемой статьи в *Physical Review Letters*

Максимальная амплитуда колебаний в этом всплеске составила 10^{-21} . Зная массы исходных объектов, можно вычислить излученную мощность, и, сравнив с этой амплитудой, выяснить, как далеко произошло это слияние. Оценка расстояния до него — примерно 1,3 млрд св. лет, $(410+160-180) \pm (10-180+160)$ Мпк, красное смещение $z=0.09+0.03-0.04$ ($z=0.09-0.04+0.03$). Из сравнения с моделированием были также получены ограничения на вращение черной дыры. Детальное обсуждение профиля GW150914, погрешностей измерения, и сравнения с моделированием приводится в сопровождающих статьях. На сайте коллаборации выложена также подробная информация по этому событию.

Временная задержка между двумя детекторами составила примерно 7 миллисекунд. Это позволило оценить направление прихода сигнала (рис). Поскольку детекторов только два, локализация вышла очень приблизительной: подходящая по параметрам область небесной сферы составляет 600 квадратных градусов.

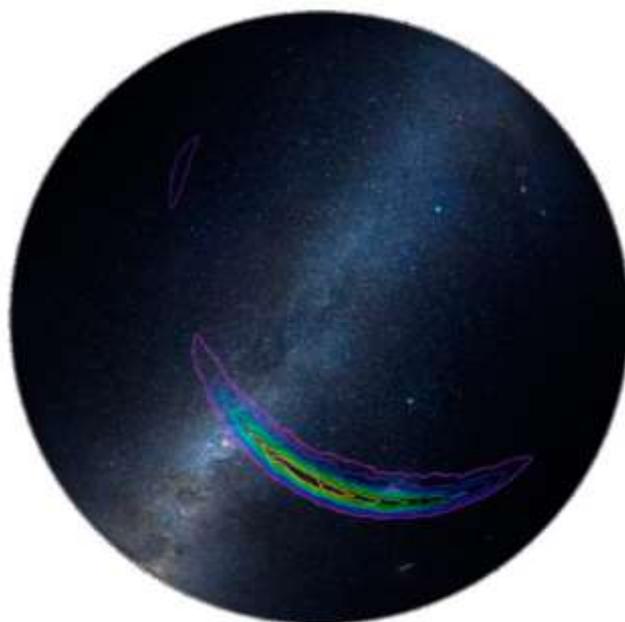


Рис. Оценка направления прихода всплеска на небесной сфере. Изображение с пресс-конференции LIGO

Коллаборация LIGO не ограничилась одной лишь констатацией факта регистрации гравитационных волн, но и провела первый анализ того, какие это наблюдение имеет последствия для астрофизики. В статье [Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914](#), опубликованной в тот же день в журнале *The Astrophysical Journal Letters*, авторы оценили, с какой частотой происходят такие слияния черных дыр. Получилось как минимум одно слияние в кубическом гигапарсеке за год, что сходится с предсказаниями наиболее оптимистичных в этом отношении моделей.

О чем расскажут гравитационные волны

Открытие нового явления после десятилетий поисков — это не завершение, а лишь начало нового раздела физики. Конечно, регистрация гравитационных волн от слияния черных двух важна сама по себе. Это прямое доказательство и существования черных дыр, и существования двойных черных дыр, и реальности гравитационных волн, и, если говорить вообще, доказательство правильности геометрического подхода к гравитации, на котором базируется ОТО. Но для физиков не менее ценно то, что гравитационно-волновая астрономия становится новым инструментом исследований, позволяет изучать то, что раньше было недоступно.

Во-первых, это новый способ рассматривать Вселенную и изучать космические катаклизмы. Для гравитационных волн нет препятствий, они без проблем проходят вообще сквозь всё во Вселенной. Они самодостаточны: их профиль несет информацию о породившем их процессе. Наконец, если один грандиозный взрыв породит и оптический, и нейтринный, и гравитационный всплеск, то можно попытаться поймать все их, сопоставить друг с другом, и разобраться в недоступных ранее деталях, что же там произошло. Уметь ловить и сравнивать такие разные сигналы от одного события — главная цель [всесигнальной астрономии](#).

Когда детекторы гравитационных волн станут еще более чувствительными, они смогут регистрировать дрожание пространства-

времени не в сам момент слияния, а за несколько секунд до него. Они автоматически пошлют свой сигнал-предупреждение в общую сеть наблюдательных станций, и астрофизические спутники-телескопы, вычислив координаты предполагаемого слияния, успеют за эти секунды повернуться в нужном направлении и начать съемку неба до начала оптического всплеска.

Во-вторых, гравитационно-волновой всплеск позволит узнать новое про нейтронные звезды, самые интересные объекты во Вселенной.

Слияние нейтронных звезд — это, фактически, самый последний и самый экстремальный эксперимент над нейтронными звездами, который природа может поставить для нас, а нам как зрителям останется только наблюдать результаты. Наблюдательные последствия такого слияния могут быть разнообразными (рис), и, набрав их статистику, мы сможем лучше понимать поведение нейтронных звезд в таких экзотических условиях. Обзор современного состояния дел в этом направлении можно найти в недавней публикации S. Rosswog, 2015. Multi-messenger picture of compact binary mergers.

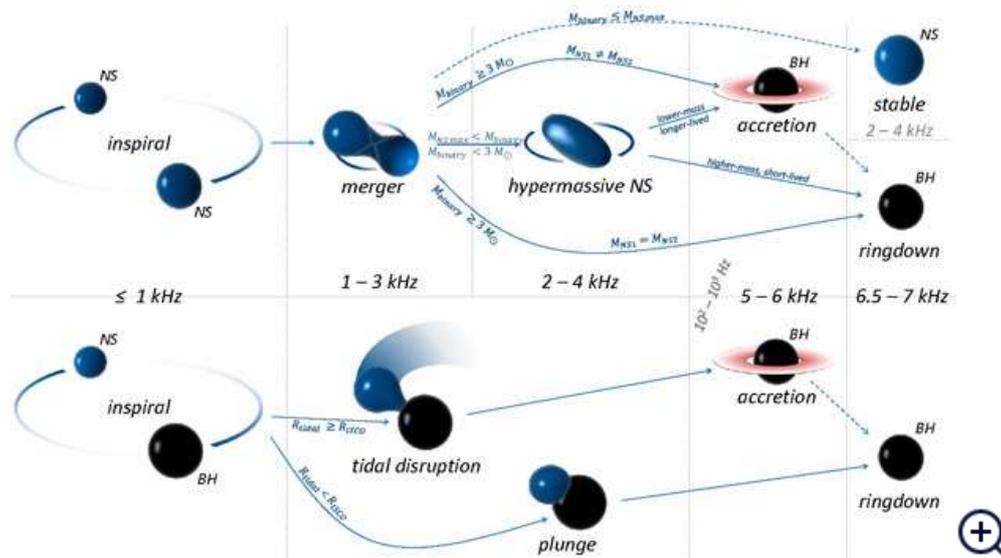


Рис. Возможные сценарии слияния нейтронной звезды с другой нейтронной звездой или с черной дырой. Информацию о развитии событий в каждом сценарии можно будет извлечь с помощью гравитационно-волнового всплеска. Изображение из статьи Imre Bartos, Patrick Brady,

Szabolcs Marka, 2012. How Gravitational-wave Observations Can Shape the Gamma-ray Burst Paradigm

В-третьих, регистрация всплеска, пришедшего от сверхновой, и сопоставление его с оптическими наблюдениями позволит наконец-то разобраться в деталях, что же там происходит внутри, в самом начале коллапса. Сейчас у физиков по-прежнему остаются сложности с численным моделированием этого процесса.

В-четвертых, у физиков, занимающихся теорией гравитации, появляется вождеденная «лаборатория» по изучению эффектов сильной гравитации. До сих пор все эффекты ОТО, которые мы могли непосредственно наблюдать, относились к гравитации в слабых полях. О том, что происходит в условиях сильной гравитации, когда искажения пространства-времени начинают сильно взаимодействовать сами с собой, мы могли догадываться лишь по косвенным проявлениям, через оптический отголосок космических катастроф.

В-пятых, появляется новая возможность для проверки экзотических теорий гравитации. Таких теорий в современной физике уже много, см. например посвященную им главу из популярной книги А. Н. Петрова «Гравитация». Некоторые из этих теорий напоминают обычную ОТО в пределе слабых полей, но могут сильно от нее отличаться, когда гравитация становится очень сильной. Другие допускают существование у гравитационных волн нового типа поляризации и предсказывают скорость, слегка отличающуюся от скорости света. Наконец, есть и теории, включающие дополнительные пространственные измерения. Что можно будет сказать по их поводу на основе гравитационных волн — вопрос открытый, но ясно, что кое-какой информацией здесь можно будет поживиться. Рекомендуем также почитать мнение самих астрофизиков о том, что изменится с открытием гравитационных волн, в подборке на Постнауке.

Дальнейшие наблюдения

Первый период наблюдения (сезон O1) — с 12 сентября 2015 по 19 января 2016. В это время действовал только детектор LIGO, и он обнаружил три гравитационных всплеска. После этого инструмент был остановлен для усовершенствования и повышения чувствительности.

Второй период наблюдения (сезон O2) — с 30 ноября 2016 по 25 августа 2017; к обновлённому американскому LIGO присоединился европейский детектор VIRGO (третий детектор на планете), при этом точность возросла почти в 10 раз). Четвёртое наблюдение было сделано [14 августа](#) 2017. Всего за эти месяцы было обнаружено 8 событий, в том числе первое столкновение нейтронных звёзд. Так, [17 августа]] 2017 один из двух детекторов LIGO зафиксировал небывало длинный — около 100 секунд — сигнал (позже выяснилось, что волну, искажённую шумами, увидел и второй детектор LIGO, а также и VIRGO); несколько секунд спустя мощную вспышку гамма-излучения заметили автоматические телескопы «[Ферми](#)» и «Интеграл». Благодаря такому богатому набору наблюдений удалось достаточно точно предсказать, где искать источник, и вскоре он был найден — столкновение двух нейтронных звезд 1,1 и 1,16 массы Солнца в 130 млн световых лет от нас, в [созвездии Гидры](#)^[28].

После этого оба детектора были вновь остановлены для модернизации.

Третий период наблюдения (сезон O3) — с апреля 2019 года. Сейчас (ноябрь 2020) подводены итоги периода O3a: с 1 апреля по 1 октября 2019 (зарегистрированных событий: 39, рекордное количество); данные сезона O3b (1 ноября 2019 года – 27 марта 2020) ещё обрабатываются. В данный момент оба детектора остановлены на очередную модернизацию, что сделает их ещё более чувствительными; планируется, что они возобновят работу в 2021 году.

Обнаружено: столкновение GW 190412 (апрель 2020) — одна из чёрных дыр имела массу 29,7 Солнца, а другая — 8,4 Солнца (это делает данную двойную систему наименее массивной из всех обнаруженных до сих

пор пар чёрных дыр); такое слияние также породило более продолжительный гравитационный сигнал.

Полученные данные, помимо прочего, были использованы, в том числе, чтобы с исключительной строгостью проверить общую теорию относительности Эйнштейна.

Параллели

Открытие гравитационных волн стало уже третьим за последние годы случаем, когда физики наконец-то пробились через все препятствия и добрались до неизведанных ранее тонкостей устройства нашего мира. В 2012 году был открыт хиггсовский бозон — частица, предсказанная почти за полвека от этого. В 2013 году нейтринный детектор IceCube доказал реальность астрофизических нейтрино и начал «разглядывать вселенную» совершенно новым, недоступным ранее способом — через нейтрино высоких энергий. И вот сейчас природа поддалась человеку еще раз: открылось гравитационно-волновое «окно» для наблюдений вселенной и, одновременно с этим, стали доступны для прямого изучения эффекты сильной гравитации.

Надо сказать, нигде здесь не было никакой «халявы» со стороны природы. Поиски велись очень долго, но она не поддавалась потому, что тогда, десятилетия назад, аппаратура не дотягивала до результата по энергии, по масштабам, или по чувствительности. Привело к цели именно неуклонное, целенаправленное развитие технологий, развитие, которое не остановили ни технические сложности, ни отрицательные результаты прошлых лет.

И во всех трех случаях сам по себе факт открытия стал не завершением, а, наоборот, началом нового направления исследований, стал новым инструментом прощупывания нашего мира. Свойства хиггсовского бозона стали доступны измерению — и в этих данных физики пытаются разглядеть эффекты Новой физики. Благодаря возросшей статистике нейтрино высоких энергий, нейтринная астрофизика делает первые шаги. Как минимум то же самое сейчас ожидается и от гравитационно-волновой астрономии, и для оптимизма есть все основания.

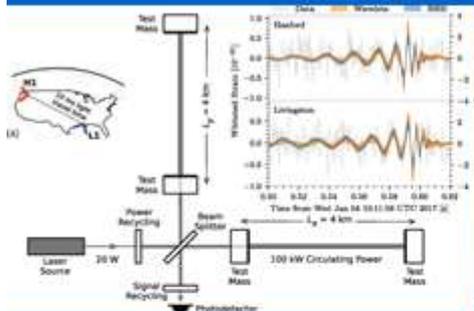
Гравитационные волны

14 сентября 2015 года коллаборация LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory – лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория), впервые наблюдала колебания пространства-времени – гравитационные волны, дошедшие до Земли от слияния двух черных дыр массами около 30 масс Солнца, что подтвердило предсказание Общей теории относительности А. Эйнштейна. Событие произошло на расстоянии 1,3 миллиарда световых лет от Земли, а в результате слияния образовалась новая чёрная дыра с массой, составляющей около 61 масс Солнца.



17 августа 2018 г. детекторы LIGO уловили гравитационные волны от столкновения двух нейтронных звезд 1,1 и 1,16 массы Солнца в 130 млн. световых лет от нас, в созвездии Гидры.

Основной частью детектора LIGO является лазерный интерферометр Майкельсона



В декабре 2017 года Нобелевская премия по физике была вручена американским ученым Райнеру Вайссу (половина премии), Кипу Торну и Барри Бэришу «за решающий вклад в детектор LIGO и за наблюдение гравитационных волн».

Группа ученых физфака МГУ принимает участие в работе международной научной коллаборации LIGO, объединяющей более 1000 человек из 16 стран.

Чем больше размер детектора тем он более чувствителен

Лекция 10

Наземные и космические телескопы, принцип их работы. Космические аппараты

Телескопы

Телескоп (от греч. tele «вдаль», «далеко» и skopeo «смотрю», «наблюдаю»), — это оптический инструмент, прибор для получения увеличенных изображений отдалённых объектов и/или исследования электромагнитного излучения от удалённых источников. В земных условиях наибольшее распространение получили оптические телескопы для видимой области спектра, поскольку атмосфера Земли непрозрачна в большей части ИК, коротковолновом УФ, рентгеновском и гамма-диапазонах.

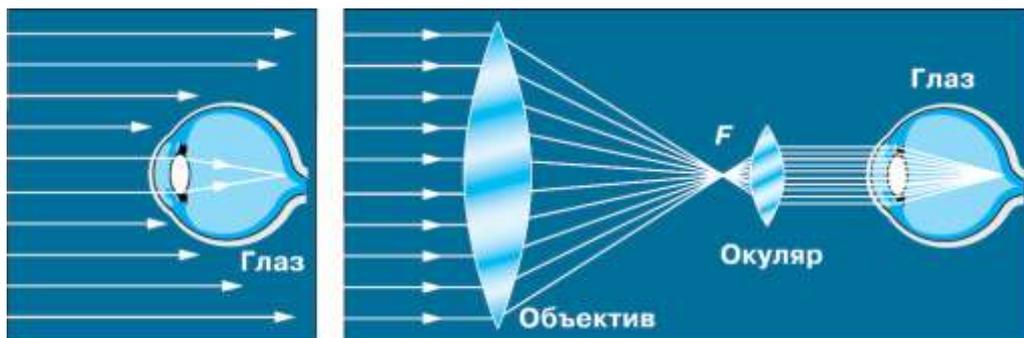
Телескоп применяют, во-первых, для того, чтобы собрать как можно больше света, идущего от исследуемого объекта, а во-вторых, чтобы обеспечить возможность изучать его мелкие детали, недоступные невооружённому глазу.

В астрономии расстояние между объектами на небе измеряют углом, образованным лучами, идущими из точки наблюдения к объектам. Такое расстояние называется угловым, и выражается оно в градусах и долях градуса. Невооруженным глазом две звезды видны отдельно, если они отстоят на небе друг от друга на угловом расстоянии не менее 1–2'. В крупные телескопы удается наблюдать отдельно звезды, угловое расстояние между которыми составляет сотые или даже тысячные доли секунды (под углом 1" «видна» спичечная коробка примерно с расстояния 10 км).

Параметрами телескопа являются:

диаметр объектива (апертура),
разрешающая способность (угловое разрешение),
фокусное расстояние,
относительное отверстие,
проницающая сила,

тип монтировки.



Диаметр объектива D . Чем больше диаметр объектива, тем более мелкие объекты можно будет разглядеть с помощью этого телескопа.

Фокусное расстояние объектива F . От этого параметра зависит относительное отверстие т.е. отношением $A = D/F$, которое принято выражать дробью с двоеточием, например, 1:2, 1:7, 1:20 и т. п.

Часто вместо относительного отверстия используется понятие светосилы, равной $(D/F)^2$. Светосила характеризует освещенность, создаваемую объективом в фокальной плоскости.

Здесь действует прямая зависимость: чем больше относительное отверстие объектива телескопа, тем выше его светосила. Количество света, собираемого объективом, возрастает пропорционально его площади (квадрату диаметра) Светосила играет важную роль в занятии астрофотографией. Большая светосила гарантирует более короткие выдержки при фотографировании слабых астрономических объектов, большую компактность всего прибора, а также лучшие условия для наблюдений с малыми увеличениями.

Увеличение. Увеличение телескопа определяется как F/f , где F - фокусное расстояние объектива телескопа, а f - фокусное расстояние окуляра телескопа. Наименьшее максимально-полезное увеличение телескопа определяется как $0,15xD$, наибольшее максимально-полезное увеличение – $2xD$, где на этот раз D - диаметр объектива в мм.. Сильные увеличения хороши для наблюдения Луны и планет, когда следует рассмотреть мелкие детали, а слабые - звездных скоплений, туманностей, галактик и комет.

Разрешающая способность. Разрешающая способность – это минимальное угловое расстояние между точечными объектами, которые можно различить в телескоп отдельно. Если невооруженным глазом можно различить две звезды с угловым расстоянием не менее 2', то телескоп позволяет уменьшить этот предел.

Чем меньше размер изображения светящейся точки (звезды), которое даёт объектив телескопа, тем лучше его разрешающая способность. Если расстояние между изображениями двух звёзд меньше размера самого изображения, то они сливаются в одно. Вследствие дифракции изображение звезды будет не точкой, а ярким пятном — дифракционным диском, угловой диаметр которого равен

$$\alpha = \frac{206\,265 \cdot \lambda}{D} \cdot 2,44,$$

где λ — длина световой волны, а D — диаметр объектива телескопа, 206 265 — число секунд в радиане. У школьного телескопа, диаметр объектива которого составляет 60 мм, теоретическая разрешающая способность будет равна примерно 2". Напомним, что это превышает разрешающую способность невооружённого глаза (в среднем) в 60 раз.

Практически угловое разрешение больших телескопов ограничивается атмосферным дрожанием. При фотографических наблюдениях разрешающая способность всегда ограничена земной атмосферой и погрешностями гидирования и не бывает лучше 0,3". При наблюдениях глазом из-за того, что можно попытаться поймать момент, когда атмосфера относительно спокойна (достаточно нескольких секунд), разрешающая способность у телескопов с диаметром D , большим 2 м, может быть близка к теоретической. Хорошим считается телескоп, собирающий более 50 % излучения в кружке 0,5".

Проницающая сила телескопа. Данная характеристика характеризуется предельной звездной величиной самой слабой звезды, которую можно увидеть в телескоп при наилучших условиях наблюдений.

Она приближённо выражается формулой $m \approx 2,1 + 5 \lg D$, где D выражено в сантиметрах.

Диаметр объектива, мм	Предельная звездная величина
60	11,0m
100	12,1m
200	13,6m
500	15,6m
1000	17,1m

Тип монтировки. Монтировка представляет собой механическое устройство для крепления и наведения телескопа на объект и может быть азимутальной и экваториальной.

В экваториальной монтировке одна из осей направлена в полюс мира, а вторая лежит в плоскости небесного экватора. В азимутальной монтировке одна из осей направлена в зенит, а вторая лежит в горизонтальной плоскости.

Недостатком азимутальной монтировки является тот факт, что для слежения за космическими объектами, перемещающимися по небесной сфере вследствие суточного вращения Земли, телескоп нужно поворачивать одновременно вокруг обеих осей с разными переменными скоростями. Поэтому такая монтировка удобна в первую очередь для наземных объектов. Данная проблема решается экваториальной монтировкой, которая призвана компенсировать вращение земного шара вращением телескопа в плоскости небесного экватора.



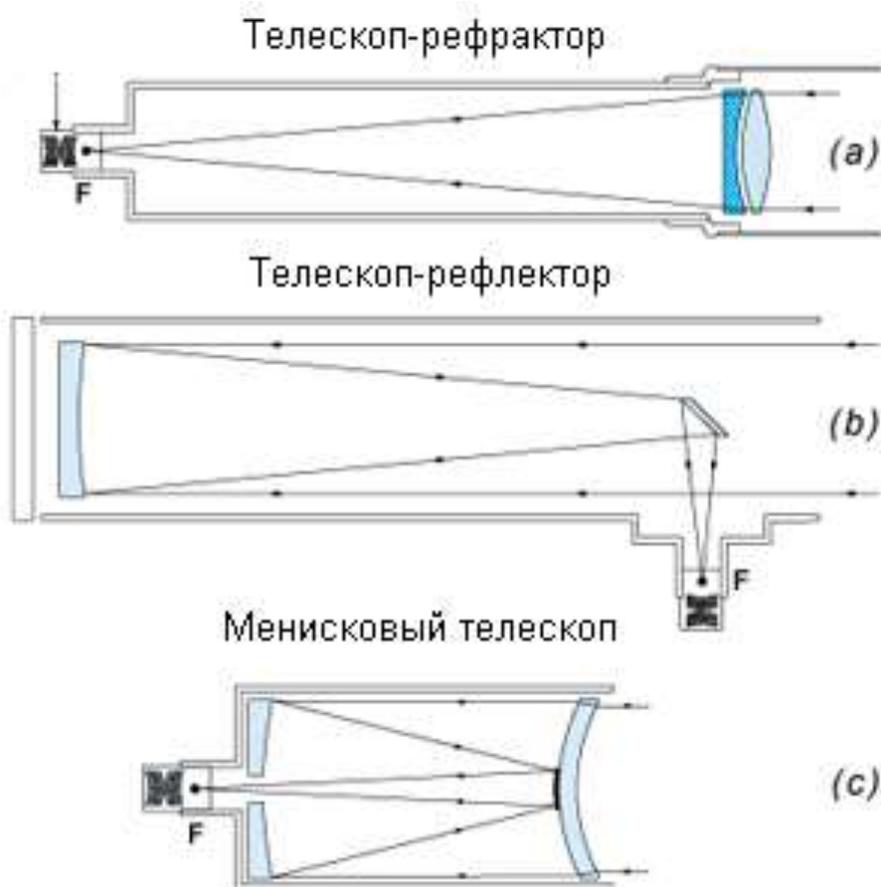
Экваториальная монтировка



*Телескоп на азимутальной
монтировке*

Характерной особенностью телескопа, как оптической системы, является параллельный ход лучей входящего излучения

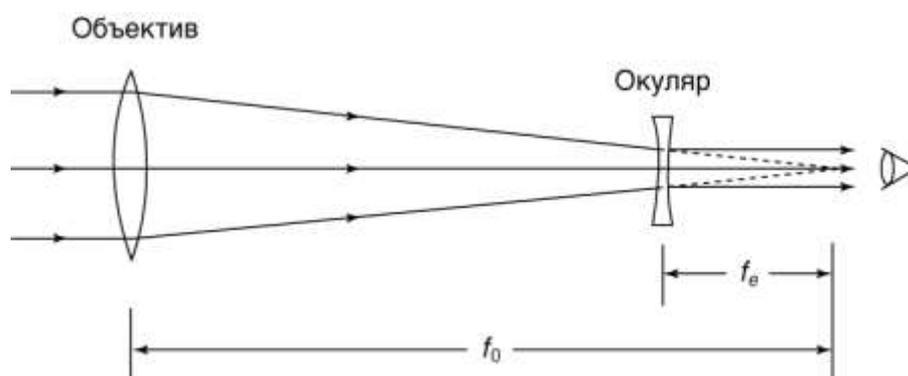
Существует несколько типов оптических телескопов. В телескопах-рефракторах (от лат. refracto — преломляю), где используется преломление света, лучи от небесных светил собирает линза (или система линз). В телескопах-рефлекторах (reflecto — отражаю) – вогнутое зеркало, способное фокусировать отраженные лучи. В зеркально-линзовых телескопах (кадиоптриках) – комбинация зеркал и линз (см. рис.).



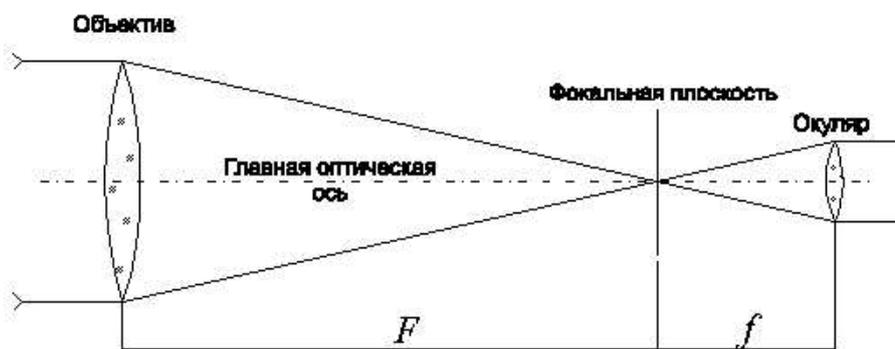
Оптический телескоп-рефрактор (зрительная труба с линзами) изобретён в начале XVII века. Первое свидетельство об использовании телескопа для астрономических наблюдений датируется 1609 годом (Галилео Галилей).

Телескоп Галилея (1609г.) имел в качестве объектива одну собирающую линзу, а окуляром служила рассеивающая линза. Такая

оптическая схема даёт неперевернутое (земное) изображение. Главными недостатками галилеевского телескопа являются очень малое поле зрения и сильная хроматическая aberrация.



Телескоп Кеплера (1611г.) Телескоп в котором в качестве окуляра используется положительная линза. Это позволило увеличить поле зрения и вынос зрачка, однако система Кеплера даёт перевернутое изображение. Преимуществом трубы Кеплера является также и то, что в ней имеется действительное промежуточное изображение, в плоскость которого можно поместить измерительную шкалу.

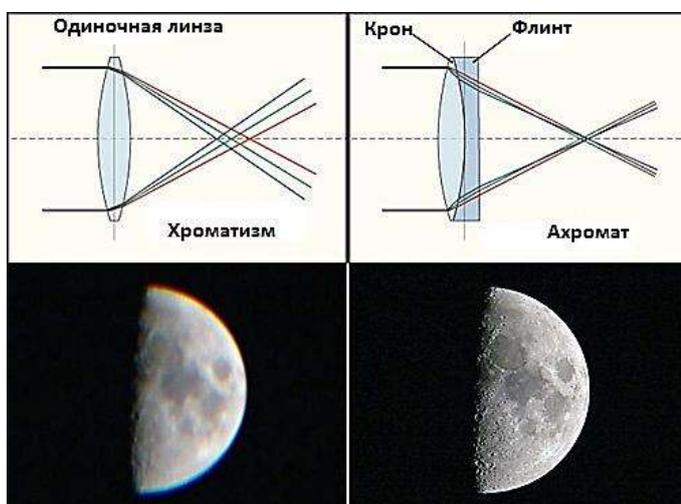


Основной недостаток телескопов-рефракторов — хроматическая aberrация.

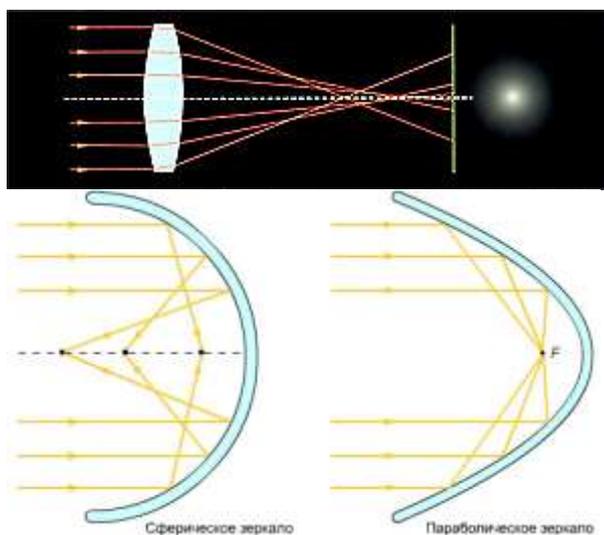
Искажение изображения, вызванное недостатками оптической системы, называется **абберацией**.

Хроматическая aberrация характерна для всех преломляющих оптических приборов. Возникает из-за того, что коэффициент преломления среды зависит от длины волны света. Синие лучи отклоняются линзой сильнее красных, и поэтому положения фокусов для лучей разных длин волн

не совпадают. В результате изображение звезды выглядит как набор радужных колец. Хроматическая aberrация в значительной степени устраняется комбинированием двух линз (телескопы-ахроматы).



Сферическая aberrация возникает из-за того, что лучи света, параллельные главной оптической оси объектива, падая на сферическую поверхность линзы или зеркала, после преломления или отражения пересекаются не в одной точке. Край объектива строят изображение ближе к объективу, а центральная часть – дальше. В результате изображение имеет в фокальной плоскости нерезкий вид.



Сферическая aberrация исправляется приданием зеркалу параболической формы.

Телескопы-рефлекторы свободны от хроматической aberrации, хотя сферические зеркала, как и линзы, подвержены сферической aberrации, которая также может быть устранена, если отражающая поверхность зеркала

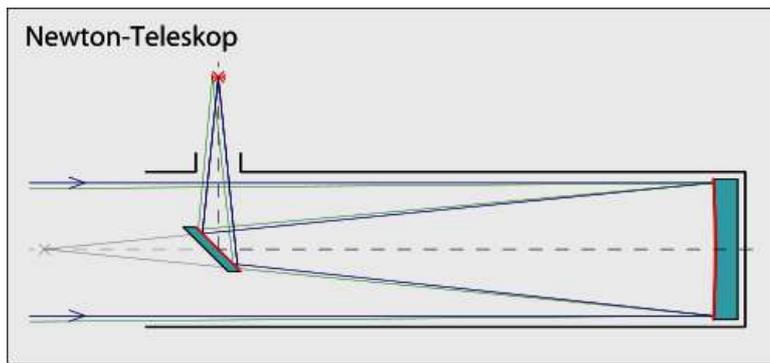
имеет форму параболоида вращения. К тому же, изготовление зеркал много проще по сравнению с изготовлением обладающими теми же техническими характеристиками линз.

Первый телескоп-рефлектор (зрительная труба с зеркалами) построен в 1668 году Исааком Ньютоном.

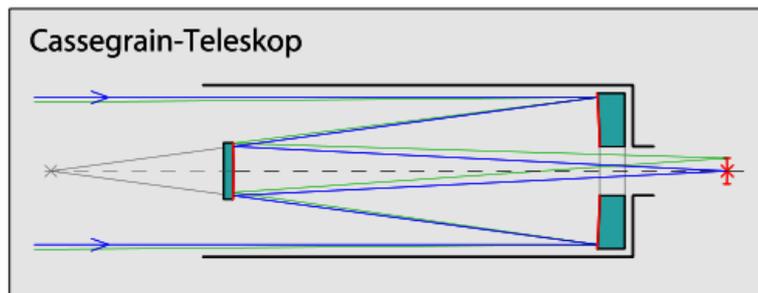


Копия телескопа Ньютона

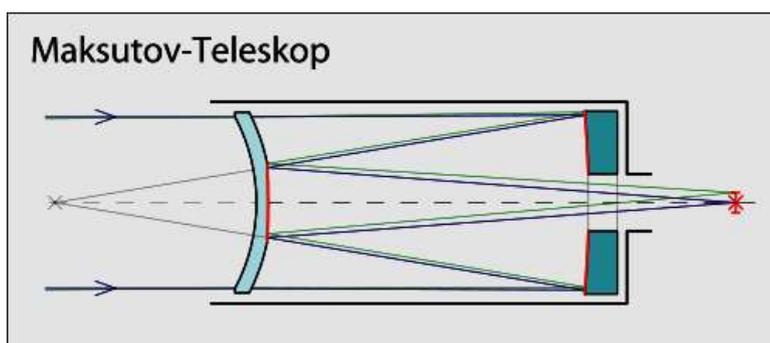
Система Ньютона - такую схему телескопов предложил Исаак Ньютон в 1667 году. Здесь плоское диагональное зеркало, расположенное вблизи фокуса, отклоняет пучок света за пределы трубы, где изображение рассматривается через окуляр или фотографируется. Главное зеркало параболическое, но если относительное отверстие не слишком большое, оно может быть и сферическим.



Система Кассегрена - схема была предложена Лореном Кассегреном в 1672 году. Это вариант двухзеркального объектива телескопа. Главное зеркало большего диаметра вогнутое (в оригинальном варианте параболическое) отбрасывает лучи на вторичное выпуклое меньшего диаметра (обычно гиперболическое).



Система Максутова-Кассегрена — система Кассегрена, модифицированную советским оптиком Д. Д. Максутовым, путем установки мениска.



В настоящее время для любительских астрономических наблюдений используются рефракторы, рефлекторы и комбинированные системы.

В профессиональной астрономии, как правило, — рефлекторы с большими параболическими или гиперболическими зеркалами.

Современный телескоп представляет собой сложное устройство, которое имеет предельно точную оптику малых и больших размеров,

наилучшие из существующих приёмники излучения и обширный комплекс научной и обслуживающей аппаратуры. Все наиболее крупные современные телескопы — это телескопы-рефлекторы.



Рис. . Шестиметровый телескоп-рефлектор

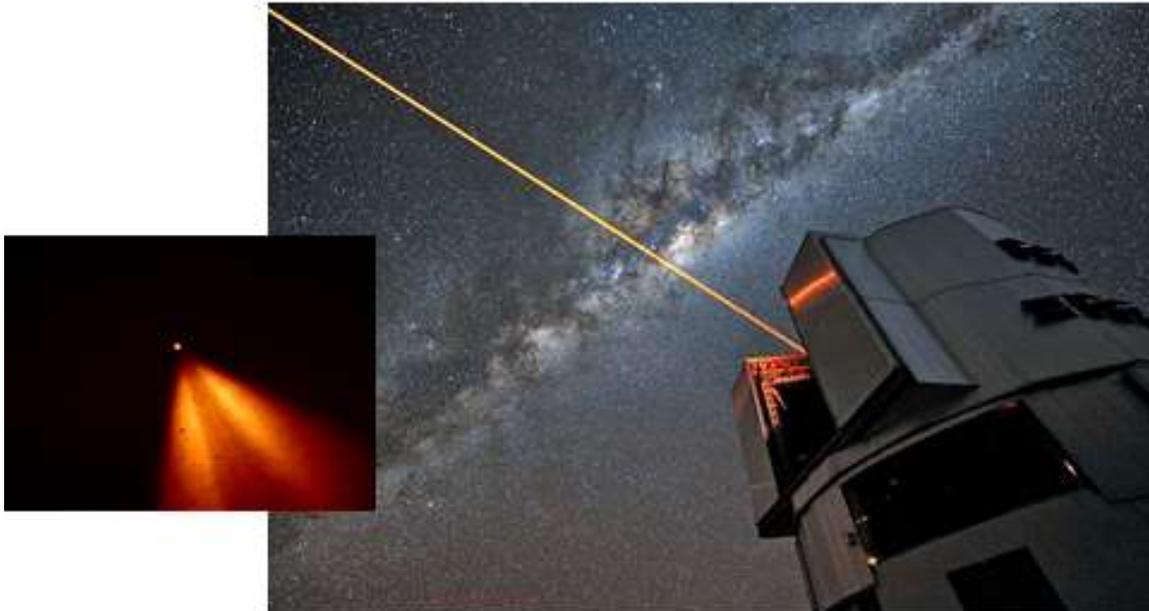
Крупнейший в России телескоп-рефлектор (рис.) имеет зеркало диаметром 6 м, отшлифованное с точностью до долей микрометра. Фокусное расстояние зеркала 24 м. Его масса около 40 т. Масса всей установки телескопа более 850 т, а высота 42 м. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительное время удерживать его в поле зрения, плавно поворачивая телескоп вслед за вращением Земли. Телескоп входит в состав Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук и установлен на Северном Кавказе (близ станции Зеленчукская в Кабардино-Балкарии) на высоте 2100 м над уровнем моря.

Оказалось, что такие огромные зеркала лучше **собирать из отдельных тонких частей** (изготавливаются они не из стекла, а из более лёгких синтетических материалов) и оснащать **системой активной оптики** – это автоматическая система для поддержания идеальной формы и правильного расположения оптических элементов телескопа-рефлектора, прежде всего его главного и вторичного зеркал (компенсация деформации зеркал).



Зеркало современного телескопа. Его формой управляет 261 актюатор.

Деформации возникают из-за изменений температуры воздуха. Также когда телескоп поворачивается при наведении на объект, форма и положение зеркала немного меняются под действием меняющейся по направлению силы тяжести. Активная оптика корректирует эти искажения: в процессе наблюдений непрерывно отслеживается опорная звезда, а компьютерный анализатор регистрирует малейшие отклонения от оптимального качества ее изображения. При появлении отклонений устройство вырабатывает управляющий сигнал, под воздействием которого форма и положение зеркала телескопа корректируются. Эта процедура повторяется через регулярные промежутки времени, как правило, один раз в минуту. Таким образом, изображения звезд всегда остаются максимально круглыми и резкими.



Для работы активной оптики при помощи специального лазера в верхних слоях атмосферы создают искусственную звезду (Laser Guide Star, LGS) — маленькое яркое пятно, постоянно присутствующее в поле зрения телескопа. Лазерный луч, на высоте около 90 км возбуждает свечение натрия. Физический размер светящейся области составляет около 1 м, что с расстояния в 100 км воспринимается как объект с угловым диаметром около 1".

Кроме того современные телескопы снабжены адаптивной оптикой - предназначена для компенсации искажений изображений светил, вызванных турбуленцией земной атмосферы Земли, из-за которого звёзды кажутся мерцающими. Их зеркала состоят из сегментов, управление которыми корректирует форму отражающей поверхности.

Специальные датчики измеряют угол наклона и кривизну волнового фронта, отраженного от главного зеркала. Эти данные поступают на компьютер, который определяет, как необходимо деформировать зеркало, чтобы компенсировать искажения, и формирует команды для приводов - устройств, которые и осуществляют деформацию зеркала. Количество приводов превышает 150, число команд, деформирующих зеркало, исчисляется тысячами в секунду.

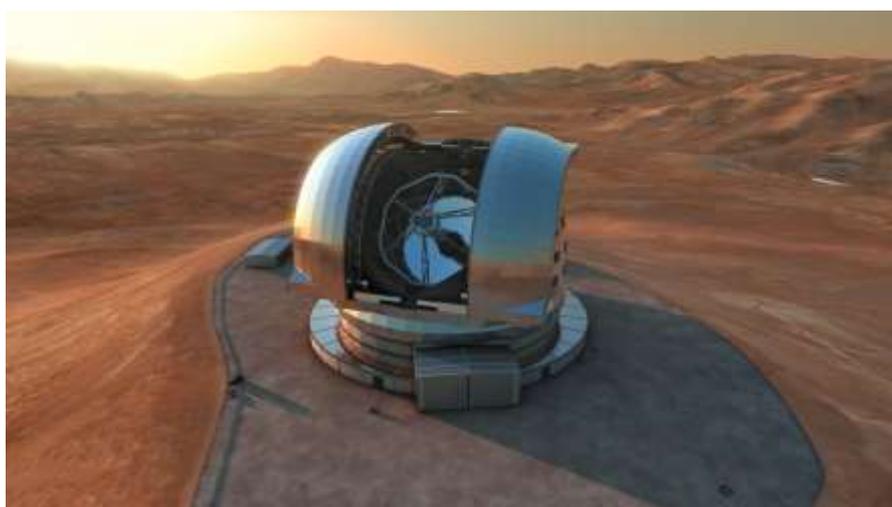
В результате достигается угловое разрешение порядка 0,001".

Большие обсерватории построены в высокогорьях для того, чтобы минимизировать влияние атмосферы на результаты измерений.

Крупнейший в мире телескоп установлен на острове Ла Пальма (Канарские острова) у побережья Африки. «Глаз» этого телескопа — зеркало диаметром 10,4 м. Площадь его поверхности составляет 82 м², а состоит оно из 36 шестиугольных фрагментов.

В настоящее время обсуждаются вполне реальные проекты создания телескопов с зеркалами диаметром 25—40 м устроенными по такому же принципу, а в перспективе намечается создание 100-метрового телескопа-рефлектора.

На вершине чилийской горы Серро Армазонес (3060 м.), планируют разместить в 2024 году мощнейший телескоп в мире, диаметр зеркала которого будет равен 39,3 метра (см. рис.). Зеркало, которое будет собрано из 798 отдельных сегментов, позволит прибору собирать в 15 раз больше света, чем все на сегодня действующие аппараты мира подобного типа. Современные технологии, применяемые при реализации проекта, позволят также детализировать снимки и увидеть ранее недостижимые участки Космоса. В 2015 году произошла торжественная закладка камня, где будет работать обсерватория. Для этого специально взорвали вершину скалы, чтобы выровнять площадку под строительство.

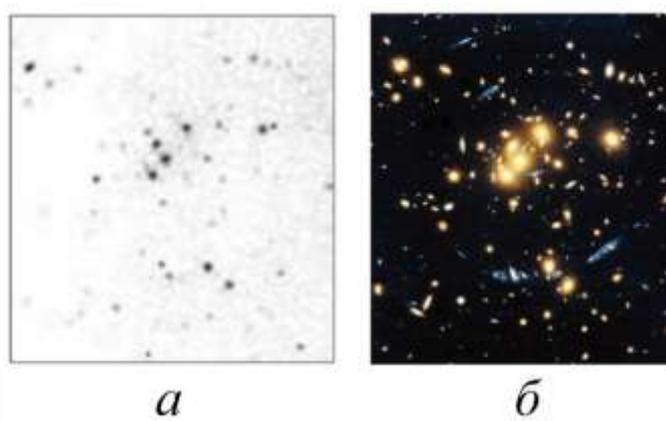


Матрицы ПЗС

Астрономы уже давно не ведут визуальных наблюдений. На смену им в XIX в. пришла фотография, а в настоящее время её во многих случаях

заменяют электронные приёмники света. Наибольшее распространение получили полупроводниковые приборы с зарядовой связью (сокращённо ПЗС). Матрицы ПЗС, которые применяются в современных цифровых фотоаппаратах, по своему устройству аналогичны тем, которые используются в астрономии.

ПЗС-матрица – это интегральная микросхема, представляющая собой совокупность МОП-структур (светочувствительных фотодиодов), сформированных на общей полупроводниковой подложке, которая создана на основе технологии ПЗС (приборов с зарядовой связью). ПЗС (Charge-Coupled Device, CCD) изобретён в 1969 году Уиллардом Бойлом и Джоржем Смитом (Нобелевская премия по физике 2009 года). В ПЗС осуществляется направленная передача зарядов от электрода к электроду путём манипуляции электрическими напряжениями на этих электродах. **Основные функциональные назначения фоточувствительных ПЗС – это преобразование оптических изображений в последовательность электрических импульсов (формирование видеосигнала), а также хранение и обработка цифровой и аналоговой информации.** Использование ПЗС привело к революционному улучшению характеристик телескопов.



Снимки одного и того же участка неба, полученные при помощи фотоплёнки (а) и ПЗС-матрицы (б)

Важнейшим качеством ПЗС, в которых используется внутренний фотоэффект, является их высокая чувствительность. Они регистрируют

практически каждый попавший на них фотон. Не менее важно и то, что запись полученных при этом изображений ведётся с помощью компьютера. Такая запись удобна для проведения различных исследований и передачи другим учёным. Некоторые телескопы используются для того, чтобы полученное изображение через компьютер передавать непосредственно пользователям Интернета. Это позволяет участвовать в наблюдениях за космическими объектами многим людям, которые интересуются астрономией, в том числе школьникам.

ПЗС незаменимы для телескопов, которые работают в автоматическом режиме, без участия человека.

Радиотелескопы

В настоящее время астрономию называют всеволновой, поскольку наблюдения за объектами ведутся не только в оптическом диапазоне.

Многие открытия при изучении Солнечной системы, нашей и других галактик связаны с радиотелескопами, предназначенными для исследования небесных тел в радиодиапазоне.



Радиотелескопом называют направленную радиоантенну, которая используется в радиоастрономии для приёма собственного электромагнитного излучения небесных объектов в радиодиапазоне и

исследования их характеристик: координат, пространственной структуры, интенсивности излучения, спектрального состава, поляризации и др. Радиотелескопы также используются для наблюдений за спутниками и автоматическими межпланетными станциями и сбора с них информации. В целях минимизации помех искусственного происхождения (радиоизлучение населённых пунктов, военных баз и т.п.) радиообсерватории обычно размещают в отдалённости от густонаселённых территорий. **Радиотелескоп** состоит из двух основных элементов: **антенного устройства и радиометра**.

Поскольку длины волн радиоизлучения лежат в широком диапазоне (от 0,1 мм до 1 км), то конструкции **антенн** радиотелескопов отличаются большим разнообразием. Антенны радиотелескопов, которые принимают излучение с длинами волн менее метра, чаще всего представляют собой **параболические отражатели**. Радиоастрономические зеркала не требуют такой высокой точности изготовления, как оптические. Чтобы зеркало не давало искажений, его отклонение от заданной параболической формы не должно превышать $\lambda/8$. Поскольку длины волн в радиодиапазоне намного больше, чем в оптическом, то, например, для волны с $\lambda = 10$ см достаточно иметь точность изготовления зеркала около 1 см. Кроме этого, зеркало радиотелескопа (антенну) можно не изготавливать сплошным.

В фокусе параболоида устанавливается **облучатель** – устройство, которое собирает радиоизлучение, направляемое зеркалом. Далее облучатель передаёт сигнал на вход радиометра. **Радиометр** усиливает принятый антенной сигнал и преобразует его в форму, удобную для обработки и регистрации. В современных радиотелескопах аналоговый сигнал после выхода радиометра переводится в цифровую форму и записывается в памяти компьютера.

Принцип работы радиотелескопа более напоминает принцип работы фотометра, чем оптического телескопа. Дело в том, что радиотелескоп не может создавать «изображение» объекта непосредственно, а только измеряет

интенсивность, спектральный состав и др. характеристики излучения, приходящего в направлении ориентации антенны. Таким образом, чтобы сформировать изображение протяжённого источника излучения с помощью радиотелескопа, необходимо измерить характеристики объекта в каждой его точке.

В провинции Гуйчжоу на юге Китая в 2016 году пустили в эксплуатацию самый большой радиотелескоп заполненной апертуры, диаметр которого 500 метров (см. рис.). Подобный аппарат поможет разрешить многие научные задачи, наблюдать за черными дырами, исследовать ранние периоды эволюции Вселенной. Ряд конструктивных особенностей позволит расширить обзор, а информацию получают и передают 9 радиоприемников.



В Пуэрто-Рико на относительно небольшой высоте в 497 метров работает рефлектор и радиотелескоп с диаметром зеркала в 304,8 метра (см. рис.). Официально он начал свою работу в 1963 году, а с начала 90-х, его используют в поиске внеземных цивилизаций.



Существенно возрастают возможности радиотелескопов, если их антенны объединить в систему и использовать для изучения одного и того же объекта. Например, система, которая состоит из 27 антенн диаметром 25 м каждая, расположенных в определённом порядке, позволяет достичь углового разрешения $0,04''$. Это соответствует возможностям радиотелескопа с антенной диаметром 35 км.

Радиоинтерферометры

Очень Большая Антенная Решётка – 27 радиотелескопов по 25 метров, штат Нью-Мексико (США), эквивалентна антенне диаметром 36 километров.



Космические телескопы

Кардинальное улучшение разрешающей способности и проникающей силы получается, если оптический телескоп работает в космосе (на околоземной или околосолнечной орбите).

В частности, это касается космического телескопа «Хаббл», который обращается вокруг Земли на высоте около 600 км. Находясь за пределами основной массы атмосферы, этот телескоп с зеркалом диаметром 2,4 м позволяет изучать объекты, которые в 10—15 раз слабее объектов, доступных такому же наземному телескопу. Телескоп «Хаббл» обеспечивает разрешающую способность 0,1", что недостижимо даже для более крупных наземных телескопов. Под таким углом футбольный мяч виден с расстояния 450 км. Выбор объектов наблюдения и обработка полученных благодаря телескопу «Хаббл» результатов проводится специалистами многих стран. За время его работы на Землю было передано свыше восьмисот тысяч высококачественных фотографий различных космических объектов. В их числе изображения самых далёких галактик, которые образовались более 13 млрд лет назад.

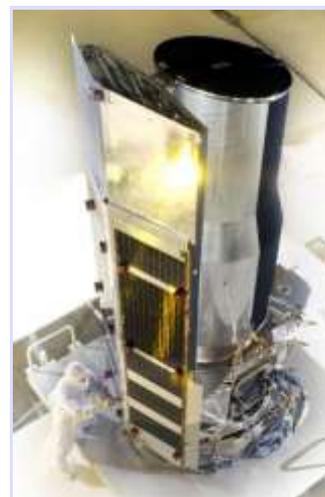
Другое преимущество космических телескопов перед наземными – возможность наблюдения в тех областях спектра, где атмосфера непрозрачна – в УФ с длинами волн меньше 300 нм, в большей части ИК, в рентгеновском и гамма диапазоне.

Наиболее крупные и успешные проекты последних лет:

Spitzer Space Telescope (Космический телескоп им. Спитцера),

Hubble Space Telescope (Космический телескоп им. Хаббла),

Chandra X-ray Observatory (Космическая рентгеновская обсерватория «Чандра»),



*Космический
телескоп им.
Спитцера*

Compton Gamma Ray Observatory (Космическая гамма-обсерватория им. Комптона).

Spitzer Space Telescope запущен 25 августа 2003 на гелиоцентрическую орбиту с периодом в 1 год. Рабочий диапазон – 3–180 мкм (ИК область), диаметр зеркала – 0,85 м. Предназначен для исследования ИК излучения слабосветящегося вещества Вселенной (остывших звёзд, молекулярных облаков и др.).

Hubble Space Telescope (HST) запущен 24 апреля 1990 года. Орбита – геоцентрическая, близкая к круговой, её высота – 559 км, период обращения – 96-97 мин. Этот телескоп регистрирует излучение в ИК, видимой и УФ областях спектра. Диаметр зеркала равен 2,4 м.

За время работы на околоземной орбите «Хаббл» получил более 700 тысяч изображений около 25 тысяч небесных объектов — звёзд, туманностей, галактик, планет.

Наиболее значимые достижения:
«Хаббл» предоставил высококачественные изображения столкновения кометы Шумейкеров – Леви 9 с Юпитером в 1994.

Впервые наблюдались ультрафиолетовые полярные сияния на Сатурне, Юпитере и Ганимеде.

Получены данные (в том числе спектрометрические) о планетах вне Солнечной системы.

Найдено большое количество протопланетных дисков вокруг звёзд в Туманности Ориона. Доказано, что процесс формирования планет происходит у большинства звёзд нашей Галактики.



*Космический телескоп им.
Хаббла*

Частично подтверждена теория о сверхмассивных чёрных дырах в центрах галактик, на основе наблюдений выдвинута гипотеза, связывающая массу чёрных дыр и свойства галактики.

По результатам наблюдений квазаров построена современная космологическая модель, представляющая собой Вселенную, расширяющуюся с ускорением, заполненную тёмной энергией, и уточнён возраст Вселенной — 13,7 млрд лет.

В 1995 «Хаббл» провёл исследования участка неба (Hubble Deep Field), содержащего несколько тысяч тусклых галактик. Сравнение этого участка с другим, расположенным в другой части неба (Hubble Deep Field South), подтвердило гипотезу об изотропности Вселенной.

В 2004 был сфотографирован участок неба (Hubble Ultra Deep Field), что позволило продолжить изучение отдалённых галактик вплоть до эпохи образования первых звёзд. Впервые были получены изображения протогалактик, первых сгустков материи, которые сформировались менее чем через миллиард лет после Большого взрыва.

Космический телескоп Chandra X-ray Observatory запущен 23 июля 1999 года на геоцентрическую орбиту высотой 586 км и периодом – 64,2 часа. Рабочий диапазон – 0,1 – 10 кэВ (рентгеновская область). Диаметр регистрирующего устройства – 1,25 м. Этот космический телескоп предназначен для наблюдения рентгеновского излучения из высокоэнергичных областей Вселенной, например, от остатков взрывов звёзд.



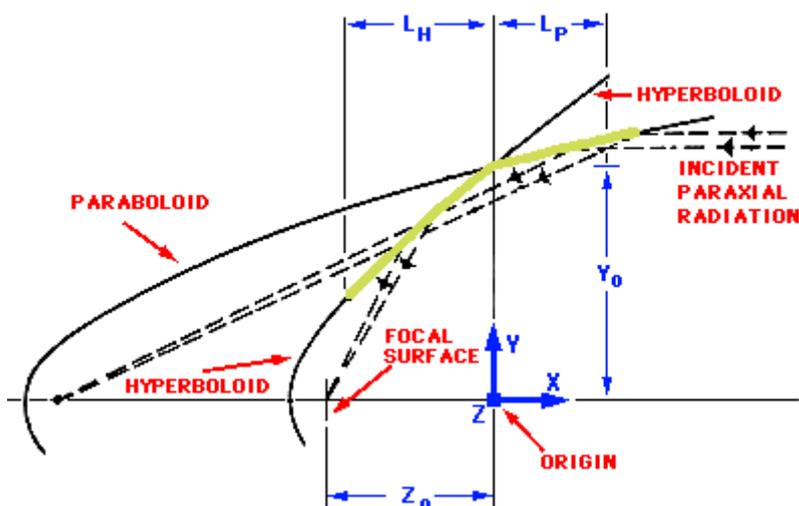
Космическая рентгеновская обсерватория «Чандра»

Космический телескоп Compton Gamma Ray Observatory работал с 5-го апреля 1991 по 4-го июня 2000 года. Орбита – геоцентрическая, высота орбиты – 450 км, период обращения – 90 мин. Рабочий диапазон – 20 кэВ – 30 ГэВ (гамма-диапазон).



Космическая гамма-обсерватория им. Комптона

Телескопы в рентгеновском и гамма-диапазонах

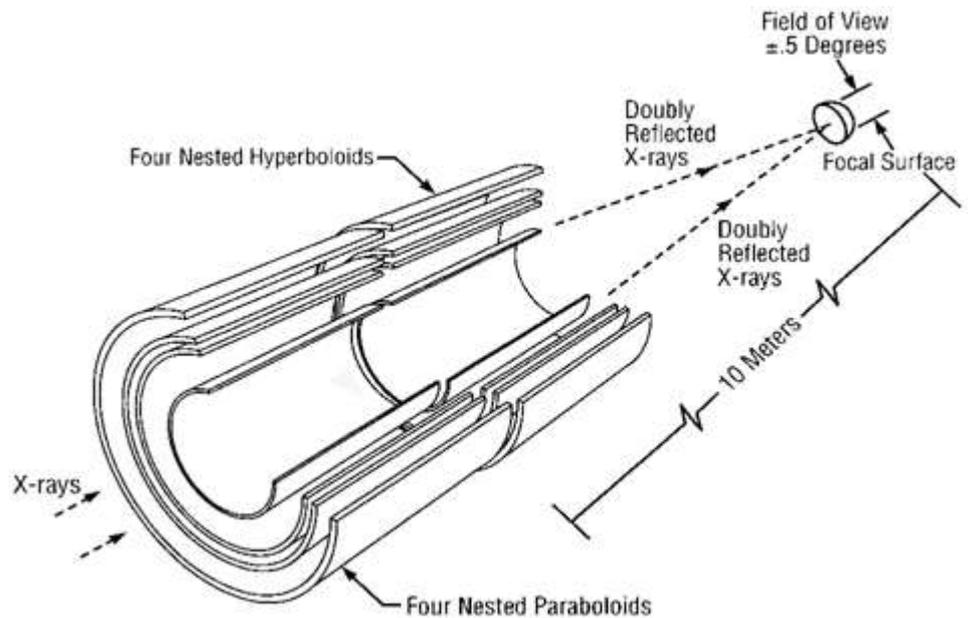


Ход лучей в оптической схеме телескопа Вольтера 1-го типа

В рентгеновском диапазоне схемы работы обычных телескопов оказываются не подходящими, поскольку рентгеновское излучение

проходит, частично рассеиваясь, сквозь зеркала практически без отражения и также практически не преломляется в линзах. Тем не менее, зеркальное отражение можно получить и в рентгеновском диапазоне, если излучение падает под большими («косыми») углами ($\geq 80^\circ$ к нормали). Такой эффект используют в **телескопах косо́го падения** (или телескопах Вольтера). В частности, в космической обсерватории Chandra использовался телескоп

*Схема
рентгеновского
телескопа
космической
обсерватории
Chandra*



именно такого типа.

В качестве приёмников излучения в мягком рентгеновском диапазоне (< 1 кэВ) используются, как правило, полупроводниковые матричные детекторы. В жёстком рентгеновском диапазоне (> 1 кэВ) применяются сцинтилляционные детекторы, состоящие из кристалла, за которым находятся фотоумножители. Когда в кристалл попадает рентгеновский фотон, возникает световая вспышка, которая регистрируется при помощи фотоумножителя.

В качестве приёмников в мягком **гамма-диапазоне** (100 кэВ – 8 МэВ) также используются сцинтилляционные счётчики. Жёсткое гамма-излучение

(50 МэВ – 10 ГэВ) регистрируется трековыми детекторами или на основе эффекта Комптона.

Лекция 11

Законы теплового излучения. Спектральный анализ.

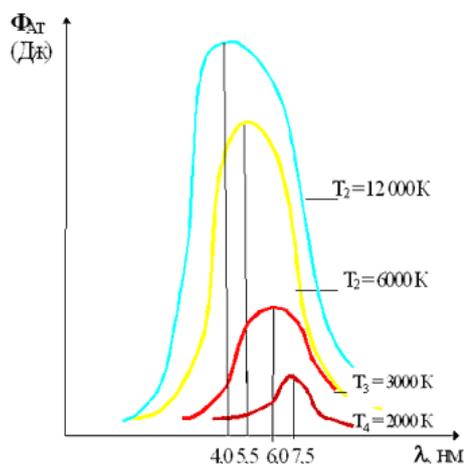
Абсолютно черное тело.

Законы теплового излучения

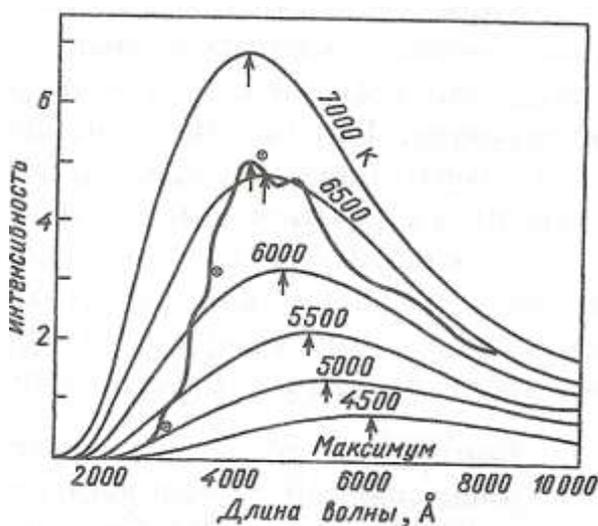
Всякое, даже слабо нагретое тело излучает электромагнитные волны (тепловое излучение). При низких температурах не превышающих 1000 К, существует главным образом инфракрасное излучение и радиоволны. По мере дальнейшего нагревания спектр теплового излучения меняется: во-первых, увеличивается общее количество излучаемой энергии, во-вторых, появляется излучение все более коротких длин волн – видимое (от красного до фиолетового), ультрафиолетовое, рентгеновское и т.д.

При каждом данном значении температуры нагретое тело излучает сильнее всего в некоторой области спектра, определяющей видимый цвет объекта, если эта область попадает на оптический диапазон. Так, например, при температуре 3000 К, как правило, наиболее интенсивно красное излучение, при 6000 К – желто-зеленое, а при более высоких температурах (10000-20000 К) – голубое, синее, фиолетовое.

Однако точное распределение энергии и точный вид спектра в общем случае зависят не только от температуры, но и от химического состава и физического состояния светящегося тела.



В одном особом (идеальном) случае, законы теплового излучения имеют наиболее простой вид. Это случай теплового или термодинамического равновесия. Он возможен, если тело полностью изолировать от окружающей среды идеально теплонепроницаемыми стенками и дождаться пока температура станет одинаковой во всем теле. В этом случае излучение определяется только температурой тела и называется равновесным. Такое тело не может терять своей тепловой энергии, оно полностью поглощает всякое излучение, которое само производит, и называется абсолютно черным телом (АЧТ).

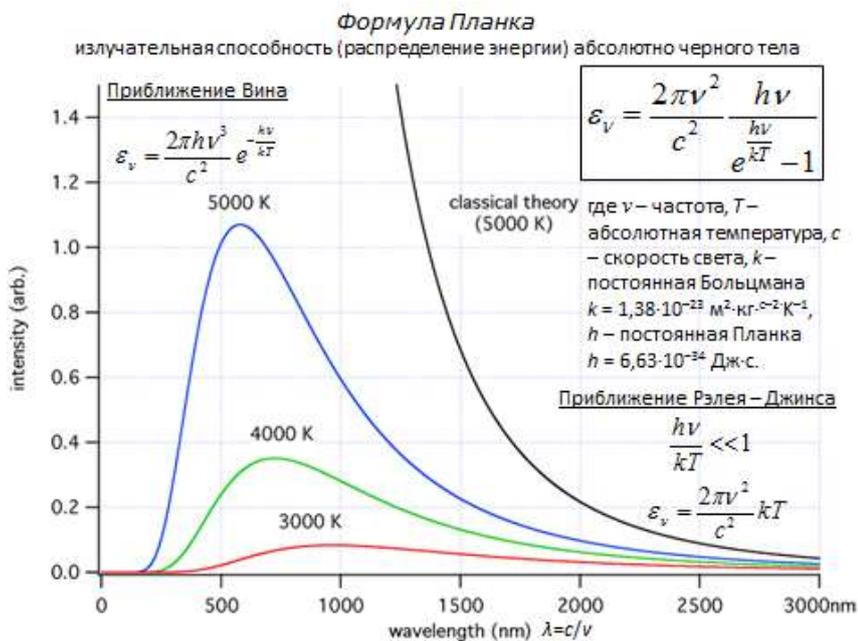


Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела при определенных температурах показано на графике и описывается формулой

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{c_2 e^{1/\lambda T} - 1}$$

Планка: где λ – длина волны, e – основание натурального логарифма, ϵ_{λ} – спектральная плотность потока энергии, c_1 и

c_2 константы.



По обе стороны от максимума Излучательная способность, описываемая формулой Планка, убывает по-разному. В области коротких волн (фиолетовый конец спектра) знаменатель второго сомножителя в формуле Планка велик, и единицей можно пренебречь. Тогда получаем *формулу Вина*

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda k T}},$$

описывающую очень крутое падение излучательной способности у фиолетового конца спектра. На противоположном конце спектра (инфракрасные и радиоволны) падение излучательной способности с длиной волны происходит значительно медленнее, так как при больших λ .

$$e^{-\frac{hc}{\lambda k T}} \approx 1 + \frac{hc}{\lambda k T},$$

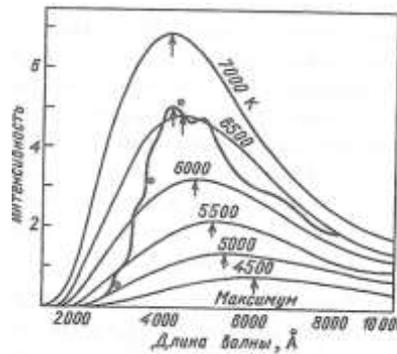
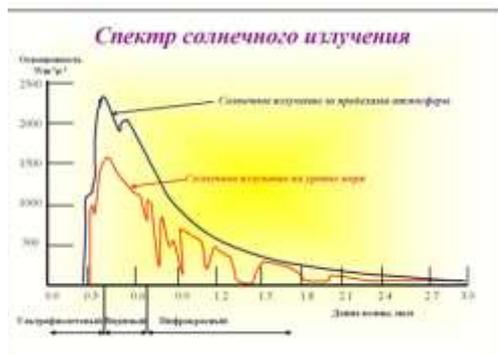
и формула Планка переходит в *формулу Рэля — Джинса*

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{2 \pi c}{\lambda^4} k T.$$

Таким образом, *в длинноволновой части спектра излучательная способность пропорциональна температуре.*

Эта формула используется в радиоастрономии для характеристики космического радиоизлучения. Пропорциональность потока излучения температуре позволяет выразить интенсивность наблюдаемого радиоизлучения через температуру абсолютно черного тела, имеющего такую же лучеиспускательную способность.

Волнистая линия – реальный спектр Солнца. Видно, что спектр излучения Солнца близок к спектру АЧТ.



Законы теплового излучения

Законы Вина и Стефана-Больцмана. Кирхгофа.

На рисунке видно, что планковские кривые для всех температур имеют максимум. Взяв производную от функции Планка и приравняв ее к нулю, мы найдем значение λ_{\max} , при котором для данной температуры излучается максимум энергии. Он приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 0,0029/T$. Это соотношение называют **законом смещения максимума излучения Вина**: *с увеличением температуры максимум излучения абсолютно черного тела смещается в коротковолновую область спектра.*

Так, для Солнца $T = 5\,800\text{ К}$, и максимум приходится на длину волны $\lambda_{\max} \approx 500\text{ нм}$, что соответствует желтому цвету в оптическом диапазоне. Именно поэтому мы видим наше Солнце желтым. Если бы температура поверхности Солнца была равна 5550 К , то мы бы видели наше светило зеленым.

От температуры зависит не только цвет излучения, но и его мощность. *Мощность излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана-Больцмана).* Каждый квадратный метр поверхности тела за одну секунду излучает по всем направлениям на всех длинах волн энергию $\epsilon = \sigma T^4$, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Энергия ϵ численно равна площади, ограниченной кривой Планка и осью абсцисс. Получить выражение закона Стефана-Больцмана можно, проинтегрировав формулу Планка по λ от 0 до ∞ .

Т.О. По ширине спектральных линий можно судить о светимости космических тел.

Эффективная температура – параметр, характеризующий светимость (полную мощность излучения) небесного тела (или другого объекта), то есть это температура абсолютно чёрного тела с размерами, равными размерам небесного тела и излучающего такое же количество энергии в единицу времени.

Светимость сферического абсолютно чёрного тела с радиусом R:

$$L = S\varepsilon = 4\pi R^2 \varepsilon = 4\pi R^2 \sigma T_E^4$$



Закон Кирхгофа

Кирхгоф Густав Роберт (1874 - 1887) – немецкий физик, член Берлинской академии наук

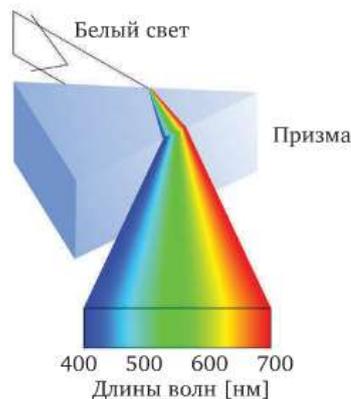
Закон Кирхгофа: отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры.

Чем больше испускательная способность тела, тем больше и его поглощательная способность. Это означает, что тело сильнее поглощающее какие-либо лучи будет эти лучи сильнее и испускать.

Спектроскопия

Анализ изучения (спектроскопия) — наиболее важный астрофизический метод; с его помощью получена основная часть наших знаний о космических объектах.

Спектр — радужная полоска, получаемая, при пропускании узкого пучка белого света через трехгранную призму. В спектре все цвета расположены всегда в определенном порядке. Явление разложения света в спектр было открыто И. Ньютоном и названо дисперсией.



Помним из курса общей физики, что свет распространяется в виде электромагнитных волн. Каждому цвету соответствует определенная длина

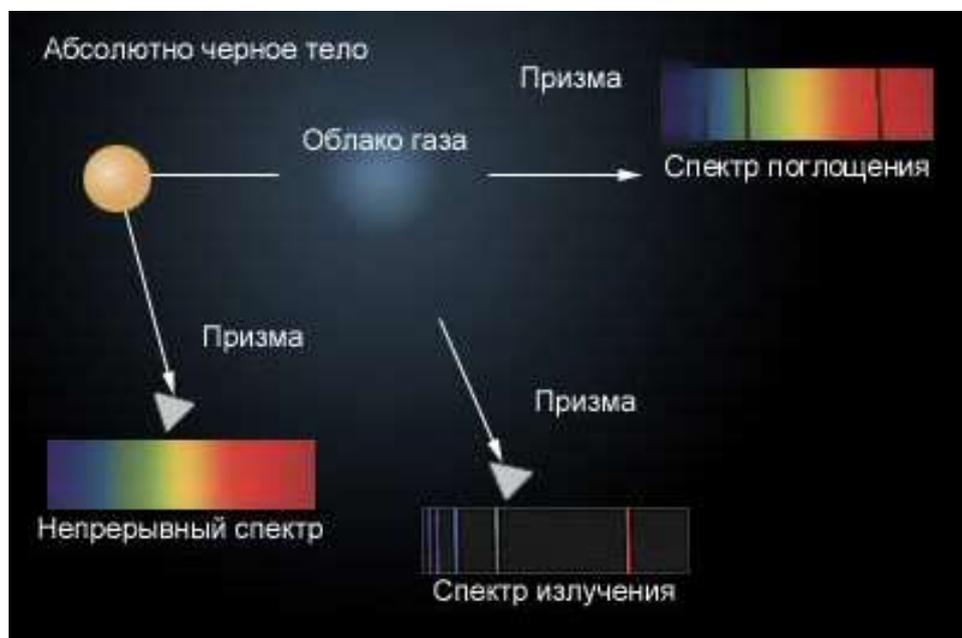
электромагнитной волны. Длина волны света уменьшается от красных лучей к фиолетовым примерно от 0,7 до 0,4 мкм. За пределами границ спектра, которые видны глазом, лежат, с одной стороны, за фиолетовыми лучами ультрафиолетовые лучи, с другой стороны, за красными лучами находится область инфракрасных лучей, а далее рентгеновские лучи. Они воспринимаются приемниками инфракрасного, ультрафиолетового излучения соответственно, например специальными фотопластинками.

Виды спектров.

В настоящее время существует целая наука, которая занимается изучением электромагнитного излучения тел путем разложения его по длинам волн, называется она спектроскопией.

Наблюдаемые спектры делятся на три класса:

- непрерывный спектр. Такой спектр дают твердые тела, жидкости или плотный непрозрачный газ в нагретом состоянии. Длина волны, на которую приходится максимум излучения, зависит от температуры;



- линейчатый спектр излучения. Нагретый разреженный газ испускает электромагнитное излучение определенных длин волн. Мы при этом наблюдаем яркие эмиссионные линии;

- линейчатый спектр поглощения. На фоне непрерывного спектра заметны темные линии поглощения. Эти линии поглощения образуются, когда излучение от более горячего тела, с непрерывным спектром, проходит через холодную разреженную среду, которая поглощает волны определенной длины.

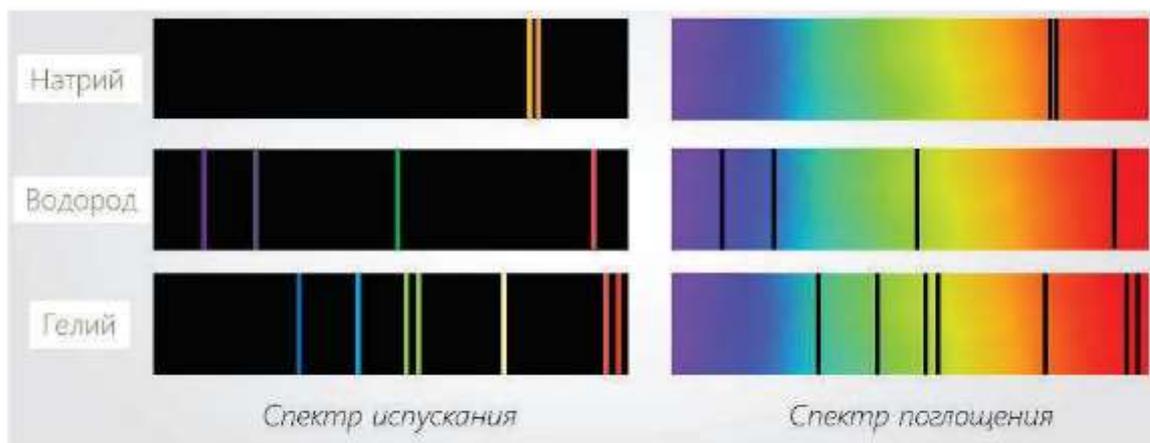


Рис. 5. Примеры линейчатых спектров

- полосатый спектр, как ясно из самого названия, состоит из отдельных полос, которые разделены темными промежутками. Каждая полоса — это совокупность большого числа очень тесно расположенных линий. При этом в отличие от линейчатых полосатые спектры образуются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом

Открытие основ спектрального анализа в середине XIX века произвело подлинную революцию в астрофизике. Спектральный анализ позволил установить основные физические характеристики космических тел: *температуру, скорость движения по лучу зрения, наличие магнитного поля, химический состав и т. д., позволил судить о процессах, протекающих в атмосферах и на поверхности космических тел.*

Первые спектральные наблюдения космических тел производились визуально, при помощи спектроскопа, вмонтированного в окулярный узел телескопа. Затем спектры космических тел стали фотографироваться.



Рис. 2.21. Спектроскоп (слева) и спектрограф (справа)

Спектроскоп



Спектроскоп двухтрубный



Спектроскоп однотрубный

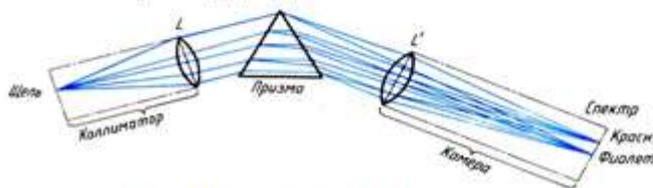
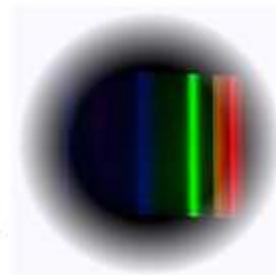


Схема двухтрубного спектрографа



В настоящее время ученые могут изучать спектры космических объектов на всем протяжении шкалы электромагнитных волн: от радио- до γ -диапазона, исследуя не только тепловое излучение тел, испускаемое веществом за счет внутренней энергии движения его молекул и атомов, при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой и их рекомбинации ($10^{-9} < l < 10^{-3}$ м), но и нетепловое излучение ($l < 10^{-9}$ м и $l > 10^{-3}$ м), возникающее при ускоренном движении электронов, атомном распаде и других процессах.

Механизм и особенности излучения определяются из характера непрерывного спектра.

Определение химического состава.

В спектрах большинства астрономических объектов наблюдаются линии водорода, возникающие при переходе возбужденного атома в более стабильное состояние. А возбуждаются атомы водорода за счет поглощения внешнего излучения. Как правило, атом находится в возбужденном состоянии микросекунды, после чего он самопроизвольно переходит в состояние с меньшей энергией, излучая излишек энергии в виде кванта электромагнитного поля. Так как энергетические уровни в атомах дискретны и имеют вполне определенное значение, то при переходе энергия может поглощаться и излучаться только определенными порциями, присущими только данному атому, т.е. поглощаются и излучаются кванты определенной частоты или длины волны. Это как бы индивидуальный штрих код, по которому можно однозначно определить химический элемент.

Но фотон, поглощенный встретившимся на его пути атомом, будет излучен им снова уже не в том направлении, в котором фотон двигался первоначально, а с равной вероятностью во все стороны. В результате наблюдатель заметит в спектре недостаток фотонов тех энергий, которые по пути следования поглощались и переизлучались.

Это выразится в появлении темных линий (недостаток квантов) на тех длинах волн, которые поглощались, а затем излучались вновь атомами водорода.

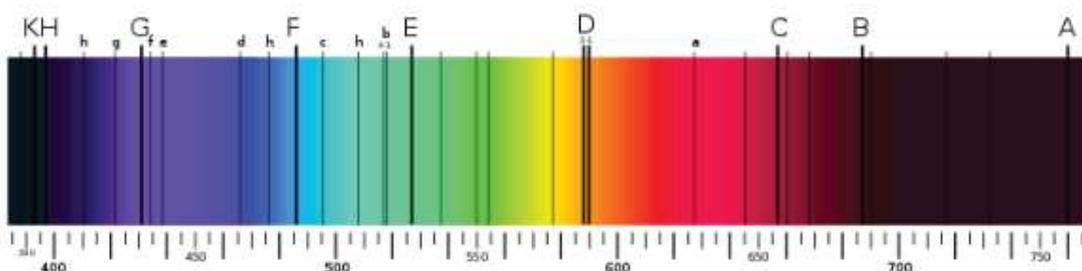
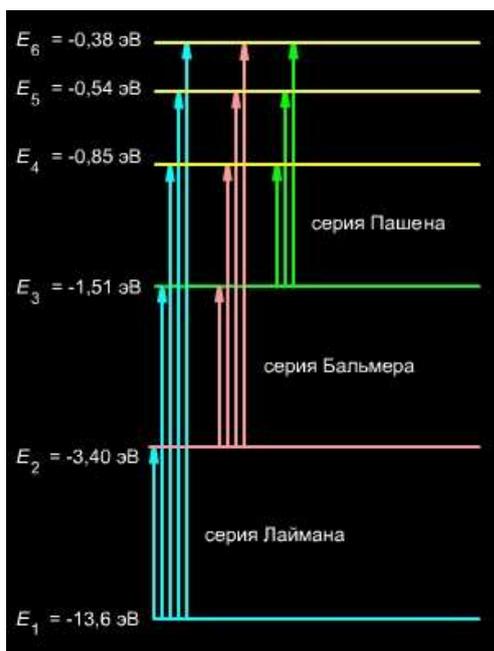


Рис. 6. Спектр поглощения Солнца (шкала дана в нм)

Практически все звезды имеют линии поглощения в своих спектрах. В

1814 году немецкий физик Фраунгофер обнаружил в солнечном спектре темные линии поглощения излучения и верно смог объяснить их появление, как недостаток фотонов, которые были поглощены, а потом излучены обратно атомами водорода. Энергии этих линий соответствуют разности энергий электронов, находящихся на разных уровнях в атомах водорода. С тех пор их называют *линиями Фраунгофера*. Они разбиты на несколько серий, в зависимости от того, на какой энергетический уровень возвращается электрон из возбужденного состояния.



Серия Лаймана, переход на самый низкий - первый уровень, наблюдается в ультрафиолете; В видимой области спектра наблюдаются линии водорода *серии Бальмера*. Это линии красного, голубого, синего и фиолетового цвета. Это переход возбужденного электрона на второй энергетический уровень. Линии водорода наблюдаются и в инфракрасной части спектра – серии Пашена, Брэкетта - это переходы на более высокие энергетические

уровни. Таким образом, возникновение линейчатых спектров связано с постоянным изменением внутренней энергии атомов водорода, то поглощающих, то вновь излучающих энергию в виде квантов электромагнитного поля.

Фотосферы звезд дают непрерывный спектр, пересеченный отдельными темными линиями, которые возникают при прохождении внутреннего горячего излучения через более холодные слои атмосферы звезды.

По спектру поглощения или излучения можно судить о химическом составе как качественном, так и количественном, атмосферы звезды, газового

облака и других объектов. Для этого сравнивают линии в спектре звезды с лабораторными линиями химических элементов.

Интенсивность линий определяет количество атомов или молекул, излучающих или поглощающих энергию: чем заметнее (более четкая) линия данного элемента в спектре излучения или поглощения, тем больше таких атомов (молекул) на пути луча света. Например, Солнце и другие звезды окружены газовыми атмосферами. Сплошной спектр их видимой поверхности перерезают темные линии поглощения, которые появляются при прохождении излучения через атмосферу звезд. Поэтому спектры Солнца и звезд — это спектры поглощения

В 1868 году в спектре Солнца были обнаружены линии неизвестного элемента, названного гелием (греч. helios «Солнце»). Через 27 лет небольшое количество этого газа обнаружилось и в земной атмосфере. Сегодня известно, что гелий – второй по распространенности элемент во Вселенной. Это был триумф спектрального анализа. Но в истории спектрального анализа не обошлось и без курьезов. Изучая спектры газовых туманностей, ученые обратили внимание на линии в зеленой части спектра. Эти линии никогда ранее не встречались в спектрах звезд, и логично было предположить, что они принадлежат новому, еще не известному элементу. Назвали его небулий. Спустя некоторое время в спектре солнечной короны, были обнаружены линии, которые тоже не удалось отождествить ни с одним известным химическим элементом. Новооткрытому элементу дали имя короний. Новая победа спектрального анализа?

Однако эйфория длилась недолго. В 20-х годах XX века право новых элементов на существование пришлось поставить под сомнение. К этому времени менделеевская таблица была почти заполнена, и для небулия и корония в ней просто не оставалось места. Значит это не новые элементы, а уже известные, но скрытые под масками, т.е. в необычных условиях межзвездного газа и солнечной короны они излучали совсем не те линии, что в земных лабораториях. И действительно, в конце концов, выяснилось, что –

небулий это замаскированный кислород, а короний – железо, но многократно ионизированное.

Т.О.

1. По ширине спектральных линий можно судить о светимости космических тел.
2. По спектру космических тел можно определить их химический состав.
3. По яркости (интенсивности) линий и полос судят о количественном (процентном) содержании каждого элемента или соединения.
4. По спектру космических тел можно судить о степени ионизации и состоянии его вещества, давлении и массе газа в туманностях и звездах.
5. По спектру космических тел можно судить о наличии и мощности их магнитных полей, воздействующих на электромагнитные волны; в результате каждая линия в спектре "расщепляется" на 2 или более линии-близнеца (эффект Зеемана-Штарка).

Эффект Зеемана.

В 1896 году нидерландским физиком Зееманом был открыт *эффект расщепления линий спектра излучения в сильном магнитном поле*, связанный с расщеплением энергетических уровней в атомах. Электроны, имеющие разные спины, но находящиеся на одной атомной оболочке, в сильном магнитном будут иметь немного отличающуюся энергию и при переходе с уровня на уровень будут пользоваться квантами различной частоты, что и выражается в том, что линии поглощения в спектре раздваиваются. Расстояние между компонентами расщепленных линий пропорционально напряженности магнитного поля. С помощью этого эффекта теперь стало возможно «измерять» космические магнитные поля.

Похожий эффект (он называется *эффектом Штарка*) наблюдается в электрическом поле. Он проявляется, когда в звезде кратковременно возникает сильное электрическое поле.

6. По спектру космических объектов, наблюдаемых как единое целое даже в мощнейшие телескопы, можно установить, какие из них на самом деле являются системами космических тел и какие тела с какими характеристиками входят в эти системы: спектры их просто "накладываются" один на другой.

7. По спектру космических тел можно определить характеристики их движения: наличие и скорость вращения, направление и скорость перемещения в пространстве относительно наблюдателя, а в ряде случаев и расстояние до них. (Эффект Доплера)

Собственные движения звезд и эффект Доплера.

Кроме видимого движения, связанного с движением Земли вокруг Солнца, звезды имеют и реальное движение в пространстве, которое называется *собственное движение* – это угол (μ), на который смещается звезда по небесной сфере в течение года. Самая быстрая звезда – Летящая Барнарда в Змееносце – смещается на видимый диаметр Луны за 180 лет. Ее собственное движение равно $10,5''$ в год, для большинства звезд $\mu < 0,02''$. Скорость, с которой звезда движется в пространстве относительно Солнца, называется пространственной скоростью. Вектор пространственной скорости можно представить как сумму двух векторов, один из которых перпендикулярен лучу зрения (тангенциальная скорость), а другой направлен по лучу зрения (лучевая скорость). Тогда модуль пространственной скорости легко найти по теореме Пифагора.

Найти тангенциальную скорость достаточно просто, зная параллакс звезды и собственное движение, окончательно $v_{\tau} = 4,74\mu/\pi$. Сложнее, казалось, обстоит дело с лучевой скоростью, но здесь на помощь астрономии опять пришла спектроскопия.

В 1842 году австрийский физик и астроном Христиан Доплер установил, что длина волны λ , принятая наблюдателем, связана с длиной

волны источника излучения соотношением: $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{V}{c}\right)$ где V – проекция скорости источника на луч зрения. λ_0 и λ – длины волн испущенные источником и принятые приемником, соответственно. Открытый им закон получил название **закона Доплера**: $\Delta\lambda/\lambda = \Delta v/v = V/c$, где $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, $\Delta v = v - v_0$, c – скорость света, v и v_0 – частоты, испущенных и принятых волн. То есть при движении источника или приемника излучения происходит изменение длины волны.

Аналогично происходит сдвиг линий и в спектрах звезд, если эти звезды имеют ненулевую проекцию лучевой скорости. **Смещение линий в спектре звезды относительно спектра сравнения в красную сторону говорит о том, что звезда удаляется от нас, смещение в фиолетовую сторону спектра – что звезда приближается к нам.** Термин «красное смещение», говорящий о расширении нашей вселенной, связан именно с эффектом Доплера. А именно, линии в спектрах излучения далеких от нас галактик смещены в сторону красного света, и чем дальше объект, тем больше они смещены. Это говорит о том, что чем дальше от нас объект, тем с большей скоростью он от нас удаляется. Измерив с помощью микроскопа смещение линий $\Delta\lambda$ по сравнению с эталонным (лабораторным) расположением, можно определить скорость движения наблюдаемого объекта: $V = \Delta\lambda \cdot c / \lambda$.

Эффект Доплера позволяет судить не только о движении излучающего тела, но и о его вращении. Например, вследствие вращения Солнца западный край Солнца удаляется от нас, а восточный край – приближается к нам. Поэтому наибольшая линейная скорость вращения Солнца, которая наблюдается на экваторе, равная 2 км/с, дает доплеровское смещение линии $\lambda = 500$ нм (5000 \AA) в $\Delta\lambda = 0,035 \text{ \AA}$. При этом на полюсах Солнца доплеровское смещение линий уменьшается до нуля.

У звезд не удастся наблюдать излучение отдельных частей их поверхностей, но астрофизики и здесь нашли выход. Наблюдаемый спектр

звезды получается в результате наложения друг на друга спектров всех точек ее диска, каждая из которых у вращающейся звезды дает различное смещение линий в спектре. В результате наблюдается уширение спектральных линий, по величине этого уширения можно судить о линейной скорости вращения, которая у некоторых звезд достигает огромных значений до сотен километров в секунду.

Если линии в спектре периодически смещаются то в одну, то в другую сторону, значит, это означает, что звезда имеет компаньона, и они оба обращаются вокруг общего центра масс. В этом случае эффект Доплера позволяет вычислить период обращения, а в конечном итоге массу звезды и ее компаньона.

С помощью эффекта Доплера можно определять даже температуру. Предположим, что имеется облако излучающего газа, которое не движется. Спектральные линии, излучаемые отдельными атомами, все равно имеют доплеровские смещения из-за беспорядочного теплового движения. Поскольку в каждый момент времени множество атомов движется к нам со всевозможными скоростями и примерно столько же удаляется от нас, то происходит, как говорилось выше, уширение спектральной линии. Атомы, излучающие спектральную линию, смещенную на величину $\Delta\lambda$, двигаются согласно закона Доплера со скоростью $V = \Delta\lambda \cdot c / \lambda$. Больше всего излучающих атомов движется с наиболее вероятной для данной температуры газа скоростью $V^* = \sqrt{2kT/m}$, k – постоянная Больцмана. Значит, наиболее темная полоска в уширенной спектральной линии будет лежать от центра линии на расстоянии $\Delta\lambda$, определяемом из условия, что $V = V^*$ - лучевая скорость источника излучения равна наиболее вероятной скорости движения молекул

$$T = \frac{mc^2}{2k} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2$$

газа. Приравнивая скорости, находим температуру газа:

Контрольные вопросы к лекции:

1. Сформулируйте закон Вина?
2. Сформулируйте закон Стефана Больцмана?
3. Что такое абсолютно черное тело?
4. Что такое спектроскопия?
5. Что такое собственное движение звезды?
6. Что такое лучевая скорость звезды?
7. Что такое дисперсия?
8. Какие виды спектров вы знаете?
9. Что такое линии Фраунгофера?
10. В чем заключается суть эффекта Доплера?
11. В чем заключается эффект Зеемана?

Лекция 12

Звезды: основные физико-химические характеристики и их взаимная связь. Разнообразие звездных характеристик и их закономерности.

Состав и строение Солнца. Атмосфера Солнца. Солнечная активность и ее влияние на Землю.

Солнце – центральное тело Солнечной системы – является типичным представителем звезд, наиболее распространенных во Вселенной тел.

Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг. Возраст - 4,7 млрд. лет; масса - 330 000 масс Земли; радиус - 109 радиусов Земли; расстояние до Земли - 149600000 км; расстояние до центра Галактики - 28 000 световых лет; скорость в Галактике - 220 км/с.

Солнце - типичный представитель звёзд, представляющий собой огромный раскалённый плазменный шар. Температура его поверхности – 6000°C , в недрах она достигает $13\,500\,000\text{ K}$.

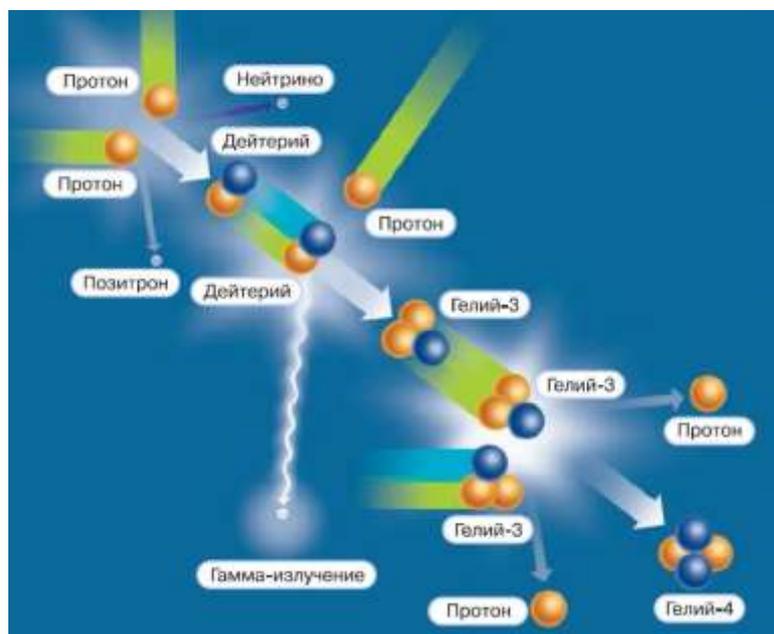
Химический состав Солнца:

- водород составляет около 70% солнечной массы,
- гелий – более 28%,
- остальные элементы – менее 2%.

Средняя плотность солнечного вещества примерно 1400 кг/м^3 .

Под действием гравитации Солнце, как и любая другая звезда, стремится к сжатию, но этому препятствуют силы, возникающие из-за сверхвысоких давлений и температур в центральной области. В этих условиях ядра атомов водорода – протоны – движутся с огромными скоростями – сотни км/сек, а так как плотность вещества в центре Солнца достигает 150 г/см^3 , то между ними нередко столкновения, которые становятся началом ядерных реакций. Течение ядерных реакций, или протон-протонного цикла (см. рис.), выражается в превращении водорода в гелий. Реакция начинается с крайне редкого явления β -распада одного из двух протонов в момент особой близости их. При β -распаде протон превращается в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино. Объединяясь со вторым

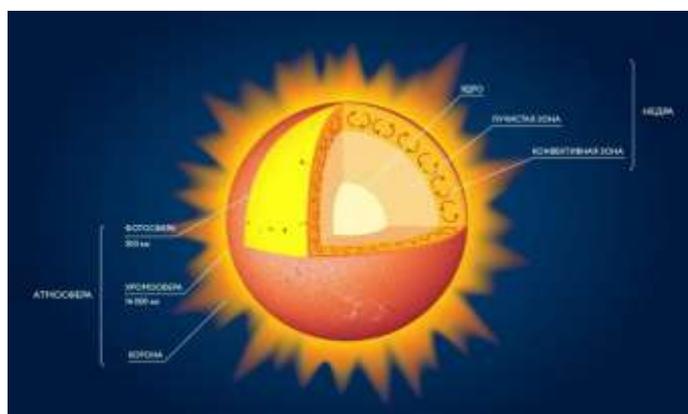
протоном, нейтрон дает ядро тяжелого водорода (дейтерия), который при столкновении с третьим протоном образует ядро неустойчивого изотопа He^3 . Два ядра такого гелия, объединяясь, образуют He^4 и испускают 2 протона.



Важнейшим моментом протон-протонного цикла является то, что масса ядра гелия почти на 1% меньше суммы масс четырех протонов, то есть масс ядер водорода. Эта кажущаяся потеря называется дефектом массы и является причиной выделения огромного количества энергии при ядерных реакциях. Эта энергия выделяется в виде γ -квантов.

Ядерные реакции могут происходить только в самых глубинных частях Солнца, так как к поверхности температура и давление понижаются. Верхние слои только передают энергию, выделившуюся в виде γ -квантов.

Внутреннее строение Солнца:



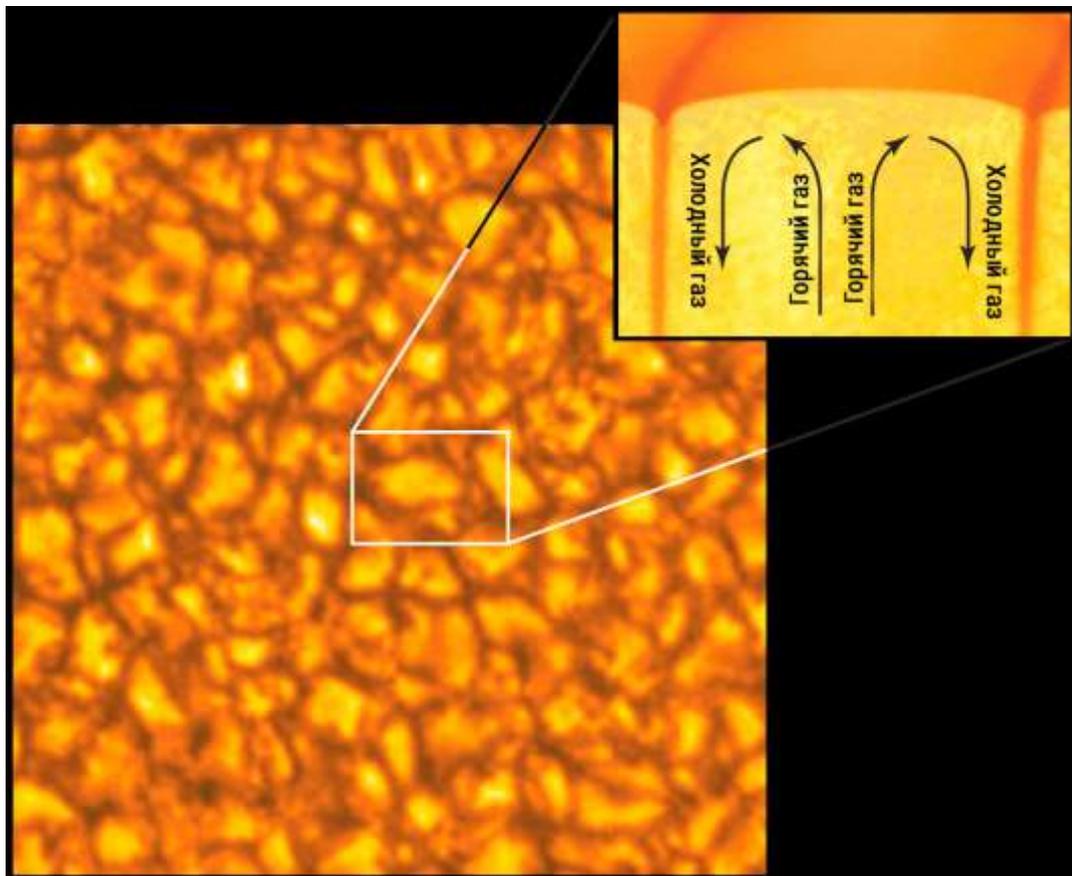
- ядро – центральная зона, где при высоком давлении и температуре происходят термоядерные реакции;
- «лучистая» зона, где энергия передается наружу от слоя к слою в результате последовательного поглощения и излучения квантов;
- наружная конвективная зона, где энергия от слоя к слою переносится самим веществом в результате перемешивания (конвекции).
- атмосфера.

Каждая из этих зон занимает примерно 1/3 солнечного радиуса.

Атмосфера Солнца.

1. Фотосфера - видимый слой солнечной атмосферы, толщиной ~ 300 км. Фотосфера состоит из отдельных зерен – гранул, размеры которых составляют в среднем несколько сотен (до 1000) километров. Гранула – это поток горячего газа, поднимающийся вверх.

В фотосфере происходит процесс постоянного возникновения и исчезновения гранул, который называется **грануляцией**.



Процесс грануляции представляется как наличие в самом нижнем слое фотосферы непрозрачного газа конвективной области – сложной системы вертикальных круговоротов. Светлая ячея – это поступающая из глубины порция более разогретого газа по сравнению с уже охлажденной на поверхности, а потому и менее яркой, компенсационно погружающейся вниз. Яркость гранул на 10–20% больше окружающего фона указывает на различие их температур в 200–300°С.

2. Хромосфера - внешняя оболочка Солнца и других звёзд толщиной около 10 000 км, окружающая фотосферу. Температура вещества в хромосфере увеличивается с высотой от 4000 К до 20 000 К. Наблюдать хромосферу можно во время полных солнечных затмений как красноватое кольцо вокруг Солнца. В ней происходят бурные движения газа – гигантские водородные фонтаны - протуберанцы.



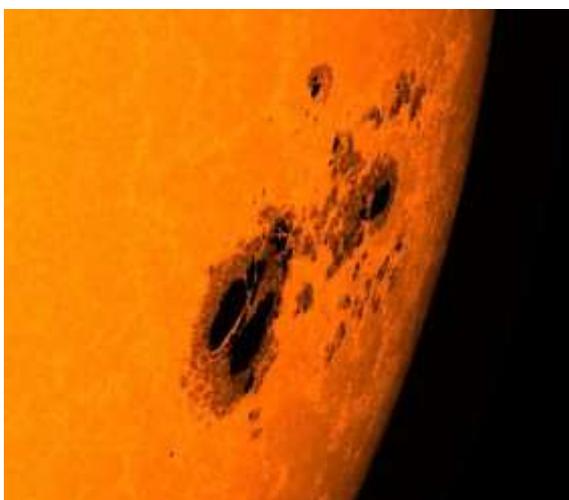
3. Внешние и самые разреженные слои солнечной атмосферы образуют солнечную корону. Это самая горячая часть солнечной атмосферы.



Периодически возникающие изменения магнитных полей порождают активные процессы в атмосфере Солнца, которые являются причиной возникновения в её слоях пятен, факелов, вспышек, число которых периодически меняется. **Солнечные пятна** - тёмные области холодного газа (их температура понижена примерно на 2000-2500 К по сравнению с окружающими участками фотосферы). **Солнечными факелами** называют яркие поля, окружающие солнечные пятна. Их температура на несколько сотен градусов выше температуры фотосферы. Взрывной процесс выделения энергии (кинетической, световой и тепловой) в атмосфере Солнца называется **солнечной вспышкой**.

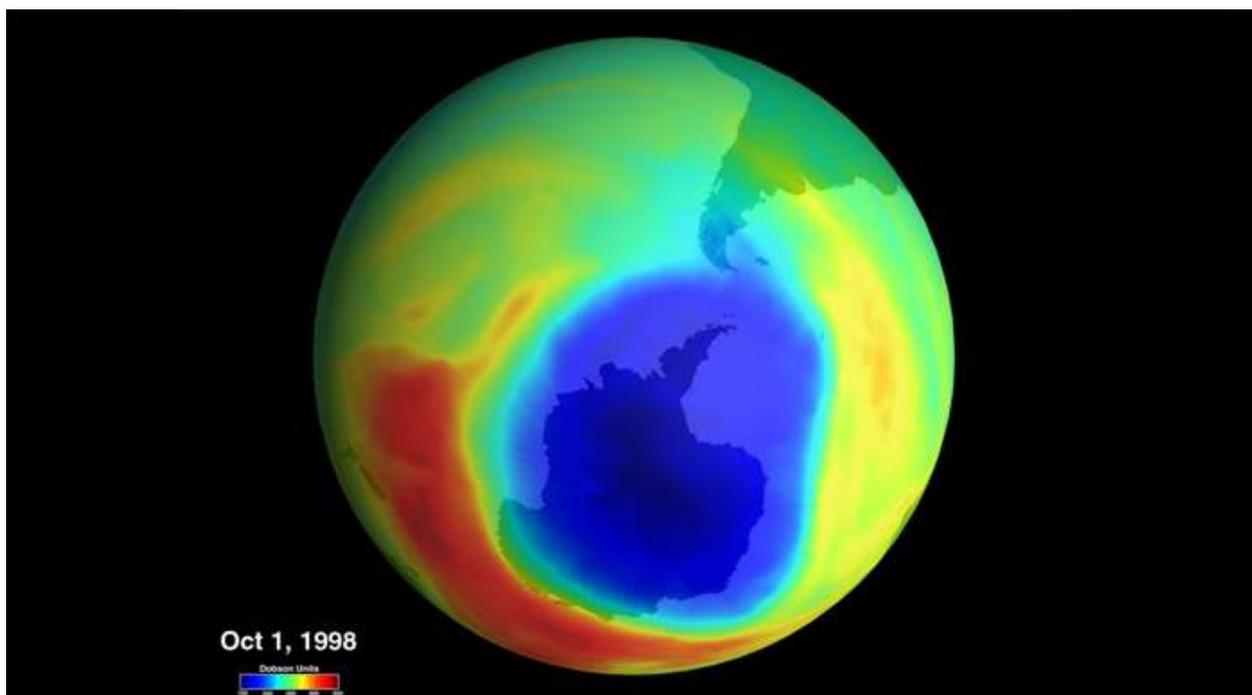


Периодические изменения солнечной активности называют **солнечной цикличностью**. Наиболее заметно выраженный цикл солнечной активности с длительностью около 11 лет. В первые четыре года цикла происходит активное увеличение количества солнечных пятен.



Также учащаются вспышки, число волокон и протуберанцев. В следующий период (около семи лет) количество пятен и активность уменьшаются. 11-летние циклы условно нумеруются, начиная с 1755 года. 24-й цикл солнечной активности начался в январе 2008 года. Его максимум приходится на 2014 г.

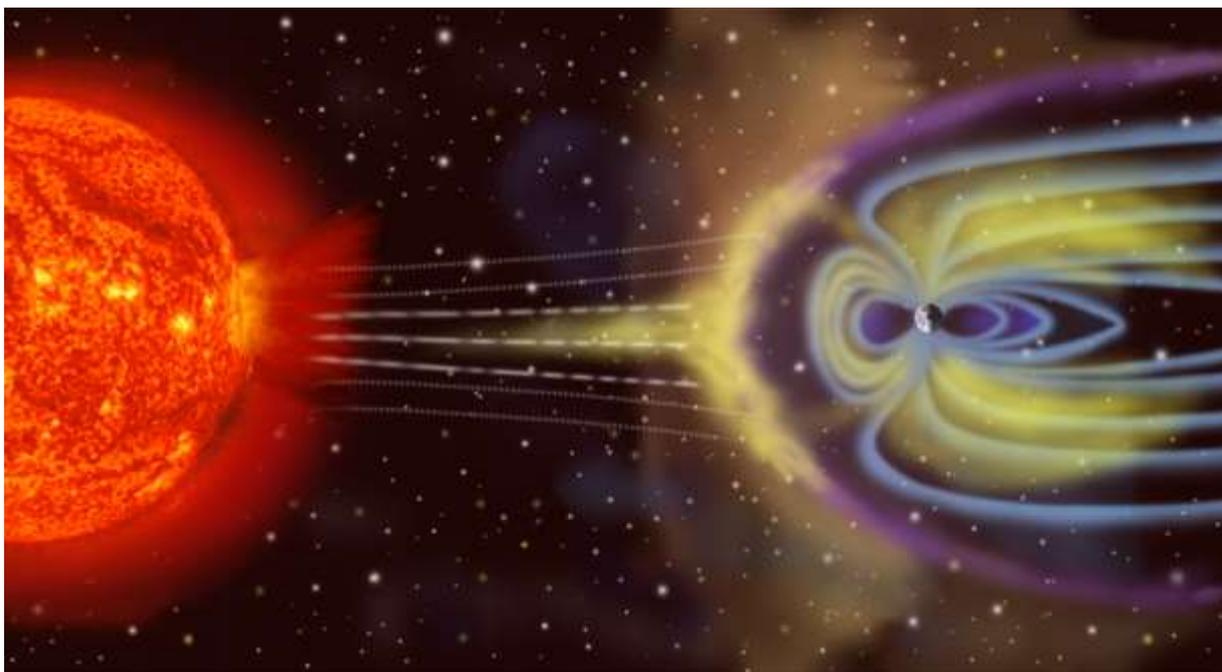
Солнечная активность оказывает сильное влияние в первую очередь на внешние оболочки Земли - магнитосферу и ионосферу. Во время мощных солнечных вспышек частицы могут разгоняться до 100 000 км/с, т. е. возникают космические лучи солнечного происхождения. Под воздействием солнечных космических лучей образуется окись азота NO, которая, взаимодействуя с озоном, активно его разрушает. После мощных вспышек на Солнце наблюдается понижение содержания озона в стратосфере над полярными шапками Земли.



Когда толщина озонового слоя уменьшается (см. на рис. фото озоновой дыры над Антарктидой), солнечное ультрафиолетовое излучение может возрасти в 1,5–2 раза. Тогда это излучение становится очень активным и может вызывать заболевание раком кожи.

Столкновение плазменного облака с магнитосферой Земли является причиной её сильного возмущения. Воздействие коронального выброса

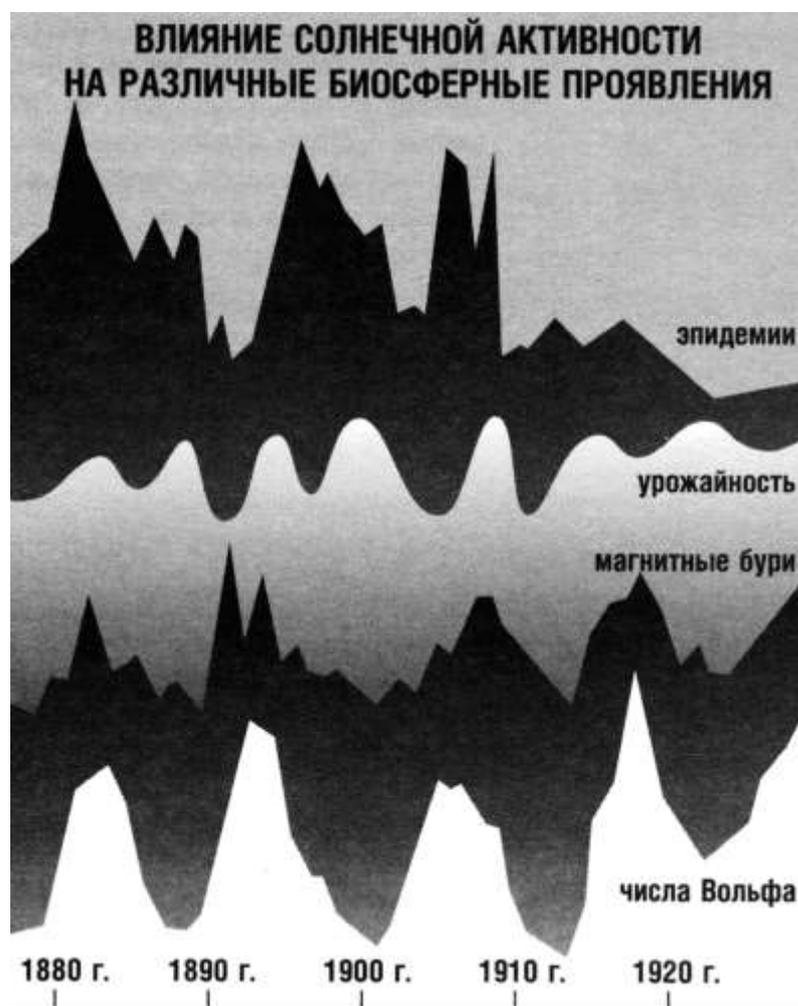
приводит к возникновению сильных магнитных бурь, к разогреву и ускорению плазмы внутри магнитосферы. При этом быстрые протоны и электроны, сталкиваясь с молекулами воздуха на высоте 100—200 км, ионизируют их и заставляют светиться. В результате этого на Земле, преимущественно в околополярных широтах, наблюдаются полярные сияния.



Во время магнитной бури изменяются электрические поля над поверхностью Земли. Это приводит, во-первых, к возникновению перегрузок в линиях электропередачи (до нескольких сотен ампер) и их отключению; во-вторых, к наведению сильных токов в трубах газо- и нефтепроводов и к выходу из строя их систем управления. Последствия магнитной бури сказываются на бортовых электронных системах космических аппаратов.

Магнитные бури приводят к изменению давления в тропосфере (нижнем слое атмосферы Земли), в результате чего развиваются циклоны. На тот факт, что Солнце влияет на биологические объекты, в том числе и на здоровье человека, впервые ещё в 1915 г. обратил внимание Александр Леонидович Чижевский. Проанализировав исторические документы, учёный пришёл к выводу, что в прошлом массовые стихийные бедствия и вспышки

эпидемий приходились преимущественно на годы максимумов солнечной активности.



На основании выведенной связи А. Л. Чижевский попытался предсказать некоторые эпидемии на 35 лет вперёд. Его прогнозы сбылись в семи случаях из восьми. А. Л. Чижевский является одним из основателей гелиобиологии. Эта наука изучает влияние циклической активности Солнца на биологические объекты и здоровье человека.

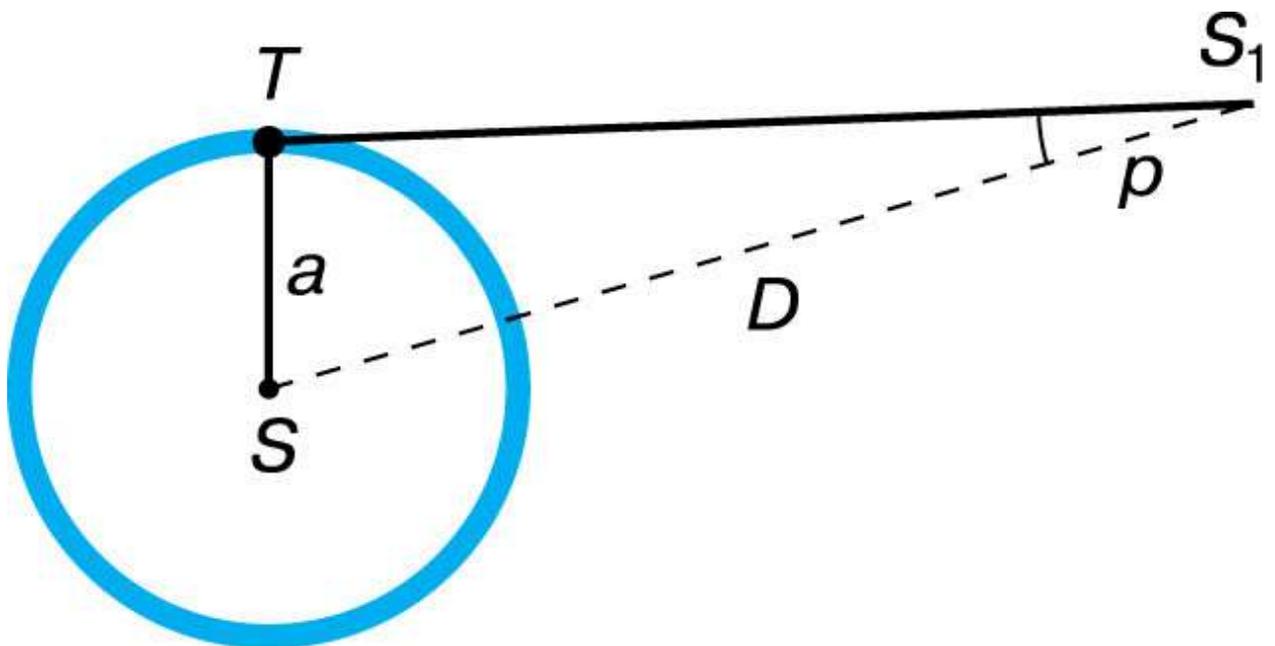
Годичный параллакс и расстояния до звезд. Светимость, спектр, цвет и температура различных классов звезд. Диаграмма «спектр-светимость». Массы и размеры звезд.

Расстояния до звёзд принято определять, используя явление параллактического смещения. **Параллактическим смещением** называется

изменение направления на предмет при перемещении наблюдателя. **Параллактическое смещение звезды** - это изменение координат звезды, вызванное изменением положения наблюдателя из-за обращения Земли вокруг Солнца. **Годичный параллакс звезды** - угол, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты, перпендикулярная направлению на



звезду.



$$D = \frac{a}{\sin p}, \text{ где } a \text{ – большая полуось земной орбиты.}$$

Для определения расстояний до ближайших звёзд используется параллакс, возникающий при годовом движении Земли вокруг Солнца. Для этого измеряется смещение изображения звезды относительно фона удалённых звёзд. Для измерения расстояний до звезд введена специальная единица длины, названная парсеком. **Парсек** — это такое расстояние, на котором параллакс звёзд равен 1". (**Парсек** (пк) - расстояние, с которого средний радиус земной орбиты, перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в 1").

$$1 \text{ пк} = 206265 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км.}$$

Расстояние до ближайшей звезды (α Центавра), параллакс которой $p = 0,75''$, составляет 270000 а.е.

Расстояния до звезд выражаются также в световых годах (св. г.).

Световой год - расстояние, которое свет, распространяясь в вакууме со скоростью 300 000 км/с, проходит за один год.

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

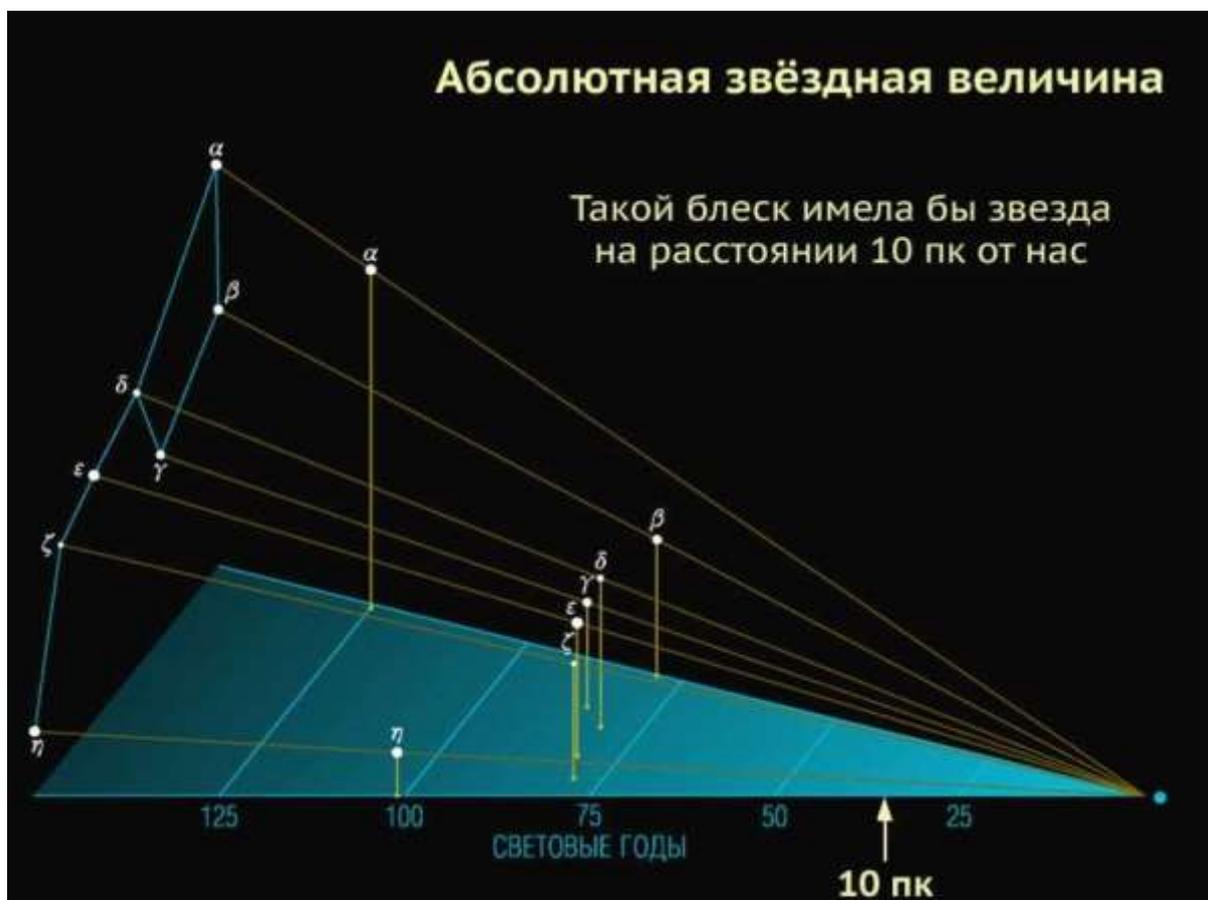


Звёзды, находящиеся на одинаковом расстоянии, могут отличаться по видимой яркости (т.е. по блеску). Значит, они имеют различную светимость.

Светимость - полная энергия, излучаемая звездой за единицу времени. В астрономии принято сравнивать звёзды по светимости, рассчитывая их

блеск (звёздную величину) для одного и того же стандартного расстояния - 10пк.

Видимая звёздная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк, получила название **абсолютной звёздной величины M**.



Размеры звезд

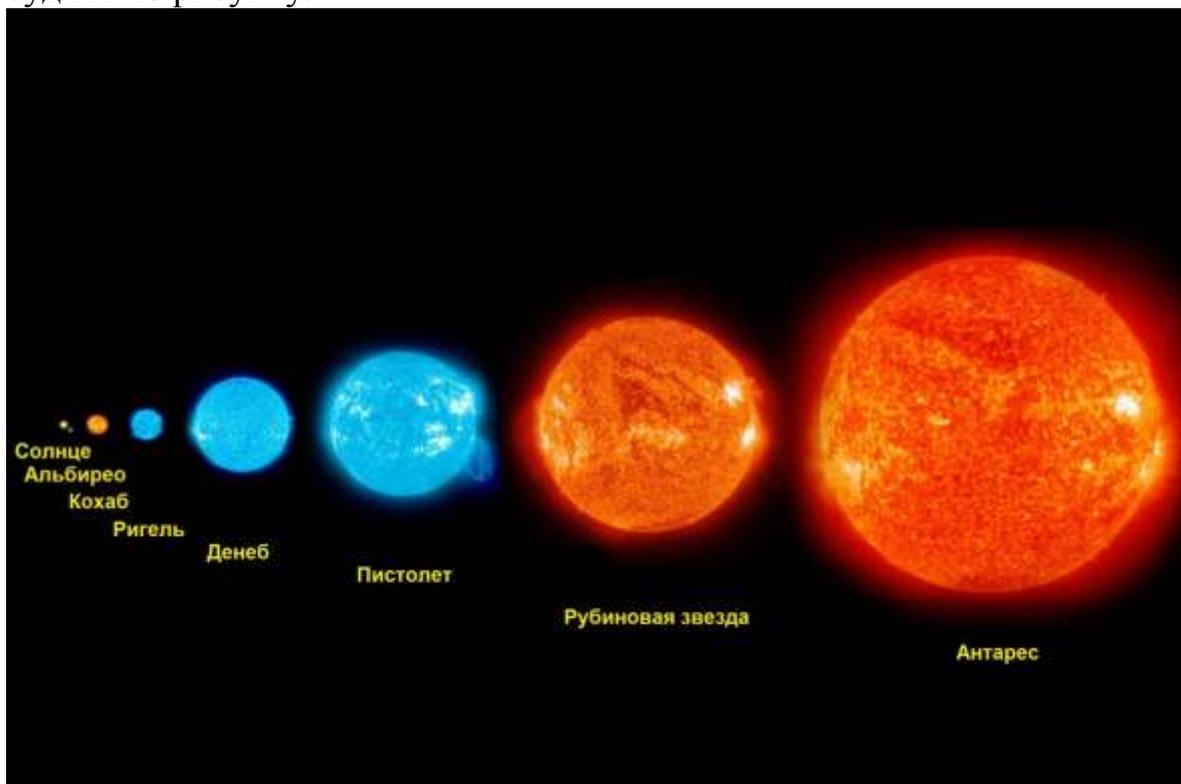
В основном астрономы определяют радиусы звезд другими методами. Один из них дает зависимость светимости L от площади поверхности (фотосферы) звезды (или от радиуса R) и температуры фотосферы (T)

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

Если известна светимость L и температура T звезды, то, используя последнюю формулу, можно вычислить радиус звезды R .

Определив радиусы многих звезд, астрономы убедились в том, что существуют звезды, размеры которых резко отличаются от размеров Солнца. Наибольшие размеры у сверхгигантов. Их радиусы в сотни раз превосходят радиус Солнца. Например, радиус звезды α Скорпиона (Антарес) не менее чем в 750 раз превосходит солнечный. Звезды, радиусы которых в десятки раз превосходят радиус Солнца, называются гигантами. Звезды, по размерам близкие к Солнцу или меньшие, чем Солнце, относятся к карликам. Среди

карликов есть звезды, которые меньше Земли или даже Луны. Открыты звезды и еще меньших размеров. О соотношении размеров звезд можно судить по рисунку.



Масса звезд

Еще одна важная характеристика звезды – ее масса. Массы звезд различны, но, в отличие от светимостей и размеров, различны в сравнительно узких пределах: самые массивные звезды обычно лишь в десятки раз превосходят Солнце, а наименьшие массы звезд порядка 0,06 массы Солнца.

Прямое определение массы возможно лишь для двойных звезд. Составляя уравнения на основе закона Всемирного тяготения и законов Кеплера, можно по наблюдаемым кинематическим характеристикам звезд вычислить их массы.

Массы одиночных звезд можно определить по их светимости: было обнаружено, что светимость звезды увеличивается пропорционально кубу ее массы.

Спектральная классификация

Спектры звезд – это их паспорта с описанием всех их физических свойств (см. рис.). По спектру звезды можно узнать ее светимость (а значит, и расстояние до нее), ее температуру, размер, химический состав ее

атмосферы, как качественный, так и количественный, скорость ее движения в пространстве, скорость ее вращения вокруг оси и даже то, нет ли вблизи нее другой, невидимой звезды, вместе с которой она обращается вокруг их общего центра тяжести.

Звёзды имеют различный цвет. Цвет звезды определяется температурой её поверхности. Чем выше температура звезды, тем более голубоватым выглядит её свечение. С увеличением температуры максимум излучения абсолютно чёрного тела смещается в коротковолновую область спектра.

С учётом видов спектральных линий и их интенсивности строится **спектральная классификация звёзд.**

Спектральная классификация - классификация звёзд по спектру излучения, с учётом видов спектральных линий и их интенсивности.

Класс О - очень горячие звёзды с температурой 30 000 - 60 000 К. Наибольшая интенсивность излучения приходится на ультрафиолетовую область спектра.

Класс В - голубовато-белые звёзды с температурой 10 000-30 000 К

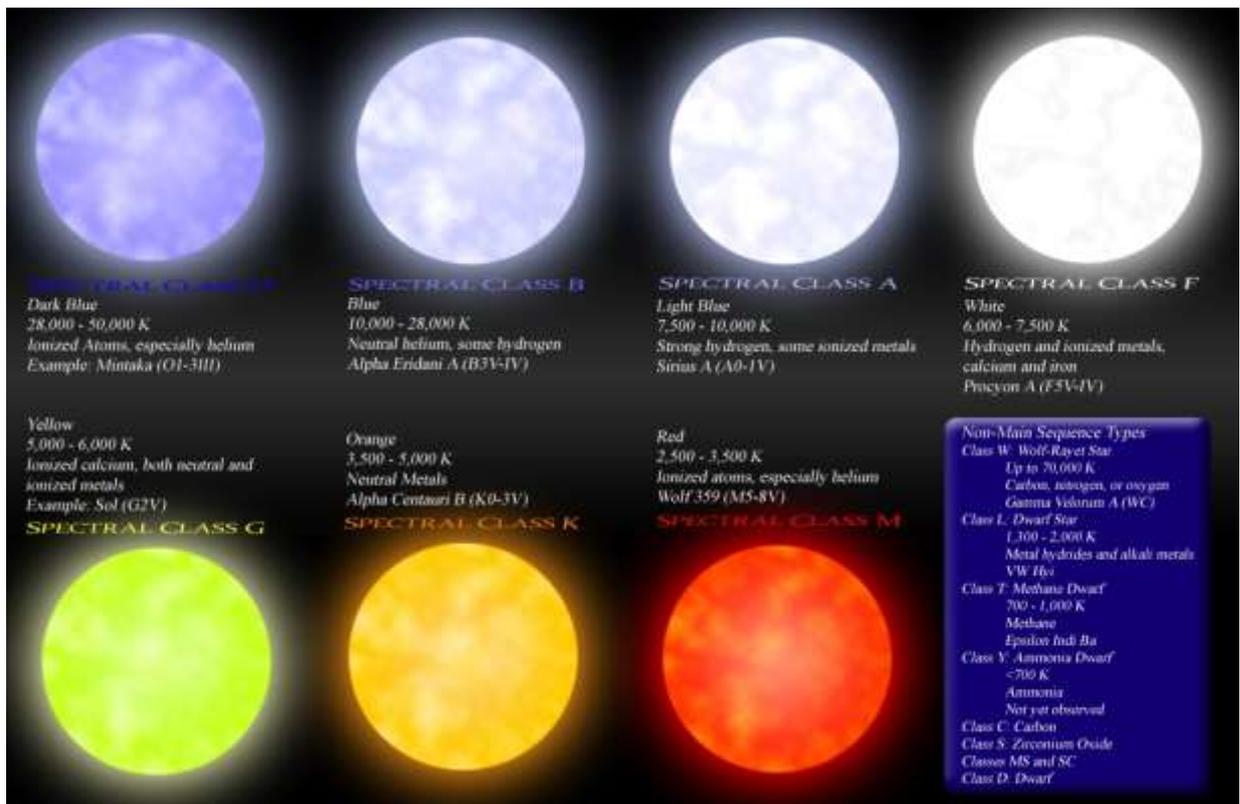
Класс А - звёзды белого цвета с температурой 7500-10 000 К.

Класс F - бело-жёлтые звёзды с температурой 6000-7500 К.

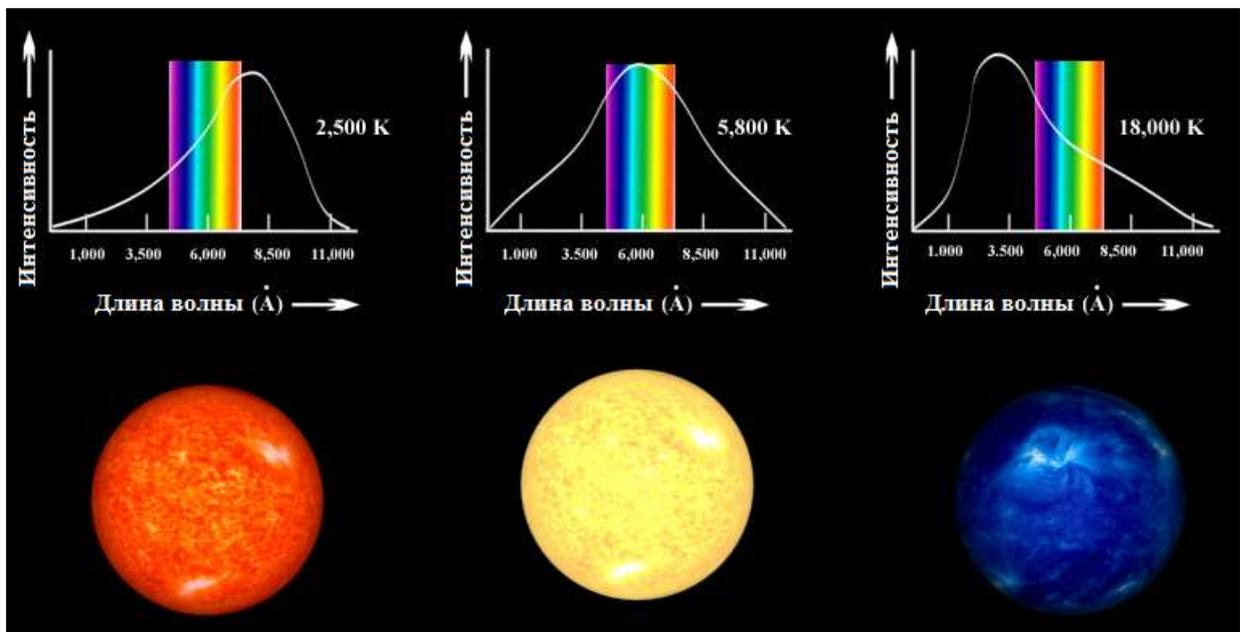
Класс G - жёлтые звёзды с температурой 5000-6000 К.

Класс К - оранжевые звёзды с температурой 3500-5000 К.

Класс М - ярко-красные (иногда тёмно- оранжевые) звёзды с температурой 2000-3500 К.



Подавляющее большинство звезд относится к последовательности от О до М.



Класс Q - звёзды, светимость которых внезапно увеличивается в $\sim 10^3$ - 10^6 раз.

Класс W (WR) - (Ш. Вольф и Ж. Райе) класс звёзд, для которых характерны очень высокая температура ($\sim 10^5$ K) и светимость.

Коричневые карлики (L, T, Y) - субзвёздные объекты, температура которых не превышает 2000 K.

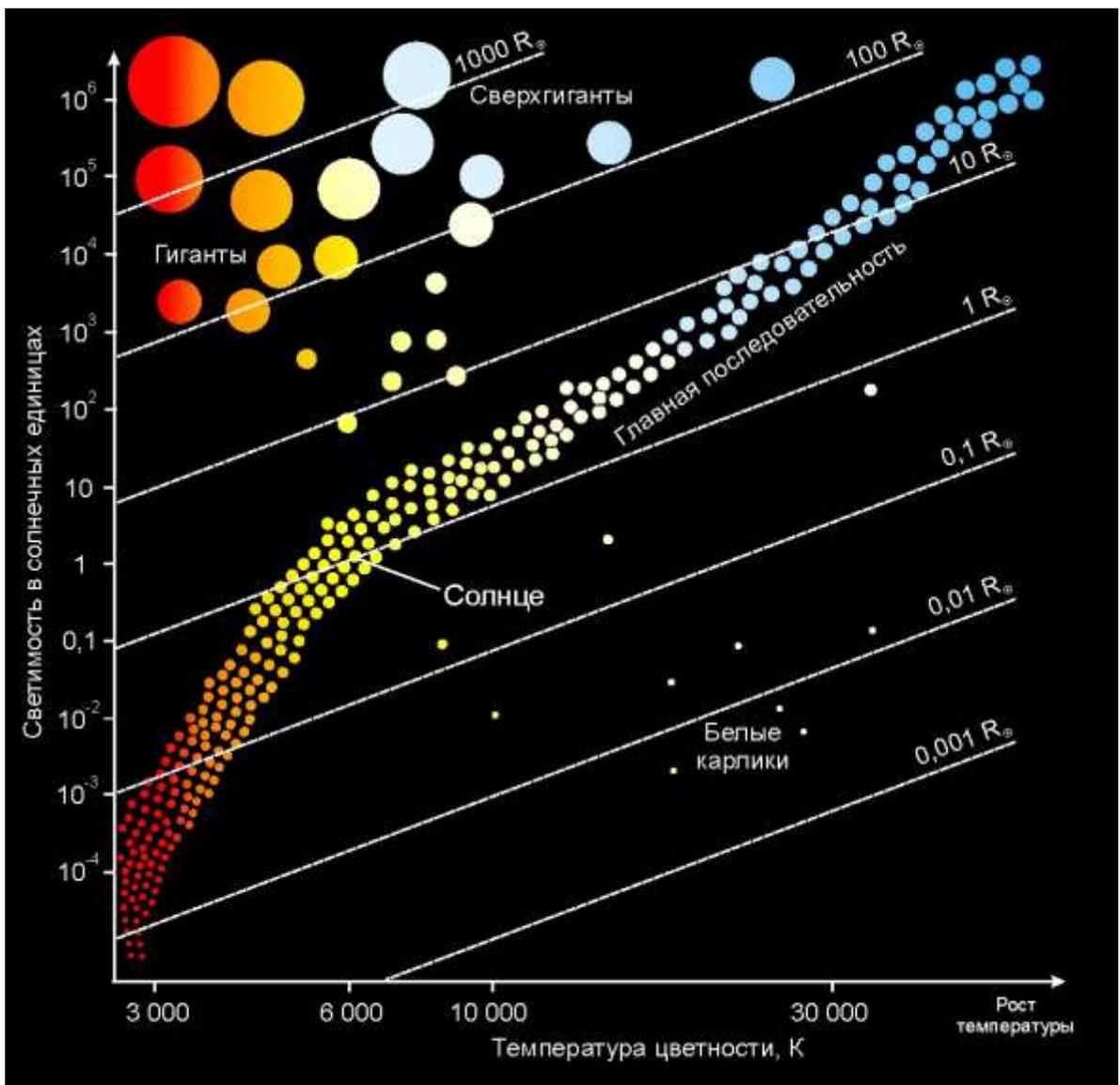
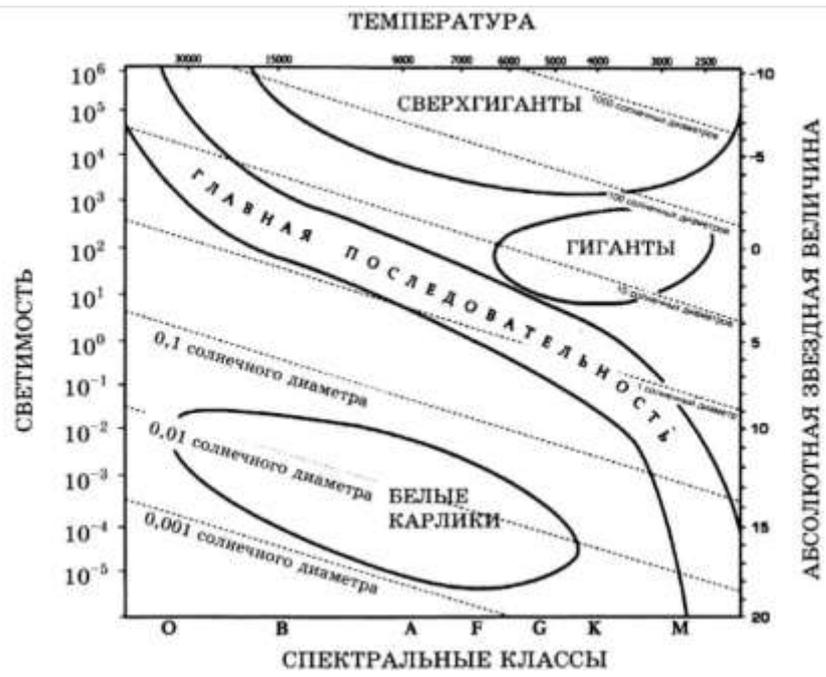
Класс Y - ультрахолодные коричневые карлики с температурой 300 - 500 К. Внутри класса звёзды делятся на подклассы от 0 (самые горячие) до 9 (самые холодные).

Солнце принадлежит спектральному классу G2.

Рассмотренная выше классификация одномерная, так как основной характеристикой является температура звезды. Но среди звезд одного класса есть звезды-гиганты и звезды-карлики. Они отличаются по плотности газа в атмосфере, площади поверхности, светимости. Эти различия отражаются на спектрах звезд. Существует новая, двумерная классификация звезд. По этой классификации у каждой звезды кроме спектрального класса указывается еще класс светимости (см. рис.).

Зависимость между видом спектра и светимостью звёзд называется диаграммой спектр-светимость или диаграммой **Герцшпрунга — Рассела**. Согласно этой зависимости все звёзды делятся на группы - последовательности:

1. **главная последовательность** – сюда относятся большинство карликовых звёзд, в том числе и Солнце;
2. **последовательность красных гигантов;**
3. **последовательность сверхгигантов;**
4. **последовательность белых карликов.**



1. Подавляющее большинство звезд принадлежит главной последовательности.
2. Чем горячее звезды, тем большую светимость имеют.
3. Группы звезд делятся по размерам.
4. Звезды данного спектрального класса не могут иметь произвольной светимости (и наоборот).
5. По диаграмме исследуют эволюцию.
6. Большинство звезд – карлики.

Главная последовательность (около 90% звезд) - это последовательность звезд разной массы. Самые большие (голубые гиганты) расположены в верхней части, а самые маленькие звезды – карлики – в нижней части главной последовательности. Их светимость обусловлена ядерными реакциями превращения водорода в гелий.

Красные гиганты и сверхгиганты располагаются над главной последовательностью справа, белые карлики – под ней слева, поэтому начало левой части главной последовательности представлена голубыми звездами с массами ~ 50 солнечных, конец правой - красными карликами с массами $\sim 0,08$ солнечных.

Существует связь между массой звезды и её светимостью: чем больше масса звезды, тем больше её светимость.

Контрольные вопросы к лекции:

1. Из каких химических элементов состоит Солнце и каково их соотношение?
2. Каков источник энергии излучения Солнца? Какие изменения с его веществом происходят при этом?
3. Какой слой Солнца является основным источником видимого излучения?
4. Каково внутреннее строение Солнца? Назовите основные слои его атмосферы.
5. В каких пределах изменяется температура на Солнце от его центра до фотосферы?
6. Какими способами осуществляется перенос энергии из недр Солнца наружу?
7. Чем объясняется наблюдаемая на Солнце грануляция?

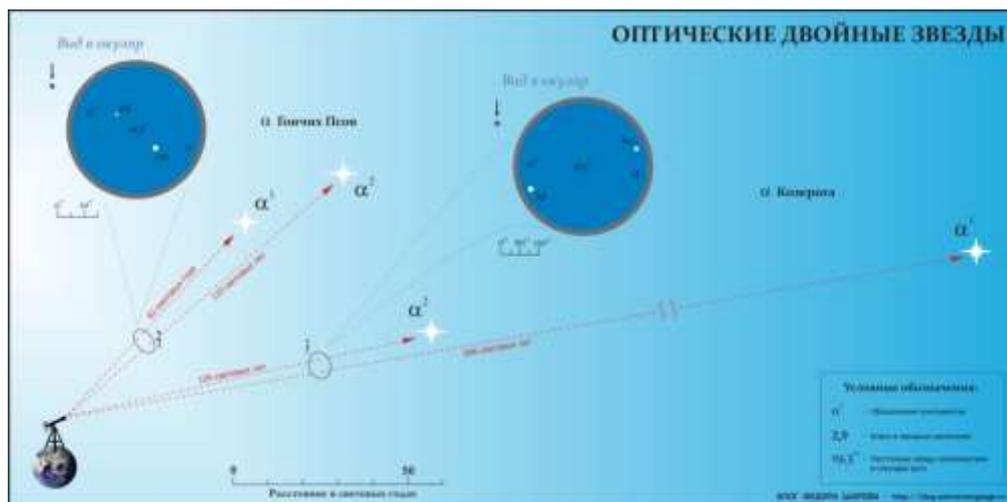
8. Какие проявления солнечной активности наблюдаются в различных слоях атмосферы Солнца? С чем связана основная причина этих явлений?
9. Чем объясняется понижение температуры в области солнечных пятен?
10. Какие явления на Земле связаны с солнечной активностью?
11. Как определяют расстояния до звёзд?
12. От чего зависит цвет звезды?
13. От чего зависит светимость звезды?

Лекция 13

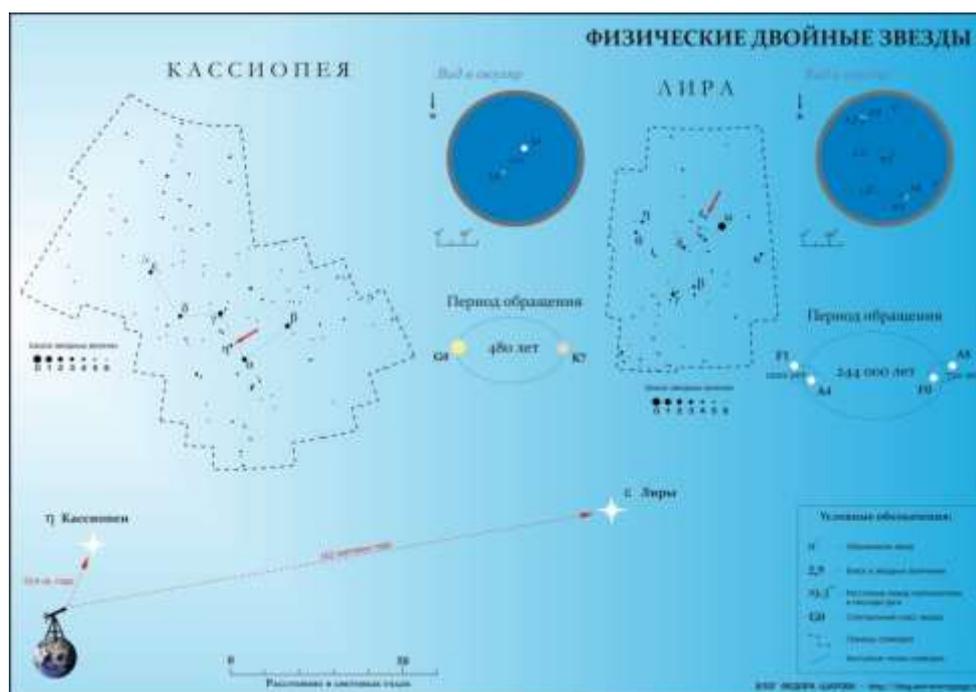
Масса и размеры звезд. Двойные и переменные звезды. Двойные звезды.

Массы звёзд вычисляются с использованием 3^{го} закона Кеплера. Массы большинства звёзд лежат в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца.

Двойными звёздами называют близко расположенные пары звёзд. Типы двойных звёзд: оптические двойные и физические двойные.



Физическая двойная звезда — система из двух гравитационно связанных звёзд, обращающихся по замкнутым орбитам вокруг общего центра масс.



Кратными называются звёздные системы, имеющие менее 10 компонентов. Кратная звезда состоит из трёх или более звёзд, которые связаны друг с другом силами гравитации (или которые выглядят с Земли близкими друг к другу).

Звёздное скопление – гравитационно связанная группа из 10 и более звёзд, имеющих общее происхождение, движущаяся в гравитационном поле галактик и как единое целое.

Несмотря на многочисленность двойных звезд, достаточно надежно определены орбиты лишь примерно для сотни из них.

При известном расстоянии до этих систем использование третьего закона Кеплера позволяет определить их массу.

Сравнивая движение спутника звезды с движением Земли вокруг Солнца, можно написать:

$$\frac{m_1+m_2}{A^3} T_1^2 = \frac{M_1+M_2}{a^3} T_2^2,$$

где m_1 и m_2 – массы компонентов звездной пары; M_1 и M_2 – массы Солнца и Земли;

T_1 – период обращения звезд; T_2 – период обращения Земли;

A – большая полуось орбиты двойной звезды; a – большая полуось земной орбиты.

Приняв период обращения Земли и величину большой полуоси ее орбиты равными 1 и пренебрегая массой Земли по сравнению с массой Солнца, получим, что в массах Солнца:

$$m_1 + m_2 = \frac{A^3}{T^2}$$

Чтобы определить массу каждой звезды, надо изучить движение каждой из них и вычислить их расстояния A_1 и A_2 ($A = A_1 + A_2$) от общего центра масс.

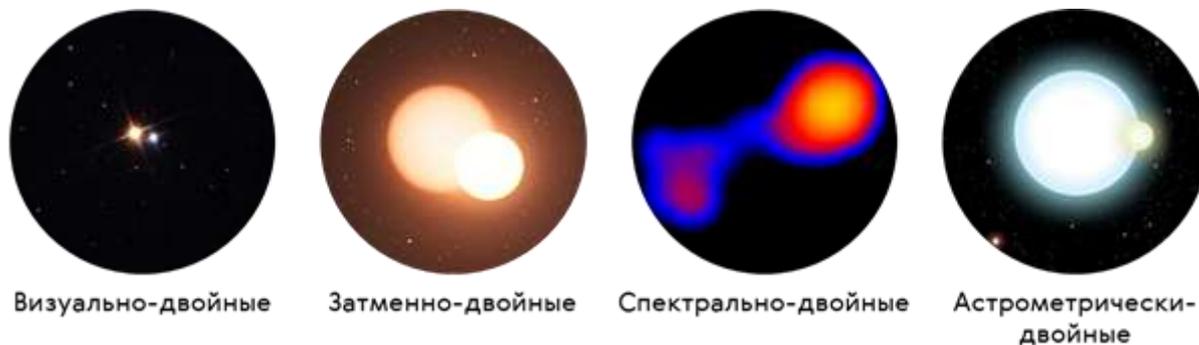
Тогда мы получим второе уравнение:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

Решая систему двух уравнений, можно вычислить массу каждой звезды.

Классы физических двойных звёзд:

В зависимости от условий наблюдения все звёзды делятся на:

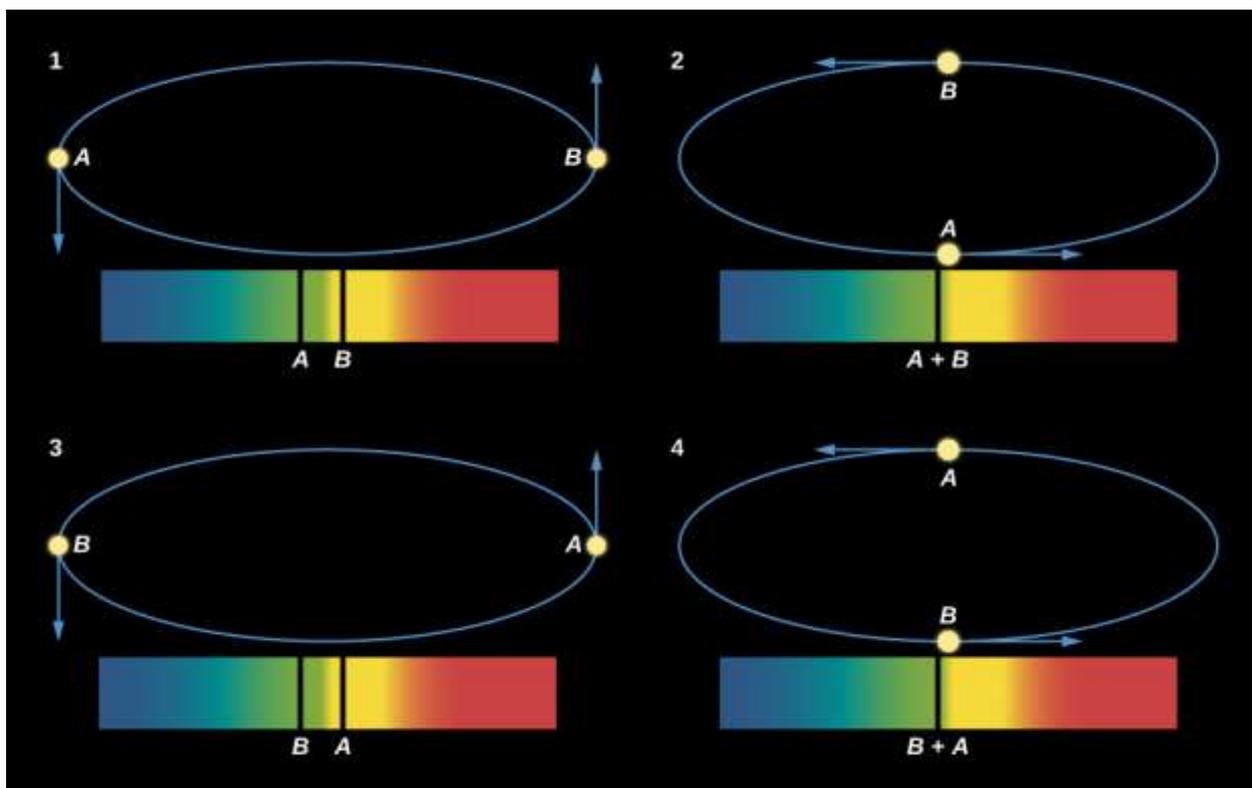


1. **Визуально-двойные** – это двойные звёзды, компоненты которых можно увидеть отдельно (в телескоп или сфотографировать). Орбиты визуально-двойных сравнимы с орбитами планет-гигантов Солнечной системы.

2. Звёздные пары, двигаясь друг относительно друга, периодически заслоняют друг друга, при этом их блеск меняется. Такие звёздные пары называют **затменно-двойными**.

3. **Спектрально-двойные** - звёзды, двойственность которых устанавливается лишь на основании спектральных наблюдений.

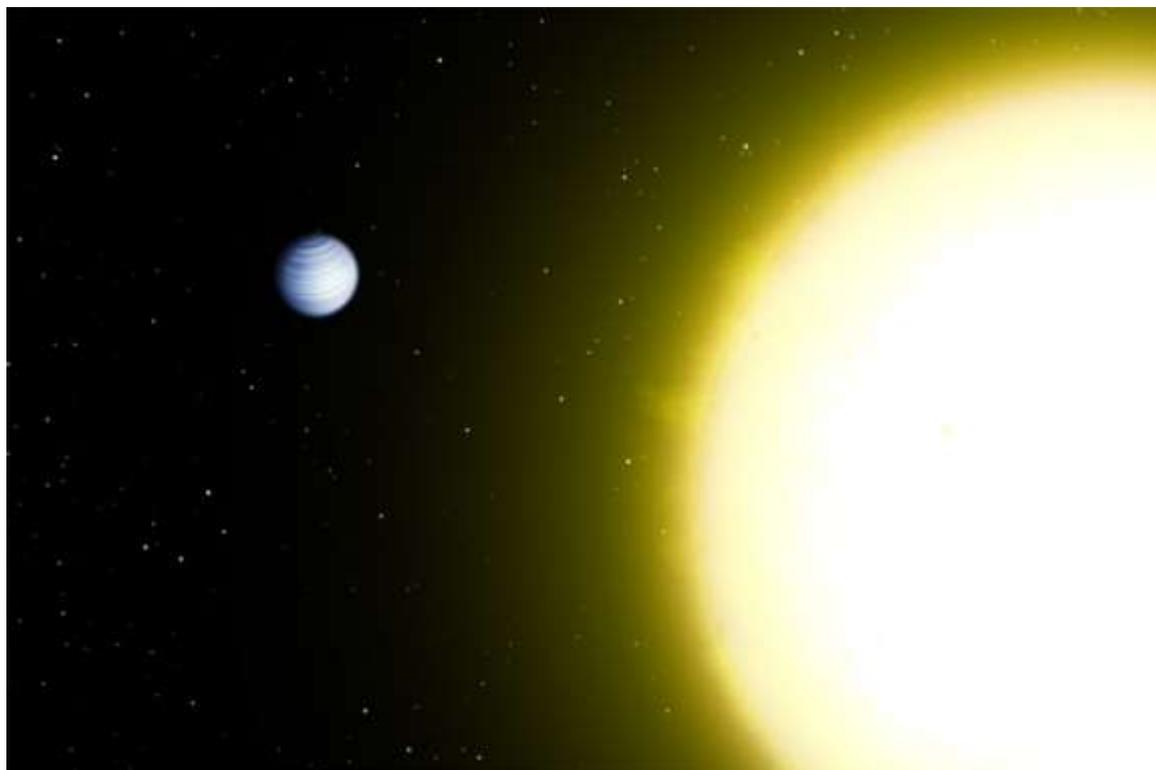
Предположим, что наблюдатель находится в плоскости орбиты двойной системы, состоящей из двух компонентов А и В, вращающихся вокруг центра масс системы (см. рис.). Спектры компонентов накладываются друг на друга, и на рисунке под изображениями четырех положений компонентов звездной пары показан ее общий наблюдаемый спектр. Стрелки у компонентов показывают направление скорости их движения.



В положениях 2 и 4 компоненты А и В движутся в перпендикулярном направлении к лучу зрения наблюдателя, находящегося на Земле, и поэтому смещения линий в их спектрах не происходит, соответствующие линии обоих спектров совпадают между собой и в наблюдаемом общем спектре звезды сливаются. Но в положениях 1 и 3 компоненты А и В движутся по лучу зрения в противоположных направлениях, поэтому линии в их спектрах несколько смещены в разные стороны: в спектре приближающегося к Земле компонента они сдвинуты к синему концу спектра, а в спектре удаляющегося компонента – к красному концу, в общем спектре звезды эти линии видны отдельно, т. е. происходит периодическое раздвоение спектральных линий. Промежуток времени между одинаковыми наибольшими смещениями раздвоенных спектральных линий равен периоду обращения компонентов звезды вокруг общего центра масс.

Если блеск одного из компонентов мал, то спектр принадлежит только более яркому компоненту и тогда в нем наблюдаются периодические смещения линий без их раздвоения.

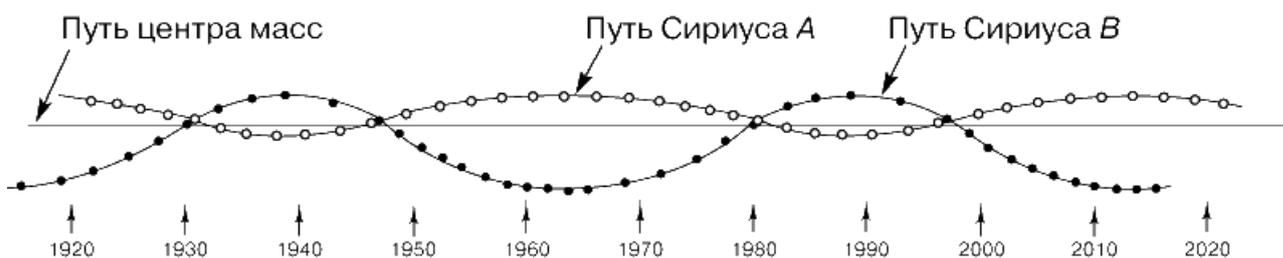
Постоянное совершенствование методики определения сдвига спектральных линий позволило в 1995 г. обнаружить у звезды 51 Пегаса спутник массой в половину массы Юпитера (см. рис.).



К настоящему времени методом лучевых скоростей у более чем 600 звёзд обнаружены планетные системы. Они получили общее название – экзопланеты.

4. **Астрометрически-двойные** – очень тесные звёздные пары, в которых одна из звёзд или очень мала по размерам, или имеет низкую светимость.

В этом случае такую звезду рассмотреть не удаётся, но обнаружить двойственность всё же можно. Яркий компонент будет периодически отклоняться от прямолинейной траектории то в одну, то в другую сторону (см. рис.), как будто по прямой движется центр масс системы.



Размеры и модели звёзд

Размеры звёзд лежат в очень широких диапазонах: от небольших белых карликов и нейтронных звёзд до огромных красных гигантов и гипергигантов.

В большинстве случаев размеры звёзд приходится рассчитывать на основе данных об их светимости и температуре. Светимость звезды рассчитывается по той же формуле, что и светимость Солнца:

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

Отношение светимостей звезды и Солнца будет равно:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4.$$

Приняв, что $R_{\odot} = 1$ и $L_{\odot} = 1$, получаем выражение для вычисления радиуса звезды (в радиусах Солнца):

$$R = \sqrt{L} \frac{T_{\odot}^2}{T^2}.$$

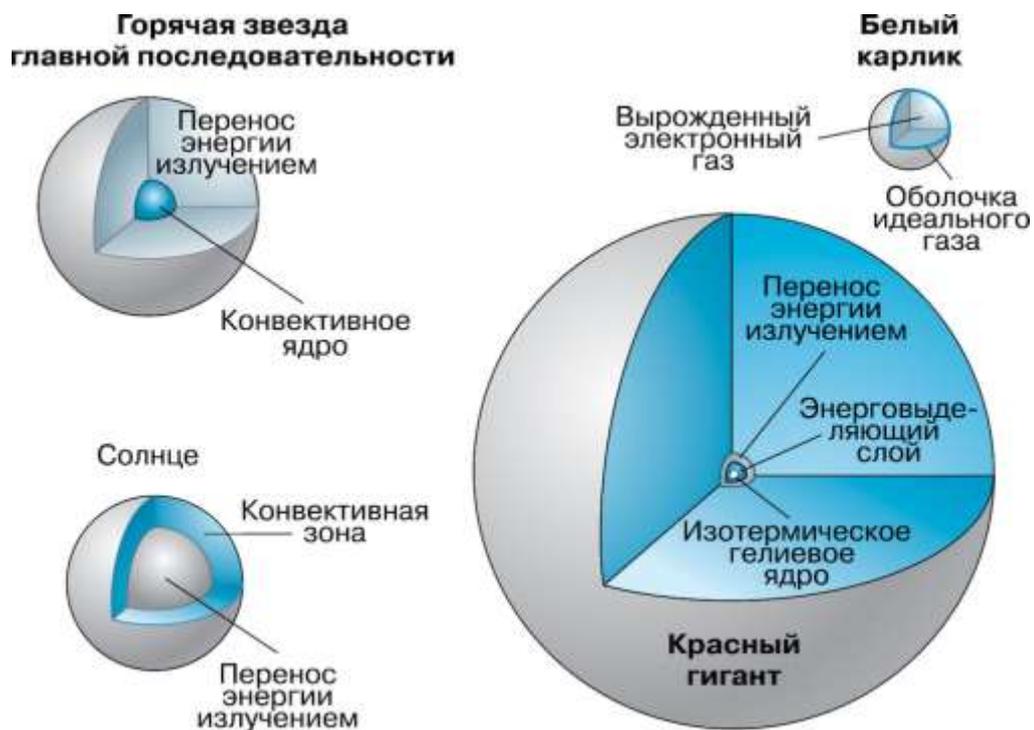
Звёзды самой большой светимости (сверхгиганты) действительно оказались очень большими. Красные сверхгиганты Антарес и Бетельгейзе в сотни раз больше Солнца по диаметру



Зато диаметр красных карликов, относящихся к главной последовательности, в несколько раз меньше солнечного. Самыми маленькими звёздами являются белые карлики, диаметр которых составляет несколько тысяч километров



В зависимости от массы и размеров звёзды различаются по внутреннему строению, хотя имеют примерно одинаковый химический состав.



Звёзды главной последовательности, температура которых такая же, как у Солнца, или ниже, похожи на него по внутреннему строению. Среди множества звёзд этого типа есть и такие, которые по многим своим характеристикам являются «двойниками» Солнца.

У более горячих звёзд главной последовательности внешняя конвективная зона отсутствует. В этих звёздах конвекция происходит в ядре протяжённостью до $\frac{1}{4}$ их радиуса, окружённом лучистой оболочкой

Гиганты и сверхгиганты имеют очень маленькое ядро (его радиус около 0,001 доли радиуса звезды). Термоядерные реакции происходят в окружающем его тонком слое; далее на протяжении около 0,1 радиуса звезды

происходит передача энергии излучением. Практически весь остальной объём ($\frac{9}{10}$ радиуса) составляет протяжённая конвективная зона.

Белые карлики состоят из вырожденного газа, давление которого определяется лишь его плотностью и не зависит от температуры. Равновесие такой «экзотической» звезды, масса которой равна солнечной, наступает лишь тогда, когда она сожмётся до размеров, примерно равных размерам Земли. Внутри белого карлика температура достигает 10 млн К и практически не меняется; только в тонкой оболочке из «обычного» вещества она резко падает до 10 000 К.

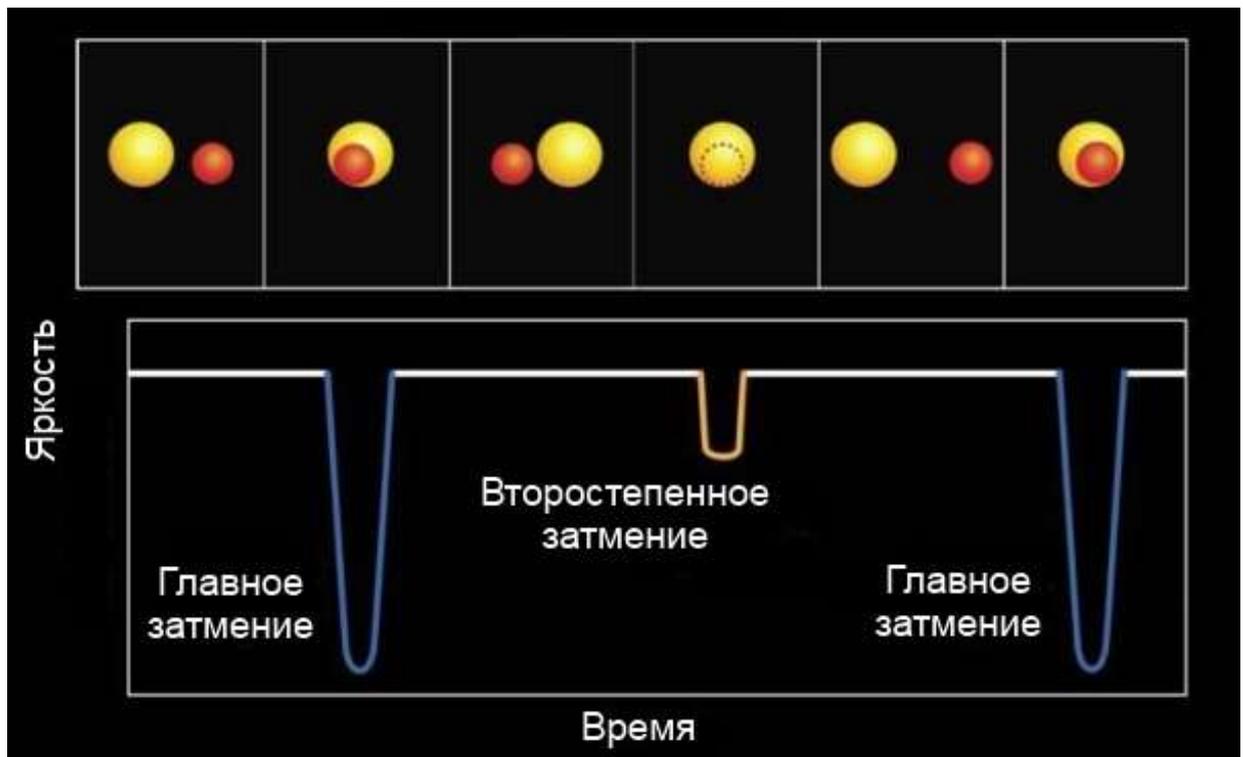
Переменные и нестационарные звёзды.

Переменные звезды – это звезды, блеск которых изменяется

Причин переменности блеска звезд может быть только две: либо взаимные затмения звезд, либо физические процессы, происходящие в их недрах. Поэтому и переменные звезды подразделяются на затменные переменные и на физические переменные.

Затменные переменные звезды – двойные звезды, компоненты которых, имея постоянную светимость, обращаются вокруг общего центра масс по орбитам, расположенным в плоскости, проходящей через Землю. Поэтому в процессе обращения компоненты затменно-двойной звезды периодически частично или полностью заслоняют (затмевают) друг друга от наблюдателя. Вне затмений до наблюдателя доходит свет от обоих компонентов, а во время затмений свет ослабляется затмевающим компонентом и наблюдатель фиксирует уменьшение блеска звезды.

Изменение видимой яркости переменной звезды во времени изображается в виде графика, называемого кривой блеска (см. рис.).



Физические переменные (нестационарные) звёзды – переменные звёзды, у которых происходят периодические изменения блеска из-за физических процессов, происходящих в их недрах.

Типы переменных звёзд: пульсирующие и эруптивные.

Пульсирующие переменные звёзды – это физические переменные звёзды, у которых происходят периодические колебания блеска. У пульсирующих переменных звезд светимость меняется из-за чередования их сжатий и расширений в небольших пределах. При сжатии звезды размеры фотосферы несколько уменьшаются, но зато ее температура возрастает. В результате увеличивается светимость звезды, а следовательно – и блеск. При расширении температура и светимость уменьшаются.

Мира А Кита - пульсирующая переменная звезда с периодом 332 дня, в течение которых её видимая звёздная величина меняется от $2,0^m$ до $10,1^m$. Мириды – класс пульсирующих переменных звёзд с периодом от нескольких недель до года и более. Практически все мириды являются красными гигантами. Изменение блеска мирид связано с их периодическим сжатием и расширением. Пульсационные колебания – изменение блеска звезды,

обусловленное нарушениями равновесия между силами гравитационного притяжения и лучевого давления.

Цефеиды – класс пульсирующих переменных звёзд с довольно точной зависимостью период-светимость, названный в честь звезды δ Цефея. Их блеск плавно и периодически меняется от $0,5^m$ до $2,0^m$ с периодом от 1,5 до 70 суток. Изменение светимости цефеид сопровождается изменениями их лучевой скорости и температуры. Период пульсации цефеид зависит от их светимости: чем она больше, тем больший период пульсации. Цефеиды – жёлтые яркие гиганты, гиганты или сверхгиганты спектральных классов F и G, обладающие очень высокой светимостью.

Переменные типа RR Лиры – тип радиально пульсирующих переменных звёзд с периодами от 0,2 до 1,2 дня и амплитудами изменения блеска от $0,2^m$ до 2^m .

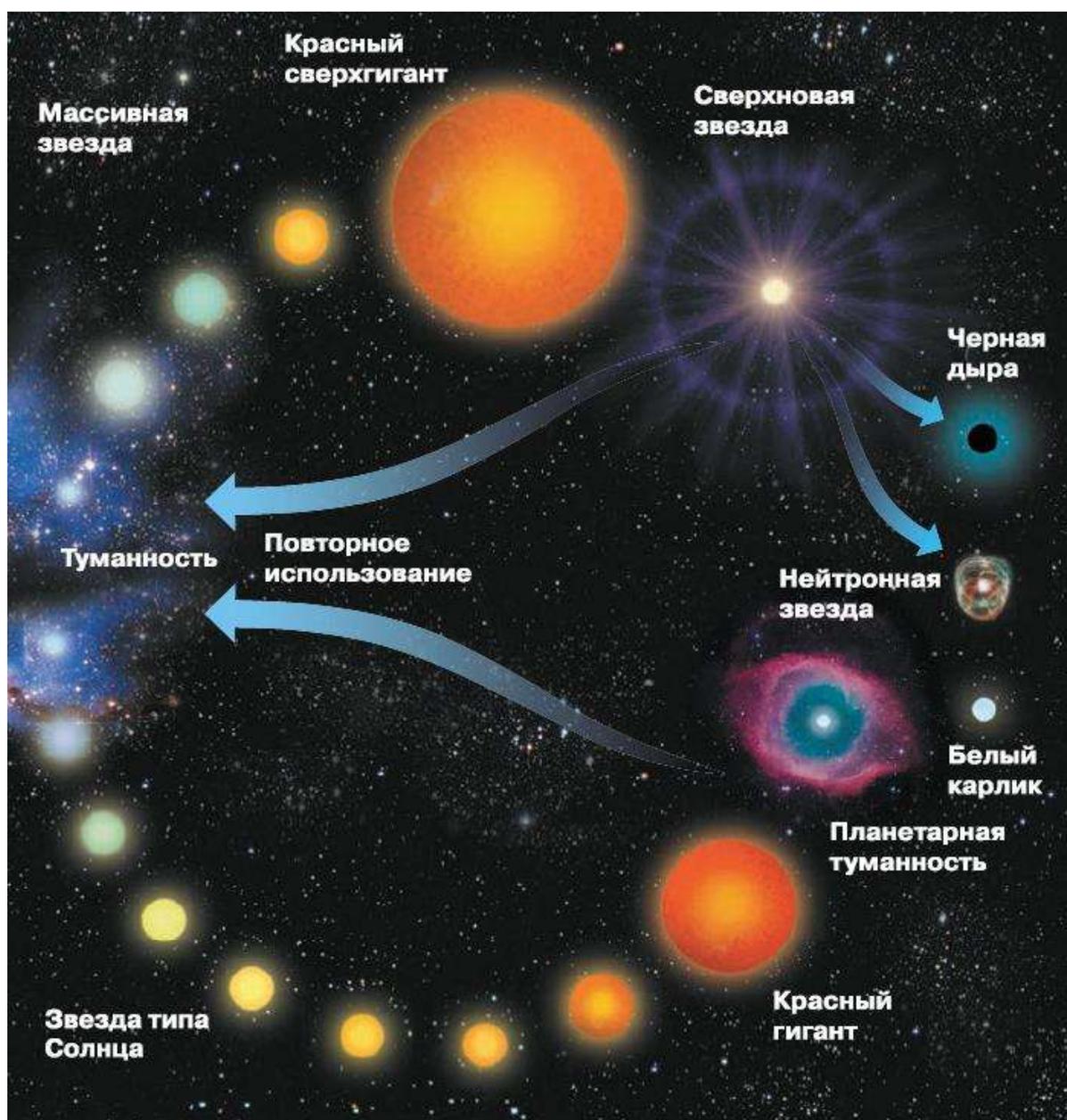
Эруптивные – физические переменные звёзды, которые проявляют свою переменность в виде вспышек. К ним относятся новые и сверхновые звёзды.

Новые звёзды – звёзды, светимость которых внезапно увеличивается в 10^3 - 10^6 раз в течение суток. Новыми называют звёзды, у которых внезапно увеличивается блеск. За время вспышки новая излучает 10^{38} Дж энергии (столько энергии Солнце излучает за 100 тыс. лет). Долгое время причины вспышек новых звёзд оставались непонятными. Положение изменилось, когда в 1954 г. было обнаружено, что одна из новых звёзд (DQ Геркулеса) является двойной с периодом обращения всего 4 ч 39 мин. Один из компонентов – белый карлик, а другой – красная звезда главной последовательности. Из-за их близкого расположения на белый карлик перетекает газ из атмосферы красного карлика. По мере накопления водорода плотность и температура внешних слоёв белого карлика возрастает, создаются условия для начала термоядерных реакций превращения водорода в гелий. Они происходят настолько быстро, что приобретают характер взрыва. При этом внешние слои звезды, составляющие небольшую часть её

массы, расширяются и выбрасываются в космическое пространство. Их свечение и наблюдается как вспышка новой звезды. Такое явление может повторяться с тесными двойными звёздами неоднократно: у одних через тысячи, у других с изменением светимости на 4—5 звёздных величин через несколько десятков лет.

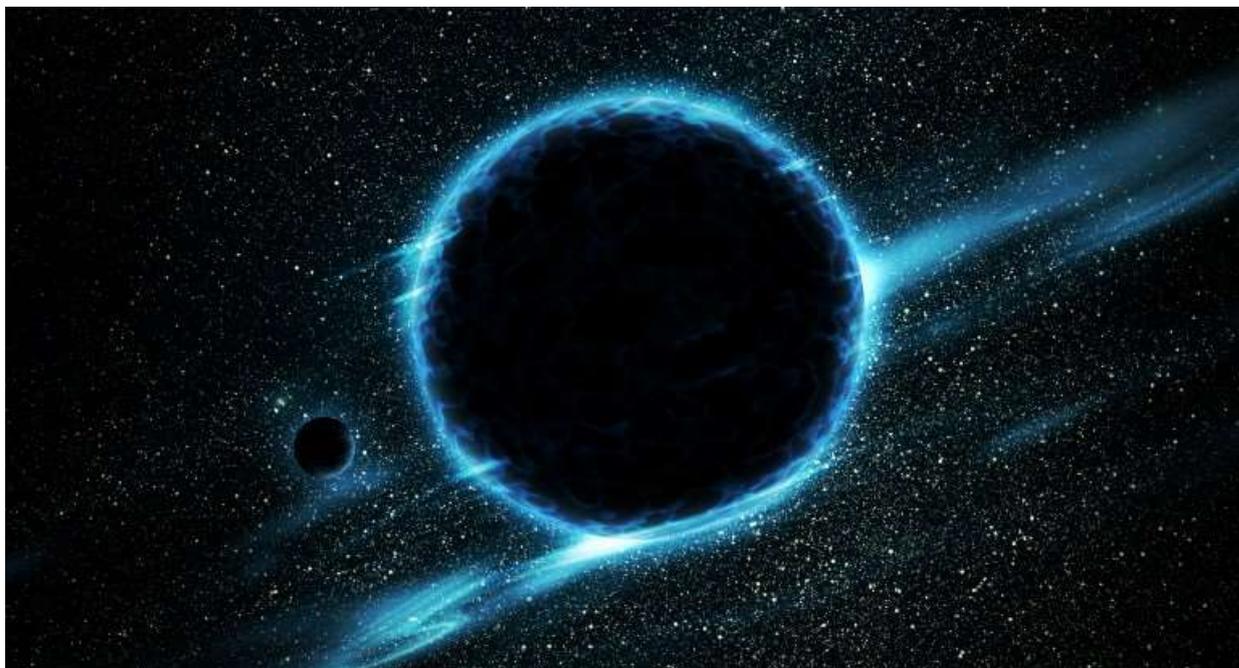
Сверхновая I класса – переменная звезда, являющаяся результатом взрыва белого карлика.

Сверхновая II класса является конечным этапом эволюции массивной одиночной звезды.



На протяжении большей части жизни любой звезды основным источником её энергии служит термоядерный синтез гелия из водорода. Выгорание водорода в центральных областях звезды приводит к образованию изотермического гелиевого ядра, переходу к стадии красного гиганта и уходу звезды с главной последовательности. Относительно краткая эволюция красных гигантов приводит, в зависимости от их массы, к образованию белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр (см. рис.).

После завершения фазы красного гиганта окончательная судьба звезды зависит от ее массы. Если звезда похожа на Солнце, то через некоторое время она теряет наружные слои, доставшиеся ей после фазы красного гиганта, которые уходят в пространство в виде светящегося кольца. От звезды остается ядро в виде очень компактного малого объекта – белого карлика (см. рис. выше). Он имеет массу, примерно равную массе Солнца, но размеры его не больше Земли. Белый карлик не имеет источников энергии, в нем не протекают ядерные реакции, но он еще сохраняет тепло, доставшееся ему от звезды. Со временем тепло уходит в пространство, и белый карлик заканчивает эволюцию холодным, темным «черным карликом» (см. рис.).



Массивные звезды иначе заканчивают свой путь. В конце фазы красного гиганта ядерные реакции, происходящие вблизи центра звезды,

выходят из-под контроля. Звезда взрывается, образуя сверхновую. Во время этого грандиозного взрыва звезда короткое время светится подобно миллиарду Солнц, в то время как наружные слои газа уносятся взрывом, создавая мощную ударную волну при встрече с космическими объектами (см. рис.).



Одновременно происходит коллапс ядра звезды, оно сжимается до тех пор, пока не достигает примерно 20 км в диаметре. Во время коллапса электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтроны. Когда все нейтроны оказываются «упакованными», сжатие прекращается

Нейтронная звезда – космическое тело, состоящее из нейтронной сердцевины, покрытой сравнительно тонкой (~1—2 км) корой вещества в виде тяжёлых атомных ядер и электронов.

Пульсар – нейтронная звезда, обладающая очень быстрым вращением и мощным магнитным полем. Пульсар представляет собой источник строго периодических радиоимпульсов с периодом от 0,0014 с до 11,8 с.

Гиперновая – взрыв массивной звезды (с массой более 80 масс Солнца) после коллапса её ядра. Если после взрыва масса оставшегося

вещества превосходит $2-3M_{\odot}$, то звезда сжимается в крошечное плотное тело.

Чёрная дыра – область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что даже свет не может его преодолеть.

Радиус Шварцшильда (гравитационный радиус) – критический радиус, до которого должна сжаться звезда, чтобы превратиться в чёрную дыру:

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

Контрольные вопросы к лекции:

1. Чем объясняется изменение яркости некоторых двойных звёзд?
2. Во сколько раз отличаются размеры и плотности звёзд-сверхгигантов и карликов?
3. Каковы размеры самых маленьких звёзд?
4. Перечислите известные вам типы переменных звёзд.
5. Перечислите возможные конечные стадии эволюции звёзд.
6. В чём причина изменения блеска цефеид?
7. Почему цефеиды называют «маяками Вселенной»?
8. Что такое пульсары?

Лекция 14

Наша Галактика - Млечный Путь. Состав и структура Галактики. Звездные скопления. Межзвездный газ и пыль. Вращение Галактики.

Галактики - гигантские гравитационно-связанные системы звёзд и межзвёздного вещества, расположенные вне нашей Галактики.

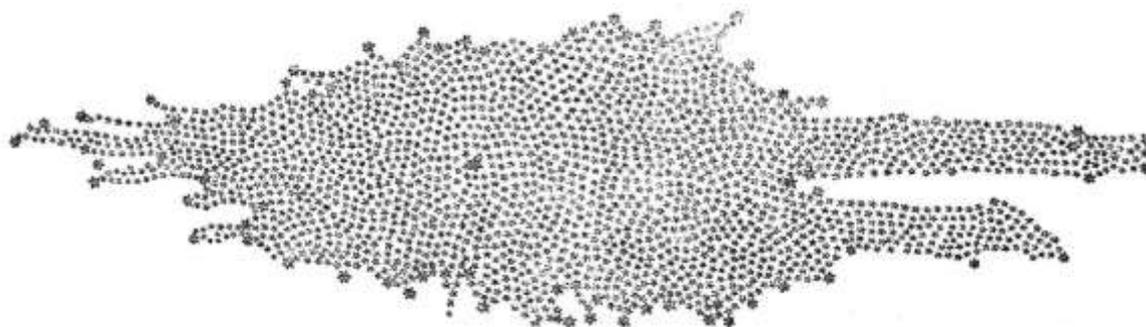
Форма и размеры Галактики

В ясную безлунную ночь наше внимание привлекает слабосветящаяся туманная полоса, пересекающая все небо, – Млечный Путь (см. рис), имеющая сложную клочковатую структуру, неодинаковую в разных местах яркость и представляющая собой совокупность огромного числа слабых звёзд.



Еще в XVIII в. В. Гершель предположил, что Млечный Путь представляет собой гигантскую звездную систему – Галактику (древнегреческое название Млечного Пути) и предложил метод исследования его структуры. Метод заключается в подсчете звезд определенной яркости, видимых в данном направлении. Переходя ко все более и более слабым звездам, мы подсчитываем число звезд, находящихся на все больших и

больших расстояниях. Сопоставляя подсчеты, сделанные в разных направлениях, можно получить представление о форме, размерах и строении нашей звездной системы.

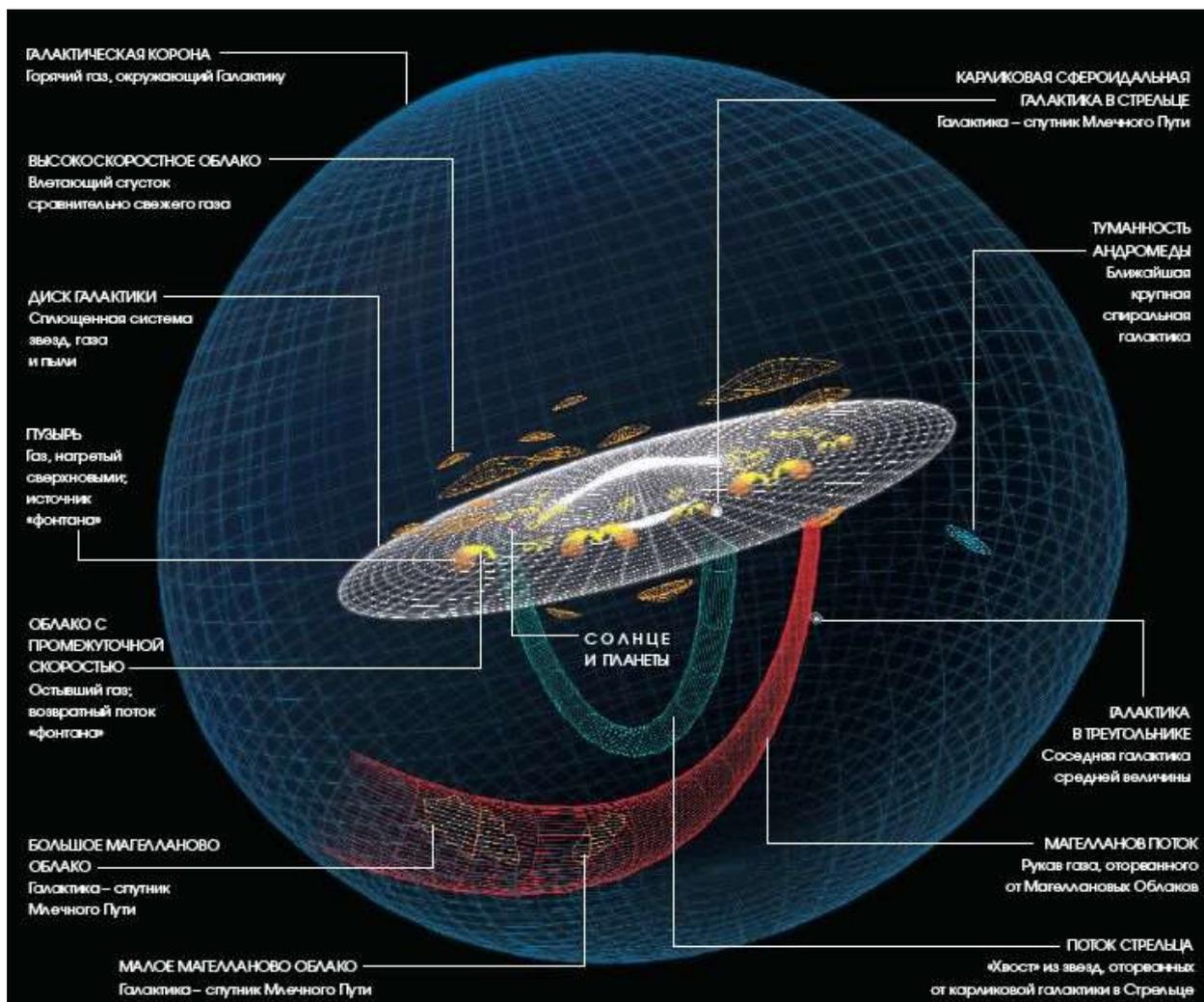


Строение Галактики (модель Гершеля)

Если речь идет о нашей звездной системе, то Галактика – имя собственное и пишется с большой буквы; если говорится о других звездных системах, то галактика – имя нарицательное и пишется с маленькой буквы.

Наша **Галактика** - гравитационно-связанная система, состоящая из 200-400 млрд. звёзд и межзвёздной среды. Все звёзды Млечного Пути образуют единую звёздную систему в форме диска конечных размеров.

Диаметр Галактики составляет около 30 кпк (около 100 тыс. световых лет), а толщина - около 4 кпк.



Линия, идущая вдоль середины Млечного Пути, называется галактическим экватором, а образующая его плоскость - **галактической плоскостью**. В состав Галактики входят звёзды и звёздные скопления. Число звёзд в Галактике порядка 10^{12} (триллиона). Масса Галактики составляет примерно 500 млрд. масс Солнца.

Состав Галактики

Звёздные скопления - гравитационно-связанные группы звёзд, которые имеют общее происхождение и движутся в поле тяготения Галактики как одно целое. Различают рассеянные и шаровые звёздные скопления.

Рассеянное звёздное скопление - это не имеющая правильной формы сравнительно неплотная группа, содержащая от нескольких десятков до нескольких тысяч звёзд, образованных из одного молекулярного облака и имеющих примерно одинаковый возраст. Размеры таких скоплений – 6–14 пк. Ближайшие к нам рассеянные звёздные скопления – Плеяды и Гиады – находятся в созвездии Тельца.

Невооружённым глазом можно различить в Плеядах 5–7 слабых звёздочек, располагающихся в виде маленького ковша (см. рис.).



В настоящее время известно около 1200 рассеянных звёздных скоплений. Общее же их число в Галактике оценивается в 20 тыс. объектов. Все они концентрируются у галактической плоскости и состоят из молодых бело-голубых звёзд главной последовательности.

Шаровое скопление - звёздное скопление, в котором содержится до миллиона звёзд, тесно связанных гравитацией. Они обладают симметричной сферической формой и характеризуются увеличением концентрации звёзд к центру скопления.



(см. на рис. шаровое скопление М13)

Шаровые скопления образуют гало вокруг центра Галактики. В основном они состоят из красных гигантов и сверхгигантов. Возраст шаровых скоплений достигает 11-13 млрд лет.

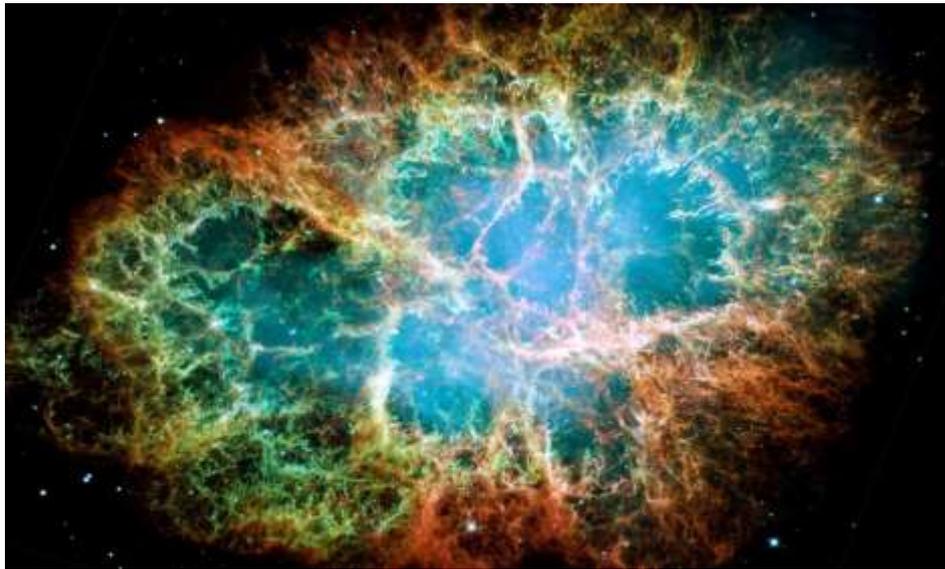
Звёздные ассоциации - группы звёзд, которые не связаны силами гравитации, или слабосвязанные молодые звёзды, объединённые общим происхождением.

В состав Галактики входят также туманности. **Газопылевая туманность** - участок межзвёздной среды, выделяющийся своим излучением или поглощением излучения на общем фоне неба. Туманности неправильной формы называют диффузными, а те, которые имеют правильную форму и напоминающие по виду планеты – планетарными.

Если вблизи большого газопылевого облака находится яркая звезда, то туманность, отражая или переизлучая излучение этой звезды, становится видимой как светлая диффузная туманность. Пример светлой диффузной туманности – большая газопылевая туманность в созвездии Ориона М42 (см. рис.). Расстояние до нее около 500 пк, диаметр центральной части туманности – 6 пк, масса примерно в 100 раз больше массы Солнца.



Интересна небольшая диффузная туманность, названная Крабовидной туманностью (см. рис.) за свою необычную сетку из ажурных газовых волокон. Установлено, что эта туманность – остаток сверхновой звезды, вспыхнувшей в 1054 г. в созвездии Тельца. Значит, возраст Крабовидной туманности чуть более 950 лет. Крабовидная туманность удалена от нас на расстояние не менее 1,5 кпк. Ее диаметр около 1 пк, масса всех волокон около 0,1 массы Солнца. Туманность расширяется со скоростью более 1000 км/с.



Пример планетарной туманности – туманность NGC 7293 Улитка или Глаз бога (см. рис.). В центре планетарной туманности находится горячая звезда. Газ, из которого состоит планетарная туманность, входил когда-то в состав атмосферы этой звезды. Коротковолновое излучение звезды переизлучается газом планетарной туманности в видимое излучение. Таким процессом (флуоресценцией), а не простым отражением объясняется свечение планетарных туманностей.



Туманность NGC 6302 Бабочка, несмотря на то, что визуально она не напоминает планету, тоже относится к планетарным (см. рис.).



Туманности, в основном состоящие из пыли, выделяются на фотографиях звездного неба в виде темных участков (см. рис. туманности IC 434 Конская голова). Многие темные туманности расположены сравнительно близко от нас и сильно поглощают свет находящихся за ними звезд.



Космические лучи и магнитные поля

Но даже там, где не видно ни звезд, ни туманностей, пространство не пусто. Оно заполнено очень разреженным межзвездным газом и межзвездной пылью. В межзвездном пространстве существуют и различные поля (гравитационное и магнитное). Пронизывают межзвездное пространство и космические лучи, представляющие собой потоки электрически заряженных частиц, которые при движении в магнитных полях разогнались до скоростей, близких к скорости света, и приобрели огромную энергию.

Межзвёздная среда - вещество и поля, заполняющие межзвёздное пространство внутри Галактики. Большая часть массы межзвёздной среды приходится на разреженный газ и пыль.

Основным компонентом межзвёздной среды является межзвёздный газ, который на 70% состоит из водорода и на 28% - из гелия. Водород составляет основную массу вещества Галактики.

Межзвёздная пыль - твёрдые микроскопические частицы, наряду с межзвёздным газом заполняющие пространство между звёзд. Полная масса космической пыли составляет порядка 1 % от полной массы межзвёздного газа.

Вращение Галактики

Все звёзды диска Галактики обращаются вокруг её ядра по орбитам, близким к круговым. Это вращение происходит по часовой стрелке, если смотреть на Галактику со стороны её северного полюса, находящегося в созвездии Волосы Вероники. Угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра. Линейная скорость вращения сначала возрастает с удалением от центра Галактики, достигая максимума (около 220 км/с) на расстоянии Солнца, после чего очень медленно убывает. Полный период обращения Солнца вокруг ядра Галактики составляет примерно 220 млн. лет (галактический год).

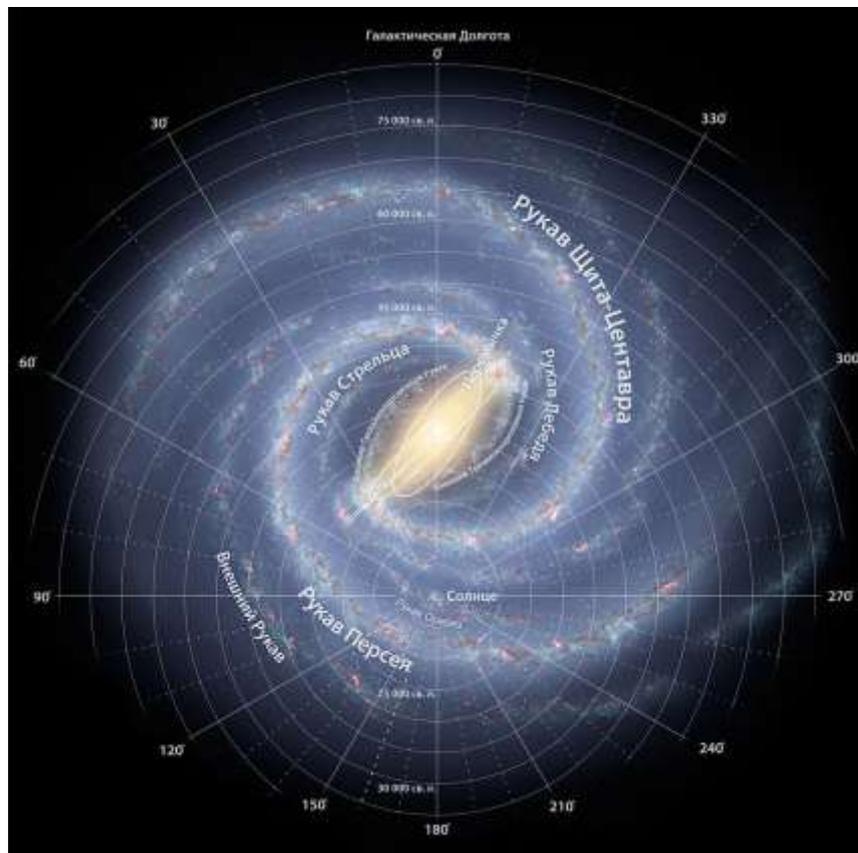
Скорость обращения Солнца практически совпадает со скоростью, с которой на данном расстоянии от центра Галактики движется волна уплотнения, формирующая спиральные рукава. Эта область Галактики получила название *коротационной окружности* (от англ. corotation — совместное вращение). Оказавшиеся здесь Солнце и другие звёзды находятся в привилегированном положении. Все остальные звёзды периодически попадают внутрь спиральных рукавов, поскольку их линейные скорости не совпадают со скоростью обращения волны уплотнения вокруг центра Галактики. Следовательно, наша планета и вся Солнечная система не испытывают на себе катастрофического влияния тех бурных процессов, которые происходят внутри спиральных рукавов. Стабильность условий, в которых возникла и миллиарды лет существует Солнечная система, может рассматриваться как один из важнейших факторов, обусловивших происхождение и развитие жизни на Земле.

Строение Галактики.

Галактика состоит из ядра, диска, гало и короны. Она имеет форму плоского линзообразного диска диаметром около 30 и толщиной около 4 кпс.



Звёздный диск Галактики имеет структуру в виде спиральных ветвей – рукавов. Выделяются две спиральные ветви: Стрельца и Персея (названы по созвездиям, где обнаруживаются эти ветви). В созвездии Ориона проходит ещё одна, не столь ярко выраженная ветвь (Орионов рукав). Вдоль рукавов сосредоточены самые молодые звёзды, например, сверхгиганты, рассеянные звёздные скопления и ассоциации. В рукавах происходит активное звёздообразование, здесь часто вспыхивают сверхновые.



В середине диска располагается балдж (вздутие). В центральной части Галактики расположено его ядро, которое представляет собой высокоплотный объект, возможно сверхмассивную чёрную дыру. Ядро наблюдается в созвездии Стрельца. Звёзды, не входящие в состав диска, образуют её звёздное гало, оно состоит из очень старых звёзд, разреженного газа и тёмной материи.

Типичная галактика (вроде Млечного Пути) состоит из четырех основных частей: ядра, диска, гало и короны. Центральная, наиболее компактная область галактики называется ядром. Там пребывает черная дыра. В ядре к тому же высокая концентрация звезд.

Область пространства вокруг ядра, имеющая сферическую форму и содержащая звезды, представляет собой гало. Центральная наиболее плотная часть гало в пределах нескольких тысяч световых лет от центра галактики имеет собственное имя — балдж. Здесь сосредоточено почти все молекулярное вещество межзвездной среды.

Третья часть галактики — это массивный звездный диск. Он представляет собой как бы две сложенные краями тарелки. В диске концентрация звезд значительно больше, чем в гало. Звезды внутри диска движутся по круговым траекториям вокруг центра галактики. В звездном диске между спиральными рукавами Млечного Пути расположено Солнце.

Диск и окружающее его гало погружены в корону. Она представляет собой оболочку горячего газа, простирающегося на десятки тысяч световых лет с каждой из сторон центральной плоскости галактического диска. Этот газ испускает ультрафиолетовое излучение, по которому и удается обнаружить и изучить короны галактик. Таким способом было установлено, что размеры короны нашей галактики в 10 раз больше, чем размеры ее диска.

Контрольные вопросы к лекции:

1. Какова структура и размеры нашей Галактики?
2. Какие объекты входят в состав Галактики?
3. Как проявляет себя межзвёздная среда? Каков её состав?

4. Какие источники радиоизлучения известны в нашей Галактике?
5. Чем различаются рассеянные и шаровые звёздные скопления?

Лекция 15

Галактики. Открытие других галактик. Многообразие галактик и их основные характеристики Темная материя. Структура и эволюция Вселенной.

Открытие других галактик

В 1924 г. с помощью крупнейшего в то время телескопа Эдвин Хаббл



установил, что туманность Андромеды образована огромным числом звёзд, сливающихся в сплошное туманное пятно при наблюдении в менее мощный телескоп. Большинство других известных туманностей оказались такими же удалёнными гигантскими системами, состоящими из миллионов и миллиардов звёзд. Гигантские гравитационно-связанные системы звёзд и межзвёздного

вещества, расположенные вне нашей Галактики, стали называть галактиками. Современные мощные телескопы сделали доступной регистрацию сотен миллиардов галактик.

Мир галактик поражает своим разнообразием. Галактики резко отличаются размерами, числом входящих в них звёзд, светимостями, внешним видом. Они обозначаются номерами, под которыми их вносят в каталоги. Одни и те же галактики фигурируют в разных каталогах под разными номерами. Например, М 31, М 82 (каталог Мессье) или NGC 224, NGC 3034 («Новый общий каталог» – New General Catalogue).

В состав всех галактик входят звёзды, межзвёздный газ и тёмная материя.

Но их относительное содержание в галактиках различного типа существенно отличается.

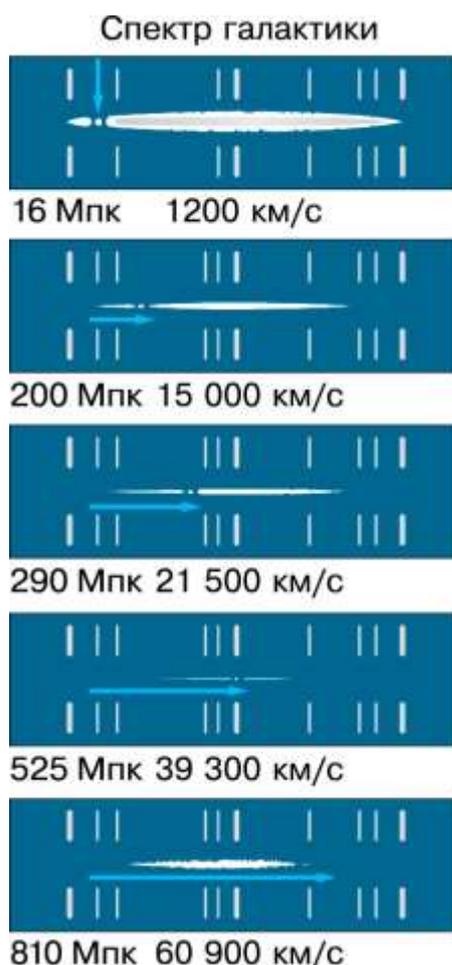
Для большинства галактик определить расстояние по наблюдениям цефеид оказывается невозможным.

В этих случаях пользуются другими методами, среди которых наиболее надёжным считается определение расстояния по закону «красного смещения», открытому в 1929 г. американским астрономом Эдвином Хабблом

Красное смещение (z) обычно измеряется относительным изменением длины волны спектральных линий:

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

Ещё в 1912-1914 гг. было обнаружено, что линии в спектрах далёких галактик смещены относительно их нормального положения в сторону красного конца спектра.



Это означало, что галактики удаляются от нас со скоростями в сотни километров в секунду. Позже Э. Хаббл определил расстояния до некоторых

галактик и их скорости. Из наблюдений следовало, что чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется. Закон, по которому скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до неё, получил название закона Хаббла. **Закон Хаббла** можно сформулировать таким образом: относительное увеличение длин волн линий в спектрах галактик пропорционально расстоянию r до них, т. е.

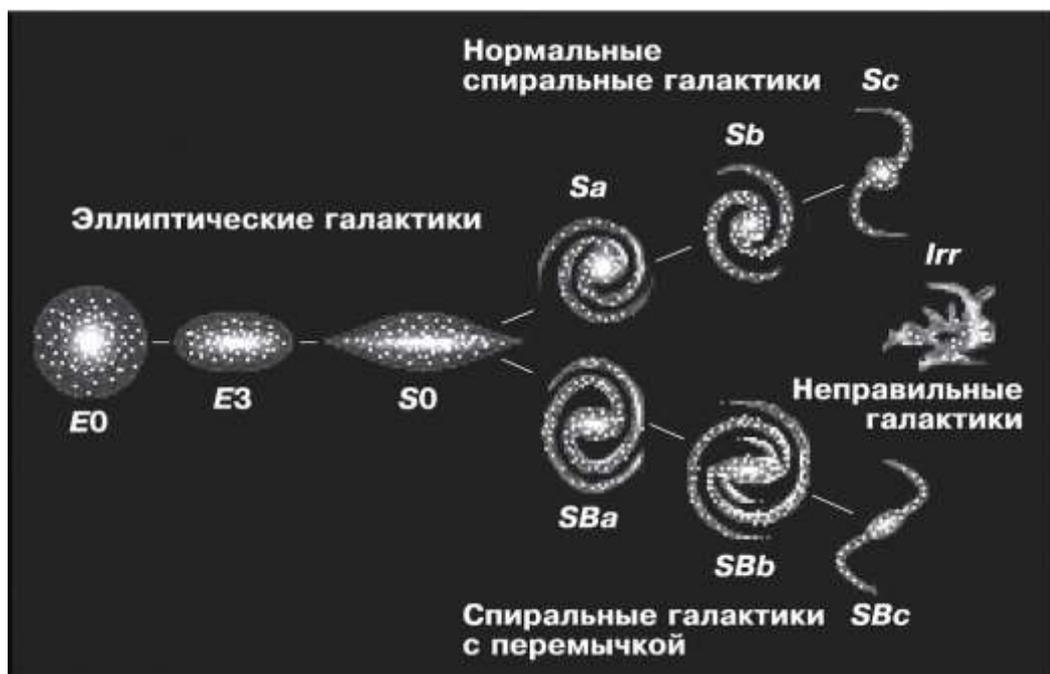
$$Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Удаление галактик происходит во все стороны со скоростями, прямо пропорциональными расстоянию до них: $v = HD$, где H — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Хаббла. Коэффициент Хаббла показывает, на сколько километров в секунду возрастает скорость галактик с увеличением расстояния до них на 1 Мпк.

Многообразие галактик

По внешнему виду галактики условно разделены на три основных типа: эллиптические, спиральные и неправильные.

эллиптические - E , спиральные - S и неправильные (иррегулярные) - I .





Пространственная форма эллиптических галактик – эллипсоиды с разной степенью сжатия (M32 Сомbrero, см. рис. выше). Среди эллиптических галактик встречаются гигантские и карликовые. Почти четверть всех изученных галактик относится к эллиптическим. Это наиболее простые по структуре галактики. Распределение звезд в них равномерно убывает от центра, пыли и газа почти нет. Самые яркие звезды – красные гиганты.

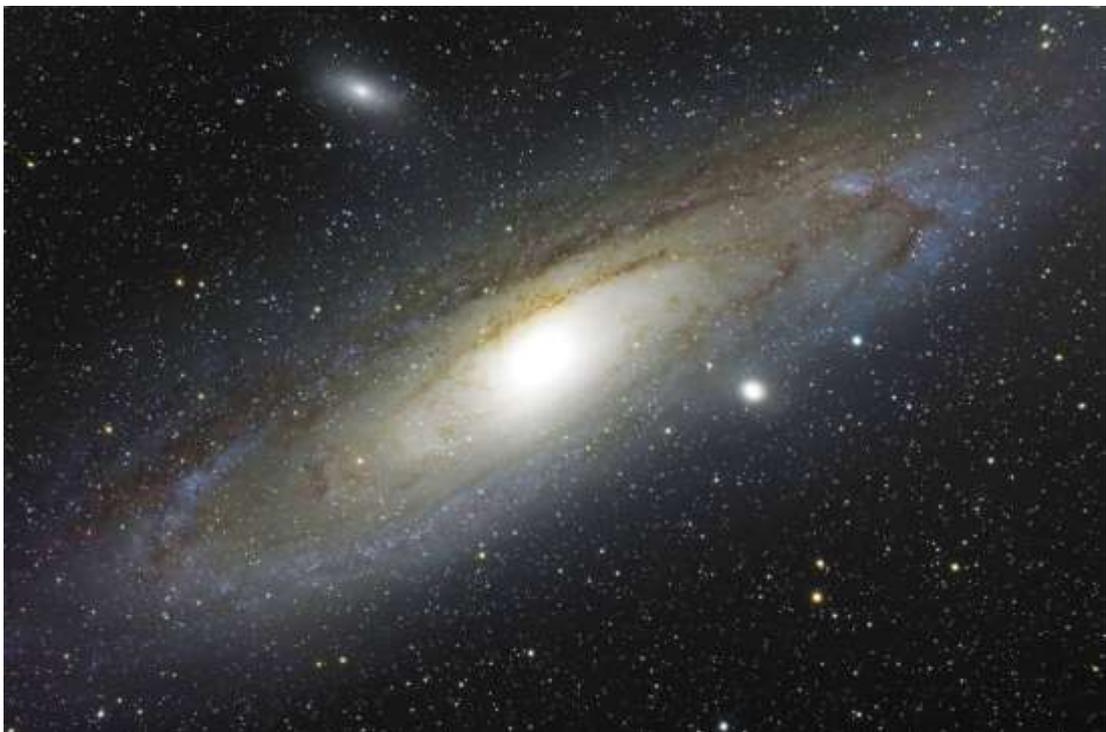
Спиральные галактики – самый многочисленный тип галактик (NGC 2903, см. рис.,



или M95, см. рис.)



К нему же относятся наша Галактика и гигантская Туманность Андромеды (M 31 или NGC 224, см. рис.), удаленная от нас примерно на 2,5 млн. св. лет. Это одна из немногих галактик, видимых невооруженным глазом. Массы спиральных галактик – порядка 10^9 – 10^{12} масс Солнца. Их строение и состав похож на нашу Галактику.



Неправильные галактики не имеют центральных ядер и не обнаруживают закономерностей в своем строении. Жители Южного

полушария Земли могут невооруженным глазом видеть две неправильные галактики – Большое и Малое Магеллановы Облака, являющиеся спутниками нашей Галактики (см. рис.).



Они находятся сравнительно недалеко от нас, на расстоянии всего лишь в полтора раза большем диаметра Галактики. Магеллановы Облака значительно меньше нашей Галактики по массе и размерам. Изучение Магеллановых Облаков позволяет получить ценнейшие сведения о звездах, звездных скоплениях и диффузной материи.

Нередко встречаются и другие виды галактик, которые по своим свойствам отличаются от эллиптических, спиральных и неправильных. Таковы, например, **взаимодействующие галактики**. Они обычно находятся на небольших расстояниях друг от друга, связаны «мостами» из светящейся материи, иногда как бы пронизывают одна другую. На рисунках показаны галактики Антенны



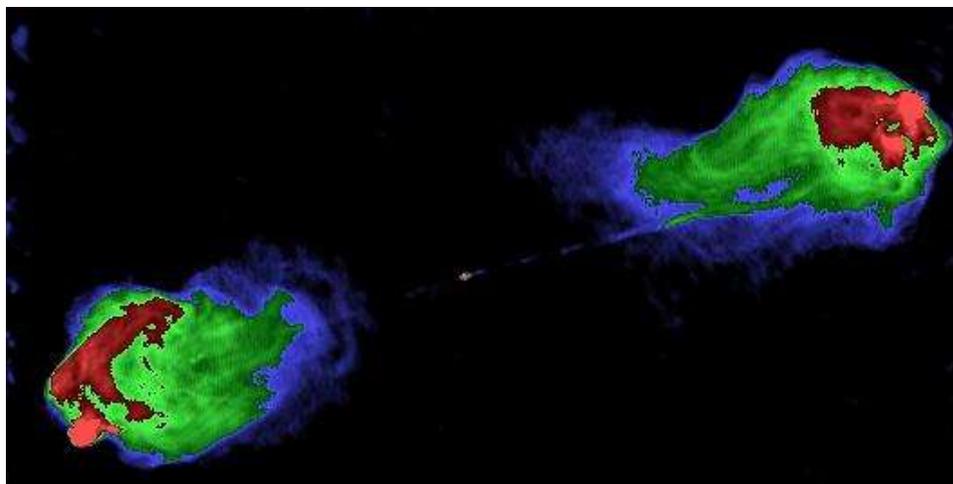
и галактики Мышки (NGC 4676A и NGC 4676B).



Радиогалактики

Некоторые галактики обладают исключительно мощным радиоизлучением, превосходящим видимое излучение. Это радиогалактики. Одна из них находится в созвездии Лебедя (Лебедь А, см. ее изображение в радиодиапазоне). Ее видимая звездная величина – примерно 18^m (будучи столь слабым объектом в оптическом диапазоне, эта галактика даже не была внесена в каталог NGC). Но абсолютная звездная величина галактики Лебедь А, находящейся от нас на расстоянии около 200 Мпк, достигает $-20,5^m$. Это такая же гигантская система, как и наша Галактика. Но, в отличие от нашей и

других «нормальных» галактик, Лебедь А излучает в радиодиапазоне больше энергии, чем в оптическом диапазоне. В Лебеде А видно два ядра, образование которых скорее всего связано с мощным взрывом в центре этой галактики (хотя, возможно, это результат столкновения двух галактик).



Другой известный источник радиоизлучения – шаровая галактика NGC 5128 в созвездии Центавра (см. рис.). На фотографии этой галактики четко выделяются огромные облака темной пылевой материи, которые как бы разделяют галактику на две части.



В одной из ближайших к нам радиогалактик (Дева А; М 87 или NGC 4486) хорошо видна газовая струя, устремленная из ядра (см. рис.). Длина струи достигает нескольких тысяч световых лет, внутри нее заметны отдельные сгущения.

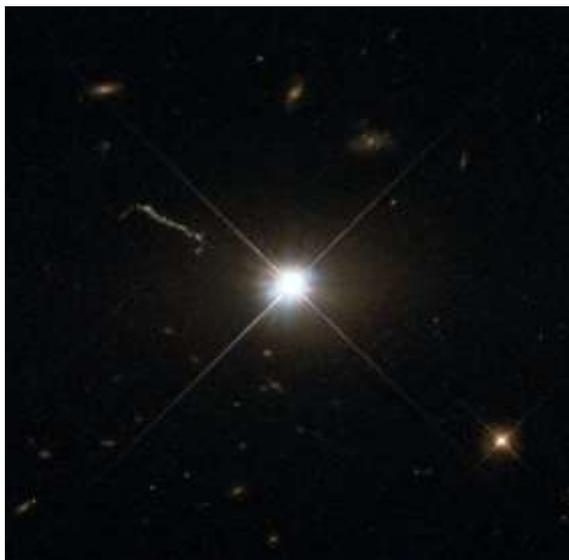


Еще недавно считалось, что самые грандиозные проявления взрывных процессов – вспышки сверхновых. Однако при взрывах в ядрах галактик выделяется во много раз больше энергии. Наблюдаемая активность ядер галактик проявляется в следующих основных формах: непрерывное истечение потоков вещества; выбросы сгустков газа и облаков газа с массой в миллионы солнечных масс; нетепловое (т. е. не связанное с нагреванием) радиоизлучение из околоядерной области; взрывы, превращающие галактику в радиогалактику. Причина активности ядер галактик пока не выяснена. На протяжении многих лет активность ядер галактик в нашей стране исследовали академик В. А. Амбарцумян и его ученики.

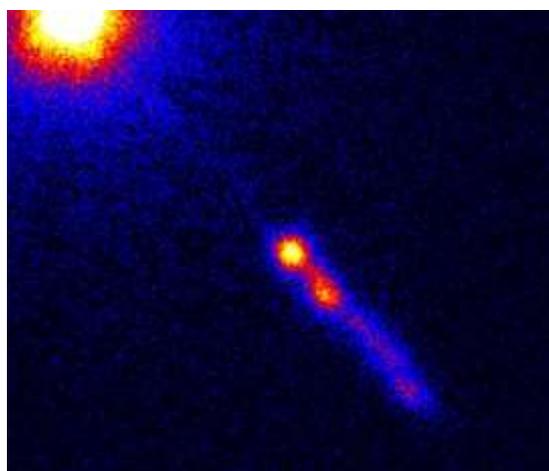
Квazarы

Радионаблюдения привели в 1963 г. к открытию удивительных звездоподобных источников радиоизлучения. Они были названы квазарами. Сейчас их открыто более тысячи. Самый яркий квазар, имеющий обозначение 3C 273 (3C – сокращенное название третьего Кембриджского каталога радиоисточников), виден как звезда $12,6^m$ (см. рис.). В действительности этот квазар, находящийся от нас на расстоянии около 3

млрд. св. лет, излучает больше энергии в оптическом диапазоне, чем самые яркие галактики.



Светимость этого квазара в 500 раз превосходит светимость галактики в Андромеде. В радиодиапазоне мощность излучения 3C 273 сравнима с радиоизлучением Лебедя А. Кроме того, этот квазар оказался одним из самых мощных источников рентгеновского излучения (см. фото 3C 273 в рентгеновском диапазоне). Сравнивая между собой старые фотографии участка звездного неба, полученные в то время, когда эта «слабая звезда» ничем не привлекала к себе внимание, обнаружили, что блеск квазара не оставался постоянным. Это позволило оценить размеры квазара. Они не превышают одного светового года. Следовательно, квазар, по крайней мере, больше обычных звезд, но гораздо меньше, например, нашей Галактики.



Квazarы не похожи на обычные звезды и своими массами. Вычисления показывают, что массы квазаров достигают многих миллионов солнечных масс. Чтобы вызвать и длительное время поддерживать сверхмощное излучение квазаров, требуется энергия, которую не может обеспечить ни один из известных ныне источников, включая термоядерный синтез. Свет и радиоизлучение от самых далеких из известных ныне квазаров идет к нам более 10 млрд. лет. Скорее всего квазары – это исключительно активные ядра очень далеких галактик.

Расстояния до ближайших галактик определяются по оценкам видимых звездных величин цефеид. Для галактик, где не обнаружены цефеиды или их невозможно увидеть, в качестве индикаторов расстояний используют ярчайшие звезды-сверхгиганты, новые и сверхновые звезды, шаровые звездные скопления. Расстояния до далёких галактик определяют также по их угловым размерам или по видимой звездной величине, а до очень далёких галактик - исключительно по величине красного смещения в их спектре.

Структура, происхождение и эволюция Вселенной

Крупномасштабная структура Вселенной

Галактики, подобно звездам, наблюдаются группами. Например, нашу Галактику, Магеллановы Облака и еще около 20 небольших спутников нашей Галактики можно рассматривать как кратную систему. Кратной оказалась и Туманность Андромеды, окруженная несколькими эллиптическими галактиками-спутниками.

Наша Галактика и Туманность Андромеды входят в Местную группу (систему) галактик, размеры которой достигают сотен тысяч парсек. Местная группа представляет собой сравнительно небольшую систему, так как существуют скопления, содержащие сотни и тысячи галактик.

Ближайшее к нам скопление галактик находится в созвездии Девы и насчитывает сотни крупных галактик. Расстояние до него порядка 20 Мпк,

это система диаметром более 6 Мпк. Крупные скопления галактик находятся в созвездиях Волосы Вероники, Северная Корона, Геркулес и др. (см. рис.).

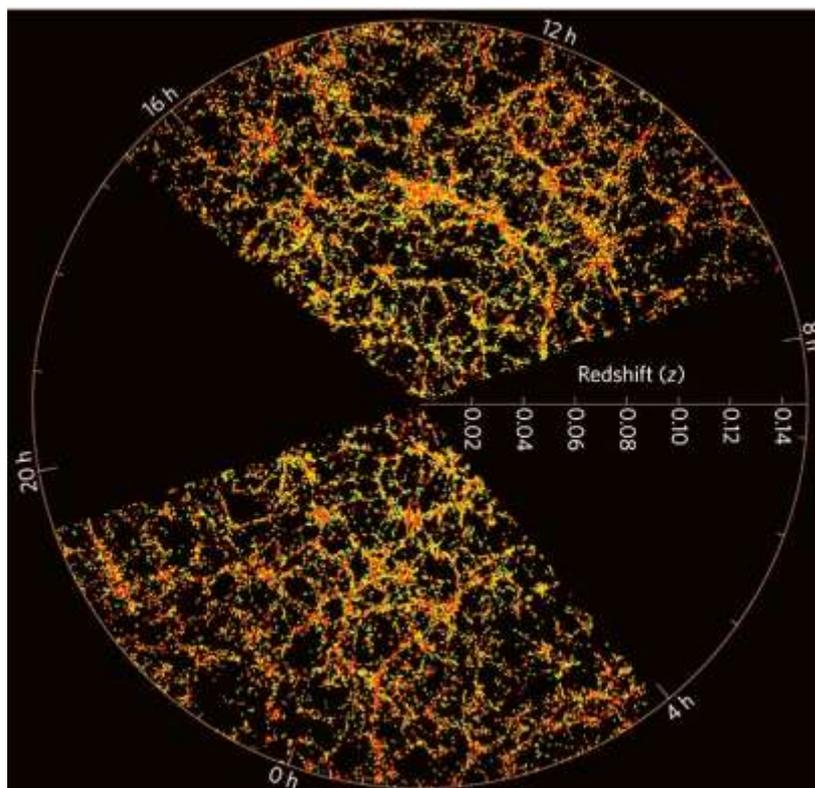


Не входят ли скопления в состав еще больших систем?

Данные внегалактической астрономии указывают на то, что, возможно, существует Местное сверхскопление галактик, насчитывающее примерно 10 тыс. галактик и имеющее диаметр около 50 Мпк. В его центре расположено скопление галактик в созвездии Девы. Открыто несколько десятков других сверхскоплений (два ближайших находятся от нас на расстоянии 100 Мпк). Таким образом, Вселенной на самых разных уровнях присуща структурность: от ядер атомов до гигантских сверхскоплений галактик.

В конце 70-х гг. XX в. астрономы обнаружили, что галактики в сверхскоплениях распределены не равномерно, а сосредоточены вблизи границ ячеек, внутри которых галактик почти нет. Теоретики предвидели возможность такого распределения галактик, а потому открытие не было неожиданным. Следовательно, согласно современным представлениям, для Вселенной характерна ячеистая (иногда говорят сетчатая, или пористая)

структура, которую можно видеть на специально обработанных фотографиях участков звездного неба. Она напоминает «паутинную сетку» (см. рис.).

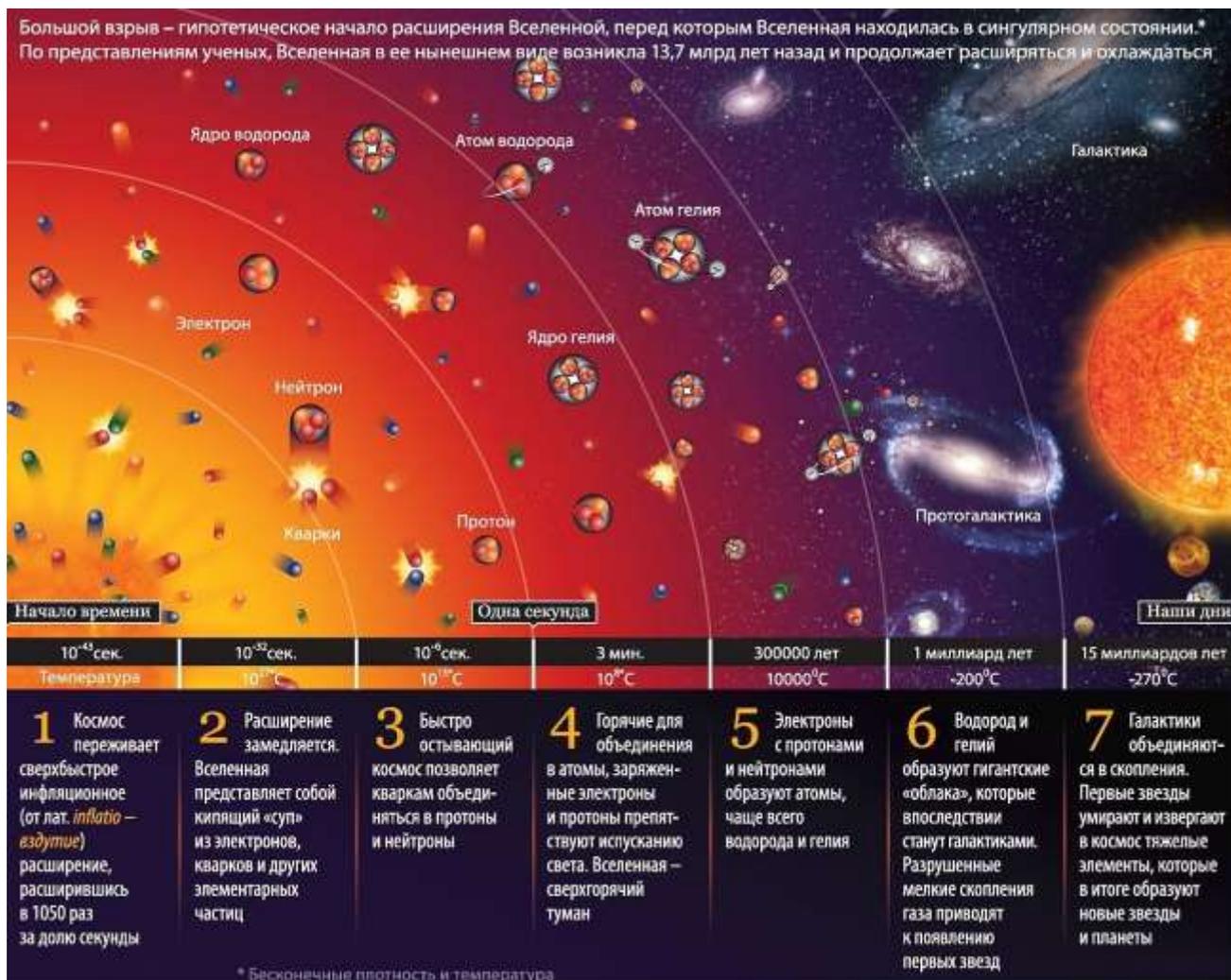


В свете этих открытий пространственной моделью структуры Вселенной может служить кусок пемзы. В целом она однородна, хотя в небольших выделенных объемах пемза неоднородна (в ней есть вещество и пузырьки воздуха). Так и во Вселенной: в небольших масштабах, например в масштабах Солнечной системы или Галактики, вещество распределено явно неравномерно, но в масштабах сверхскоплений галактик вещество распределено практически равномерно. **Итак, в крупномасштабной структуре Вселенной не существует каких-либо особых, чем-то выделяющихся мест или направлений, поэтому в больших масштабах Вселенную можно считать не только однородной, но и изотропной.**

Возникновение Вселенной

Согласно современным взглядам вначале Вселенная была точкой, т. е. вся материя Вселенной была сконцентрирована внутри ничтожно малого объема бесконечно большой температуры и давления. До момента начала

расширения или Большого Взрыва не было ничего, ни времени, ни пространства, ни вещества. История Вселенной начинается с 10^{-43} с после момента «ноль» – момента взрыва чудовищной силы, который является датой рождения Вселенной (см. рис).



В момент возникновения радиус Вселенной составляет 10^{-35} м, плотность 10^{101} кг/м³ и температура 10^{30} К. Естественно, что при таких условиях ничего похожего на наш мир не было. В частности, элементарные частицы в это время не имели массы. Материя в момент возникновения Вселенной была в состоянии физического вакуума. В отличие от обычной материи (состоящей из элементарных частиц) в физическом вакууме имеются гравитационные силы отталкивания.

Сразу же после возникновения Вселенная под действием этих сил начинает расширяться. Причем это расширение происходит с огромной

скоростью: уже к моменту $t=10^{-35}$ с после начала размеры Вселенной увеличиваются примерно в $10^{300000000}$ раз (это невероятное число означает единицу с тремястами миллионами нулей) (см. рис.). Такая скорость расширения не противоречит принципу максимальной скорости света, поскольку эта скорость относится к расширению пространства, а не к движению в пространстве «реальных» частиц.



Плотность материи во Вселенной не изменяется, температура падает и тогда, когда достигает некоторого предела; вакуум распадается, в нем возникают элементарные частицы и античастицы. Это начало формирования той Вселенной, в которой мы живем.

Эволюция стандартной Вселенной

В период времени от 10^{-35} до 10^{-8} с важных событий не происходит, а к моменту времени 10^{-8} с появляются протоны и антипротоны. Плотность вещества к этому моменту падает до 10^{-8} кг/м³, а температура – до 10^{13} К. К моменту времени 10^{-6} с температура падает до 10^{10} К, и в процессе столкновений уже не могут возникать частицы и античастицы. В дальнейшем в реакциях аннигиляции исчезают все античастицы. При этом оказывается, что частиц было несколько больше. На 1 000 000 000 античастиц (антипротонов и позитронов) приходилось 1 000 000 001 частица (протонов и электронов). В результате сейчас наш мир состоит из протонов и электронов,

а не из антипротонов и позитронов. Причина таится в особенностях процессов, происходивших в период времени до 10^{-35} с.

Примерно в течение времени от 1 до 300 с происходят ядерные реакции слияния протонов и нейтронов, в результате чего образуются дейтерий, гелий и литий. Количество образовавшихся дейтерия и гелия зависит от плотности вещества в момент их образования, а значит, и от средней плотности вещества в настоящий момент. Расчет показывает, что доля гелия по весу должна составлять от 25 до 30%. Это хорошо согласуется с современными значениями. Более тяжелые элементы образовались в звездах.

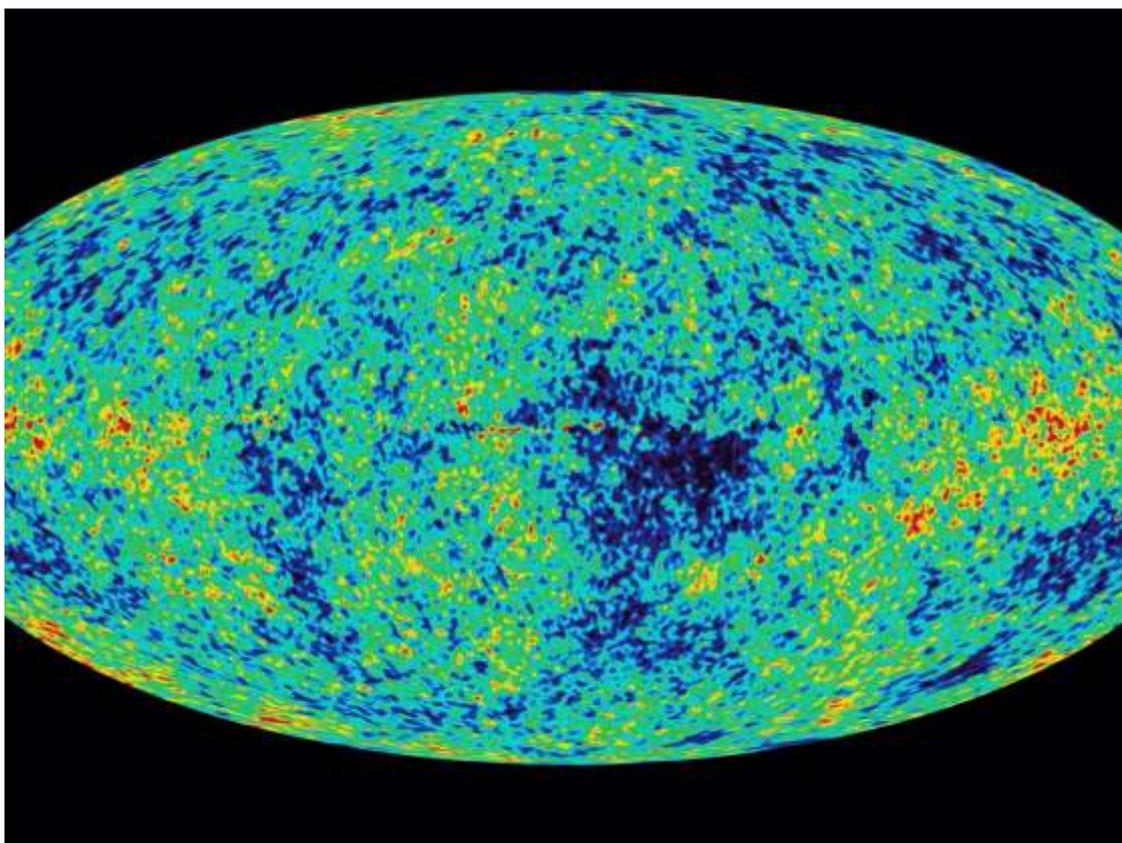
Возникновение реликтового излучения

В следующий миллион лет продолжается расширение Вселенной, сопровождающееся постепенным уменьшением температуры. Первое время температура достаточно высока, чтобы газ оставался ионизованным (плазмой) (см. рис.). Но ионизованный газ сильно взаимодействует с излучением, и их температуры остаются равными. Но как только температура во Вселенной падает до 4000 К, а это происходит примерно через миллион лет после начала расширения, начинается рекомбинация атомов и излучение «отрывается» от вещества. С этого момента излучение и вещество ведут себя по-разному.



Излучение, возникшее в тот момент, когда температура понизилась до 4000 К (его назвали реликтовым излучением), приходит к нам в настоящее время из областей, удаленных на многие миллиарды световых лет. Это излучение было открыто в 1965 г. Как и ожидалось, оно приходит к нам со всех направлений с почти одинаковой интенсивностью, т. е. вещество в момент отрыва излучения было действительно в высокой степени однородно.

На рисунке представлена карта реликтового излучения на небесной сфере. Вариации интенсивности (яркости) реликтового излучения по небу не превышают одной сотой доли процента, но их наличие указывает на едва заметные неоднородности в распределении вещества, которые существовали на ранней стадии эволюции Вселенной и послужили зародышами галактик и их скоплений.



Таким образом, теория образования Вселенной подтверждается двумя проверяемыми следствиями: реликтовым излучением и современным химическим составом.

Возникновение галактик

Рекомбинация водорода и гелия приводит к тому, что излучение и вещество практически перестают взаимодействовать, давление света исчезает и равновесие вещества определяется в дальнейшем только газовым давлением. Поскольку это давление невелико, оно уже неспособно противодействовать гравитации. Вещество фрагментирует на объекты массой примерно $10^{15} M_{\odot}$, что соответствует массе скопления галактик.

Галактика образуется как огромный газовый шар, диаметр которого лишь незначительно превышает диаметр будущей галактики. Движения газа в нем хаотические, т. е. облака газа заполняют весь объем шара, двигаясь главным образом в радиальных направлениях. Весь шар вращается как целое. Сразу после возникновения протогалактики в ней начинается бурный процесс звездообразования, причем в основном образуются звезды большой массы. Быстро эволюционируя, они взрываются как сверхновые и обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами.

На протяжении всего времени эволюции в галактике идет процесс обогащения межзвездного газа элементами тяжелее гелия. Различия химического состава, точнее доля тяжелых элементов, позволяют определить последовательность появления различных групп звезд (населений) в галактике.

Сравнительно недавно с помощью космического телескопа Хаббла были получены фотографии «глубокого космоса» - областей, удаленных от нас на 10 - 12 млрд. св. лет. Мы видим эти области такими, какими они были в период формирования галактик. Поражает обилие небольших объектов. В то время расстояния между галактиками были примерно в 2 раза меньше, чем сейчас. Но наблюдаемые объекты намного меньше, чем теперешние галактики. Пока остается непонятным, что мы видим: области бурного образования звезд в одной галактике или небольшие вновь образовавшиеся галактики, которые затем сольются в отдельные гигантские звездные системы.

Эволюция галактик

Итак, на первой стадии существования галактики в ней образуются первые звезды и газовые облака. Дальнейшая «судьба» галактики зависит от ее массы и вращения. Галактика малой массы, как правило, не формирует ясно видимой структуры. Процесс звездообразования в ней сильно затянут, о чем свидетельствует большое количество молодых голубых звезд. Образовавшиеся в галактике звезды сохраняют движение тех газовых облаков, в которых они образовались, так как столкновения и близкие сближения звезд очень редки. Поэтому если галактика изначально вращалась медленно, то звезды сохраняют хаотические движения главным образом в радиальных направлениях. Газовые же облака часто сталкиваются между собой. Их хаотические скорости гасятся, и газ смещается к центру галактики.

Вид галактики, определяемый звездами, будет мало отличаться от шара с сильной концентрацией звезд к центру, т. е. формируется эллиптическая галактика. Концентрирующийся к центру газ не только увеличивает концентрацию звезд к центру (процесс звездообразования не прекращается), но, по-видимому, приводит к образованию сверхмассивной черной дыры в ее центре. Взаимодействие черной дыры и газа, падающего к центру, определяет активность галактики.

В быстровращающейся галактике звезды первого поколения образуют сферическую составляющую. Хотя в такой галактике столкновения газовых облаков происходят не менее часто, чем в медленно вращающейся, газ не может сконцентрироваться к центру, ибо этому мешают центробежные силы. В результате газ будет концентрироваться в галактической плоскости.

Внешние возмущения приведут к тому, что в галактической плоскости возникнут волны плотности. Именно в них идет процесс звездообразования. Возникающие молодые массивные звезды и светящиеся под действием их излучения облака водорода образуют известный рисунок спиральной галактики.

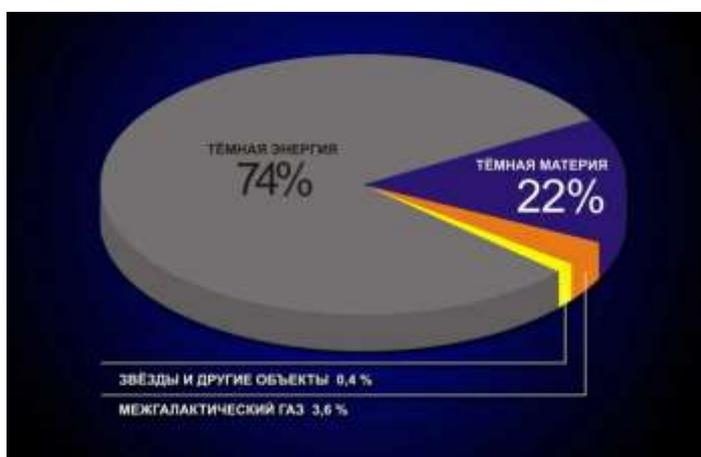
Расстояния до ближайших галактик определяются по оценкам видимых звёздных величин цефеид. Для галактик, где не обнаружены цефеиды или их невозможно увидеть, в качестве индикаторов расстояний используют ярчайшие звёзды-сверхгиганты, новые и сверхновые звёзды, шаровые звёздные скопления. Расстояния до далёких галактик определяют также по их угловым размерам или по видимой звёздной величине, а до очень далёких галактик - исключительно по величине красного смещения в их спектре.

Темная материя и темная энергия

Исследуя собственное вращение галактик, астрономы обратили внимание на то, что скорости звезд, расположенных на периферии галактик, и скорости спутников галактик заметно выше той, которую они имели бы, если бы всё вещество галактики было сосредоточено в звёздах, газе и пыли.

Наблюдения указывают на то, что в галактиках имеется не излучающая свет *тёмная материя*, которая по массе в несколько раз превышает суммарную массу всех звёзд. Это несветящееся вещество не участвует в электромагнитном взаимодействии, слабо проявляется в ядерном и слабом взаимодействиях, поэтому оно себя не обнаруживает. В основном оно участвует в гравитационном взаимодействии.

Природа этой материи пока не ясна, но она вносит основной вклад в массу галактик. Поэтому ранее приведенное значение средней плотности Вселенной нужно увеличить почти в три раза.



Делать выводы о бесконечном расширении Вселенной пока преждевременно, так как ряд наблюдений указывают на существование во Вселенной более экзотической по свойствам материи, которая получила название *темной энергии*. По своей массе она превышает все другие формы материи (см. рис. выше) и вносит основной вклад в расширение Вселенной (см. рис.).

Проявление тёмной энергии было обнаружено по наблюдениям вспышек сверхновых звёзд в очень далёких галактиках. Удалось независимо от метода измерения расстояния по красному смещению линий в спектрах далёких галактик и закону Хаббла определять расстояние до них. Оказалось, что это расстояние больше, чем даст закон Хаббла. Отсюда следовало, что на таких расстояниях расширение происходит с ускорением, т. е. во Вселенной проявляется новая сила отталкивания, которая является определяющей в больших масштабах, а на малых расстояниях ею можно пренебречь. Природа тёмной энергии и связанная с ней сила отталкивания пока не известны. Так что, по мнению учёных, средняя плотность Вселенной равна критической плотности и основной вклад в неё вносит тёмная энергия.



Свойство тёмной энергии совершенно необычное, она проявляет себя только в гравитационном взаимодействии и не участвует в слабом, ядерном и электромагнитном взаимодействиях. Она проявляет себя как сила отталкивания, пропорциональная расстоянию между телами. Плотность тёмной энергии постоянна во времени. Так как по мере расширения объём Вселенной увеличивается, то плотность обычной и тёмной материи уменьшается (масса этих видов материи не меняется). Поэтому, начиная с определенного момента времени, масса тёмной энергии будет превышать массу остальных видов материи и она будет оказывать основное влияние на гравитацию Вселенной. Наблюдения показали, что ускоренное расширение показывают галактики, которые находятся на расстоянии около 6 млрд. св. лет от нас. Это означает, что темная материя и энергия стала преобладать над обычной материей, когда возраст Вселенной был около 7 млрд. лет.

Контрольные вопросы к лекции:

1. Как определяют расстояния до галактик?
2. На какие основные типы можно разделить галактики по их внешнему виду и форме?
3. Чем различаются по составу и структуре спиральные и эллиптические галактики?
4. Чем объясняется «красное смещение» в спектрах галактик?
5. Какие внегалактические источники радиоизлучения известны в настоящее время?
6. Что является источником радиоизлучения в радиогалактиках?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Астрономия: учебник для студентов профессионального образования / Е.В. Алексеева, П.М. Скворцов, Т.С. Фещенко, Л.А. Шестакова; под ред. Т.С. Фещенко. – 4-е изд., стер. – Москва: Академия, 2019. – 256 с. – ISBN 9785446887767. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/416929/>. – Текст: электронный.
2. Астрономия: учебное пособие для среднего профессионального образования / А. В. Коломиец [и др.]; ответственный редактор А. В. Коломиец, А. А. Сафонов. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 293 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-08243-2. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/429393> (дата обращения: 30.01.2020).
3. Язев, С. А. Астрономия. Солнечная система: учебное пособие для среднего профессионального образования / С. А. Язев; под научной редакцией В. Г. Сурдина. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 336 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-08245-6. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/442005> (дата обращения: 30.01.2020).

Дополнительная литература

1. Измиран [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.izmiran.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.
2. Моя астрономия [Электронный ресурс] / Н. Е. Шатовская. – Режим доступа: <http://www.myastronomy.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Космический Мир [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmoworld.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Астрономическое общество [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sai.msu.su/EAAS>
5. Гомулина Н. Н. Открытая астрономия / под ред. В. Г. Сурдина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.college.ru/astronomy/course/content/index.htm>
6. Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sai.msu.ru>
7. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.izmiran.ru>
8. Новости космоса, астрономии и космонавтики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronews.ru/>
9. Общероссийский астрономический портал. Астрономия РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xn--80aqldeblhj0l.xn--p1ai/>

10. Российская астрономическая сеть. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru>

11. Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия «Энциклопедия Кругосвет» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.krugosvet.ru>

12. Энциклопедия «Космонавтика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmoworld.ru/spaceencyclopedia>

<http://www.astro.websib.ru/>

<http://www.myastronomy.ru>

<http://class-fizika.narod.ru>

<https://sites.google.com/site/astronomlevitan/plakaty>

<http://earth-and-universe.narod.ru/index.html>

<http://catalog.prosv.ru/item/28633>

<http://www.planetarium-moscow.ru/>

<https://sites.google.com/site/auastro2/levitan>

<http://www.gomulina.orc.ru/>

<http://www.myastronomy.ru/>