



В.М. Чаругин

АСТРОНОМИЯ

10.11

БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ



В.М. Чаругин

АСТРОНОМИЯ

10·11 классы

Базовый уровень

Учебник
для общеобразовательных
организаций

*Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации*

6-е издание, стереотипное

Москва
«Просвещение»
2022

УДК 373:52+52(075.3)

ББК 22.6я721

Ч-23

Серия «Сферы» основана в 2003 году

Линия учебно-методических комплексов «Сферы» по астрономии

На учебник получены **положительные** заключения **научной** (заключение РАО № 1436 от 12.01.17), **педагогической** (заключение РАО № 1450 от 12.01.17) и **общественной** (заключение РКС № 652-ОЭ от 13.01.17) экспертиз.

Издание выходит в pdf-формате.

Чаругин, Виктор Максимович.

Ч-23 Астрономия : 10—11-е классы : базовый уровень : учебник : издание в pdf-формате / В. М. Чаругин. — 6-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 144 с. : ил. — (Сферы).

ISBN 978-5-09-101648-2 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-087655-1 (печ. изд.).

Данный учебник представляет линию учебно-методических комплексов «Сферы» по астрономии. Издание подготовлено в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта и освещает вопросы курса астрономии для 10—11 классов. Содержание курса отвечает таким критериям изложения материала, как научность и доступность. Учебное содержание направлено на формирование научных представлений об астрономических и физических законах, явлениях и основывается на достижениях современной астрономии и космологии. Реализовано практическое применение астрономии в реальной жизни. Усилена межпредметная интеграция: тесная связь астрономии с физикой. Главными особенностями данного учебника являются фиксированный в тематических разворотах формат, лаконичность и жёсткая структурированность текста, разнообразный иллюстративный ряд.

УДК 373:52+52(075.3)

ББК 22.6я721

Учебное издание

Серия «Сферы»

Чаругин Виктор Максимович

Астрономия

10—11 классы

Базовый уровень

Учебник

Редакция физики

Ответственный за выпуск *Н.Н. Гриценко*. Художественный редактор *С.Г. Куркина*.

Фотобанки: «Легион медиа», «Россия сегодня», «Diomedia», «Fotolia», «Shutterstock».

Компьютерная вёрстка *Э.В. Ленчевской, Д.Ю. Герасимова*.

Художественное оформление *О.В. Поповича, С.В. Ермолина, Э.В. Ленчевской, С.Г. Куркиной*.

Дизайн обложки *О.В. Поповича*. Технический редактор *Л.В. Марухно*. Корректор *Д.А. Белитов*

Подписано в печать 30.07.2021. Формат 84×108^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookCSanPin. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 13,55. Тираж экз. Заказ № .

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».

Российская Федерация, 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, этаж 4, помещение I.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — vopros@pros.ru.

ISBN 978-5-09-101648-2 (электр. изд.)

ISBN 978-5-09-087655-1 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2018

© Художественное оформление.

АО «Издательство «Просвещение», 2018

Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
----------------	---

Работаем с учебником	6
----------------------------	---

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

1. Структура и масштабы Вселенной	8
2. Далёкие глубины Вселенной	12
Подведём итоги	14

Глава 2. АСТРОМЕТРИЯ

3. Звёздное небо	16
4. Небесные координаты	20
5. Видимое движение планет и Солнца	22
6. Движение Луны и затмения	24
7. Время и календарь	28
Подведём итоги	32

Глава 3. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

8. Система мира	34
9. Законы движения планет	40
10. Космические скорости	44
11. Межпланетные полёты	46
Подведём итоги	48

Глава 4. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

12. Современные представления о Солнечной системе	50
13. Планета Земля	52
14. Луна и её влияние на Землю	56
15. Планеты земной группы	60
16. Планеты-гиганты. Планеты-карлики	64
17. Малые тела Солнечной системы	68
18. Современные представления о происхождении Солнечной системы	72
Подведём итоги	74

Глава 5. АСТРОФИЗИКА И ЗВЁЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

19. Методы астрофизических исследований	76
20. Солнце	80
21. Внутреннее строение и источник энергии Солнца	86
22. Основные характеристики звёзд	91
23. Внутреннее строение звёзд	94
24. Белые карлики, нейтронные звёзды, пульсары и чёрные дыры	95
25. Двойные, кратные и переменные звёзды	98
26. Новые и сверхновые звёзды	100
27. Эволюция звёзд	103
Подведём итоги	106

Глава 6. МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ — НАША ГАЛАКТИКА

28. Газ и пыль в галактике	108
29. Рассеянные и шаровые звёздные скопления	110
30. Сверхмассивная чёрная дыра в центре Галактики	112
Подведём итоги	114

Глава 7. ГАЛАКТИКИ

31. Классификация галактик	116
32. Активные галактики и квазары	120
33. Скопления галактик	122
Подведём итоги	124

Глава 8. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

34. Конечность и бесконечность Вселенной — парадоксы классической космологии	126
35. Расширяющаяся Вселенная	128
36. Модель горячей Вселенной и реликтовое излучение	132
Подведём итоги	134

Глава 9. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОНОМИИ

37. Ускоренное расширение Вселенной и тёмная энергия	136
38. Обнаружение планет около других звёзд	138
39. Поиск жизни и разума во Вселенной	140
Подведём итоги	142

Ответы и решения	143
------------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Вы приступаете к изучению одной из древнейших наук — астрономии. Астрономия изучалась в академии Платона в IV в. до н. э. В античные времена её приравнивали к одному из видов искусств, и богиня Урания покровительствовала ей. В Средние века астрономию включили в число предметов факультета свободных искусств всех университетов. В эпоху Просвещения энциклопедисты XVIII в. включили астрономию в число обязательных наук, которые должны изучать молодые люди — будущие члены общества.

В настоящее время развитие цивилизации определяется в том числе астрономическими исследованиями, так как они позволяют нам прикоснуться к тайнам Вселенной. А «ощущение тайны — самое прекрасное из доступных нам переживаний. Именно это чувство стоит у колыбели истинного искусства и настоящей науки...» (А. Эйнштейн).

В предлагаемом учебнике астрономии вы познакомитесь с описанием вида звёздного неба, с природой планет и звёзд, строением Солнечной системы, Млечного Пути, галактик, их распределением в пространстве и строением Вселенной в целом. Изучите, как астрономы определяют расстояние до звёзд и галактик, их размеры, массу, температуру, химический состав. Познаете, как небесные тела возникают, живут и умирают, как эволюционирует Вселенная во времени. Вы познакомитесь с новейшими достижениями астрономии, современными крупными наземными и космическими телескопами, которые используют для наблюдений самых далёких и необычных небесных тел: квазаров, пульсаров, нейтронных звёзд и чёрных дыр. Узнаете о возникновении и развитии совершенно новых методов астрономических наблюдений — нейтринной и гравитационно-волновой астрономии. Увидите, как астрономы на основе законов небесной механики рассчитывают орбиты космических аппаратов, искусственных спутников Земли и планет.

Вы сможете почувствовать, как современная астрономия делает фундаментальные открытия, которые существенно меняют наши представления об окружающем мире. К таким открытиям, несомненно, относится открытие ускоренного расширения Вселенной, наличия тёмной материи, тёмной энергии и всемирной силы отталкивания, природа которых пока не понятна.

В материале учебника рассматриваются наблюдения и эксперименты, связанные с одной из важнейших мировоззренческих проблем существования жизни во Вселенной и связи с внеземными цивилизациями.

Основной метод исследования в астрономии — наблюдение. Если в вашем распоряжении окажется бинокль или телескоп, проводите самостоятельные наблюдения. Это поможет вам заглянуть в космические дали и увидеть недоступные небесные тела.

Желаем вам успеха!

Это интересно

МОИ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Теории, гипотезы, факты...

ВНИМАНИЕ!

РАБОТАЕМ С УЧЕБНИКОМ

Материал учебника включает девять тем, каждая из которых разделена на параграфы. Перед каждой темой в рубрике «Знаете ли вы, что...» приведены интересные данные, которые отражают суть содержания темы.

Параграф начинается с вводных рубрик «Вы узнаете...», «Вспомните...». Рубрика «Вы узнаете...» познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика «Вспомните...» подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, для того чтобы усвоить новый.

Основной текст параграфа сопровождают рубрики, которые помогут вам глубже понять наиболее важный материал.

Рубрика «Мои астрономические исследования» поможет вам научиться самостоятельно проводить астрономические наблюдения.

Рубрика «Это интересно» содержит интересные сведения и дополнительную информацию к основному тексту параграфа.

Рубрика «Теории, гипотезы, факты...» дополняет текст параграфа примерами различных предположений и утверждений по данной тематике.

Законы и формулы параграфа выделены в рубрике «Внимание!».

Рубрика «Решение задач» содержит задачи для самостоятельного решения.

Завершают параграф рубрики «Вырази своё мнение» и «Вопросы и задания», которые помогут вам проверить свои знания по теме параграфа.

На последней странице каждой главы содержатся рубрики «Подведём итоги», «Астрономический кружок», а также ссылки на дополнительные источники информации.

В рубрике «Подведём итоги» приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе.

Вопросы и задания, содержащиеся в рубрике «Астрономический кружок», носят проблемный характер и требуют совместных решений.

Ссылки на интернет-ресурсы и литературу позволят привлечь дополнительные источники информации при изучении темы.

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

■ СТРУКТУРА И МАСШТАБЫ
ВСЕЛЕННОЙ

■ ДАЛЁКИЕ ГЛУБИНЫ
ВСЕЛЕННОЙ

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Число звёзд в нашей Галактике Млечный Путь примерно 200 млрд. Вокруг многих из них вращаются планеты, и на некоторых, возможно, есть жизнь. Во Вселенной существует более чем 100 млрд крупных галактик, и в каждой столько звёзд, как в Млечном Пути или даже больше! Посмотрите, как огромна Вселенная! Ведь в ней $2 \cdot 10^{22}$ звёзд, а это 20 000 000 000 000 000 000 000!

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что изучает астрономия.
- Каковы методы изучения Вселенной.
- Каковы современные представления о Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие вы знаете небесные тела?
- Как называется наша Галактика?

1 Световой год (св. г.) — путь, который свет проходит за один год. Если скорость света c — максимальная скорость, известная в природе, равна 300 000 км/с, а число секунд в году

$$t = 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 31\,560\,000 \text{ с},$$

$$\text{то } 1 \text{ св. г.} = c \cdot t = 9,47 \cdot 10^{12} \text{ км.}$$

Туманность Андромеды



СТРУКТУРА И МАСШТАБЫ ВСЕЛЕННОЙ

Изучение движения Солнца, Луны, звёзд и других небесных тел играло важную роль в развитии всех цивилизаций на Земле, начиная с самых древних времён.

НАУКА АСТРОНОМИЯ

Наука о небесных телах получила название **астрономия** (от древнегреч. слов *астрон* — звезда и *номос* — закон). Она изучает их видимые и действительные движения и законы, определяющие эти движения; форму, размер, массу и рельеф поверхности; природу и физическое состояние небесных тел; взаимодействие между ними, их эволюцию — вероятную прошлую историю и будущее развитие. Астрономы изучают не только отдельные небесные тела, объектом их исследований является вся Вселенная в целом.

ИЗУЧЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Самые крупные из существующих наземных и космических телескопов «заглядывают» в космическое пространство на расстояния свыше десятка миллиардов световых лет. Это означает, что лучам света, излучённым самыми далёкими галактиками и квазарами, требуется свыше десятка миллиардов лет, чтобы дойти до Земли.

Внутри этой, доступной для наблюдений, части Вселенной имеется около двух триллионов небольших галактик и около ста миллиардов галактик, похожих на нашу Галактику, или на гигантскую спиральную галактику M31, так называемую Туманность Андромеды, или на гигантскую эллиптическую галактику M49 в созвездии Девы. Каждая галактика содержит десятки и сотни миллиардов звёзд, похожих на наше Солнце. Таким образом, полное число звёзд в наблюдаемой части Вселенной составляет порядка 10^{22} .

Полную массу вещества, заключённого в этих звёздах, можно рассчитать, умножив это число на массу Солнца.

Масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг, поэтому масса всех звёзд в видимой части Вселенной составляет примерно $2 \cdot 10^{52}$ кг. Огромная величина!

Несмотря на большое значение массы звёзд, главное свойство видимой Вселенной — пустота. Действительно, если мы посмотрим в безлунную ночь на небо, то в лучшем случае сможем насчитать около 2—3 тыс. звёзд, рассеянных по небу Северного полушария. С учё-

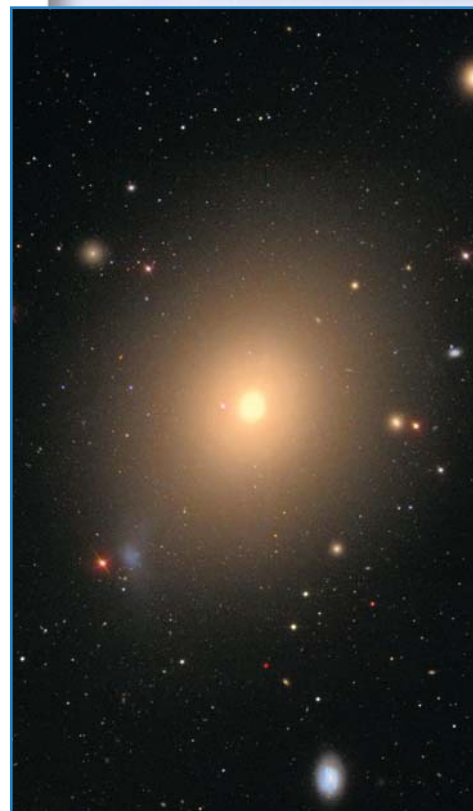
том звёзд Южного полушария это составит всего около 4—6 тыс. звёзд. В небольшой школьный телескоп мы смогли бы насчитать около 20—25 тыс. звёзд на небе. При фотографировании неба самыми мощными телескопами удаётся зафиксировать до 10 млрд звёзд. Практически все они принадлежат нашей Галактике, которой ещё в древности дали название *Млечный Путь*. Неярких звёзд настолько много и расположены они так близко друг к другу, что, концентрируясь в узкую полосу, вытянувшуюся через всё небо, сливаются в сплошную серебристую полосу Млечного Пути. Складывается впечатление, что небо здесь вплотную заполнено звёздами и между ними нет пустого пространства.

Это впечатление обманчиво. Астрономы измерили расстояние до многих звёзд. Так, расстояние до ближайшей к нам звезды Проксимы Центавра составляет 4,2 св.г. (от греч. *проксима* — ближайшая). Она действительно ближайшая к нам из трёх звёзд звёздной системы α Центавра. Значение «несколько световых лет» характеризует среднее расстояние между звёздами в Млечном Пути. Чтобы почувствовать эти величины, представьте себе Млечный Путь, состоящий из капель вместо звёзд, тогда расстояние между каплями будет примерно 50—100 км, т.е. Млечный Путь представляет собой практически пустоту с вкраплениями звёзд.

Если принять, что среднее расстояние между галактиками сравнимо с расстоянием до ближайшей к нам галактики М31 (Туманность Андромеды), составляющим около 2,5 млн св. лет, то межгалактическое пространство оказывается ещё более пустым.

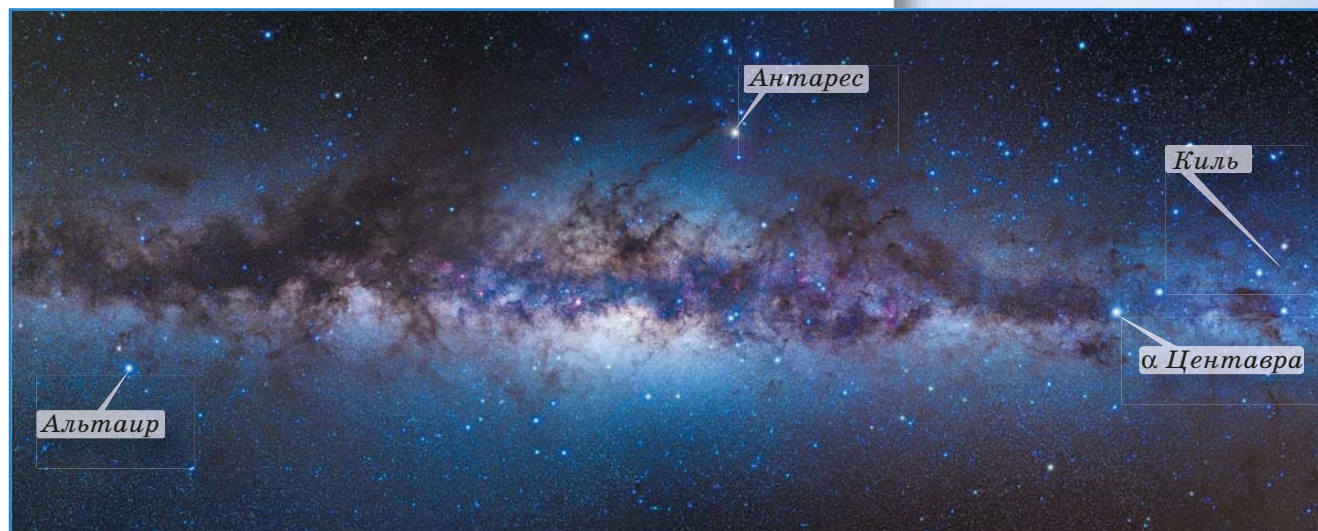
Теперь мы можем оценить среднюю плотность вещества в видимой Вселенной.

Если представить видимую Вселенную в виде куба с длиной ребра около 10 млрд св. лет и соответственно объёмом $8,46 \cdot 10^{77} \text{ м}^3$ и массой около $2 \cdot 10^{52} \text{ кг}$, то средняя плотность будет равна $2,4 \cdot 10^{-26} \text{ кг/м}^3$.



Эллиптическая галактика М49 в созвездии Девы

Часть Млечного Пути от созвездия Орла до созвездия Кита





Газопылевые туманности
Северная Америка, Пеликан
и пылевая туманность
Мексиканский залив



Рассеянное скопление звёзд
Плеяды, погружённое
в отражающие свет облака
газа и пыли



Шаровое скопление звёзд M13
в созвездии Геркулеса

Такую маленькую плотность трудно себе представить. Так как вещество Вселенной состоит в основном из водорода, то по полученному значению плотности легко оценить среднюю концентрацию атомов водорода во Вселенной: она равна средней плотности, делённой на массу атома водорода. Масса атома водорода $m_H = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, следовательно, искомая концентрация

$$n = \frac{\rho}{m_H} = \frac{2,4 \cdot 10^{-26}}{1,66 \cdot 10^{-27}} = 14,4 \text{ ат./м}^3,$$

т. е. чуть больше 10 атомов в 1 м^3 .

Наряду со звёздами и планетами во Вселенной имеются газ и пыль, которые в основном сосредоточены в галактиках. Масса газа и пыли в галактиках почти в 100 раз меньше, чем масса материи в звёздах. Если разреженный газ, расположенный вблизи горячих звёзд, может наблюдаться в виде светящейся газовой туманности (как, например, туманности *Северная Америка* и *Пеликан*), то облака пыли наблюдаются в виде тёмных, поглощающих свет далёких звёзд, туманностей. Примером пылевой туманности может служить туманность *Мексиканский Залив*, которая расположена рядом с туманностями *Северная Америка* и *Пеликан*.

Пылевые облака, расположенные рядом с яркими звёздами, могут, как плохие зеркала, отражать свет звёзд и часто наблюдаются как отражательные туманности. Примером подобных объектов могут служить отражательные туманности вокруг ярких звёзд в звёздном скоплении *Плеяды*. Скопление Плеяды относится к рассеянному звёздному скоплению. В нём насчитывается более 1000 звёзд, расстояние до него около 400 св. лет.

Шаровые звёздные скопления имеют правильную шарообразную форму, например шаровое скопление M13 в созвездии Геркулеса. Это скопление имеет диаметр около 170 св. лет и содержит около 300 тыс. звёзд. Луч света идёт от звёзд этого скопления до нас около 25 000 лет. Интересно отметить, что 16 ноября 1974 г. к звёздам этого скопления было отправлено закодированное радиопослание от нашей цивилизации. Так как большинство звёзд скопления похожи на Солнце, не исключена вероятность, что сообщение будет кем-то принято.

Самые разреженные области Вселенной — это пространство между галактиками, а самые плотные — ядра звёзд. Если средняя плотность Солнца составляет около 1400 кг/м^3 , почти как плотность воды, то в центре Солнца плотность уже около $150\,000 \text{ кг/м}^3$. У звёзд белых карликов плотность достигает 1000 кг/см^3 , или 1 т/см^3 , а у нейтронных звёзд, даже трудно представить, — несколько миллиардов тонн в кубическом сантиметре.

Астрономам удалось измерить и рассчитать температуру различных небесных тел и областей космоса. Так, самыми холодными оказались плотные облака газа и пыли, удалённые на большие расстояния от звёзд, — в них

температура составляет всего несколько кельвинов. Именно в этих областях образуются новые звёзды.

На поверхности Солнца температура равна примерно 6000 К, а в его центре — около 15 000 000 К. В некоторых звёздах температура в центре достигает миллиардов кельвинов. Благодаря высоким температурам в них протекают термоядерные реакции и образуются все, в том числе тяжёлые, химические элементы.

Во время взрывов сверхновых звёзд выделяется так много энергии, что огромные массы вещества приобретают скорости порядка 10 000—20 000 км/с и образуются потоки элементарных частиц, скорости которых близки к скорости света. Остаток такого взрыва — *Крабовидную туманность* — мы наблюдаем в созвездии Тельца.

В первой четверти XX в. Э. Хаббл открыл удивительный факт расширения Вселенной и сделал вывод о сверхплотном состоянии вещества в начале этого расширения. Последние наблюдения показали, что Вселенная расширяется с ускорением. И если по наблюдениям движения планет и Луны И. Ньютон открыл закон всемирного тяготения, то по наблюдениям ускоренного удаления галактик не так давно была открыта новая сила Всеми́рного отталкивания. Природа этой силы пока не ясна. Кроме этого, было установлено, что основную часть Вселенной занимают тёмная материя и тёмная энергия, а обычное вещество составляет всего несколько процентов.

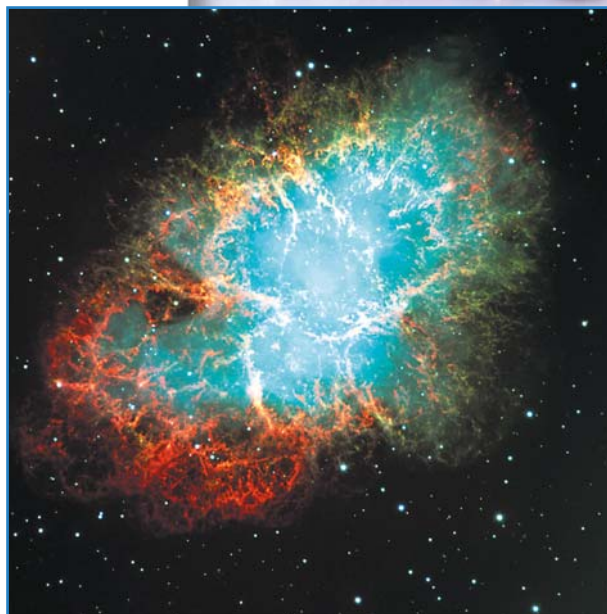
Астрономы проводят наблюдения во всех диапазонах длин волн, выводя за пределы земной атмосферы космические телескопы, работающие в инфракрасном, видимом, рентген- и гамма-диапазоне. Например, наблюдения в инфракрасных лучах центра Млечного Пути помогли обнаружить там сверхмассивную чёрную дыру с массой, в два миллиона раз превышающей массу Солнца.

В лабораториях мы не можем достичь той степени разреженности, которая есть в межпланетном пространстве, и той степени сжатия, которая встречается в белых карликах и нейтронных звёздах.

В земных условиях практически нереально достичь тех гигантских температур, до которых разогреты центры звёзд. Наблюдения с помощью нейтринных телескопов потоков нейтрино от Солнца и сверхновых звёзд позволили заглянуть внутрь этих небесных тел.

В последние годы астрономы начали исследовать гравитационные волны, которые генерируются при столкновениях чёрных дыр.

Таким образом, астрономия позволяет изучать физические процессы в экстремальных условиях, которые не могут быть достигнуты на Земле.



Крабовидная туманность — остаток взрыва сверхновой звезды

ЗАДАЧА № 1

Видимый угловой радиус Крабовидной туманности — остатка взрыва сверхновой звезды, $\theta \approx 2,5'$, расстояние до неё $r \approx 6500$ св. лет. Наблюдения указывают, что скорость расширения туманности $v \approx 1500$ км/с. Оцените линейный радиус и момент времени, когда произошёл взрыв сверхновой звезды.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что изучает астрономия?
- Какими способами изучают Вселенную?
- Из каких объектов состоит Вселенная?

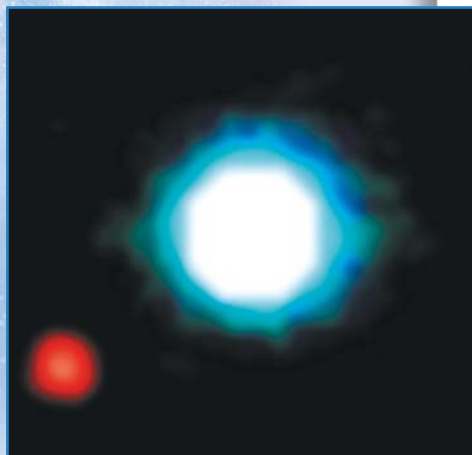
ДАЛЁКИЕ ГЛУБИНЫ ВСЕЛЕННОЙ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Где и как работают самые крупные оптические телескопы.
- Как астрономы исследуют γ -излучение Вселенной.
- Что увидели гравитационно-волновые и нейтринные телескопы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что изучает астрономия?
- Какими способами изучают Вселенную?
- Из каких объектов состоит Вселенная?



Первый прямой снимок экзопланеты

Очень Большой Телескоп Лазерный луч, показанный на фотографии, помогает увидеть и оценить искажения, вносимые атмосферой, и автоматически учесть их при обработке, тем самым значительно улучшая снимки. На первом прямом снимке экзопланеты она видна на угловом расстоянии $0,778''$ от своей звезды коричневого карлика, что при расстоянии до этой звезды 230 св. лет соответствует 55 астрономическим единицам.

В последние десятилетия современная астрономия нацелена на изучение самых далёких областей Вселенной и изучение детальной структуры небесных тел. Для этого было построено несколько обсерваторий с гигантскими телескопами.

СОВРЕМЕННЫЕ ЗЕМНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Следует отметить южную международную астрономическую обсерваторию в Чили. Благодаря тому, что она находится на высоте около 5000 м, удалось существенно уменьшить влияние атмосферы на формирование изображений небесных тел. Очень Большой Телескоп состоит из четырёх телескопов диаметром 8,2 м каждый. С помощью компьютерных технологий они могут работать вместе как гигантский интерферометр с угловым разрешением в несколько миллизекунд дуги.

Чувствительные инфракрасные приёмники света позволили проникнуть в центр Млечного Пути через облака газа и пыли, которые непрозрачны для видимого света, изучить движение отдельных звёзд в центре и обнаружить сверхмассивную чёрную дыру в нём.

Два телескопа с объективами по 10,4 м в диаметре установлены на высоте 4154 м в обсерватории на Гавайских островах. Соединённые вместе с помощью компьютерных технологий, телескопы начали работать как телескоп диаметром 86 м с пространственным разрешением $0,004''$ (под таким углом будет видна буква «о» в вашем учебнике с расстояния 100 км).

КОСМИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

И всё-таки атмосфера ограничивает наблюдения за небесными телами и мешает их проведению. Поэтому астрономы запускают телескопы за пределы земной атмосферы.

Используя длительные экспозиции, удалось заглянуть в далёкое прошлое Вселенной, в эпоху формирования первых галактик. Впервые были получены изображения протогалактик, первых сгустков материи, которые сформировались менее чем через миллиард лет после Большого взрыва.

Очень Большой Телескоп



В настоящее время в космическом пространстве работает российская космическая обсерватория «РадиоАстрон». Совместно с наземными радиотелескопами обсерватория работает как радиоинтерферометр. Телескоп движется по очень вытянутой орбите с апогеем до 360 000 км. По пространственному разрешению он сравним с радиотелескопом, который имел бы зеркало диаметром от Земли до Луны. «РадиоАстрон» позволяет получить информацию о структуре галактических и внегалактических радиоисточников на угловых масштабах до 8 микросекунд дуги ($8 \cdot 10^{-6}''$).

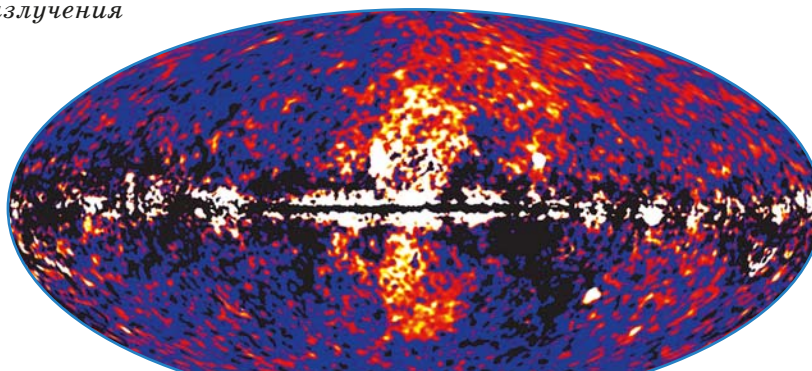
Сейчас в космическом пространстве вокруг Земли вращается γ -телескоп имени Ферми. Так как γ -излучение образуется при высокоэнергичных процессах рождения и аннигиляции частиц и античастиц, при ядерных реакциях, то телескоп позволяет исследовать эти процессы в небесных телах.

На рисунке показана карта распределения γ -излучения по всему небу, полученная телескопом Ферми. На фотографии неба в γ -лучах выделяется излучение полосы Млечного Пути, которое объясняется остатками взрывов сверхновых звёзд, нейтронных звёзд и чёрных дыр, концентрирующихся на плоскости Млечного Пути. Загадкой для астрономов являются два γ -пузыря, протянувшихся перпендикулярно вверх и вниз от центра. Многие астрономы склонны думать, что в γ -излучении себя проявляют необычные свойства тёмной материи.

В настоящее время мы получаем информацию о небесных телах не только в различных диапазонах электромагнитного излучения. Большое развитие получила нейтринная астрономия, с её помощью удалось заглянуть внутрь Солнца и в ядра взрывающихся сверхновых звёзд. Совершенно новое направление представляет гравитационно-волновая астрономия. Её первые успехи вызывают с прямым наблюдением гравитационного излучения, которое, по-видимому, образовалось при слиянии двух чёрных дыр.

Бурное развитие современной астрономии связано как с традиционным развитием наземных обсерваторий, так и с запуском телескопов за пределы земной атмосферы и наблюдением в нетрадиционных для астрономии диапазонах длин волн — инфракрасном, рентгеновском и γ -диапазоне.

Карта распределения
 γ -излучения



Один из самых крупных космических оптических телескопов с диаметром зеркала 2,4 м — телескоп Хаббла — уже свыше 27 лет работает на высоте 540 км.



«Столпы Творения» в туманности Орёл. В них рождаются новые звёзды

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- С какими современными телескопами вы познакомились?
- Расскажите о назначении телескопов.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Внутри доступной наблюдениям части Вселенной содержится около ста миллиардов крупных галактик различной формы.
- Газ и пыль собраны в газопылевые облака, которые наблюдаются в виде диффузных светящихся туманностей и отражательных туманностей возле звёзд.
- Наблюдаются рассеянные и шаровые звёздные скопления.
- Средняя плотность вещества во Вселенной в виде звёзд, газа, пыли и галактик составляет всего около $1,2 \cdot 10^{-26}$ кг/м³.
- Самыми плотными объектами являются нейтронные звёзды.
- Наблюдаются остатки взрывов сверхновых звёзд, в которых вещество разлетается со скоростью в тысячи километров в секунду, в результате чего образуются релятивистские частицы.
- В центре Млечного Пути находится сверхмассивная чёрная дыра.
- Для изучения самых далёких небесных тел астрономы строят гигантские телескопы, чтобы различить как можно меньшие детали небесных тел.
- Чтобы избавиться от влияния атмосферы и изучать излучение небесных тел в рентгеновских, γ - и инфракрасных лучах, запускают космические телескопы.

ЗАДАЧА № 2

Видимый угловой диаметр шарового звёздного скопления М13 в созвездии Геркулеса $\theta \approx 23'$, расстояние до него $r \approx 25\,000$ св. лет. Скопление содержит $N = 10^6$ звёзд. Оцените среднюю концентрацию звёзд и расстояние между ними. Сравните с расстоянием до ближайшей к нам звезды (св. лет)³.

ПОДРОБНЕЕ...

Перельман Я.И. Занимательная астрономия. — М.: Аванта (АСТ), 2018.

Сурдин В.Г. Астрономия: век XXI. — Фрязино: Век 2, 2007.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Объект с каким минимальным линейным размером мы сможем различить в галактике Туманность Андромеды, расстояние до которой 2,5 млн св. лет, с помощью «РадиоАстрона»?
- Скорость волокон в Крабовидной туманности составляет 1500 км/с. Расстояние до неё 6500 св. лет. Через сколько лет мы сможем заметить это перемещение в телескоп с диаметром 86 м с пространственным разрешением 0,004''?
- Чем отличаются исследования в области астрономии от исследований в области физики и биологии?

Астронет
<http://www.astronet.ru/>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru/>



Глава 2

АСТРОМЕТРИЯ

- ЗВЁЗДНОЕ НЕБО
- НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ
- ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ И СОЛНЦА
- ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ И ЗАТМЕНИЯ
- ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Известны попытки создания египтянами звёздных часов (ок. 1500 г. до н.э.) с использованием простых инструментов. Наблюдения проводили, отмечая время прохождения определённых звёзд через небесный меридиан и соседние участки неба.

Египетская идея не зависящего от продолжительности дня часа легла в основу всех астрономических наблюдений. Древними египтянами был предложен счёт времени, где один час — это $\frac{1}{24}$ продолжительности суток.

ЗВЁЗДНОЕ НЕБО

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие звёзды входят в созвездия Ориона и Лебеда.
- Что такое эклиптика.
- Почему происходит петлеобразное движение планет по небу.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие вы знаете небесные тела?
- Чем звёзды отличаются от планет?



В ясную безлунную ночь мы можем рассматривать небо, усеянное звёздами различной яркости. Если наблюдать за звёздами в течение нескольких вечеров, то можно заметить, что наиболее яркие звёзды могут быть распределены в отдельные группы — созвездия.

ЗВЁЗДЫ И СОЗВЕЗДИЯ При наблюдении за звёздным небом создаётся зрительное впечатление о том, что звёзды и созвездия располагаются на воображаемой небесной сфере. Многие из созвездий имеют форму, которую легко запомнить и зарисовать (крест — созвездие Лебеда, ковш — созвездие Большой Медведицы, буква *W* — созвездие Кассиопеи). Найти эти же фигуры на звёздном небе можно не только в следующие вечера, но и через несколько лет. Они могут оказаться не в той же части неба, где мы их обнаружили в первый раз, но ни их очертания, ни яркость составляющих их звёзд не изменятся. Если бы первые астрономы — жрецы древнего Египта и Вавилона — смогли в наши дни взглянуть на небо, они практически не заметили бы изменений во взаимном расположении звёзд. Положения звёзд относительно друг друга практически не изменяются на масштабах сотен лет, поэтому их часто называют неподвижными. Наиболее заметные группы звёзд объединили в созвездия, присвоив им имена мифических героев (Геркулес, Орион, Цефей и др.) и животных (Телец, Гидра, Заяц и др.). При неизменности взаимного расположения звёзд знание созвездий позволяло античным астрономам создавать звёздные карты и атласы, быстро находить те или иные звёзды и небесные тела.

САМЫЕ ЯРКИЕ ЗВЁЗДЫ СЕВЕРНОГО НЕБА

Звезда	Созвездие	Расстояние, св. лет	Звёздная величина
Сириус	Большой Пёс	8,6	-1,47
Арктур	Волопас	36,7	-0,06
Вега	Лира	25	+0,03
Капелла	Возничий	42,2	+0,08
Ригель	Орион	870	+0,12
Процион	Малый Пёс	11,4	+0,38
Бетельгейзе	Орион	530	+0,50
Альтаир	Орёл	16,8	+0,75
Альдебаран	Телец	65	+0,85
Антарес	Скорпион	610	+1,09
Спика	α Девы	261	+0,96
Поллукс	Близнецы	33,7	+1,15
Фомальгаут	Южной Рыбы	23	+1,16
Денеб	Лебедь	1550	+1,25

Чтобы легче было ориентироваться среди звёзд, древнегреческий астроном Гиппарх, живший во II в. до н. э., присвоил звёздам определённые звёздные величины в зависимости от яркости их блеска. Самые яркие — звёзды первой величины — обозначают 1^m , а самые слабые, но ещё видимые глазом, — 6^m . За последние двадцать веков астрономы научились более точно определять звёздные величины. Сейчас очень яркие звёзды определяют через нулевую и даже отрицательную звёздную величину.

Математически звёздные величины определяются в соответствии с формулой Погсона:

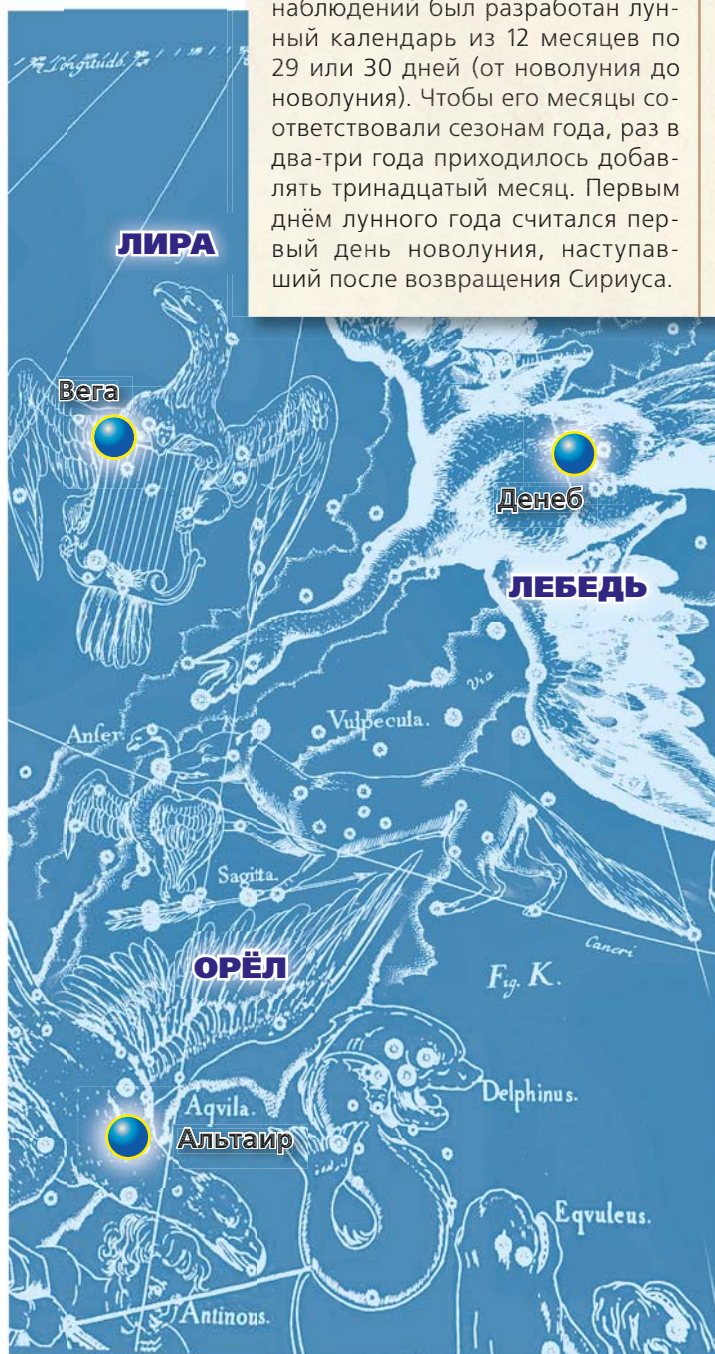
$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg \frac{E_1}{E_2}.$$

Здесь m_1 и m_2 — звёздные величины двух звёзд, а E_1 и E_2 — создаваемые ими освещённости. Из этой формулы мы видим, что звезда 1^m светит в 2,512 раз ярче звезды 2^m и в 100 раз ярче звезды 6^m .

Наиболее яркие звёзды на небе имеют собственные имена, в основном заимствованные из арабских источников. В большинстве случаев астрономы обозначают звёзды в созвездии буквами греческого алфавита в порядке уменьшения яркости этих звёзд. Так, летом и осенью по вечерам высоко над головой видно созвездие Лебеда, самую яркую звезду которого — α Лебеда — называют *Денеб* (от араб. *аль джанаб аль даждаж* — хвост курицы, так как в древности созвездие Лебеда во многих странах представляли в виде курицы). Её звёздная величина $1,25^m$. Самая яркая звезда ночного неба *Сириус* (α Большого Пса) имеет звёздную величину $-1,47^m$.

Чтобы «почувствовать» звёздные величины, достаточно осенью посмотреть в область неба вблизи зенита, т. е. вертикально вверх. Вблизи зенита видно созвездие Лебеда. Западнее находится самая яркая звезда северного неба — *Вега* (α Лир), блеск которой $0,03^m$. Над точкой юга расположен *Альтаир* (α Орла). Эти три яркие звезды — *Денеб*, *Вега* и *Альтаир* — расположены в вершинах так называемого летне-осеннего треугольника.

Известно, что ещё за 3 тыс. лет до н. э. египетские жрецы подметили, что разливы Нила наступали вскоре после того, как перед восходом Солнца на востоке появилась самая яркая из звёзд — Сириус, скрывавшаяся до этого около двух месяцев в лучах Солнца. Из этих наблюдений был разработан лунный календарь из 12 месяцев по 29 или 30 дней (от новолуния до новолуния). Чтобы его месяцы соответствовали сезонам года, раз в два-три года приходилось добавлять тринадцатый месяц. Первым днём лунного года считался первый день новолуния, наступавший после возвращения Сириуса.



Древние и средневековые астрономы представляли себе небо в виде хрустальной сферы с прибитыми к ней серебряными гвоздиками — звёздами. Эта сфера медленно в течение суток вращается вокруг Земли, которая находится в центре сферы. Такая простая модель позволяла не только объяснить суточное движение небесной сферы, но и уверенно предсказывать появление тех или иных созвездий над горизонтом.

Бетельгейзе (α Ориона)



Fig. 99

Семь звёзд Большой Медведицы, которые осенью находятся невысоко над горизонтом на северо-западе, имеют блеск примерно 2^m . По виду это созвездие скорее похоже на телегу или ковш с ручкой.

Зимой наиболее заметным является созвездие Ориона. Его ярчайшая звезда — Бетельгейзе (α Ориона), что в переводе с арабского означает «рука великана» — звезда красного цвета ($0,5^m$), а звезда β Ориона — Ригель (от араб. *Ригель аль гебар* — нога великана) — бело-голубой сверхгигант ($0,12^m$). Контур из девяти ярчайших звёзд этого созвездия действительно похож на человека, перевязанного поясом. Пояс из трёх звёзд указывает на самую яркую звезду ночного неба Сириус (α Большого Пса). Его звёздная величина отрицательна и равна $-1,47^m$, расположен он низко у горизонта.

Весной вблизи зенита наряду с Большой Медведицей и Малой Медведицей можно увидеть созвездие Волопаса. Ярчайшая звезда в этом созвездии — Арктур — имеет блеск $-0,04^m$. Эту звезду и само созвездие Волопаса легко найти на продолжении хвоста Большой Медведицы.

«Атлас звёздного неба» Я. Гевелия. Созвездие Орион (Зеркальное изображение)



ПОЛЯРНАЯ ЗВЕЗДА Полярную звезду (α Малой Медведицы) легко найти на продолжении линии от двух крайних звёзд β и α ковша Большой Медведицы.

В течение суток все звёзды небесной сферы вращаются вокруг Полярной звезды, которая одна остаётся на месте.

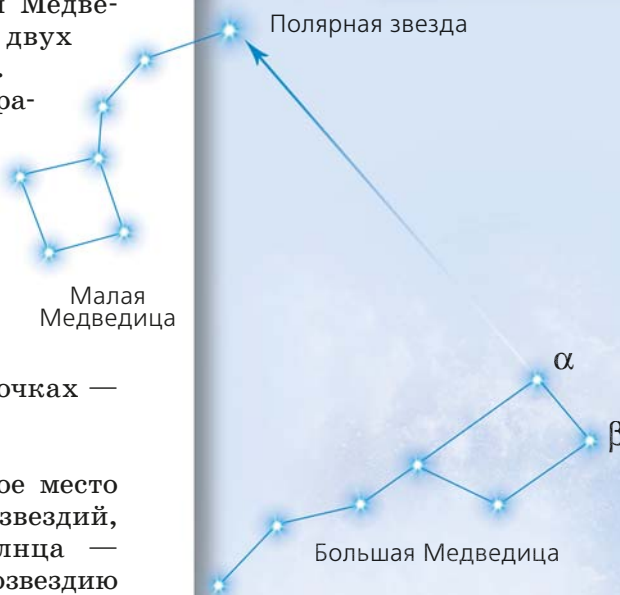
Кажущееся явление вращения небесной сферы вокруг Полярной звезды отражает действительное вращение земного шара вокруг своей оси.

Ось видимого вращения небесной сферы, называют **осью мира**.

Ось мира пересекает небесную сферу в двух точках — **полюсах мира**.

ЗОДИАКАЛЬНЫЕ СОЗВЕЗДИЯ. ЭКЛИПТИКА Особое место среди созвездий занимают 12 зодиакальных созвездий, через которые проходит годичный путь Солнца — **эклиптика**. Так, в марте Солнце движется по созвездию Рыб, в мае — Тельца, в августе — Льва, в ноябре — Скорпиона и т.д. Наряду со звёздами на небе наблюдаются планеты, которые медленно перемещаются среди неподвижных звёзд, оправдывая своё название: слово *планетас* в переводе с греческого означает «блуждающая звезда».

Знаки зодиака



ВАШЕ МНЕНИЕ:

- Можно ли, наблюдая за звёздным небом, доказать, что Земля вращается вокруг своей оси?
- Как можно сориентироваться ночью по звёздам?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- От чего зависит звёздная величина?
- Что такое небесная сфера?
- Как определить ось мира и полюсы мира?
- Что такое эклиптика?

НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое небесный экватор и небесный меридиан.
- Как строят экваториальную систему небесных координат.
- Как строят горизонтальную систему небесных координат.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие бывают географические координаты?
- Что такое градусная и часовая мера угла?

В астрономии для описания положения светил на небе или точек на воображаемой небесной сфере используют свои системы координат. Координаты светил или точек задаются двумя угловыми величинами, определяющими положение объектов на небесной сфере. Система небесных координат является сферической системой координат, в которой третья координата — расстояние — не используется.

ЭКВАТОРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ В настоящее время для ориентации среди звёзд астрономы используют небесные координаты, среди которых особое место занимает **экваториальная система координат**. В её основе лежит **небесный экватор** — проекция земного экватора на небесную сферу.

Эклиптика и экватор пересекаются в точках весеннего (γ) и осеннего (ω) равноденствия, в них Солнце бывает соответственно в дни весеннего и осеннего равноденствия, когда продолжительность дня равна продолжительности ночи.

Точка весеннего равноденствия находится в созвездии Рыб и служит начальной точкой, от которой в направлении против часовой стрелки отсчитывается координата **прямое восхождение звезды М**, которую обычно обозначают буквой α . Эта координата является аналогом долготы в географических координатах.

В астрономии принято прямое восхождение измерять в часовой мере, а не в градусной. Принято, что полная окружность составляет 24 ч.

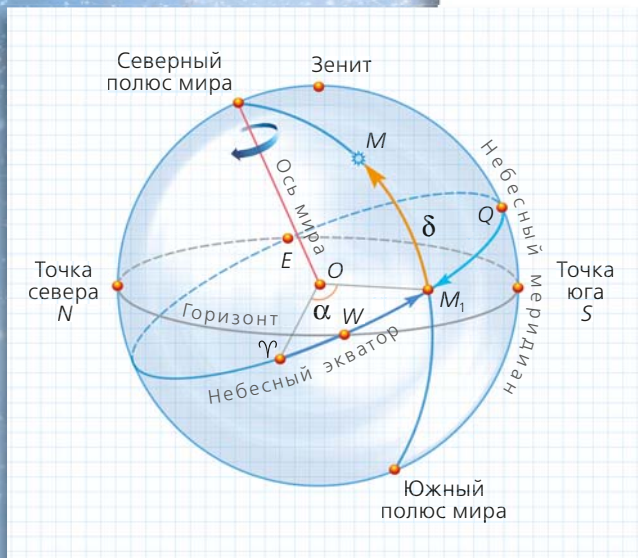
Вторая координата светила — **склонение** — обозначается буквой δ и является аналогом широты; измеряют её в градусной мере. Так, звезда Альтаир (α Орла) имеет следующих координаты: $\alpha = 19^{\text{ч}}48^{\text{м}}18^{\text{с}}$; $\delta = +8^{\circ}44'$.

Измеренные координаты звёзд хранят в каталогах. По ним строят звёздные карты, которые используются при поиске нужных светил.

Астрономы пользуются ещё одной координатой звёзд — **часовым углом (t)**, который измеряется дугой QM_1 и меняется со временем.

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ На практике часто используют горизонтальную систему координат, которая непосредственно связана с наблюдателем и его местоположением на поверхности Земли.

В этой системе координат основной линией является горизонт, а точнее — **математический горизонт**. Найти эту линию на небесной сфере легко. Для этого вначале нужно провести вертикальную линию. Это можно сде-



лать с помощью отвеса. Эта линия пересечёт небесную сферу в точке зенита Z как раз у нас над головой. Плоскость, перпендикулярная вертикальной линии, — плоскость горизонта, а линия пересечения этой плоскости с небесной сферой — математический горизонт.

Небесный экватор пересекает горизонт в двух точках: востока (E — *East*) и запада (W — *West*).

Большой круг небесной сферы, который проходит через зенит и полюсы мира, называют **небесным меридианом**. Небесный меридиан пересекает горизонт в точках севера (N — *North*) и юга (S — *South*).

Угловое расстояние светила от горизонта называется **высотой** и обозначается h (эта координата аналогична географической широте). Высота измеряется в градусной мере от -90° до $+90^\circ$. Если светило под горизонтом, то высота отрицательная.

От точки юга вдоль горизонта по часовой стрелке (к западу) отсчитывается вторая координата светила — **азимут** A (эта координата аналогична географической долготе). Азимут также измеряется в градусной мере от 0 до 360° .

Высота h_p Северного полюса мира равна **широте** места φ , в Южном полушарии обе величины отрицательны.

Итак, горизонтальные координаты полюса мира: высота (широта) $h_p = \varphi$, азимут (долгота) $A = 180^\circ$.

Горизонтальная система координат удобна для измерений, но неудобна тем, что из-за суточного вращения небесной сферы координаты светил непрерывно меняются. Светила восходят, поднимаются до максимальной высоты и заходят.

При восходе и заходе светило имеет высоту $h = 0^\circ$. Максимальную высоту светило имеет, когда пересекает небесный меридиан. Этот момент называют **верхней кульминацией** светила. В зависимости от положения на небе и широты места наблюдения в это время светило может располагаться над южным или северным горизонтом. К югу от экватора большинство звёзд проходят верхнюю кульминацию над точкой севера.

При минимальной высоте над горизонтом светило также располагается на небесном меридиане, тогда говорят о **нижней кульминации**. Если светила не заходят в данном месте, то верхняя и нижняя кульминации происходят над горизонтом. Если светила невосходящие и находятся всегда под горизонтом, то верхняя и нижняя кульминации происходят всегда под горизонтом. У звёзд, которые восходят и заходят, верхняя кульминация происходит над горизонтом, а нижняя — под горизонтом.

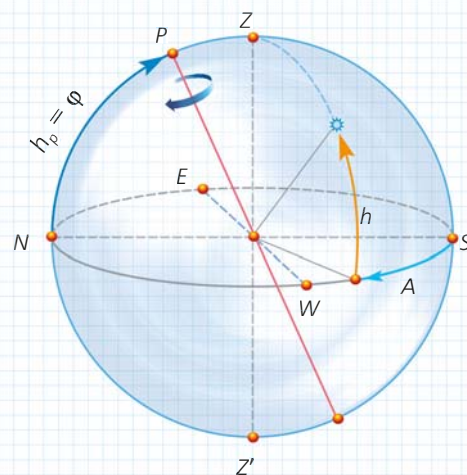
Например, в Москве высота полюса мира равна

$$h_p = \varphi = 55^\circ 45'.$$

Все светила, у которых склонение $\delta > 90 - \varphi = 34^\circ 15'$, в Москве не заходят, а светила, у которых $\delta < -34^\circ 15'$, в Москве никогда не восходят — это звёзды и созвездия Южного полушария, находящиеся около Южного полюса мира.

Не следует путать точку севера с Северным полюсом.

Горизонтальная система координат



ВАШЕ МНЕНИЕ:

Можно ли с помощью горизонтальной системы координат построить карту звёздного неба? Аргументируйте ответ.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- В каких точках пересекаются эклиптика и небесный экватор?
- Что такое верхняя и нижняя кульминации светила?

ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ И СОЛНЦА

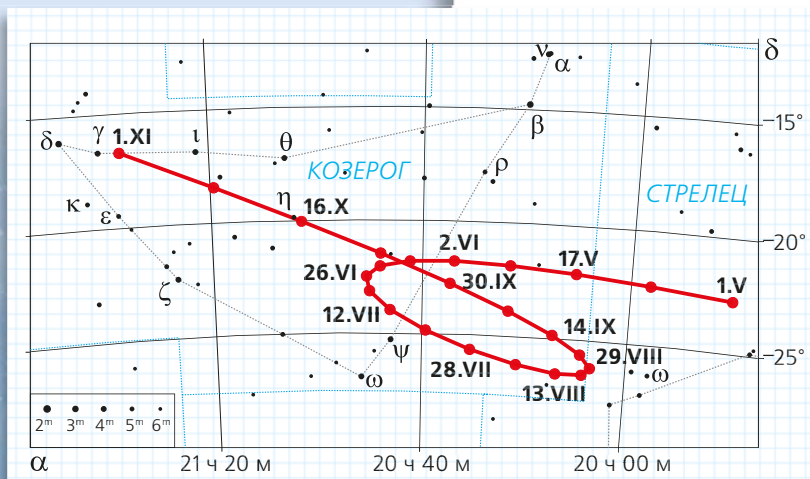
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое петлеобразное движение планет.
- Что такое попятное и прямое движение планет.
- Что такое эклиптика.
- Как Солнце движется неравномерно по эклиптике.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие бывают системы небесных координат?
- Какие основные точки и линии небесной сферы вы знаете?

Видимый петлеобразный путь Марса с мая по октябрь 2018 г. по созвездиям Стрельца и Козерога, вблизи Великого противояния (римские цифры обозначают номера месяцев)



На фоне звёзд, не меняющих своего взаимного расположения на небе и группирующихся в созвездия, невооружённым глазом видны пять ярких планет, которые изо дня в день медленно изменяют своё положение, как бы блуждая среди звёзд (напомним, что слово «планетас» в переводе с греческого — блуждающая звезда).

ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Наблюдая за движением планет в течение длительного времени, можно заметить, что планеты в основном перемещаются с запада на восток, не отходя далеко от эклиптики, постоянно находясь в пределах пояса зодиакальных созвездий. Это движение планет, похожее на движение Солнца и Луны среди звёзд, называют **прямым движением**.

В движении каждой планеты время от времени наступают остановки, получившие название **стояний**, после которых планета начинает двигаться среди звёзд в обратном направлении, т. е. с востока на запад. Это обратное,

или **попятное**, движение длится несколько недель или месяцев, затем следует новая остановка (новое стояние), после чего планета продолжает своё прямое движение к востоку. Таким образом, видимый путь планет на небе получается петлеобразным или зигзагообразным.

У Меркурия дуга попятного движения составляет около 13° , у Марса — около 15° , у Юпитера — немного более 10° .

Петлеобразные участки видимого пути планет могут находиться в разных зодиакальных созвездиях.

Период обращения Марса вокруг Солнца 687 суток, Юпитера —

11,9 года, а Сатурна — 29,5 года.

Эти три планеты периодически бывают вблизи Солнца и тогда не видны; затем постепенно отступают от него к западу и в области неба, противоположной Солнцу, описывают очередную петлю. В зависимости от расположения относительно Солнца эти планеты видны в различные часы тёмного времени суток, в том числе и на протяжении всей ночи.

Меркурий и Венера всегда находятся вблизи Солнца, удаляясь от него попеременно к западу и к востоку не более чем на 28° (Меркурий) и 48° (Венера). Благодаря близости к Солнцу эти две планеты видны только в вос-

ЗАДАЧА № 3

Используя график, определите экваториальные координаты звезды Регула (α Льва). Чему равна её высота $h_{\text{вк}}$ в момент верхней кульминации в Москве ($\varphi = 55^\circ 45'$) и Мурманске ($\varphi = 68^\circ 58'$).

точной области неба под утро, до восхода Солнца, либо в западной стороне по вечерам, вскоре после захода Солнца. Таким образом, видимое движение Меркурия и Венеры в небе Земли относительно Солнца отличается от видимого пути Марса, Юпитера и Сатурна. Перемещение же Солнца и Луны на фоне звёзд происходит по большим кругам всегда в прямом направлении.

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА СРЕДИ ЗВЁЗД Кроме знакомого всем с детства суточного движения Солнца по небу, наблюдается и годичное перемещение нашего светила по небесной сфере вдоль некоторой линии, называемой **эклиптикой**.

Эклиптика — проекция земной орбиты на небесную сферу. Эта линия проходит через 12 зодиакальных созвездий: в мае Солнце движется по созвездиям Овна и Тельца, в июне — Тельца и Близнецов, в августе — Рака и Льва, в октябре — Девы, в ноябре — Весов и Скорпиона и т. д.

Если проследить за движением Солнца по эклиптике в течение года, то обнаружится его неравномерность. Действительно, 21 марта, в день весеннего равноденствия, Солнце находится на эклиптике в точке Υ — точке весеннего равноденствия. Далее, перемещаясь по эклиптике, 22 июня Солнце проходит точку летнего солнцестояния — Θ . В этот день продолжительность светового дня в Северном полушарии максимальна.

Далее, пройдя дугу в 180° по эклиптике, 22 сентября Солнце пересекает точку осеннего равноденствия Ω .

22 декабря Солнце проходит точку зимнего солнцестояния Υ ; продолжительность светового дня в эту дату в Северном полушарии минимальна.

Пройдя полную окружность по эклиптике, Солнце завершает своё годичное движение по зодиакальным созвездиям в точке весеннего равноденствия.

Измерения видимого углового диаметра Солнца в течение года показали, что в начале января он максимален и составляет около $32,5'$. В начале июля он минимален и составляет $31,5'$.

Так как движение Солнца по эклиптике отражает движение Земли вокруг Солнца, это означает, что зимой Солнце к нам ближе, чем летом. Правда, изменение расстояния до Солнца в течение года настолько мало, что не оказывает влияния на смену сезонов на Земле.

Путь Луны среди звёзд похож на солнечный, но значительно сложнее.

За время с 21 марта по 22 сентября Солнце проходит половину своего годичного пути (весну и лето), т. е. 180° , за 186 суток. Вторую половину своего пути (осень и зиму) Солнце проходит с 22 сентября по 21 марта, т. е. за 179 суток. Таким образом, осенью и зимой движение Солнца совершается быстрее, чем весной и летом.

Быстрее всего Солнце движется в период 1–5 января — $1,019^\circ$ в сутки, медленнее всего в период 1–5 июля — $0,952^\circ$ в сутки.



ВАШЕ МНЕНИЕ:

Можно ли с помощью экваториальной системы координат построить карту звёздного неба? Аргументируйте ответ.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Почему планеты называют блуждающими звёздами?
- Опишите путь Солнца среди звёзд в течение года.

ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ И ЗАТМЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое сидерический месяц и синодический месяц.
- Почему происходят солнечные и лунные затмения.
- Почему затмения Солнца и Луны происходят вблизи узлов лунной орбиты.
- Как предсказывать затмения.

ВСПОМНИТЕ:

- Как движется Солнце по эклиптике?
- Как изменяется положение планет на небесной сфере?

Луна издревле привлекала внимание людей как ближайшее к Земле небесное тело и её естественный спутник. Среднее расстояние от Луны до Земли 384 400 км, средняя скорость её движения по орбите составляет 1 км/с. Многие явления на Земле связаны с Луной.

ДВИЖЕНИЯ ЛУНЫ Наблюдая несколько вечеров подряд положение Луны среди звёзд, можно заметить, что она смещается по небесной сфере с запада на восток, как и Солнце. Каждый день Луна кульминирует примерно на 52 мин позже, чем в предыдущий день. Сдвигается Луна в ту же сторону, что и Солнце, но значительно быстрее: всего за 27,3 суток она описывает полный круг и возвращается в то же место среди звёзд.

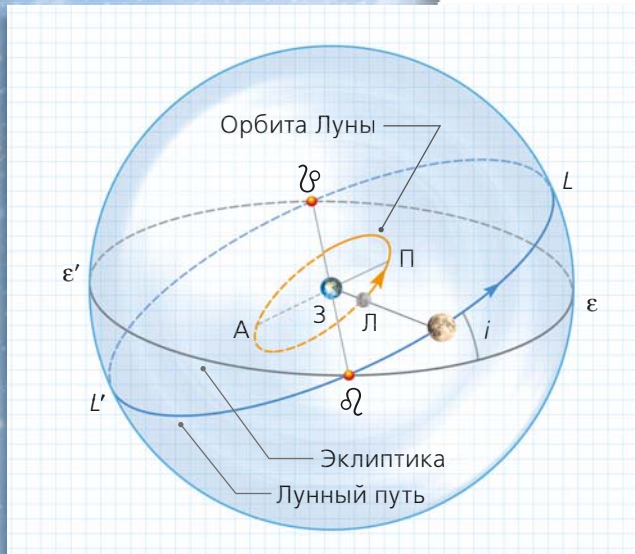
Этот промежуток времени равен периоду обращения Луны вокруг Земли; он получил название звёздного или **сидерического месяца** (периода).

В то же время Луна медленно вращается вокруг своей оси в прямом направлении с периодом, равным сидерическому месяцу, вследствие чего она постоянно повёрнута к Земле одной стороной. Поэтому с Земли всегда видно одно полушарие Луны. Обратную её сторону впервые удалось увидеть только 7 октября 1959 г., когда советская автоматическая станция «Луна-3» облетела Луну и сфотографировала её обратную сторону, передав снимки на Землю.

Видимый путь Луны среди звёзд представляет собой круг, наклонённый к плоскости эклиптики под углом i , который составляет примерно 5° . Таким образом, Луна может отклоняться от эклиптики всего на 5° , поэтому она, подобно Солнцу, практически не выходит из пояса зодиакальных созвездий.

Плоскость лунной орбиты пересекается с плоскостью земной орбиты (плоскостью эклиптики) по **линии узлов**, проходящей через оба лунных узла и центр Земли: Ω — восходящий узел лунной орбиты, φ — нисходящий узел.

ФАЗЫ ЛУНЫ Луна, подобно Земле, представляет собой тёмное непрозрачное шаровидное тело, светящее отражённым солнечным светом. Солнце всегда освещает приблизительно половину этого шара, другая половина остаётся тёмной. Так как к Земле обычно бывают обращены и часть светлого видимого полушария, и часть тёмного, то Луна большую часть времени кажется нам неполною, представляя ту или иную **фазу**.



Значки узлов Ω φ представляют древние знаки драконов, так как в старину (например, в Древнем Китае) полагали, что в узлах прячутся драконы, которые заглатывают Солнце и Луну, если они слишком приблизились к ним. Поэтому во время затмений Солнца люди барабанили, взрывали ракеты, чтобы испугать драконов и спасти Солнце.

Лунной фазой (от греч. *фазис* — проявление) называется вид Луны на небе.

На рисунке показаны положения Луны относительно Земли и Солнца для различных фаз. Солнце находится очень далеко справа. Так как Солнце в 400 раз дальше Луны, его лучи можно считать параллельными.

Во время новолуния, когда Луна проходит между Землёй и Солнцем, к нам обращена её неосвещённая тёмная сторона. Луна тогда не видна. Когда она передвинется в следующее положение (по стрелке), к нам повернётся узкая полоска светлого полушария (справа). В это время Луна видна в виде узкого серпа, обращённого выпуклостью вправо. Говорят, что мы видим молодую «растущую» Луну, которая появляется в вечерние часы после захода Солнца.

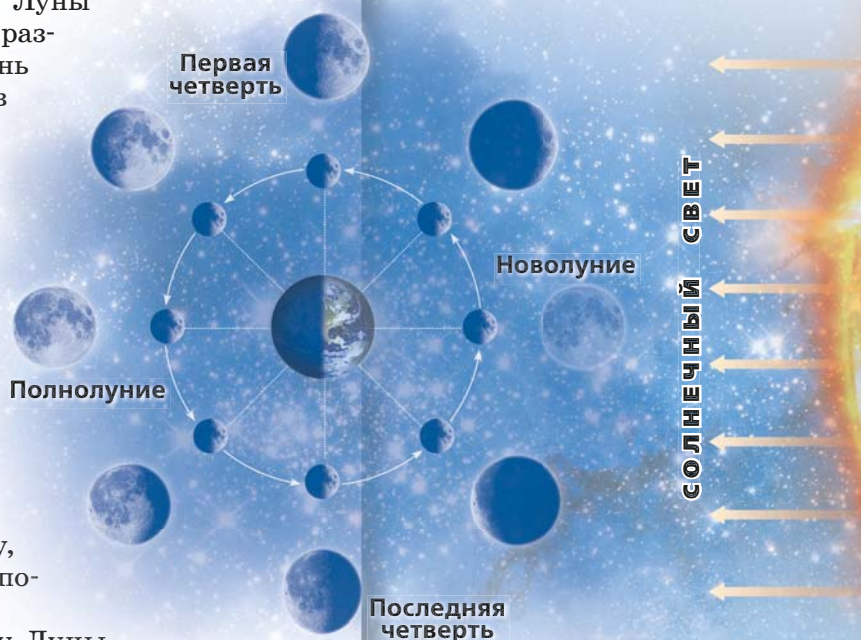
Через неделю после новолуния у Луны видна ровно половина освещённого полушария. Мы видим тогда освещённой правую половину лунного диска. Эта фаза называется *первой четвертью*. Затем к нам поворачивается всё бо́льшая и бо́льшая часть освещённого полушария, пока ещё через неделю не наступит *полнолуние*. В это время Солнце, Луна и Земля находятся почти на одной прямой. После этого Луна начинает убывать: с каждым днём скрывается от наших глаз всё бо́льшая часть светлого полушария, и с правой стороны диска появляется всё бо́льший «ущерб».

Через неделю после полнолуния наступает *последняя четверть*: мы видим с Земли освещённой левую половину лунного диска. Наконец, Луна принимает форму серпа, обращённого выпуклостью влево (говорят, что мы видим «старую» Луну; она видна в утренние часы перед восходом Солнца), и вскоре исчезает. Затем опять наступает новолуние.

Интервал времени между двумя последовательными новолуниями составляет 29,5 суток и называется **синодический месяц** (период). Синодический месяц лежит в основе лунного календаря.

СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ При движении Луна заслоняет (покрывает) звёзды зодиакальных созвездий, по которым проходит лунный путь. Иногда происходят покрытия Луной планет, оказавшихся на небе в непосредственной близости к лунному пути. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце — тогда происходит **солнечное затмение**.

Фазы Луны



Растущая Луна



Стареющая Луна



МОИ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведите наблюдения за изменениями фаз Луны. Составьте лунный календарь.

«ПОМОЩНИК»

- В течение нескольких дней в одно и то же время понаблюдайте за изменениями фазы Луны, её положения на небесной сфере.
- Опишите свои наблюдения.
- В какой части горизонта расположен серп молодой Луны? В какое время и где восходит полная Луна?

В древних китайских летописях (XXII в. до н. э.) описывается печальная судьба двух придворных астрономов Хи и Хо, которые не предсказали солнечное затмение 22 октября 2137 г. до н. э., вызвавшее серьёзное замешательство в народе. По приказу императора им отрубили головы. Судьба этих астрономов показывает, какое значение в Древнем Китае придавали затмениям.

Схема солнечного затмения

Античный историк Геродот упоминает об астрономе Фалесе Милетском, который предсказал солнечное затмение, происшедшее в 584 г. до н. э. в Малой Азии во время битвы лидийцев с медянами. Сражающиеся были настолько поражены этим событием, что прекратили битву, заключили мир, закрепив его династическим браком.

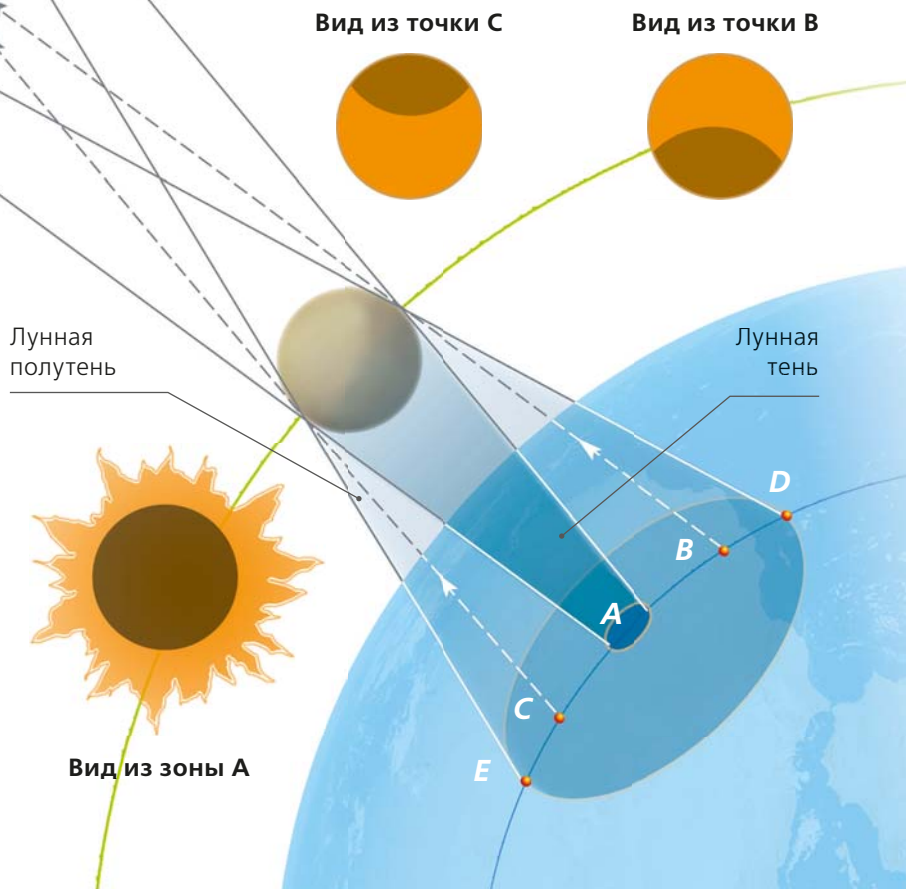
Солнечные затмения бывают только во время новолуния. Они случались бы каждое новолуние, если бы Луна двигалась по эклиптике. Но вследствие наклона лунной орбиты Луна в новолуние чаще проходит выше или ниже Солнца.

Очевидно, затмение возможно только тогда, когда Луна во время новолуния находится недалеко от эклиптики, т. е. вблизи одного из узлов лунной орбиты — точек пересечения лунного пути с эклиптикой.

Так как Луна движется по эллиптической орбите, она бывает то ближе, то дальше от Земли, поэтому её видимый угловой диаметр бывает то больше, то меньше солнечного. Если во время затмения Луна находится ближе к Земле и её видимый размер больше солнечного, то лунный диск полностью закрывает солнечный и наблюдается **полное солнечное затмение**.

Если во время затмения Луна находится в более далёкой части орбиты и её угловой диаметр меньше солнечного, то во время затмения края солнечного диска остаются незакрытыми и наблюдается яркое кольцо вокруг тёмного диска Луны — **кольцеобразное затмение**.

Полные солнечные затмения случаются довольно часто (в среднем 13 затмений за 18 лет), но каждое затмение может наблюдаться лишь в сравнительно узкой полосе земной поверхности. Поэтому в конкретном месте Земли это явление случается очень редко — один раз в десятки и сотни лет.



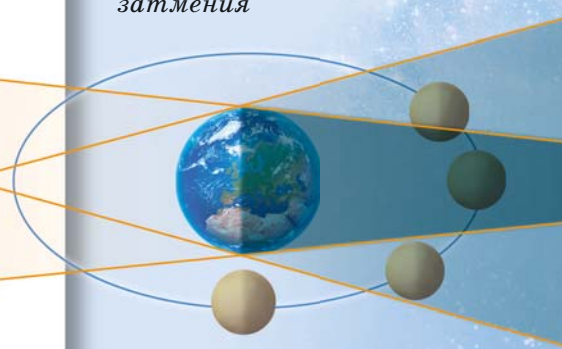
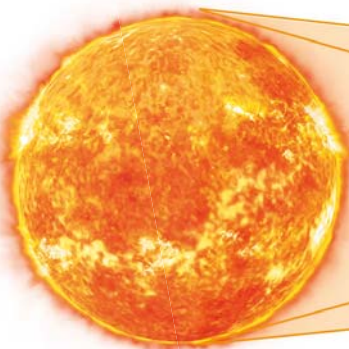
Так, например, в Москве полные солнечные затмения происходили 11 августа 1124 г., 20 марта 1140 г., 7 июня 1415 г., 25 февраля 1476 г., 19 августа 1887 г. Очередное полное затмение Солнца в Москве продолжительностью около 3,5 минут произойдёт 16 октября 2126 г.

ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ В отличие от солнечных, лунные затмения представляют собой физическое явление прохождения Луны сквозь земную тень. Во время полного затмения Луна видна на небе, только её свет заметно слабее, чем обычно, и имеет тёмно-красный цвет. Это объясняется тем, что солнечные лучи, проходя через земную атмосферу, преломляются в ней и таким образом попадают на поверхность Луны.

На протяжении календарного года происходит от 2 до 5 солнечных затмений и от 0 до 3 теневого лунного затмения.



Схема лунного затмения



Ещё древние вавилоняне заметили, что все затмения повторяются в том же порядке примерно через 18 лет и 11 дней.

Этот период у древних вавилонян назывался циклом Сароса (в переводе с египетского *сарос* — повторение), им пользовались для предсказаний затмений.



Христофор Колумб, которому вместе с его небольшим отрядом грозила голодная смерть на Ямайке из-за недружелюбного и агрессивного отношения местных жителей-карибов, нашёл способ добыть припасов, пригрозив им, что он лишит их лунного света. Вожди не поверили угрозам. Колумб знал, что 29 февраля 1504 г. вечером произойдёт затмение Луны. В этот день он пригласил вождей к себе и, как хороший актёр, прекрасно провёл сцену «отнятия» и последующего великодушного «возвращения» им Луны. С этого момента продовольственные припасы доставлялись в его лагерь в изобилии и без всяких проволочек.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое сидерический месяц?
- Опишите фазы Луны.
- Предскажите затмение Солнца. Полное затмение Солнца произошло 29 марта 2006 г. Когда произойдёт похожее затмение?

ВРЕМЯ И КАЛЕНДАРЬ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём заключаются различия между звёздным и солнечным временем.
- Как устроен лунный календарь.
- Как устроен солнечный календарь.
- В чём состоит различие юлианского календаря от григорианского.

ВСПОМНИТЕ:

- Где появились первые календари?
- Чему равна продолжительность синодического месяца?

ЗАДАЧА № 4

В течение года склонение Солнца меняется в пределах $-23,5^\circ \leq \delta \leq 23,5^\circ$. Определите, в пределах каких широт Солнце хотя бы раз в году бывает в зените. Где оно может вообще не восходить?

Основной задачей астрономии в течение веков было измерение времени и ведение календаря. Течение времени может измеряться посредством какого-либо регулярно повторяющегося в природе процесса. Этот процесс должен быть равномерным, чтобы установленные с его помощью единицы счёта времени сохраняли свою продолжительность, только тогда ими можно будет пользоваться.

ЗВЁЗДНОЕ И СОЛНЕЧНОЕ ВРЕМЯ

Вся наша жизнь связана с периодическими астрономическими явлениями природы — с чередованием дня и ночи, сезонов года, т. е. с вращением Земли вокруг своей оси и обращением Земли вокруг Солнца. Поэтому из астрономических наблюдений установлены две основные единицы счёта времени — *сутки* и *год*. Если время измеряют по звёздам, то за единицу времени принимают *звёздные сутки*.

Звёздные сутки — период вращения Земли вокруг собственной оси в системе отсчёта, связанной с удалёнными звёздами. Он равен промежутку времени между двумя последовательными верхними кульминациями точки весеннего равноденствия на одном и том же меридиане. Звёздные сутки делятся на 24 ч по 60 мин, и каждая минута — на 60 с. Сутки начинаются, когда точка весеннего равноденствия находится в верхней кульминации — выше всего над точкой юга.

Звёздное время S измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия t_γ . Для любой звезды имеется связь между звёздным временем S , часовым углом t и прямым восхождением α звезды:

$$S = t_\gamma = \alpha + t.$$

Звёздное время удобно для астрономов, но в повседневной жизни мы пользуемся *солнечным временем*.

Продолжительность солнечных суток, по которым мы живём, определяется промежутком времени между двумя последовательными верхними кульминациями Солнца. Солнечные сутки также делятся на 24 ч, час — на 60 мин и минута — на 60 с. Различают *истинное* солнечное время $T_\odot$, *среднее* солнечное время T_λ , *мировое* T_0 и *поясное* солнечное время.

Истинное солнечное время ($T_\odot$) измеряется часовым углом Солнца ($t_\odot$), увеличенным на 12 часов:

$$T_\odot = t_\odot + 12^h.$$

Момент верхней кульминации Солнца называется *истинным полднем* (середина дня). В это время часовой угол Солнца $t_\odot = 0^h$ и истинное солнечное время $T_\odot = 12^h$. В момент нижней кульминации Солнца, называемый *истинной полночью* (середина ночи), $t_\odot = 12^h$, а истинное солнечное время $T_\odot = 24^h = 0^h$, т. е. заканчиваются текущие и начинаются новые солнечные сутки.

Истинные солнечные сутки продолжительнее звёздных суток примерно на 4 мин. Допустим, что в момент весеннего равноденствия Земля находилась в положении 1, как показано на рисунке *a*, и в этот момент в точке *O* её поверхности наступил истинный полдень, т. е. Солнце (*C*) вместе с точкой весеннего равноденствия (Υ) находилось на меридиане (видимое положение Солнца на небе отмечено знаком $\odot 1$).

По прошествии звёздных суток Земля повернётся (по стрелке *D*) на угол 360° и переместится по своей орбите (по стрелке *A*) на угол $\omega \approx 1^\circ$ в положение 2. Тогда точка весеннего равноденствия снова окажется в меридиане, а Солнце до него ещё не дойдёт, так как за звёздные сутки оно сместится по эклиптике к востоку (по стрелке *B*) на тот же угол $\omega \approx 1^\circ$, в положение $\odot 2$.

Чтобы в пункте *O* снова наступил истинный полдень, Земле необходимо повернуться ещё на угол $\omega \approx 1^\circ$ (пункт *O* займёт положение *O'*), на что требуется около 4 мин. Вспомним, что $1^\circ = 4$ мин (4^m). Таким образом, продолжительность истинных солнечных суток соответствует повороту Земли примерно на 361° .

Солнце движется по эклиптике неравномерно — зимой быстрее, чем летом. Кроме этого, Солнце перемещается по эклиптике, а часовой угол отсчитывается вдоль небесного экватора. Это приводит к тому, что истинное солнечное время неравномерно.

Для удобства пользования вводят среднее солнечное время T_λ . За основу берётся средняя продолжительность суток за год. Наши часы отрегулированы как раз на продолжительность средних солнечных суток.

Разница между средним и истинным солнечным временем, которую называют *уравнением времени*, рассчитывается на каждый день и приводится в астрономических календарях. Эта разница равна нулю 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. 11 февраля она достигает +14 мин, а 2 ноября −16 мин.

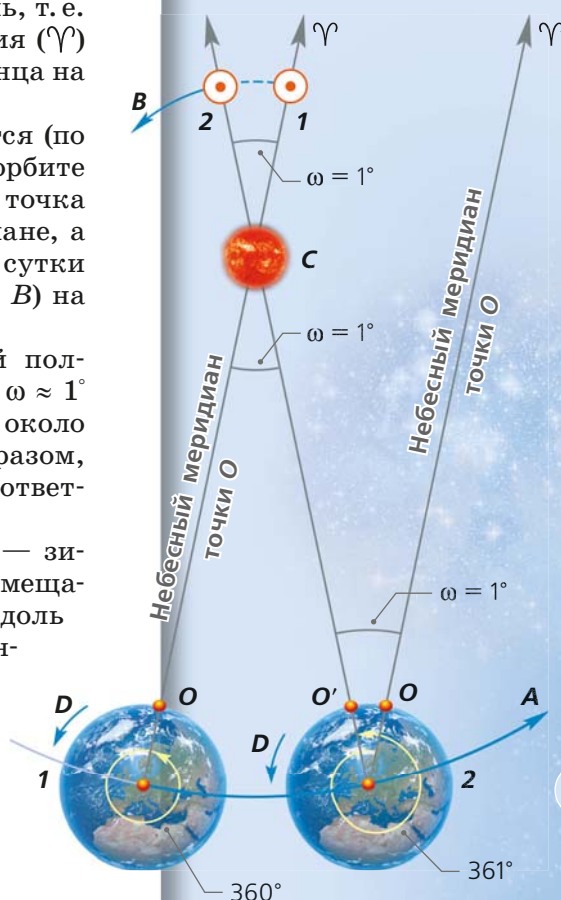
В каждом месте на Земле своё солнечное время. Среднее время на нулевом меридиане Гринвичской обсерватории в Лондоне получило название *всемирного времени* (обозначается T_0). Тогда в любом пункте с долготой λ среднее солнечное время

$$T_\lambda = T_0 + \lambda.$$

Как видно, уже в пределах большого города, в разных его концах, а тем более в пределах области среднее солнечное время различно, что неудобно для использования в реальной жизни. Поэтому было введено *поясное время* T_n . В системе поясного времени весь земной шар разбит вдоль меридианов на 24 часовых пояса, в каждом месте внутри пояса время одинаковое.

Зная всемирное время T_0 и номер n часового пояса, можно определить поясное время:

$$T_n = T_0 + n.$$



ЗАДАЧА № 5

Осеннее равноденствие в 1985 г. наступило 23 сентября в $2^h 08^m$ по Всемирному времени. Когда равноденствие наступило в Краснодаре ($n=2$) и Иркутске ($n=8$)?



Из приведённых формул получим связь между поясным и средним солнечным временем:

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda.$$

В России в 1918 г. было введено *декретное время*, которое на один час больше поясного. Его действие сохранилось до наших дней.

Московское время — декретное время для Москвы — поясное время второго часового пояса, увеличенное на час:

$$T_M = T_0 + 2 \text{ ч } (2^ч) + 1 \text{ ч } (1^ч) = T_0 + 3 \text{ ч } (3^ч).$$

КАЛЕНДАРИ Основой любого календаря служат длительные промежутки времени, определяемые по периодическим явлениям природы — смене лунных фаз и смене сезонов года.

Календари, основанные на смене лунных фаз, называются *лунными*, на смене сезонов года — *солнечными*, а на обоих этих явлениях — *лунно-солнечными*.

Каждый календарь обязан установить определённый порядок счёта дней (солнечных суток), число суток в длительных периодах времени и указать начало счёта самих периодов.

Первая задача не вызывает затруднений, третья решается тоже весьма просто, так как за начало счёта можно принять любое реальное или мифическое событие.

Вторая же задача решалась бы легко, если бы период смены лунных фаз, называемый лунным (синодическим) месяцем, и тропический год (период смены сезонов года) содержали в точности целое число суток.

Но все три периода несоизмеримы между собой:

$$\text{тропический год } T_\gamma = 365^д, 24\,220 = 365^д 5^ч 48^м 46,08^с;$$

$$\text{лунный месяц } S = 29^д, 53\,059 = 29^д 12^ч 44^м 02,98^с.$$

В то же время календарный месяц и календарный год должны содержать целое число суток, чтобы начало каждого месяца и года совпадало с началом суток. Поэтому создание идеально точного календаря невозможно, и время от времени в него приходится вносить поправки.

Лунный календарный год содержит 354 дня и делится на 12 месяцев, длительность которых чередуется по 30 и 29 дней и в среднем составляет 29,5 суток, т. е. близка к периоду смены лунных фаз. Для согласования календаря с сезонами года в лунном календаре раз в несколько лет вводят дополнительный месяц. Лунный календарь широко используется в мусульманском мире.

В Древнем Египте за три тысячелетия до нашей эры был создан солнечный календарь. Из наблюдений было установлено, что первое предутреннее появление ярких звёзд после периода их невидимости повторяется примерно через 360 суток. Поэтому первый древнеегипетский календарь содержал 360 дней и состоял из 12 месяцев, по 30 дней в каждом.

Для удобства счёта времени эклиптика была разделена по числу дней в календарном году на 360 частей — градусов, и такое деление окружности сохранилось до наших дней.

В дальнейшем длительность года была уточнена, и к началу нашей эры его продолжительность составляла 365,25 суток.

Римский император Юлий Цезарь (100—44 гг. до н. э.) в 46 г. до н. э. поручил египетскому астроному Созигену разработать новый календарь.

Созиген принял среднюю продолжительность календарного года равной 365,25 суток ($365^{\text{д}} 6^{\text{ч}}$) — по египетскому счислению, назвав этот промежуток времени *юлианским годом* (в честь Юлия Цезаря). Поскольку календарный год должен содержать целое число суток, было принято отсчитывать в трёх последовательных годах по 365 дней, а в каждом четвёртом году — 366 дней (удлинённые, или високосные, годы).

Но юлианский год длиннее реального тропического года на 11 мин 14 с. К 1570 г., т. е. за 1245 лет, астрономические явления, связанные с сезонами года, сместились на 10 суток и, например, день весеннего равноденствия, который должен был приходиться на 21 марта, пришёлся на 11 марта. Такое смещение вызвало расхождение между принятыми датами религиозных праздников и явлениями природы, по которым эти праздники были установлены.

Своим распоряжением (буллой) от 24 февраля 1582 г. римский папа Григорий XIII ввёл новый календарь, приказав следующий день после четверга 4 октября 1582 г. считать пятницей 15 октября (вместо 5 октября) 1582 г., и таким образом в 1583 г. днём весеннего равноденствия снова стало 21 марта.

Реформированный календарь стал называться *григорианским календарём*, или новым стилем. В нём чередование простых и високосных годов в пределах каждого столетия ведётся так же, как и в юлианском календаре, но последний год столетия считается високосным только в том случае, если номер столетия делится на 4.

В России на григорианский календарь перешли в 1918 г., сместив даты уже на 13 суток.

Длительность года в календаре, по которому мы сейчас живём, лишь на 0,0003 суток (на $25,9^{\text{с}}$) превышает длительность тропического года и, следовательно, смещение равноденствий и солнцестояний на 1 день вперёд происходит только за 3333 года.

Год в юлианском календаре делился на 12 месяцев с чередованием по 31 дню в нечётных месяцах и по 30 дней в чётных, за исключением последнего месяца года — февраля, на долю которого в простом году оставалось 29 дней, а в високосном — 30 дней. В начале нашей эры римский сенат переименовал шестой месяц в Август в честь императора.

Кроме того, в этот месяц добавили 1 день (получился 31 день), который забрали у февраля, в котором осталось 28 дней в обычные годы и 29 в високосные.

Спутники Магеллана, вернувшись из кругосветного путешествия, увидели, что они потеряли целые сутки, несмотря на то что капитан каждый день в журнале отмечал моменты восхода и захода Солнца. Это связано с тем, что, двигаясь на кораблях с востока на запад, они по отношению к Земле сделали на один оборот меньше, чем Земля и люди, которые не путешествовали с ними.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое солнечные и звёздные сутки?
- 25 декабря солнечные часы в Москве показали истинный полдень. Каково московское время в этот момент и время в Лондоне? Долгота Москвы $\lambda \approx 2^{\text{ч}} 30^{\text{м}}$.
- 22 декабря в Москве в истинный полдень склонение Солнца составляет $-23,5^{\circ}$. Чему равна высота Солнца над горизонтом в этот момент?

ДЕКРЕТ

О ВВЕДЕНИИ В РОССИИ ЗАПАДНО-ЕВРОПЕЙСКОГО КАЛЕНДАРЯ

В целях установления в России единых культурных народными и численными Колясников постановляет известия месяца сего года, в гражданский об

В силу этого:
1) Первый день после 31-го января с февраля, а 14-я февраля, второй день с 10) До 1 июля с. г. писать, после числу календарю, в скобках число по до с календарю.

Председатель Совета Народных Комиссаров
Генеральный Секретарь Совета Народных Комиссаров
25-го января, 1918 г.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Солнце движется по эклиптике по зодиакальным созвездиям.
- Точка весеннего равноденствия является началом отсчёта координаты прямого восхождения, а её часовой угол определяет звёздное время.
- Часовой угол Солнца +12 ч определяет солнечное время.
- Солнце по эклиптике движется неравномерно — зимой быстрее, а летом медленнее, что сказывается на неравномерности истинного солнечного времени.
- Планеты совершают петлеобразные движения среди звёзд.
- Луна меняет фазы через синодический месяц, который лежит в основе лунного календаря.
- Плоскость лунной орбиты не совпадает с эклиптикой, поэтому затмения случаются не каждый месяц, а только тогда, когда новолуния и полнолуния происходят вблизи узлов лунной орбиты.
- В основе солнечного календаря лежит тропический год — период смены сезонов года, в течение которого Солнце возвращается в точку весеннего равноденствия.
- Средняя продолжительность юлианского года на 11 мин 14 с больше тропического года. Чтобы ликвидировать эту разницу, которая к XVI в. достигла 10 суток, провели реформу календаря, передвинув все даты на 10 дней.

ПОДРОБНЕЕ...

- Дагаев М.М. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.
- Сурдин В.Г. Путешествие к Луне. — М.: Физматлит, 2009.
- Энциклопедия для детей. Т.8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Каким образом можно приблизительно проследить за эклипкой на звёздном небе?
- Как вы думаете, отличается ли и если да, то на сколько продолжительность года в солнечных и звёздных сутках?
- Если бы Луна двигалась точно по эклиптике, то как часто происходили бы солнечные и лунные затмения?
- Подсчитайте, сколько дней проходит от весеннего до осеннего равноденствий и от осеннего до весеннего равноденствий. На сколько отличается продолжительность весны и лета, осени и зимы? На что это указывает?
- Можно ли использовать описания затмений, происходивших в древности во время каких-то событий, для датировки этих событий?

ЗАДАЧА № 6

Путешественники измерили среднее солнечное время $T_{\lambda} = 23^{\text{ч}} 15^{\text{м}} 12^{\text{с}}$ в момент, когда радио передало сигнал точного московского времени $T_{\text{м}} = 12^{\text{ч}}$. Определите долготу места, где находятся путешественники.

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>

Глава 3

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

- СИСТЕМА МИРА
- ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ
- КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ
- МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПОЛЁТЫ



ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Больше 50 лет назад 12 апреля 1961 г. советский космонавт Юрий Гагарин стал первым человеком в космосе. Ракета-носитель «Восток-1» стартовала с космодрома Байконур в 9:07 по московскому времени. Вся миссия длилась 108 мин, а полёт вокруг Земли на скорости 28 260 км/ч занял меньше полутора часов. За это время «Восток-1» завершил не совсем круговой оборот на максимальной высоте 327 км перед тем, как замедлиться до точки, в которой капсула отсоединилась в атмосферу для баллистического возвращения.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как в античные времена представляли строение Солнечной системы.
- Как в гелиоцентрической системе мира объясняются петлеобразные движения планет.
- Какие наблюдения доказывают, что Земля обращается вокруг Солнца, а не наоборот.
- Как учёные определяют расстояния до звёзд.
- Что такое парсек.

ВСПОМНИТЕ:

- Как движутся планеты для наблюдателя с Земли?
- Как движутся звёзды по небесной сфере?

Древнегреческий математик и астроном Евдокс (около 408—365 гг. до н. э.) объяснял петлеобразное движение планет комбинацией 26 чисто умозрительных геометрических сфер.

Выдающийся философ и создатель древней физики Аристотель, пытаясь усовершенствовать геоцентрическую систему мира, увеличил число сфер до 56, утверждая, что они представляют собой хрустальные сферы. Считая шарообразную Землю центром Вселенной, ограниченной хрустальной сферой неподвижных звёзд, Аристотель говорил о резком отличии всего небесного от земного.

Согласно Аристотелю, небесные светила состоят из эфира — особого светоносного, невесомого, вечного и неизменного вещества. Круговое движение — самое совершенное, и поэтому небесные светила могут двигаться только равномерно по кругам. Движущееся тело не может быть центром кругового движения других тел.

СИСТЕМА МИРА

С глубокой древности люди пытались объяснить устройство того большого мира, в котором мы живём, понять место человечества во Вселенной. Этот путь был очень непростым и подчас весьма драматичным.

ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА

Пытаясь представить себе строение мира (Вселенной), объяснить видимые движения небесных светил и предвычислить их положение на небе, древнегреческие мыслители создавали геометрические модели, известные под названием геоцентрических систем мира (от греч. *Гей* — Земля, т. е. Земля в центре мира). В этих системах центром Вселенной считалась неподвижная Земля, а все небесные светила — обращающимися вокруг неё.

Такой взгляд на природу в те далёкие времена был вполне закономерен, так как непосредственно вытекал из наблюдений: никаких признаков вращения Земли не обнаруживалось, зато наблюдалось равномерное суточное вращение неба вместе со светилами вокруг Земли. Поэтому равномерное движение по окружностям считалось совершенным (идеальным) и приписывалось всем без исключения небесным светилам.

Суточное вращение звёзд объяснялось просто: считалось, что звёзды находятся на внутренней поверхности сферы, которая равномерно вращается вокруг Земли. Но чтобы объяснить перемещение Солнца, Луны и неравномерное петлеобразное передвижение планет по звёздному небу, не нарушая принципа совершенного движения по окружности, приходилось создавать сложные построения из большого числа геометрических сфер, различных по своим размерам.

Многовековые астрономические наблюдения подытожил во II в. выдающийся александрийский астроном Клавдий Птолемей. Будучи сторонником учения Аристотеля, он разработал математическую теорию движения Солнца, Луны и планет, позволявшую с большой по тому времени точностью предвычислять видимые положения этих светил на небе.

Упрощённая схема его геоцентрической системы мира представлена на рисунке *a*. В соответствии со скоростью перемещения светил Птолемей расположил их в следующей последовательности от Земли: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн. Далее расположена сфера неподвижных звёзд, ограничивающая Вселенную.

В системе Птолемея вращение небесной сферы вокруг Земли с востока на запад объясняет восход и заход светил. Помимо этого, Солнце и Луна равномерно движутся вокруг Земли в прямом направлении (с запада к востоку) по большим кругам — **деферентам** (от лат. *деференс* — несущий). Планеты также равномерно и в прямом направлении движутся по малым кругам — **эпициклам**.

(от греч. *эпи* — на и *киклос* — круг), а центры эпициклов равномерно движутся в прямом направлении по своим деферентам. Сочетание движения планет по эпициклам с движением эпициклов по деферентам объясняло видимое петлеобразное движение планет.

Знание параметров циклов и эпициклов, их угловых радиусов и скоростей перемещения по ним позволяло заранее рассчитать положение планеты в будущем.

Система мира Птолемея сыграла большую роль в науке, так как позволяла предвычислять видимое положение планет и побуждала астрономов совершенствовать наблюдения с целью уточнения теории движения планет.

Система мира Птолемея хорошо укладывалась в рамки религиозных христианских представлений о Вселенной, поэтому она поддерживалась церковью. Благодаря этому она продержалась в науке почти полторы тысячи лет.

Между тем потребности мореплавания требовали более точного предвычисления положения планет на много лет вперёд. В рамках геоцентрической системы мира Птолемея составление таких таблиц требовало включения новых эпициклов.

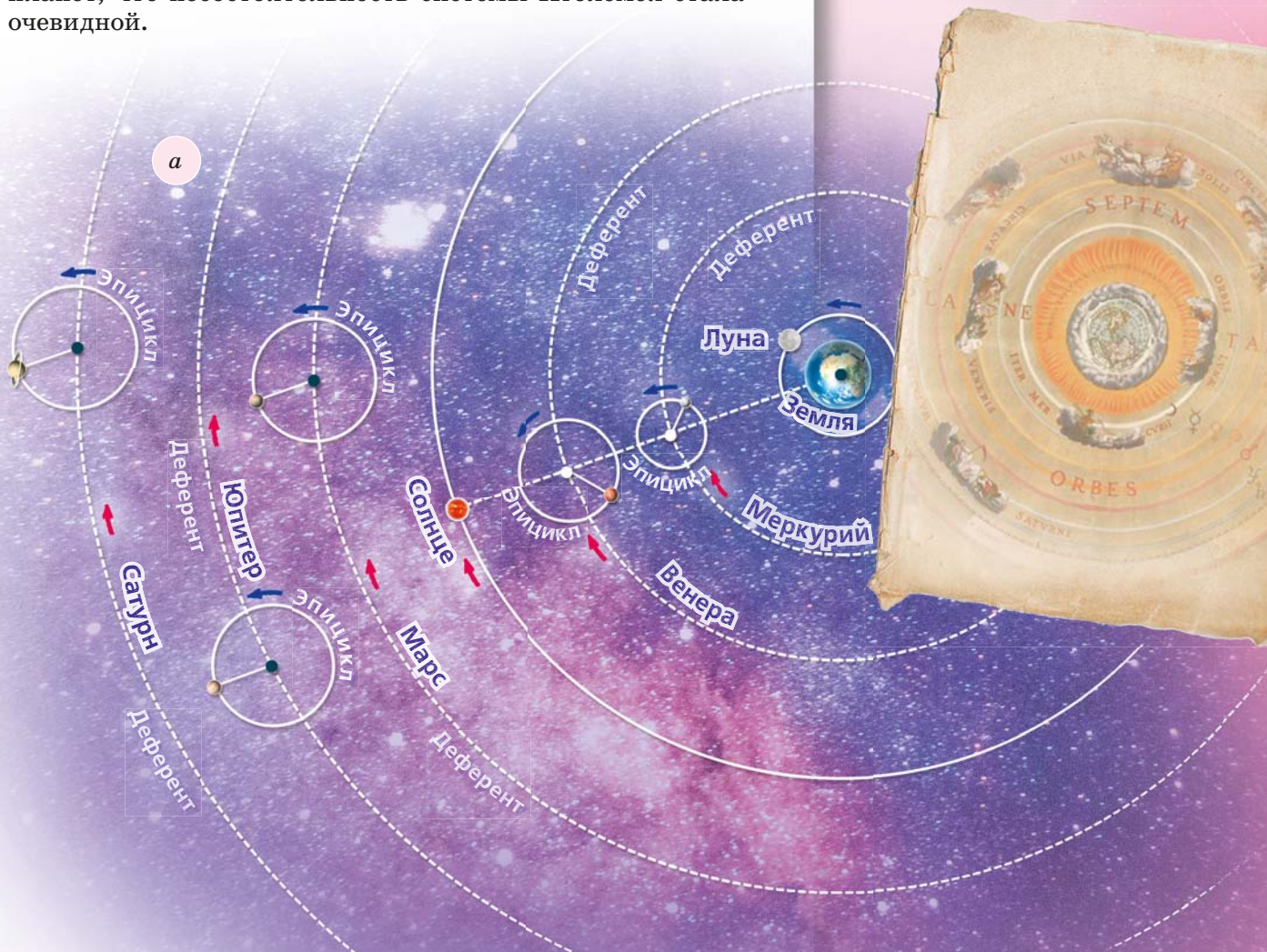
К середине XIII в. общее число эпициклов достигло 70 и настолько запутало вычисления видимых положений планет, что несостоятельность системы Птолемея стала очевидной.



Клавдий Птолемей

(ок. 100—ок. 170)

Древнегреческий учёный. Разработал математическую теорию движения планет вокруг неподвижной Земли.





Николай Коперник

(1473—1543)

Польский астроном. Объяснил видимые движения небесных светил вращением Земли вокруг оси и обращением планет (в том числе Земли) вокруг Солнца. Своё учение изложил в сочинении «Об обращениях небесных сфер».

ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА КОПЕРНИКА

В середине XVI в. Николай Коперник обнаружил, что суточное движение небесного свода очень просто объяснить вращением Земли вокруг своей оси. Он показал, что сложность системы Птолемея уменьшается, если основываться на следующих гипотезах:

1) планеты вращаются вокруг Солнца, а не вокруг Земли;

2) Земля есть одна из планет и, следовательно, также обращается вокруг Солнца.

Таким образом, по теории Коперника планеты действительно движутся по кругам без всяких остановок и поворотов; описываемые ими петли (эпициклы) возникают из-за того, что мы смотрим на них с движущейся Земли.

Годичное движение Солнца по эклиптике объясняется годичным движением Земли вокруг Солнца. Земля никак не выделена и является одной из планет, занимая третье место от Солнца. Порядок расположения планет от Солнца такой: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн. Система Коперника с Солнцем в центре называется **гелиоцентрической** (от греч. *гелиос* — Солнце). Вокруг Земли движется только Луна.

Рассмотрим видимое движение так называемой **верхней планеты** (например, Марса), т. е. планеты, находящейся дальше от Солнца, чем Земля.

На рисунке **б** цифрами **1, 2, 3, 4, ...** обозначены положения Земли и Марса на своих орбитах и видимое положение планеты на небесной сфере в разные последовательные моменты времени. Земля и планета движутся в том же направлении, но движение планеты медленнее.

В первый момент, когда Земля и планета расположены на своих орбитах в точках **1**, планета будет на бесконечно далёкой небесной сфере в точке **1**. Ко второму моменту планета передвинется среди звёзд влево, т. е. к востоку. Но так как Земля движется быстрее планеты, то в следующие моменты планета начнёт замедлять своё видимое движение до момента **3**, где она остановится. Далее она меняет движение на попятное.

В четвёртый момент наступает **противостояние** планеты. Земля обгоняет её по орбите, а на небесной сфере планета будет двигаться с востока на запад, т. е. попятно, вплоть до момента **5**.

В моменты **6** и **7** мы будем наблюдать прямое движение планеты по небесной сфере с запада на восток. Таким образом, планета опишет на звёздном небе путь **1—2—3—4—5** в форме петли.

Внешняя планета подходит ближе всего к Земле во время **противостояния**, когда она находится на небе в точке, противоположной Солнцу. Следовательно, в это время Солнце, Земля и планета находятся на одной прямой. Как видно из рисунка **б**, вблизи точки противостояния планета совершает обратное (попятное) движение.

Во время противостояния планета видна всю ночь, достигая максимальной высоты над горизонтом в полночь.

Когда планета проходит за Солнцем (и, следовательно, не видна), то говорят, что она находится в **соединении** с Солнцем. В это время происходит её самое быстрое прямое движение, так как Земля и планета движутся навстречу друг другу.

К внутренним (или нижним) планетам относятся Меркурий и Венера, их орбиты расположены ближе к Солнцу, чем Земля. По этой причине Венера бывает видна только как утренняя или вечерняя звезда: утром она может быть видна на рассвете на востоке в лучах утренней зари, а вечером на западе в лучах вечерней зари. При этом она никогда не отходит от Солнца дальше чем на 48° .

На рисунке **б** показано, как Земля и планета движутся в одну сторону. Планета движется быстрее Земли. В первый момент планета находится на одной линии с Землёй за Солнцем и с Земли не видна; это положение называется **верхним соединением** планеты с Солнцем. После этого она появляется из-за Солнца и с каждым днём отходит от него всё дальше влево, т.е. к востоку. В это время она видна по вечерам.

Достигнув **наибольшей восточной элонгации** (угол между Солнцем, планетой и Землёй равен 90°), она начинает опять приближаться к Солнцу, проходит между Солнцем и Землёй положение так называемого **нижнего соединения** и появляется по другую сторону Солнца, к западу от него, в виде утренней звезды.

После **наибольшей западной элонгации**, когда угол между Солнцем, планетой и Землёй равен 90° , она опять приближается к Солнцу и, наконец, скрывается за ним; затем всё повторяется в том же порядке.

По повторяющимся на небе положениям планет относительно Солнца Коперник вычислил расстояния от планет до Солнца, приняв за единицу измерения среднее расстояние от Земли до Солнца — 1 астрономическую единицу (1 а.е. = 149,6 млн км):

Меркурий — 0,4;

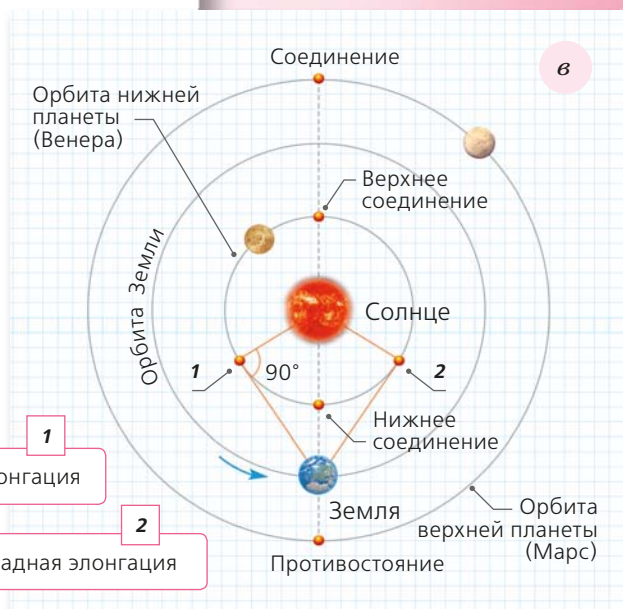
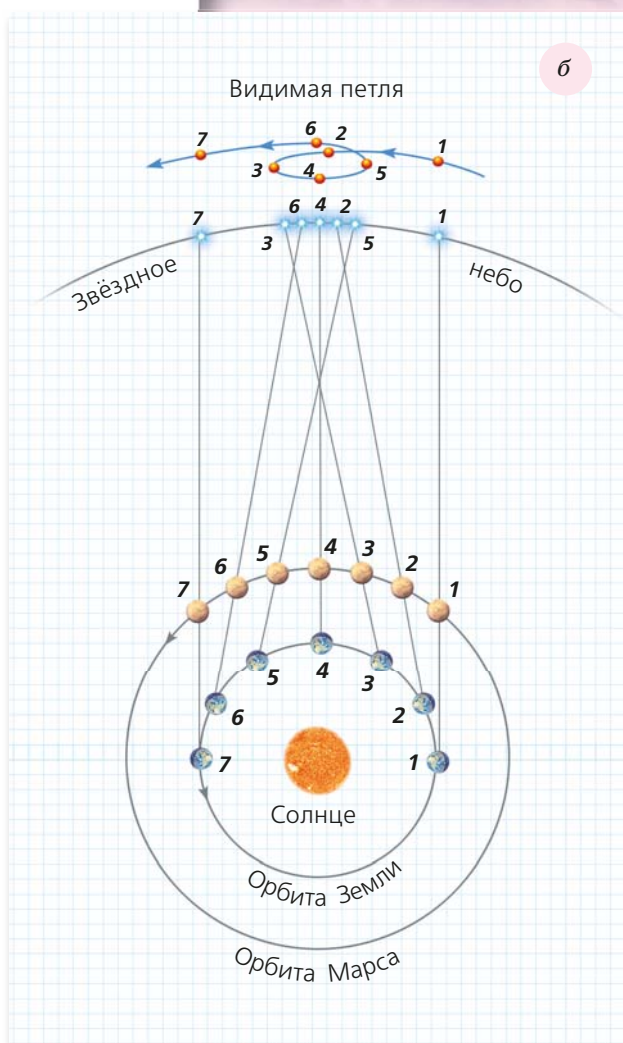
Венера — 0,7;

Земля — 1;

Марс — 1,5;

Юпитер — 5;

Сатурн — 10.



Когда мы едем на поезде или в автомобиле, то складывается впечатление, что все окружающие предметы движутся нам навстречу. Чем ближе предмет, тем быстрее для него это кажущееся движение, а очень далёкие предметы движутся так медленно, что долгое время кажется, будто они едут вместе с нами, мы видим их в одном и том же направлении. Подобным образом можно охарактеризовать годичное движение Земли, которое проявляется в кажущемся встречном движении всех небесных тел, а не одного только Солнца. Понятно, что чем дальше светило, тем меньше это смещение, тем труднее его заметить.

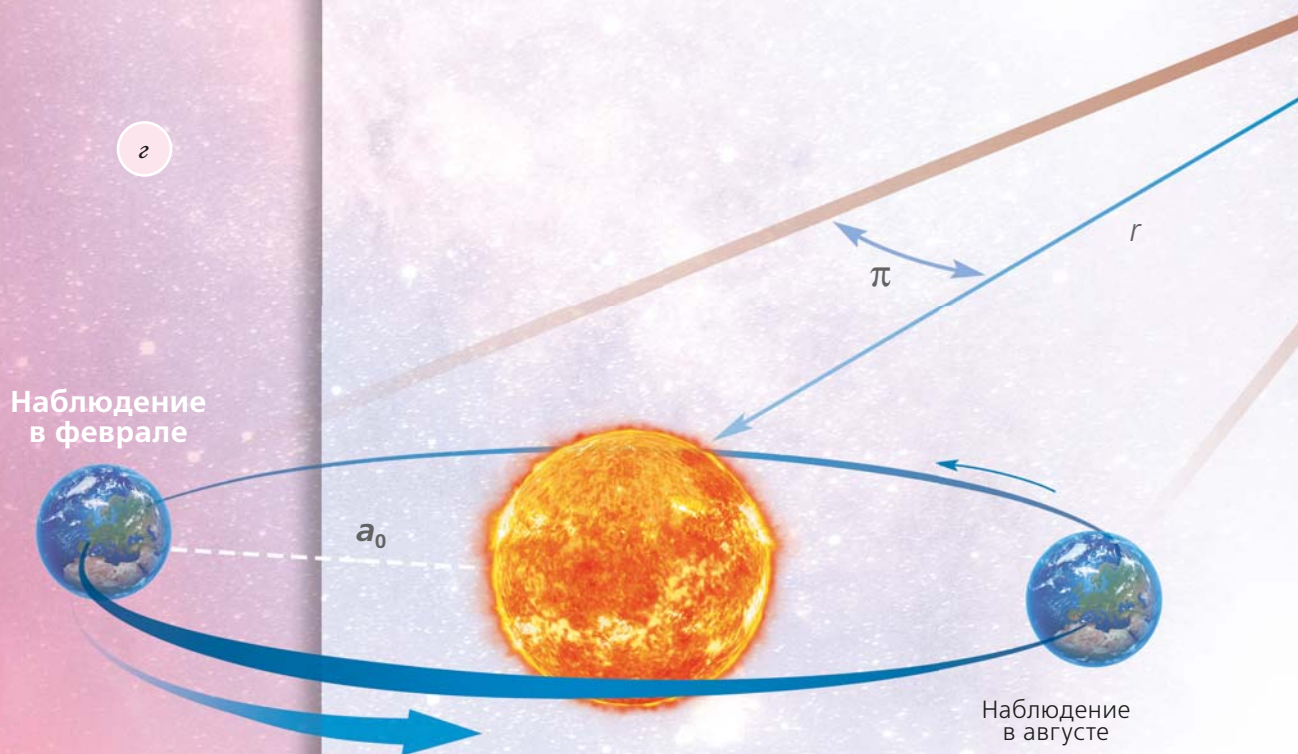
ГОДИЧНЫЙ ПАРАЛЛАКС Земля обращается вокруг Солнца, поэтому можно обнаружить периодическое смещение близких звёзд на фоне далёких звёзд.

Наибольшее в течение года отклонение звезды от её среднего положения называют **гелиоцентрическим годичным параллаксом** звезды. На рисунке 2 видно, что гелиоцентрический годичный параллакс — это угол π , под которым со звезды, удалённой на расстояние r , виден радиус a_0 земной орбиты:

$$\sin \pi = \frac{a_0}{r}.$$

Гелиоцентрический параллакс определяют путём измерения из двух положений Земли на её орбите параллактического смещения звезды на небесной сфере. Ясно, что, если бы Земля стояла на месте, а Солнце обращалось вокруг неё, как в геоцентрической системе мира, такого параллактического смещения звёзд не было бы.

Самая близкая к нам звезда α Центавра (это тройная звезда, ближайшая в ней — Проксима Центавра) имеет параллакс $\pi = 0,75''$. Зная годичный параллакс звезды, можно найти расстояние до неё.



Из рисунка 2 видно, что расстояние до звезды

$$r = \frac{a_0}{\sin \pi},$$

где $a_0 = 1 \text{ а.е.} = 149,6 \text{ млн км}$ — среднее расстояние от Земли до Солнца.

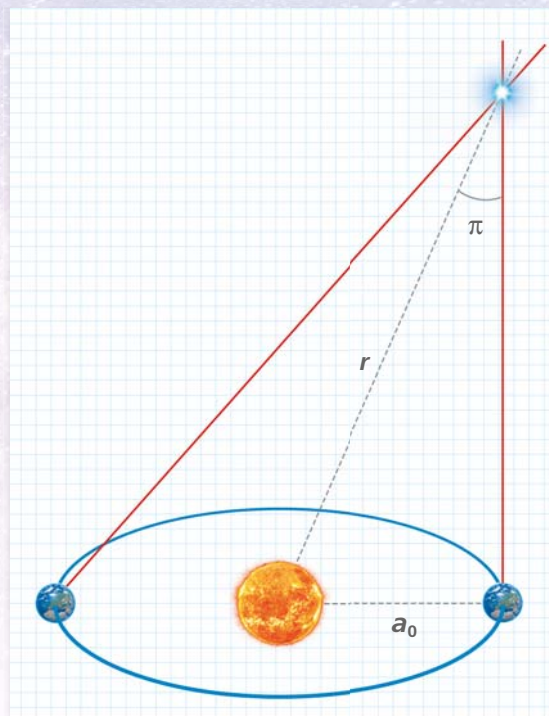
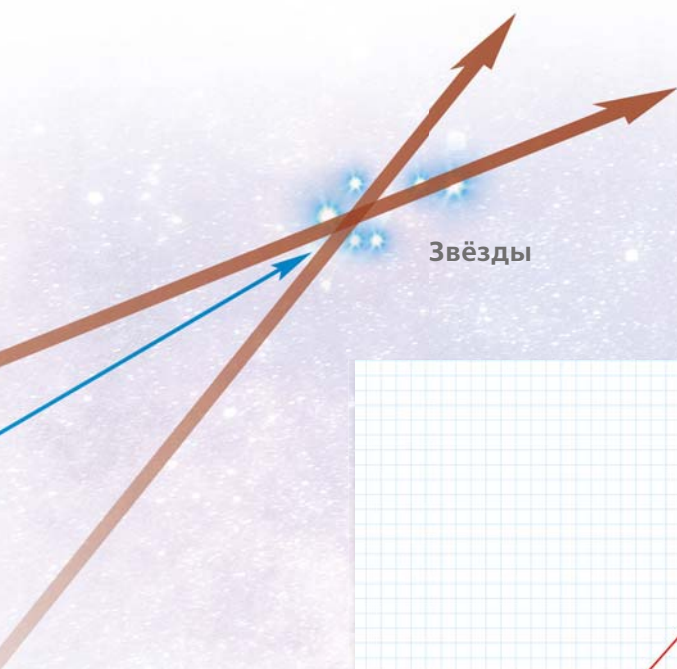
Учитывая, что при малых углах и радианной мере измерения углов $\sin \pi_{\text{рад}} \approx \pi_{\text{рад}}$ и что $1 \text{ рад} = 206\,265''$, имеем $r = 206\,265 \cdot a_0 / \pi''$. Здесь угол π'' выражен в секундах дуги.

В астрономии за единицу расстояний до звёзд принята величина 1 парсек = 1 пк = $206\,265 \cdot a_0 = 3 \cdot 10^{16} \text{ м} = 3,26 \text{ св. г.}$

Тогда

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{\pi''}.$$

Подставляя в эту формулу параллакс звезды α Центавра, имеем $r_{\text{пк}} = 1/\pi'' = 1/0,75 = 1,4 \text{ пк}$, так что свет от α Центавра до Земли идёт 4,3 года.



Первым, кто попытался измерить параллактическое смещение звёзд и тем самым проверить теорию Коперника, был Тихо Браге. До изобретения телескопа его измерения положения звёзд невооружённым глазом были самыми точными. Путём наблюдений он установил, что смещения звёзд нет и что Коперник не прав. Тихо Браге не предполагал, что звёзды находятся так далеко, что при его точности измерений углов около $1'$, определяемой свойствами глаза, он в принципе не смог бы измерить параллаксы звёзд.

Астрономам удалось определить параллаксы некоторых звёзд только в 1838 г. В наше время с помощью космических телескопов возможно измерять параллаксы звёзд до значений менее $0,001''$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- В чём различия геоцентрической и гелиоцентрической систем мира?
- Максимальное восточное удаление Венеры от Солнца составляет примерно 46° . Чему равно расстояние от Солнца до Венеры в а.е.?
- Нижнее соединение Венеры повторяется через 1 год 7 месяцев. Почему прохождение Венеры по диску Солнца бывает очень редко (через 121,5 года, 105,5 и 8 лет)?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- По каким законам движутся планеты.
- Как определить массы планет по элементам их движения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое эллипс и каковы его основные элементы?
- Как формулируется закон всемирного тяготения?



Иоганн Кеплер
(1571—1630)

Немецкий математик, астроном, механик, оптик. Первооткрыватель законов движения планет Солнечной системы.

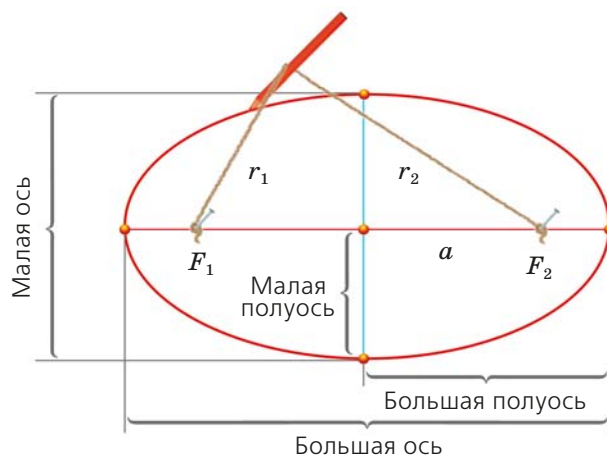
ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

Поместив Солнце в центр Солнечной системы, Коперник полагал, что планеты движутся равномерно по окружностям. Но к XVI в. с повышением точности астрономических наблюдений стало ясно, что теория движения планет требует уточнения. Большую роль в этом сыграли наблюдения великого датского астронома Тихо Браге (1546—1601). В течение многих лет он изучал движение планет в специально выстроенной обсерватории. Его наблюдения отличались высокой точностью, несмотря на то что учёный смотрел на небесные тела невооружённым глазом. Телескоп был изобретён только в 1610 г. Наблюдения Тихо Браге были обработаны знаменитым астрономом Иоганном Кеплером.

ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

Изучая движение планеты Марс по наблюдениям Тихо Браге и используя расчёты Коперника, Кеплер сначала изобразил орбиты Земли и Марса окружностями с радиусами 1 и 1,52 а. е. Чтобы объяснить неравномерное движение Солнца по эклиптике, Кеплер сместил его из центра земной орбиты на $\frac{1}{59}$ (0,017) его радиуса. Но многочисленные попытки изобразить орбиту Марса окружностью с центром в Солнце или вне его окончились неудачей: вычисленные положения планеты на небе не совпадали с наблюдаемыми.

Тогда Кеплер отверг многовековое убеждение в круговом равномерном движении планет и стал подбирать для Марса более подходящую форму орбиты. Лучше других подошёл эллипс с Солнцем в одном из фокусов и эксцентриситетом $e = 0,091$.



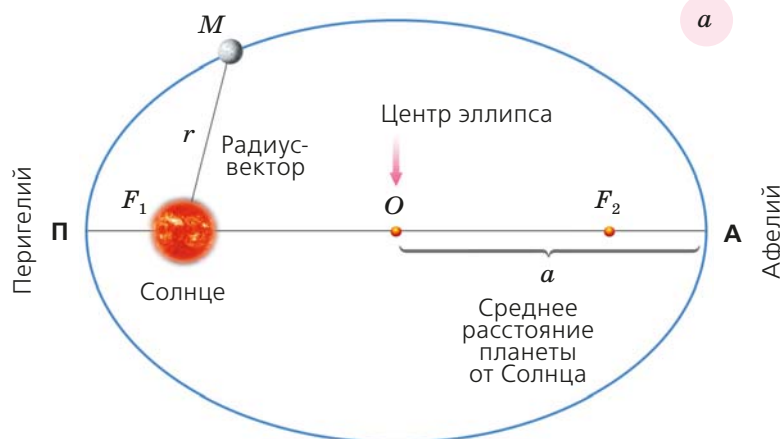
Следовательно, принятое Кеплером положение Солнца вне центра круговой орбиты Земли означало, что Земля тоже движется по эллиптической орбите с небольшим эксцентриситетом $e = 0,017$ и её движение, как и движение Марса, неравномерно.

Эллипсом называют замкнутую кривую линию на плоскости, обладающую следующим свойством: сумма расстояний от каждой её точки до двух данных точек F_1 и F_2 , называемых фокусами, есть величина постоянная.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА В 1616 г. Кеплер сформулировал свой **первый закон**: **орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.**

Следовательно, орбиты всех планет Солнечной системы имеют один общий фокус, расположенный в центре Солнца.

На рисунке **a** изображена орбита планеты M в виде эллипса с Солнцем в одном из фокусов F_1 . Центр эллипса находится в точке O , большая ось $AP = 2a$, полуось $AO = OP = a$.



Ближайшую к Солнцу точку P орбиты называют **перигелием**, а наиболее удалённую точку A — **афелием**.

При движении планеты M вокруг Солнца её гелиоцентрическое расстояние (расстояние от Солнца) равно модулю радиус-вектора: $r = F_1M$. Перигельное расстояние $q = a(1 - e)$, афелие расстояние $Q = a(1 + e)$. Первому закону Кеплера подчиняются также движения комет и астероидов.

В дальнейшем И. Ньютон, используя открытый им закон всемирного тяготения, дал более общую формулировку рассматриваемого нами закона.

ПЕРВЫЙ ОБОБЩЁННЫЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА: под действием силы притяжения одно небесное тело движется в поле тяготения другого небесного тела по одному из конических сечений — кругу, эллипсу, параболе или гиперболе.

Эксцентриситеты для окружностей $e = 0$, для эллипсов $0 < e < 1$, для парабол $e = 1$, для гипербол $e > 1$. Эллипсы планетных орбит мало отличаются от окружностей.

В Солнечной системе наибольший эксцентриситет имеет орбита Меркурия $e = 0,2056$, эксцентриситет орбиты Земли $e = 0,0167$.

Знаменитая комета Галлея имеет эксцентриситет орбиты $e = 0,967$, в перигелии она подходит к Солнцу на расстояние $0,587$ а. е., а в афелии удаляется от Солнца на расстояние $35,3$ а. е. — за орбиту Нептуна.

Эксцентриситетом называют отношение расстояния между фокусами эллипса к его большой оси (к большому диаметру):

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



ЗАДАЧА № 7

Орбита астероида Паллада имеет большую полуось $a = 2,77$ а. е., эксцентриситет $e = 0,235$. Найдите его перигельное и афелийное расстояния, сидерический и синодический периоды обращения, а также круговую скорость (среднюю скорость).



МОИ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нарисуйте эллипс. Укажите на рисунке основные элементы этой геометрической фигуры.

«ПОМОЩНИК»

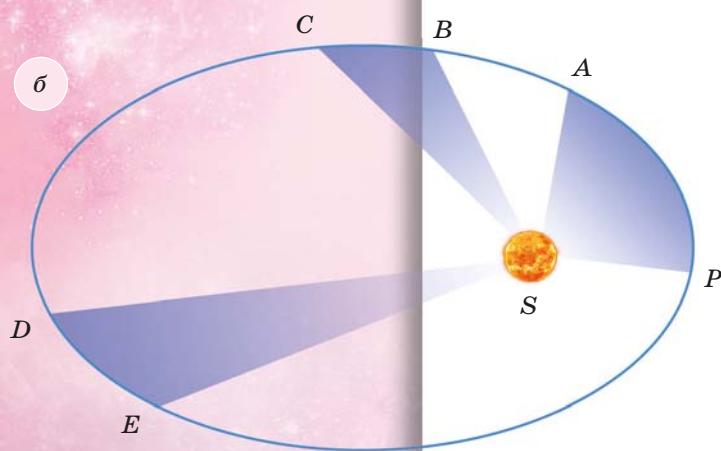
● Простой способ вычерчивания эллипса следует из его определения. Воткните в фокусы F_1 и F_2 две булавки, наденьте на них нитку со связанными концами.

● Если теперь двигать карандашом по бумаге так, чтобы нитка всё время оставалась натянутой, то получится эллипс.

● Укажите основные элементы полученного эллипса.

● Определите эксцентриситет полученного эллипса.

Второй закон Кеплера объясняет факт быстрого перемещения Солнца по небу в первых числах января. В это время Земля находится в перигелии и движется с большей скоростью, а нам, наблюдающим за Солнцем, кажется, что Солнце быстрее перемещается среди звёзд. В начале июля Земля находится в афелии, дальше всего от Солнца, поэтому движется медленнее, а нам кажется, что Солнце медленнее движется среди звёзд.



Движение естественных и искусственных спутников вокруг планет, движение одной звезды вокруг другой в двойной системе также подчиняются этому закону Кеплера.

ВТОРОЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА (ЗАКОН ПЛОЩАДЕЙ): радиус-вектор каждой планеты описывает за равное время равные площади.

Предположим, планета, двигаясь по эллиптической орбите с центром притяжения в точке S , находится вблизи перигелия P , за один месяц она проходит дугу PA , за это время радиус-вектор описывает площадь PSA . Вблизи афелия, на большом расстоянии от точки S , радиус-вектор за месяц опишет площадь DSE . Так как эти площади равны, то дуга DE , которую пройдёт планета за такое же время, будет меньше дуги PA .

Таким образом, второй закон Кеплера определяет изменение скорости планеты при её движении по орбите: скорость тем больше, чем планета ближе к Солнцу, т.е. в перигелии больше, чем в афелии.

Два первых закона Кеплера решают задачу движения каждой планеты в отдельности.

Естественно, у Кеплера возникла мысль о существовании закономерности, связывающей все планеты в стройную единую планетную систему. Только в 1618 г. он нашёл такую закономерность, известную под названием третьего закона Кеплера.

ТРЕТИЙ ЗАКОН КЕПЛЕРА: квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит.

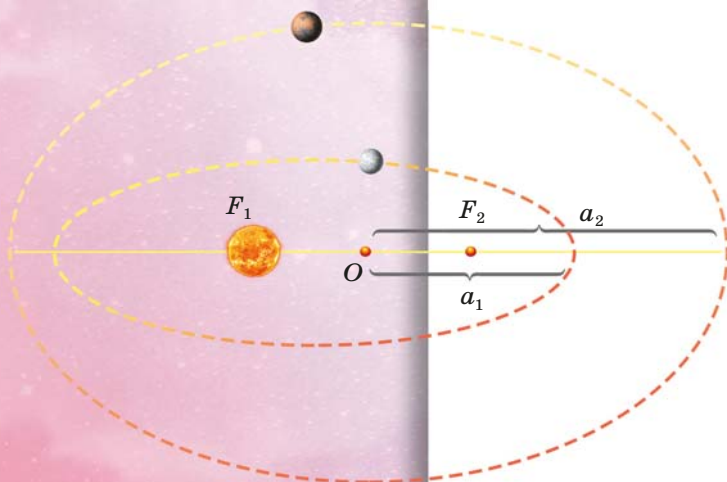
Если у одной планеты период обращения вокруг Солнца равен T_1 и большая полуось, равная среднему гелиоцентрическому расстоянию, равна a_1 , а у другой планеты аналогичные величины соответственно равны T_2 и a_2 , то выполняется соотношение

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

Отсюда следует, что

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{T_3^2}{a_3^3} = \dots = \frac{T^2}{a^3} = C = \text{const.}$$

Постоянная C является постоянной для всех тел планетной системы, её численное значение зависит от принятых единиц измерений.



Так, если выражать периоды T в земных годах, а длину a в астрономических единицах (а. е.), то для Земли $T = 1$, $a = 1$ и, следовательно, для любой планеты Солнечной системы

$$\frac{T^2}{a^3} = 1.$$

В выражение третьего закона Кеплера не входят значения эксцентриситетов орбит. Поэтому, какую бы вытянутость эллиптические орбиты ни имели, при равных больших полуосях орбит периоды обращения по ним одинаковы.



В 1781 г. английский астроном В. Гершель открыл новую планету за орбитой Сатурна. Эту планету называли Уран. Изучение движения Урана обнаружило расхождения между теоретически предвычисленными и наблюдаемыми положениями планеты. Так, в 1825–1826 гг. Уран опережал расчётные положения почти на $10''$, затем стал отставать. К 1840 г. отставание достигло $1,5'$. Была высказана гипотеза, что за Ураном находится ещё одна планета, которая своим притяжением влияет на движение Урана. Два молодых астронома, англичанин Дж. Адамс и француз У. Лаверье по на-

блюдаемым расхождениям рассчитали положение новой планеты. Вот что написал Лаверье астроному Берлинской обсерватории И. Галле: «... направьте телескоп в созвездие Водолея в точку эклиптики с долготой 326° , и в пределах одного градуса от этого места Вы найдёте новую планету. Она девятой звёздной величины и имеет заметный размытый диск...» В первую же ночь наблюдений Галле открыл в указанном месте планету, названную Нептуном. Открытие Нептуна «на кончике пера» окончательно подтвердило справедливость закона всемирного тяготения и стало триумфом небесной механики.



ЗАДАЧА Карликовая планета Плутон, которая была открыта в 1930 г., находится на среднем расстоянии от Солнца — $39,5$ а. е. Определите период обращения Плутона вокруг Солнца.

Решение: из формулы для третьего закона Кеплера находим $T = 1 \cdot a^{3/2} = 39,5^{1,5} = 247,7$ года. С момента открытия Плутон прошёл чуть меньше трети длины своей орбиты.

Кеплер не учитывал массы планет. И. Ньютон, опираясь на закон всемирного тяготения, вывел **третий обобщённый закон Кеплера**, который математически записывается так:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)},$$

где M_1 и M_2 — массы двух притягивающихся тел.

Для Солнечной системы масса Солнца $M_\odot = M_1 \gg M_2$ массы любой планеты, и тогда

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_\odot}.$$

Правая часть уравнения — постоянная C для всех тел Солнечной системы, что и утверждает третий закон, полученный Кеплером в результате анализа наблюдений.

Третий обобщённый закон Кеплера позволяет определять массы планет по движению их спутников, массы двойных звёзд по элементам их орбит и т. д.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Как формулируются законы движения планет, полученные Кеплером по результатам наблюдений?
- Как И. Ньютон изменил третий закон Кеплера?
- Комета Галлея имеет эксцентриситет орбиты $e = 0,967$ и период обращения вокруг Солнца $T = 76$ лет. Чему равны большая полуось орбиты, перигельное и афелийное расстояния кометы? Где расположен афелий кометы?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Значение первой космической скорости.
- Как определяется вторая космическая скорость.
- Как долго длился полёт Ю. А. Гагарина вокруг Земли.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируются законы Кеплера?

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ

Первый обобщённый закон Кеплера носит универсальный характер, так как справедлив для любых тел, между которыми действует сила всемирного тяготения. Ему подчиняется не только движение планет, комет и других небесных тел, но и движение искусственных небесных тел, которые мы запускаем с Земли.

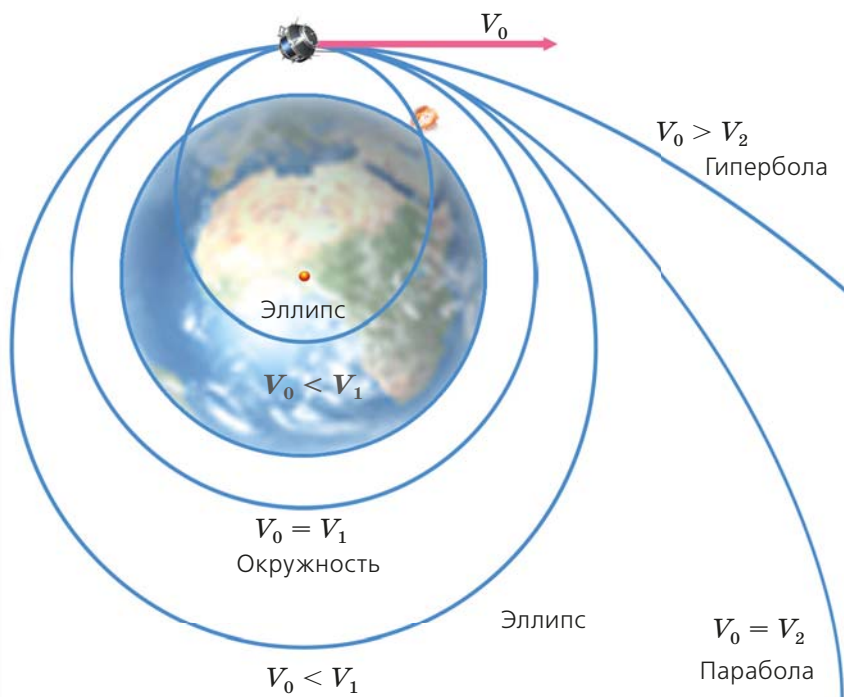
ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ Форма орбиты искусственных небесных тел определяется значением и направлением скорости, которое мы сообщаем спутнику.

Если скорость второго тела вблизи поверхности первого меньше первой космической скорости V_1 , то оно пролетит некоторое расстояние и затем упадёт на первое тело. Если скорость равна V_1 , то оно станет спутником и будет вращаться вокруг другого по окружности. По этой причине V_1 называют **круговой скоростью**.

Если скорость тела равна V_2 (вторая космическая, или параболическая), то оно будет двигаться по параболе и покинет сферу притяжения первого тела.

При меньшей скорости оно будет двигаться по эллиптической орбите, при большей — по гиперболической орбите.

Для того чтобы тело не упало на Землю, а стало искусственным спутником Земли, т.е. двигалось вокруг Земли по круговой орбите и не высоко над Землёй, ему нужно сообщить первую космическую (круговую) скорость V_1 .

**ЗАДАЧА № 8**

Рассчитайте вторую космическую скорость на поверхности Меркурия и на поверхности астероида Аполлон. Как вы думаете, стоит ли слишком сильно подпрыгивать на поверхности Аполлона? $M_M = 3,3 \cdot 10^{23}$ кг, $R_M = 2400$ км; $M_A = 2 \cdot 10^{12}$ кг, $R_A \approx 500$ м.

Впервые на такую возможность указал И. Ньютон. Он показал, что

$$V_1 = V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Для Земли имеем

$$V_1 = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = \sqrt{\frac{6,65 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6,37 \cdot 10^6}} \cong 7900 \text{ м/с}.$$

Именно такая скорость была сообщена космическому аппарату «Восток-1», на котором Ю.А. Гагарин совершил свой полёт вокруг Земли 12 апреля 1961 г. — первый полёт человека в космическом пространстве.

Легко рассчитать время, за которое он совершил облёт Земли. Так как высота орбиты над Землёй была около 100 км, что намного меньше радиуса Земли, то можно для простоты принять, что он двигался у её поверхности.

Итак, время полета без учёта времени подъёма и спуска равно

$$t = \frac{2\pi R_{\oplus}}{V_1} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}}{7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с}} = 5064 \text{ с} = 84 \text{ мин.},$$

т.е. около полутора часов.

ВТОРАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ Чтобы покинуть Землю и лететь к другим планетам, необходимо, как минимум, сообщить ракете вторую (параболическую) скорость.

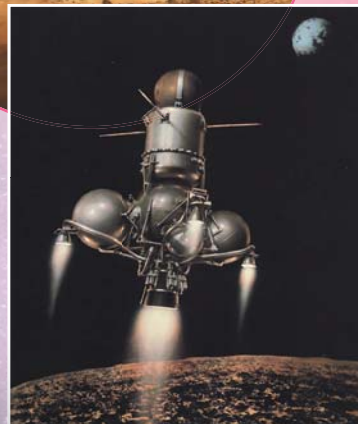
Вторая космическая скорость равна

$$V_2 = V_n = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} \cdot V_1.$$

Для Земли $V_2 = 11 \text{ км/с}$.

Например, при старте с Луны ракеты с американскими космонавтами Н. Армстронгом и Э. Олдрином, впервые вступившими на Луну в июле 1969 г., и советской автоматической станции «Луна-16» (сентябрь 1970 г.), доставившей на Землю образцы лунного грунта, им была сообщена вторая космическая скорость, для Луны равная $V_2 = 2,38 \text{ км/с}$.

Космические аппараты, которые будут направлены к Марсу с целью доставки проб марсианского грунта, должны стартовать с поверхности Марса со скоростью не меньше второй космической скорости. Для Марса она равна $V_2 = 5,05 \text{ км/с}$.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

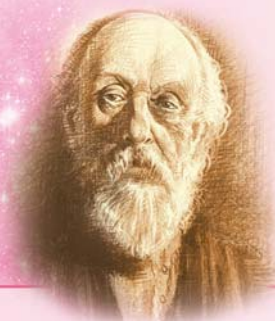
● Запишите уравнение второго закона Ньютона для движения тела со скоростью V по круговой орбите вокруг массивного тела с радиусом R и массой M . Получите выражение для круговой скорости V_1 .

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Понятие оптимальной траектории полёта к планете.
- Время полёта к планете.

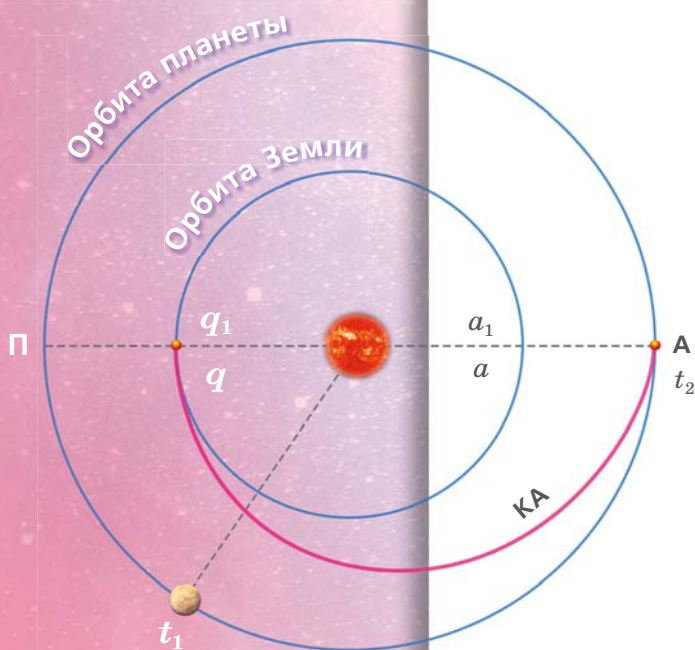
ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируются законы Кеплера?
- Что такое первая и вторая космические скорости?



**Константин Эдуардович
Циолковский**
(1857—1935)

Русский учёный. Основоположник теоретической космонавтики. В 1903 г. впервые предложил конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем.



МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПОЛЁТЫ

Современная космонавтика — наука о полётах в межпланетном пространстве — представляет собой совокупность различных областей науки и техники. Расчёты траекторий космических полётов связаны с астрономией и прежде всего с небесной механикой.

РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ Запуск СССР первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. положил начало эпохе освоения космического пространства. Полёты к другим небесным телам стали возможны благодаря усилиям многих учёных и конструкторов. Впервые доказал техническую возможность осуществления межпланетных полётов К. Э. Циолковский. Выдающийся вклад в разработку ракетной техники в нашей стране был сделан С. П. Королёвым.

Как только космический аппарат (КА) выключает свои реактивные двигатели, он начинает движение по законам небесной механики, т. е. по законам движения планет, их спутников, комет, астероидов и других небесных тел.

Чтобы КА, запущенный с Земли, попал на исследуемую планету, необходимо заранее с высокой точностью знать траекторию его движения и условия, необходимые для вывода аппарата на эту траекторию. Эти условия диктуют требования к ракетным двигателям.

Например, при скорости запуска ракет к Луне с Земли, равной 10 923 м/с, ошибка в скорости ± 2 м/с (т. е. относительная ошибка 0,02%) приведёт к тому, что ракета пройдёт мимо Луны. А что говорить о полётах к более далёким планетам?

Расчёт реальной траектории КА к планете очень сложен. Действительно, в начале полёта аппарат движется в поле тяготения Земли, затем большую часть своего пути — в поле тяготения Солнца, и в конце пути — в поле исследуемой планеты. Помимо этого, необходимо учитывать гравитационное воздействие со стороны крупных небесных тел. Обычно для предварительной оценки ограничиваются расчётом простейшей орбиты в поле тяготения Солнца.

Наиболее оптимальной (с точки зрения затрат энергии) является полуэллиптическая орбита движения КА, касающаяся своими вершинами орбит Земли и планеты. В соответствии с первым законом Кеплера Солнце находится в одном из фокусов этой орбиты, большая ось которой проходит через Солнце и Землю.

Рассчитаем параметры орбиты и требования к КА при полёте к внешним планетам — Марсу, Юпитеру и др. Полученный результат затем легко обобщить для полётов к внутренним планетам — Венере и Меркурию.

При запуске к любой внешней планете перигелий (П) орбиты КА совпадает с Землёй и отстоит от Солнца (С) на расстояние $q = a_0 = 1 \text{ а. е.} = 150 \text{ млн км.}$

Афелий (А) находится на пересечении большой оси орбиты КА с орбитой планеты и удалён от Солнца на расстояние $Q = a_1 \text{ (а. е.)}$. В день сближения с КА планета должна подойти к афелию.

Сам запуск производится в сторону движения Земли, с тем чтобы использовать её орбитальную (гелиоцентрическую) скорость $v_0 = 30 \text{ км/с.}$

Во время полёта в гравитационном поле Солнца космический аппарат подчиняется законам движения планет — законам Кеплера. Большая полуось его орбиты, выраженная в астрономических единицах, равна

$$a_{\text{ка}} = \frac{q+Q}{2} = \frac{a_0+a_1}{2} = \frac{1+a_1}{2} \text{ (а. е.)}.$$

Согласно третьему закону Кеплера для всех планет Солнечной системы имеет место соотношение $a^3/T^2 = 1$, если a выражено в а. е., а период обращения планеты T выражен в годах. Отсюда измеренная в годах продолжительность полёта КА (равная половине периода обращения по орбите)

$$t = \frac{1}{2}T = \frac{1}{2}a_{\text{КА}}\sqrt{a_{\text{КА}}}.$$

Старт КА к планете происходит в определённую конфигурацию планеты, когда разница гелиоцентрических долгот — угол между направлением на Солнце и от Солнца на планету — станет равной

$$180^\circ - \omega \cdot t,$$

где ω — угловая скорость движения планеты по своей орбите.

Так, для полёта к Марсу получим

$$a_1 = a_{\text{м}} = 1,5 \text{ а. е., } a_{\text{КА}} = 1,25 \text{ а. е.}$$

Оптимальное время полёта к Марсу — 255 суток.

Угловая скорость Марса по орбите $\omega = 0,524^\circ/\text{сутки}$, поэтому в момент старта t разница гелиоцентрических долгот равна

$$180^\circ - 0,524^\circ/\text{сут} \cdot 255 \text{ сут} = 43^\circ.$$

Интересно, что такие конфигурации Марса повторяются примерно через 2 года и 2 месяца.



Сергей Павлович Королёв
(1907—1966)

Конструктор, учёный, академик. Основоположник практической космонавтики. Дважды Герой Социалистического Труда. С его именем связан запуск первого космического спутника и первый полёт человека в космос.

ЗАДАЧА № 9

Рассчитайте время полёта КА по полуэллиптической орбите к Венере. Как выглядит конфигурация Земли, Венеры и Солнца (чему равен угол между Венерой, Солнцем и Землёй) в момент старта с Земли, как часто можно отправлять КА к Венере?

ВАШЕ МНЕНИЕ:

☉ Человек выпивает примерно три литра воды в день. Сколько воды потребуется космонавтам при полёте к Марсу? Неужели весь КА будет загружен таким количеством воды?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

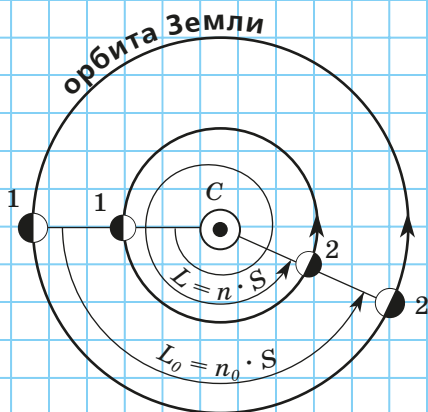
☉ Рассчитайте параметры орбиты и время полёта КА к Венере.

ЗАДАЧА № 10

На какой высоте над Землёй и в какой плоскости обращается геостационарный спутник, который постоянно находится над одной точкой поверхности Земли?

ЗАДАЧА № 11

Найдите связь между периодом обращения планеты вокруг Солнца T (звёздный или сидерический период) и периодом повторения её видимой конфигурации S (синодический период) для внутренних планет. Как часто происходит нижнее соединение Венеры?



Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- В гелиоцентрической системе, разработанной Коперником, планеты обращались вокруг Солнца. Суточное вращение небесной сферы с востока на запад является следствием вращения Земли с запада на восток.
- Доказательством движения Земли вокруг Солнца является параллактическое смещение звезды в течение года, по которому определяют расстояние до звезды.
- Расстояние в 1 парсек равно расстоянию, с которого радиус земной орбиты виден под углом в $1''$. Это расстояние равно 3,26 св. г., или $3 \cdot 10^{16}$ м.
- **Первый закон Кеплера** утверждает, что планеты движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам.
- **Второй закон Кеплера** утверждает, что в равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади.
- **Третий закон Кеплера** утверждает, что отношение квадрата периода обращения планеты к кубу большой полуоси планеты есть величина, постоянная для всех планет.
- Выведенные И. Ньютоном обобщённые законы Кеплера указывают на возможность движения не только по эллиптическим, но и по параболическим и гиперболическим орбитам. Третий обобщённый закон позволяет определять массы планет и Солнца.
- **Первая, или круговая, космическая скорость** — минимальная скорость, которая позволяет телу двигаться и не упасть на Землю.
- **Вторая космическая, или параболическая, скорость** — минимальная скорость, с которой тело может покинуть Землю. С меньшей скоростью тело будет двигаться по траектории, имеющей форму эллипса.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М. М. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.
Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как вы думаете, если бы вторая космическая скорость какого-то тела была чуть выше скорости света, можно было бы общаться с жителями такого тела? Аргументируйте свой ответ.
- Как вы думаете, если бы тепловая скорость каких-то молекул в атмосфере планеты превышала вторую космическую скорость, сохранились бы в атмосфере такие молекулы?

Глава 4

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

- СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ
- ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ
- ЛУНА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМЛЮ
- ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ
- ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ. ПЛАНЕТЫ-КАРЛИКИ
- МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
- СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОИСХОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Между планетой и её спутником существует эффект приливного взаимодействия. В результате взаимодействия происходит замедление вращения планеты вокруг собственной оси и изменение орбиты спутника. Например, каждые 100 лет вращение Земли замедляется на 0,002 с, а продолжительность суток увеличивается на ~15 микросекунд в год, при этом Луна ежегодно удаляется от Земли на 3,8 см.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие объекты входят в состав Солнечной системы.
- Чем отличаются планеты земной группы от планет-гигантов.
- Что такое пояс Койпера и облако Оорта.
- Каковы размеры Солнечной системы.

ВСПОМНИТЕ:

- По каким законам движутся планеты?
- Какие планеты называют верхними, а какие — нижними?

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Солнечной системой называют совокупность небесных тел, движущихся вокруг Солнца. В Солнечную систему входят восемь больших планет со своими спутниками, планеты-карлики, свыше 100 000 малых планет (астероидов), множество комет и метеорных тел (камней самых разнообразных размеров) и потоки мелкой пыли (метеорные рои).

ПЛАНЕТЫ И АСТЕРОИДЫ Планеты представляют собой тёмные шарообразные тела, обращающиеся вокруг Солнца и сопоставимые по размерам с Землёй.

Астероиды — сравнительно небольшие твёрдые тела с размерами, не превышающими сотен километров, и в подавляющем большинстве неправильной формы. Почти все астероиды движутся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя своеобразное кольцо, называемое поясом или зоной астероидов.

Планеты и астероиды видны потому, что освещаются Солнцем. Даже самые крупные из малых планет видны только в телескоп и выглядят светящимися точками, как звёзды, за что и получили название астероидов (по-гречески — звездообразных объектов).

Далёкие планеты Уран, Нептун и планеты-карлики типа Плутона, слабо освещаемые Солнцем, также доступны наблюдениям лишь в телескопы. Более близкие к Солнцу планеты — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер,



ПОЯС АСТЕРОИДОВ



Сатурн, обильно освещаемые солнечными лучами, видны невооружённым глазом, поэтому были известны людям с древнейших времён.

Все планеты и астероиды обращаются вокруг Солнца в направлении движения Земли, которое считается прямым. Они образуют планетную систему, являющуюся частью Солнечной системы. Радиус планетной системы близок к $4,5 \cdot 10^9$ км — четырём с половиной миллиардам километров (30 а. е.) и определяется расстоянием от центра Солнца до Нептуна.

Если луч света распространяется от Солнца до Земли почти 8 мин, то до границы планетной системы он добирается около 4 ч.

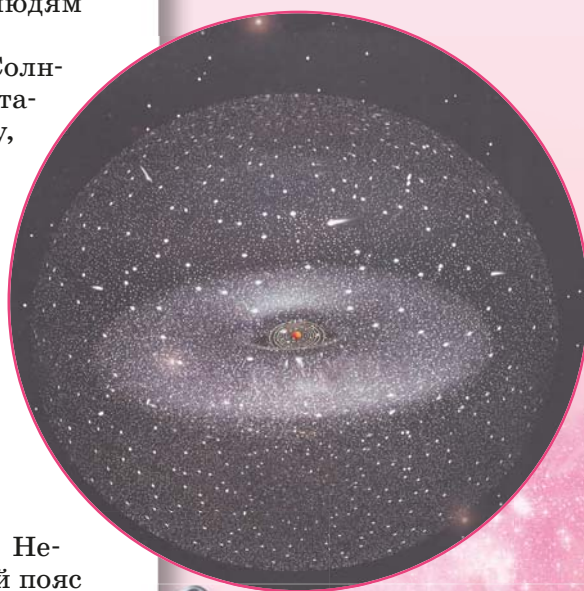
И всё же радиус нашей планетной системы почти в 10 000 раз меньше расстояния до ближайшей звезды Проксимы Центавра.

КАРЛИКОВЫЕ ПЛАНЕТЫ. ОБЛАКО ООРТА За орбитой Нептуна (примерно 55 а. е.) находится так называемый пояс Койпера, состоящий из карликовых планет Плутона, Эриды, Хаумеи и др., а также большого числа более мелких тел.

Ещё дальше вплоть до границы Солнечной системы располагается гипотетическое облако Оорта, состоящее из ледяных глыб и ядер комет.

Сама Солнечная система ограничивается зоной действия притяжения Солнца и распространения солнечного вещества. В настоящее время предполагается, что граница Солнечной системы находится на расстоянии свыше 100 000 а. е. от Солнца.

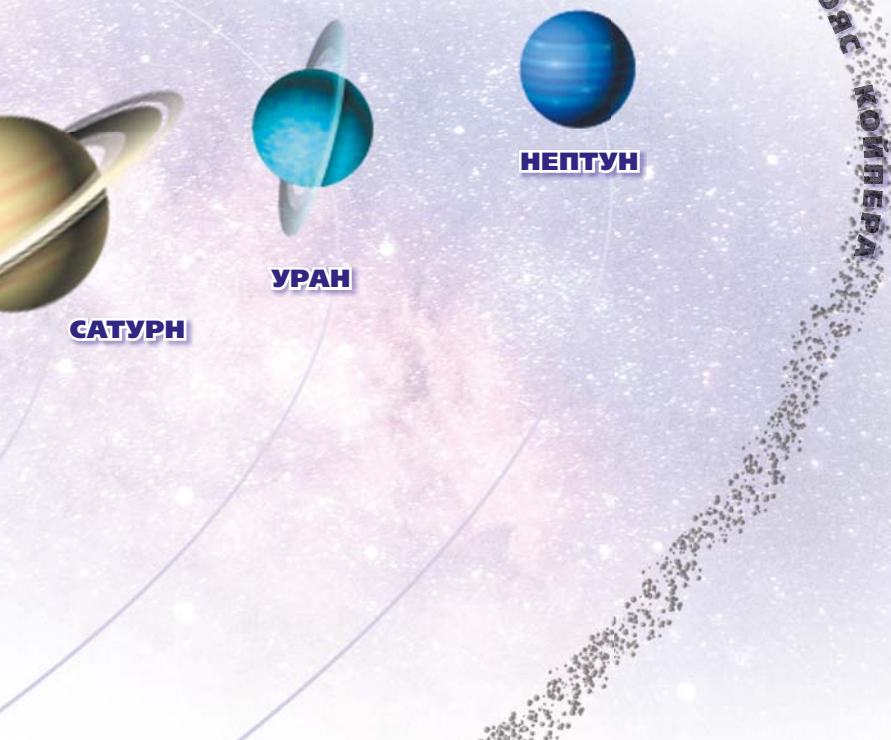
Облако Оорта



В 2003 г. был открыт самый далёкий из известных на тот момент транснептуновых объектов — Седна. В настоящий момент Седна располагается примерно в 76 а. е. от Солнца, вблизи перигелия своей очень вытянутой орбиты. Период обращения Седны вокруг Солнца превышает 11 тысяч лет, а наибольшее расстояние от Солнца — 920 а. е. В последующие годы было открыто более десятка тел на подобных орбитах. Особенности их движения указывают на возможность существования на окраинах Солнечной системы ещё одной большой планеты, влияющей на движения далёких малых тел. Большое расстояние и малая яркость, а также неизвестность положения делают задачу её поиска очень трудной. Эту загадку астрономии XXI века ещё только предстоит решить.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Назовите объекты Солнечной системы.
- Каков состав пояса Койпера и облака Оорта?



ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова форма Земли.
- Как выглядит внутреннее строение Земли.
- Как парниковый эффект делает комфортной жизнь на Земле.

ВСПОМНИТЕ:

- Каков состав объектов Солнечной системы?
- По каким законам движутся планеты?

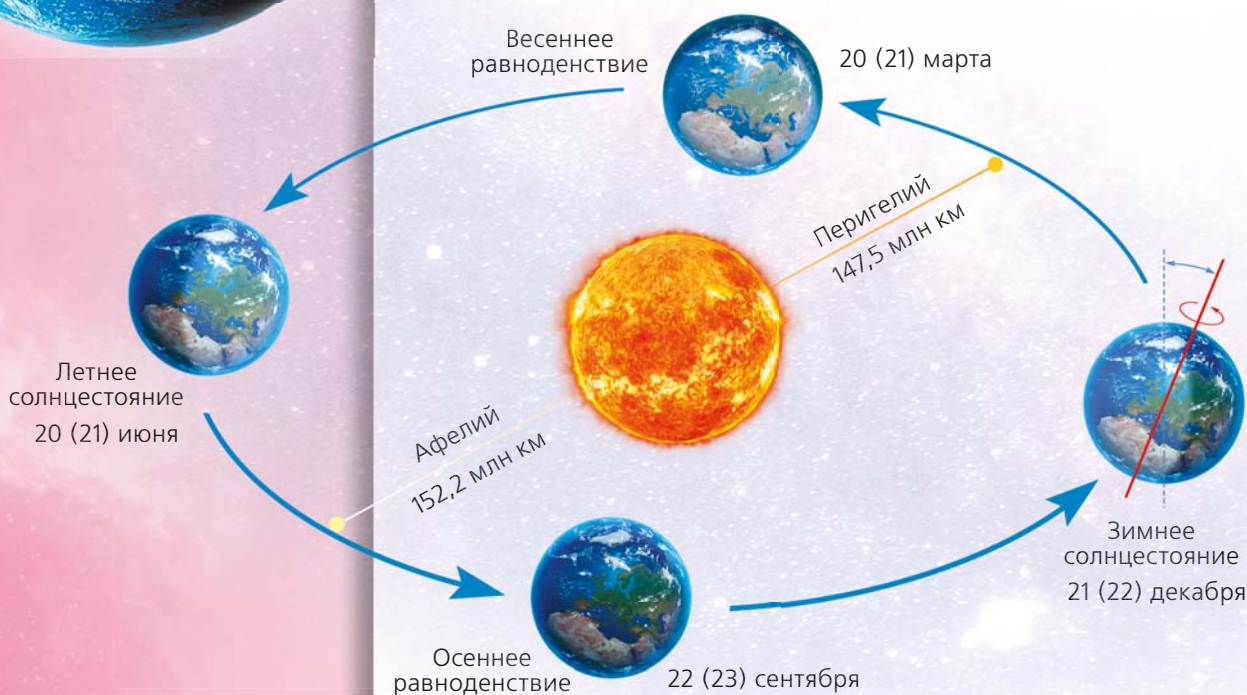
Третья по счёту от Солнца планета — Земля — имеет форму сфероида (чуть приплюснутого шара) со средним радиусом $R_{\oplus} = 6371$ км. Экваториальный радиус Земли равен 6378,16 км, полярный радиус — 6356,78 км, т. е. на полюсе мы будем находиться на 21,38 км ближе к центру Земли, чем на экваторе. На снимках из космоса видны форма Земли и основные детали поверхности.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ Ось вращения Земли наклонена под углом $66,5^\circ$ к плоскости её орбиты (к плоскости эклиптики). При движении Земли вокруг Солнца ось её вращения практически постоянно «смотрит» на Полярную звезду. Благодаря этому происходят периодические изменения освещённости и продолжительности дня и ночи в Северном и Южном полушариях Земли, а также смена сезонов года. В действительности ось вращения Земли (ось мира, поскольку они параллельны) описывает на небесной сфере малый круг, совершая один полный оборот за 26 000 лет.

Ближайшие сотни лет северный полюс мира, на который направлена ось вращения Земли, будет находиться недалеко от Полярной звезды, затем начнёт удаляться от неё. Через 12 000 лет полюс мира приблизится к самой яркой звезде северного неба — Веге из созвездия Лиры.

Перемещается и точка весеннего равноденствия. Она медленно движется навстречу годовичному движению Солнца по эклиптике.

Описанное явление носит название **прецессии** оси вращения Земли.



МАССА И ПЛОТНОСТЬ ЗЕМЛИ Одна из важнейших характеристик любой планеты — масса.

Масса Земли $M_{\oplus} = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг. Её можно определить по гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ и ускорению свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ на поверхности Земли:

$$g = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2},$$

откуда

$$M_{\oplus} = \frac{gR_{\oplus}^2}{G} = \frac{9,81 \text{ м/с}^2 \cdot (6371 \cdot 10^3 \text{ м})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)} = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

Зная средний радиус Земли $R = 6371 \text{ км}$, можно вычислить среднюю плотность Земли: 5520 кг/м^3 . Плотность земной коры 2700 кг/м^3 , что указывает на увеличение плотности с глубиной.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ О внутреннем строении Земли приходится судить по косвенным данным геофизики и, главным образом, сейсмологии (науке о распространении упругих волн в Земле).

Нашу планету можно условно разделить на несколько частей:

- внутреннее ядро радиусом около 1300 км , в котором вещество находится в твёрдом состоянии. Температура во внутреннем ядре порядка $8000\text{--}9000 \text{ К}$, давление 350 ГПа , плотность около $12\,000 \text{ кг/м}^3$;

- внешнее ядро с внешним радиусом примерно 3400 км . Здесь в слое толщиной около 2100 км , окружающем внутреннее ядро, вещество находится в жидком состоянии;

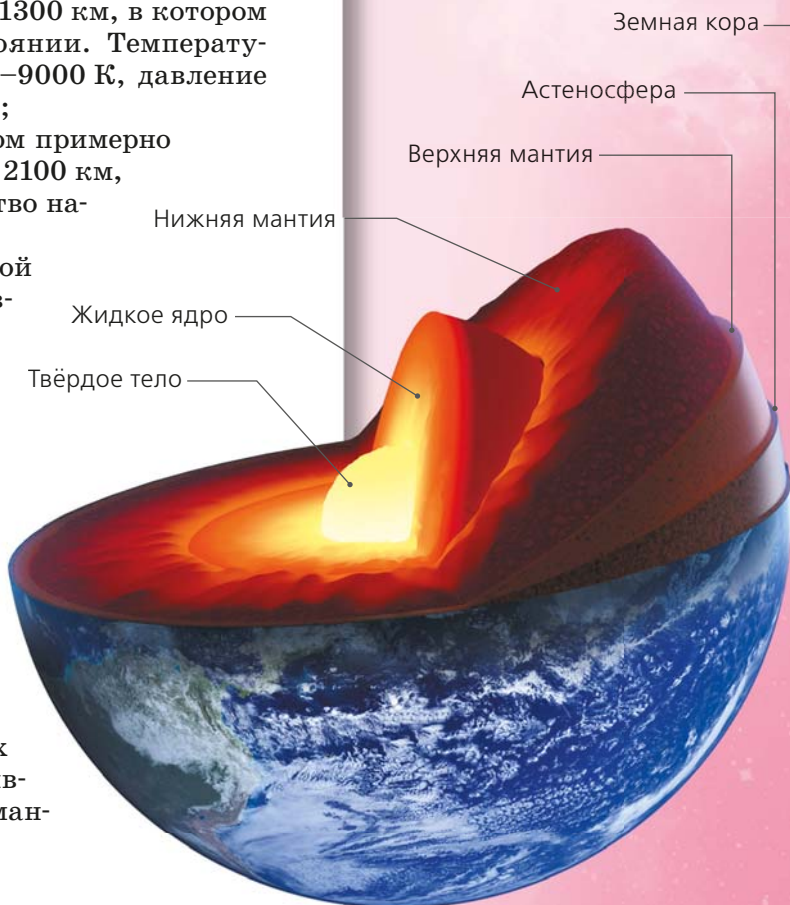
- оболочка, или мантия, толщиной около 2900 км , состоящая из расплавленных базальтов и силикатов;

- кора, которая простирается от мантии до поверхности Земли; её толщина под океаном достигает $6\text{--}10 \text{ км}$, а под материками — $35\text{--}70 \text{ км}$.

При бурении сверхглубоких скважин на Кольском полуострове и на Кавказе установлено, что на глубине 10 км температура достигает 180°C (или 450 К), что объясняется мощным потоком тепла, идущим из горячих недр Земли.

В связи с происходящими в недрах Земли процессами распада радиоактивных элементов (урана, тория и др.) в мантии происходит выделение тепла.

Обнаружил явление прецессии древнегреческий астроном Гиппарх (ок. $190\text{--}125 \text{ гг. до н.э.}$) при сравнении положений звёзд в своём каталоге с составленным задолго до него. Отличие положений звёзд в этих каталогах и указало Гиппарху на медленное перемещение полюса мира и точки весеннего равноденствия. Со времён Гиппарха прошло свыше 2000 лет, и точка весеннего равноденствия с тех пор переместилась из созвездия Овна в созвездие Рыб. Это и объясняет несовпадение знаков Зодиака и соответствующих созвездий.



ЗАДАЧА № 12

Видимый с Земли угловой радиус Солнца, измеренный в начале января, максимален и равен $16' 17''$, а в начале июля минимален и равен $15' 45''$. Вычислите эксцентриситет земной орбиты, перигельное и афелийное расстояния Земли от Солнца. На сколько километров мы ближе к Солнцу в перигелии, чем в афелии.

При перемещении глубинных масс расплавленное вещество — магма — по каналам, диаметры которых достигают десятка километров, а высота — 60–100 км, поднимается на поверхность Земли. Это приводит к извержению вулканов. Особенно их много образуется в местах разломов и на границах движущихся материков.

Жидкая водная оболочка Земли, покрывающая почти 70% её поверхности, называется **гидросферой**. Вода на 97% сосредоточена в бассейнах океанов. Мощные океанические течения переносят тепло от экваториальных областей к полярным, тем самым регулируя климат на Земле. По современным представлениям наличие больших водоёмов сыграло решающую роль в возникновении жизни на Земле. Часть воды на Земле находится в твёрдом состоянии в виде льда и снега.

Как и некоторые другие планеты Солнечной системы, Земля обладает протяжённой газовой оболочкой, состоящей из смеси различных газов, — **атмосферой**.

Атмосфера образует над поверхностью Земли огромный «воздушный океан», на дне которого мы и живём. Атмосфера на 78% по объёму состоит из азота, на 21% — из кислорода и на 1% — из смеси других газов. Углекислого газа в атмосфере всего 0,03–0,04%. Основная масса атмосферы сосредоточена в приземном слое толщиной около 8 км, дальше плотность её постепенно уменьшается, но прослеживается она до высоты в сотни километров.

ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

Благодаря углекислому газу и водяным парам, присутствующим в атмосфере, климат Земли значительно теплее, чем был бы при отсутствии этих газов. Это связано с **парниковым эффектом**, который и возникает из-за наличия газов в атмосфере.



Как известно, в парнике солнечные лучи свободно пропускаются прозрачной плёнкой внутрь, нагревая грунт и воздух до высокой температуры. Нагретый грунт и воздух излучают инфракрасные (тепловые) лучи, которые плёнкой наружу не выпускаются. Поэтому тепло скапливается внутри парника, повышая температуру.

Для Земли такой плёнкой служит углекислый газ и водяные пары в атмосфере. Атмосфера прозрачна для солнечных лучей, поэтому они проникают к поверхности Земли и нагревают её и нижние слои воздуха. Тепловое инфракрасное излучение этими газами частично задерживается, поэтому тепло удерживается в приземном слое, тем самым повышая его температуру. Поэтому средняя годовая температура Земли около $+15^{\circ}\text{C}$.

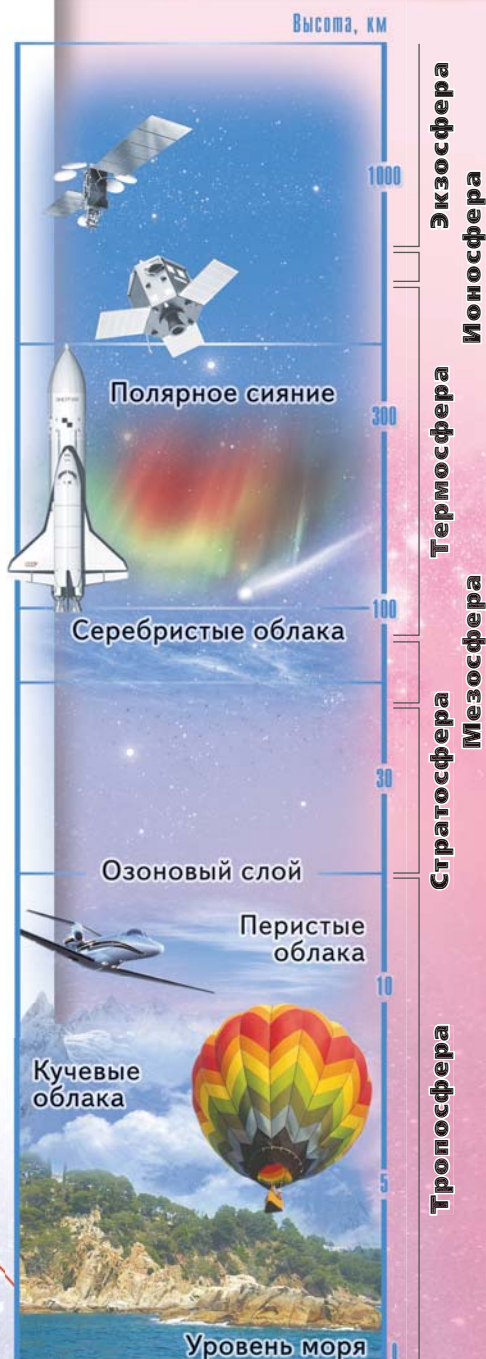
Если бы в атмосфере не было углекислого газа и водяных паров, то температура на Земле была бы почти на 40 градусов ниже.

Как мы увидим далее, парниковый эффект играет огромную роль и в формировании климата Венеры.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ Земля представляет собой огромный магнит, южный полюс которого в настоящее время находится на севере Канады у границы с Гренландией, а северный — вблизи Южного полюса Земли.

Действие магнитного поля простирается на десятки тысяч километров от Земли. Когда заряженные частицы высокой энергии попадают в магнитосферу Земли и там накапливаются, то появляются радиационные пояса (пояса Ван Аллена). Полярные сияния возникают, когда заряженные частицы солнечного ветра достигают атмосферы Земли в районе магнитных полюсов.

Магнитное поле отклоняет заряженные космические лучи и частицы солнечного ветра, тем самым оберегая жизнь на Земле от их пагубного воздействия.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое прецессия земной оси?
- Каково внутреннее строение Земли?

ЛУНА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ЗЕМЛЮ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова природа Луны.
- Каким образом Луна вызывает приливы на Земле.
- Что именно Луна вызывает прецессию земной оси.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое фазы Луны?
- Почему происходят лунные затмения?

Луна — единственный естественный спутник нашей планеты, ближайшее к Земле небесное тело. Её отражённый свет мы наблюдаем практически каждый день (вечер, ночь) в безоблачную погоду.

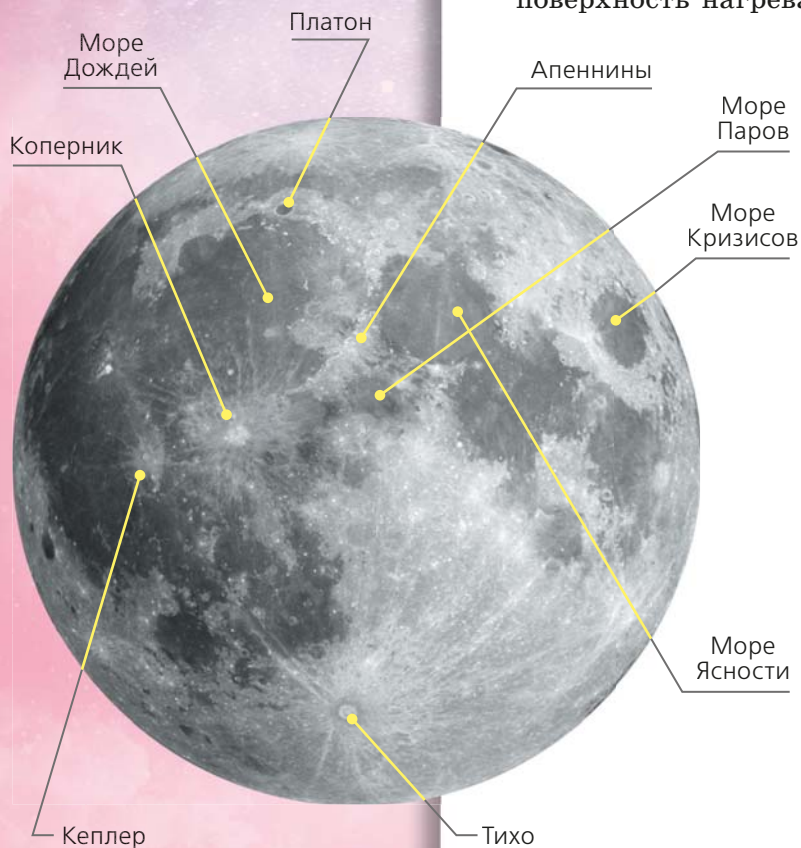
ПРИРОДА ЛУНЫ Луна — холодное шаровидное тело с твёрдой скалистой поверхностью. Радиус Луны равен 1738 км. Масса Луны в 81,3 раза меньше массы Земли, что надёжно определено по движению искусственных спутников, неоднократно выводимых в 1966–1971 гг. на селеноцентрические (от греч. *Селена* — Луна) орбиты. Первым искусственным спутником Луны 3 апреля 1966 г. стал советский космический аппарат «Луна-10».

Средняя плотность Луны $\rho = 3350 \text{ кг/м}^3$, или 0,6 плотности Земли. Ускорение силы тяжести на поверхности $1,63 \text{ м/с}^2$ (в 6 раз меньше земного). Период вращения Луны вокруг своей оси равен периоду её обращения вокруг Земли, а именно 27,3 суток. Продолжительность солнечных суток на Луне составляет около 29,5 суток земных.

Луна лишена воды и атмосферы. За продолжительный лунный день в течение 14,8 земных суток лунная поверхность нагревается до температуры $+130^\circ\text{C}$, а ночью охлаждается до -170°C . Из-за малой силы тяжести и высокой температуры на Луне отсутствует атмосфера.

Следов жизни на Луне пока тоже не обнаружено.

Рельеф лунного полушария, обращённого к Земле, хорошо виден даже в небольшой телескоп. Обширные тёмные округлые и сравнительно ровные низменности ещё в XVII в. получили названия морей: Море Спокойствия, Море Ясности и т. д. Их размеры от 200 до 1200 км в поперечнике. Самая большая низменность, протяжённость которой свыше 2000 км, названа Океаном Бурь. Сглаженная поверхность морей покрыта тёмным веществом, в том числе застывшей лавой, некогда изверженной из лунных недр. Океан Бурь и наиболее крупные моря различимы невооружённым глазом в виде тёмных пятен на лунном диске.



Светлые области — материки — занимают свыше 60% видимой поверхности Луны.

Материки покрыты как отдельными горами, так и горными хребтами. Так, Море дождей ограничено с северо-востока Альпами, с востока Кавказом.

Высота гор различна, отдельные горные вершины достигают 8 км.

Горные районы покрыты множеством кольцевых структур — кратеров, в меньшем количестве они имеются и в морях. Размеры кратеров варьируются от 1 м до 250 км.

Многие кратеры названы именами учёных: Архимед, Гиппарх и др. У таких крупных кратеров, как Тихо, Коперник, Кеплер, наблюдаются расходящиеся светлые лучевые структуры.

По современным представлениям большинство кратеров образовалось при столкновении с лунной поверхностью крупных метеоритов, астероидов и комет.



Обширные ровные поверхности лунных морей учёные объясняют столкновениями в далёком прошлом крупных метеоритов или астероидов с только что сформировавшейся поверхностью Луны. Они пробивали кору лунной поверхности, и потоки лавы заливали огромные пространства вокруг, сглаживая все неровности. Огромные по массе остатки метеоритов и астероидов застряли на большой глубине под поверхностью. Подтверждения этой гипотезы были получены из анализа движения искусственных спутников Луны: они испытывали дополнительное притяжение со стороны масс, сконцентрированных под поверхностью и получивших название *масконы*.

ПРИЛИВЫ Уровень океанов испытывает постоянные, правильные колебания. Во время приливов уровень воды плавно нарастает, достигая наибольшего значения, а затем постепенно снижается до наименьшего уровня.

Максимумы подъёмов воды чередуются через определённые промежутки времени, близкие к 12 ч 26 мин.

Таким образом, в каждом месте океанского берега за 24 ч 52 мин бывают два прилива и два отлива.

Но мы уже упоминали, что из-за движения Луны вокруг Земли Луна проходит выше всего над горизонтом как раз через 24 ч 52 мин. Это указывает на зависимость между Луной и приливами.

Максимальные приливы бывают, когда Луна находится выше всего над горизонтом или ниже всего под горизонтом.

Под влиянием лунного притяжения Земля имеет некоторое ускорение в направлении Луны. При этом твёрдая часть Земли испытывает одинаковое ускорение; его вектор можно связать с центром Земли.

С водной оболочкой ситуация сложнее.

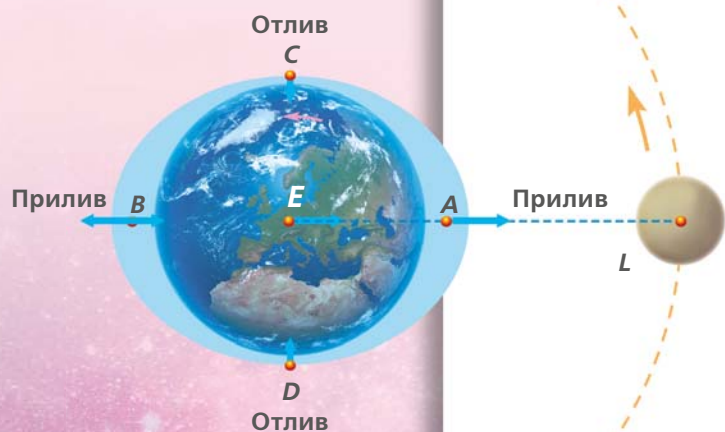


МОИ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составьте план лунной поверхности.

«ПОМОЩНИК»

- Используя бинокль или телескоп, определите крупные формы рельефа лунной поверхности.
- Нарисуйте план лунной поверхности в выбранном масштабе.
- Найдите карту Луны и сравните со своим планом. Напишите названия объектов вашего плана.



Предположим, что вся Земля покрыта океаном. Пусть точка E — центр Земли, L — Луна.

Очевидно, вода в точке A , наиболее близкой к Луне, испытывает большее ускорение, направленное в сторону Луны, чем центр Земли E , а в точке D , в свою очередь, большее, чем в точке B . Поэтому в общем движении к Луне частицы воды близ точки A уйдут вперёд по отношению к твёрдой Земле, испытывая большее ускорение в сторону Луны, чем твёрдая поверхность Земли. На этой стороне Земли вода поднимется; здесь, таким образом, будет прилив.

Но такой же прилив будет в то же время и на противоположной стороне Земли, так как вода в точке B отстанет от центра Земли почти на столько же, на сколько вода в точке D уйдёт вперёд.

В точках C и D водная оболочка будет испытывать дополнительное смещение, направленное к центру Земли, прижимаясь к ней. В этих точках будет наблюдаться отлив.

Таким образом, под действием лунного притяжения водная оболочка Земли принимает слегка вытянутую в сторону Луны форму:

близ точек A , где Луна выше всего над горизонтом, и B , где Луна ниже всего под горизонтом, будет наблюдаться прилив;

близ точек C , где Луна заходит, и D , где Луна восходит, будет наблюдаться отлив.



Так как Земля вращается вокруг своей оси существенно быстрее, чем Луна обращается вокруг Земли, образующийся приливной горб в точке A будет, двигаясь по инерции, бежать чуть впереди линии, соединяющей центры Луны и Земли. Масса этого горба будет притягивать Луну с силой, проекция которой, направленная в сторону движения Луны, будет незначительно ускорять это движение, и Луна будет удаляться от Земли. Точные измерения расстояния до Луны с помощью лазерной локации показали, что Луна действительно удаляется от Земли со скоростью 38 мм в год.

Интересно, что и Луна с такой же по модулю силой притягивает приливной горб. Благодаря этому появляется небольшая сила, которая действует против направления вращения Земли и тормозит её вращение. Это приводит к удлинению продолжительности земных суток. К замедлению вращения Земли приводит также трение водной оболочки о дно океанов и морей в прибрежной мелководной зоне, в которой приливная волна может достигать высоты свыше 10 м. Наблюдения показали, что за счёт приливов длительность суток увеличивается на 0,0014 с за 100 лет.

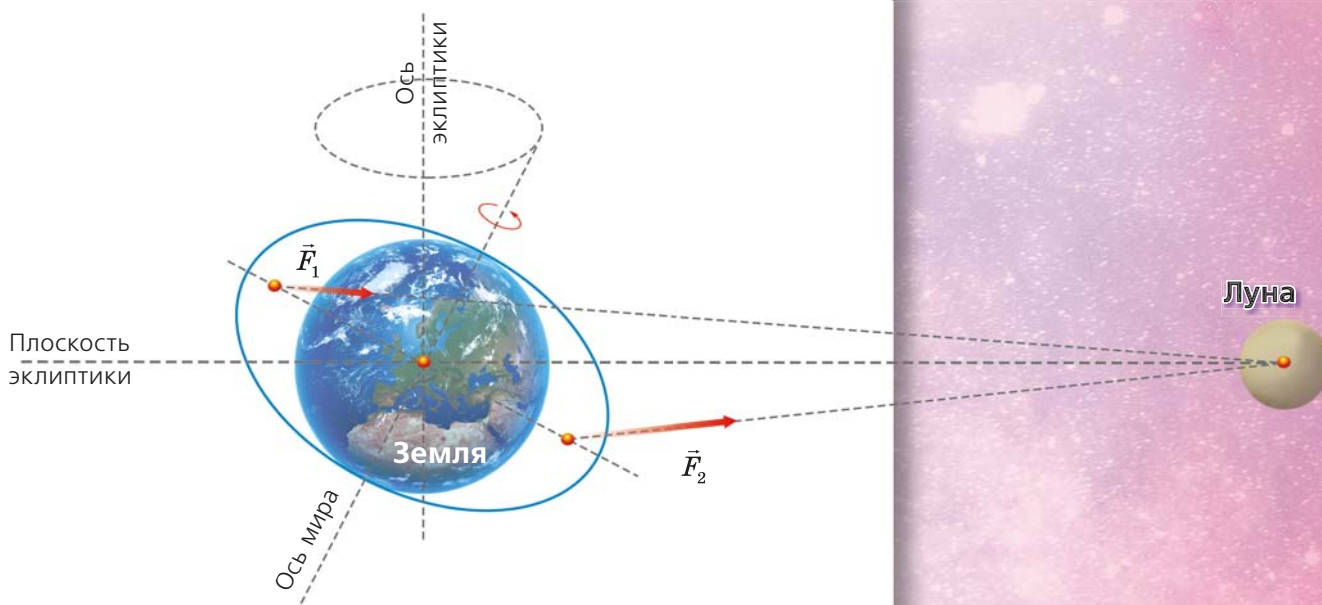
Вследствие вращения Земли приливные выступы образуются каждый следующий момент уже в новых точках земной поверхности. Поэтому в течение одного оборота Луны (24 ч 52 мин) они обойдут вокруг всего земного шара. За это время в каждом месте случается два прилива и два отлива.

Солнце, как и Луна, также вызывает приливы. Несмотря на большую удалённость от Земли, благодаря большой массе Солнца приливы, которые оно вызывает, всего в 2,5 раза меньше лунных.

Во время полнолуний и новолуний лунные и солнечные приливы складываются и наблюдаются самые большие приливы.

Напротив, когда Луна в первой или последней четверти, во время лунного прилива будет солнечный отлив. Действие Солнца уменьшает действие Луны, и приливы делаются существенно меньшими.

ПРЕЦЕССИЯ — явление, при котором момент импульса тела меняет своё направление в пространстве под действием момента внешней силы.



Так как Земля из-за своей сплюснутости имеет избыток массы в экваториальной области, то Луна и Солнце своим притяжением этих выступов стремятся повернуть Землю таким образом, чтобы земной экватор совместился с плоскостью эклиптики.

Этот поворот складывается с осевым вращением Земли и приводит к медленному обращению оси вращения Земли вокруг направления на полюс эклиптики с периодом примерно 26 000 лет.

Земля также вызывает приливы на Луне, причём они существенно больше, чем приливы, вызываемые Луной на Земле. В прошлом, когда Луна ещё только формировалась и была расплавленной, приливное трение настолько затормозило вращение Луны, что она оказалась повернутой к нам постоянно одной стороной.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Вследствие чего возникает прецессия земной оси?
- Когда на Земле можно наблюдать максимальные приливы? Аргументируйте свой ответ.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что Меркурий, Венера и Марс во многом похожи на Землю.
- Как парниковый эффект перегревает атмосферу Венеры.
- Есть ли жизнь на Марсе.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируются законы Кеплера?
- Какие планеты относятся к нижним планетам?

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

К планетам земной группы традиционно относят Меркурий, Венеру, Землю и Марс (в порядке удаления от Солнца). Орбиты этих четырёх планет расположены до Главного пояса астероидов. Эти планеты объединяют в одну группу также из-за схожести их физических свойств — они имеют небольшие размеры и массы, средняя плотность их в несколько раз превосходит плотность воды, они медленно вращаются вокруг своих осей, у них мало или совсем нет спутников (у Земли — один, у Марса — два, у Меркурия и Венеры — ни одного). Но есть у этих планет и различия...

МЕРКУРИЙ — наименьшая из планет земной группы. Его диаметр равен 4880 км, или 0,383 диаметра Земли, масса — 0,056 массы Земли, а средняя плотность, равная 5420 кг/м³, близка к земной.

Эксцентриситет орбиты Меркурия 0,206 — самый большой из планет Солнечной системы.

Фотографии, сделанные в 2008 г. автоматической межпланетной станцией (АМС) «Мессенджер» с расстояния 27 000 км, свидетельствуют о явном сходстве Меркурия с Луной (а).

Резко очерченные фазы планеты, чёткий рельеф поверхности и отчётливые тени от гор свидетельствуют об отсутствии атмосферы у Меркурия.

Радиолокационные наблюдения с Земли позволили установить, что Меркурий медленно вращается вокруг своей оси в прямом направлении (как у Земли) с периодом 58,6 земных суток.

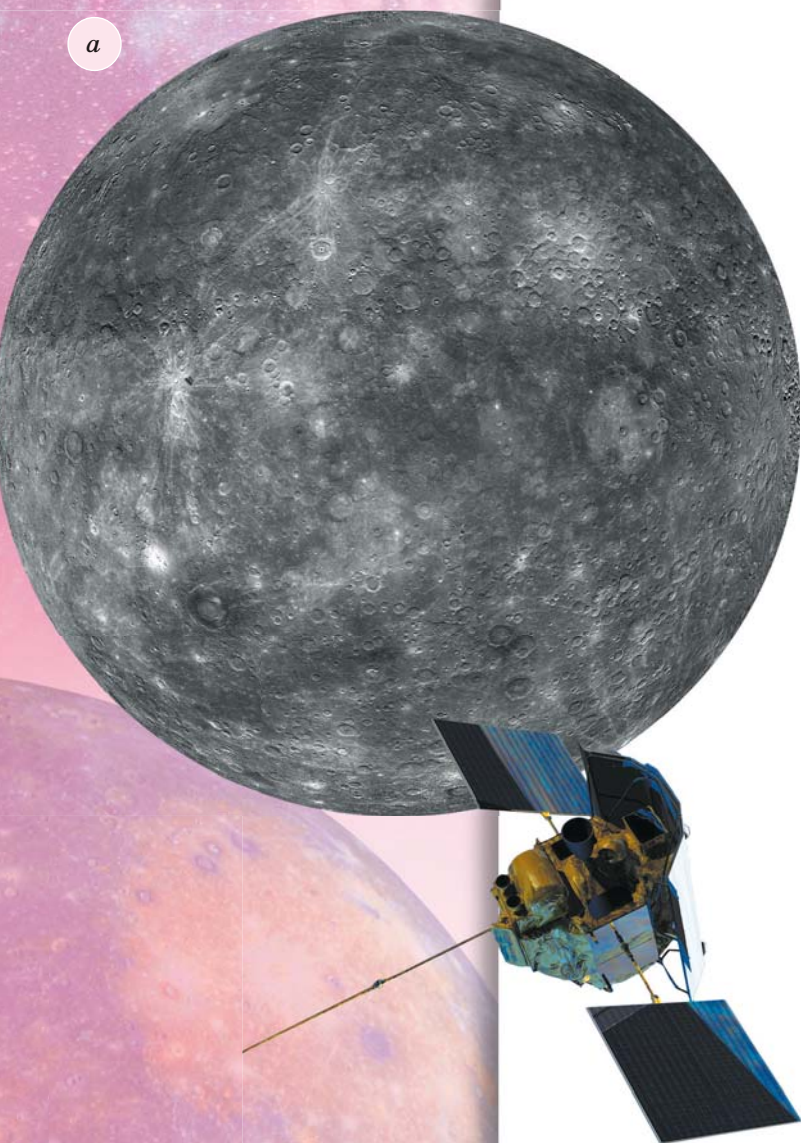
Солнечные сутки на Меркурии длятся 176 земных суток, или два меркурианских года!

ВЕНЕРА — самая горячая планета в Солнечной системе. Температура её поверхности достигает 480 °С.

Масса Венеры равна 0,815 массы Земли, а её радиус — 6050 км, или 0,950 радиуса Земли, средняя плотность вещества планеты составляет 5240 кг/м³.

У Венеры, как и у Меркурия, нет естественных спутников.

Из-за близости к Солнцу и Земле Венера является третьим по яркости объектом на нашем небе после Солнца и Луны.



Вращение Венеры вокруг своей оси обратное, т. е. происходит в направлении, обратном вращению планеты вокруг Солнца, период вращения равен 243 земным суткам. Один оборот вокруг Солнца Венера делает за 225 земных суток, т. е. один день на Венере длится дольше, чем один год.

Ускорение свободного падения на Венере составляет 0,9 от земного и равно около $8,8 \text{ м/с}^2$.

Плотную атмосферу на Венере обнаружил ещё в 1761 г. М. Ломоносов во время наблюдений прохождения Венеры по диску Солнца. А химический состав атмосферы был установлен гораздо позже.

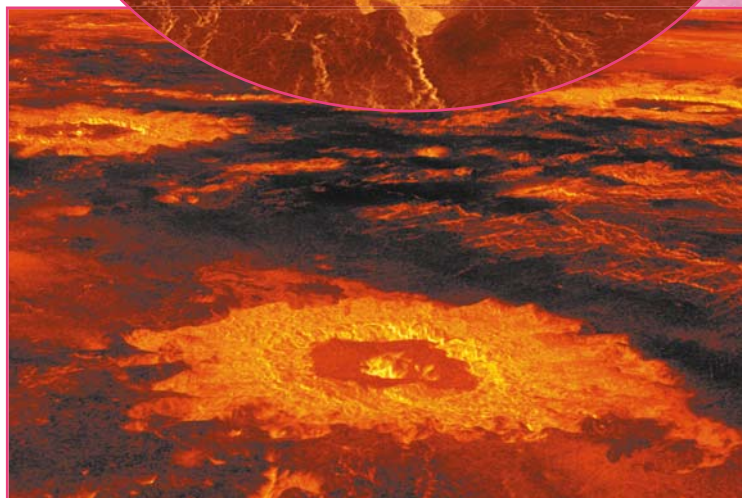
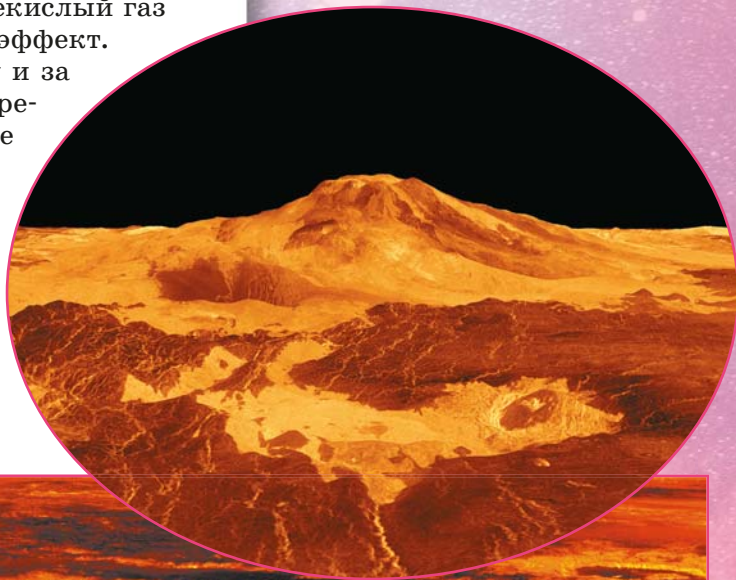
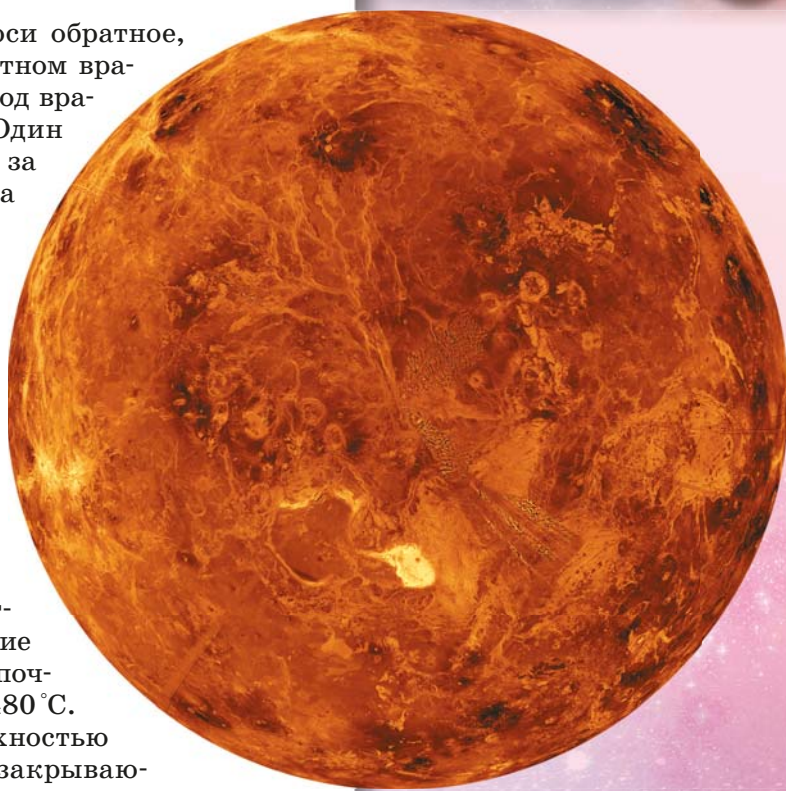
Атмосфера Венеры состоит на 96% из углекислого газа, на 3,5% из азота, а на остальные газы приходится менее половины процента. Давление на поверхности планеты составляет почти 90 атмосфер, а температура — 480°C . На высоте около 40—50 км над поверхностью находится мощный облачный слой, закрывающий от нас поверхность Венеры. Облака состоят из мельчайших капель серной и соляной кислот.

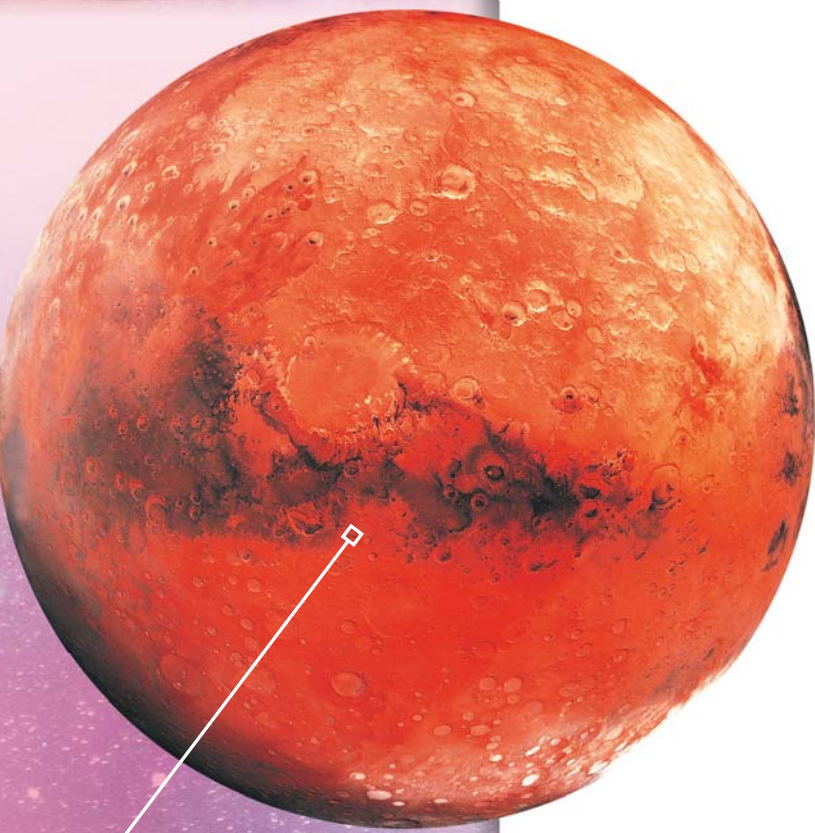
Преобладающий в атмосфере Венеры углекислый газ создаёт на планете сильный парниковый эффект. Солнечные лучи проходят сквозь атмосферу и за долгий венерианский день значительно нагревают поверхность планеты, а инфракрасное (тепловое) излучение поверхности крайне медленно уходит в окружающее пространство, так как оно почти не пропускается углекислым газом. Из-за этого поверхность Венеры и нижние слои атмосферы нагреты до очень высокой температуры.

Так как планета окутана облаками, поверхность Венеры недоступна оптическим наблюдениям с Земли. Поэтому подавляющее большинство физических характеристик планеты получено с помощью радиолокационных методов и космических исследований.

Первый космический аппарат для исследования Венеры АМС «Венера-1» отправился с Байконура 12 февраля 1961 г.

МАРС Поверхность Марса хорошо видна в телескопы, а с помощью космических станций и марсоходов удалось хорошо изучить рельеф планеты. Это





Долина Маринер —
гигантская система каньонов
на поверхности Марса

Приливы, которые вызывают спутники на Марсе, незначительны, но, несмотря на это, они влияют на движение спутников. Так, Деймос отстаёт от приливного горба, который он вызывает на Марсе. Притяжение этого горба ускоряет Деймос, и он удаляется от планеты. Ситуация похожа на то, что происходит с Луной. Но вот Фобос, наоборот, тормозится приливным горбом, который он вызывает своим притяжением на Марсе, так как Фобос обгоняет его. Расчёты показывают, что Фобос должен упасть на Марс в течение нескольких миллионов лет. Следовательно, Фобос появился у Марса недавно, несколько миллионов лет назад.

позволило сравнительно точно измерить его угловые размеры и по ним вычислить линейный диаметр — 6800 км, или 0,533 диаметра Земли. Масса планеты равна 0,107 массы Земли. Средняя плотность вещества планеты составляет 3950 кг/м^3 , или 0,72 плотности Земли. Иногда Марс называют «красной планетой» из-за красноватого оттенка поверхности, придаваемого ей оксидом железа.

Вращение Марса вокруг своей оси прямое, с периодом $24^{\text{ч}} 37^{\text{м}} 23^{\text{с}}$ (марсианские звёздные сутки), что определяет длительность его солнечных суток $24^{\text{ч}} 39^{\text{м}} 29^{\text{с}}$, которые продолжительнее земных всего лишь на $39,5^{\text{м}}$. Наклон оси вращения Марса равен $24^{\circ} 56'$, т. е. близок к наклону земной оси ($23^{\circ} 26'$).

Поэтому на Марсе, как и на Земле, имеются жаркий, два умеренных и два холодных тепловых пояса, а также происходит смена сезонов года, каждый из которых почти в 2 раза продолжительнее земных сезонов, поскольку марсианский год длится 687 земных суток.

Но контрасты сезонов года на Марсе иные, чем на Земле, так как он удалён от Солнца в 1,52 раза дальше Земли, получает тепла в 2,3 раза меньше, лишён водных бассейнов. Там нет ни снежной зимы, ни жаркого лета.

Среднегодовая температура поверхности Марса близка к -70°C . Но вблизи экватора днём она повышается до $+20...+25^{\circ}\text{C}$, к заходу Солнца снижается до -10°C и ниже, а под утро падает до -90°C . Такие резкие колебания температуры объясняются очень разреженной атмосферой, которая не в состоянии сохранить тепло, полученное днём поверхностью планеты, и оно в ночное время быстро излучается в мировое пространство.

В атмосфере планеты содержится до 95% углекислого газа, около 2% азота, 0,3% кислорода и примерно 0,01% водяных паров. Плотность атмосферы и её давление у поверхности такие, как в атмосфере Земли на высоте 30 км. При таких условиях вода не может находиться в жидком состоянии. Но наличие образований на поверхности, похожих на высохшие русла рек, указывает на возможное существование воды и, следовательно, плотной атмосферы на Марсе в далёком прошлом. А там, где была вода, возможно, была жизнь.

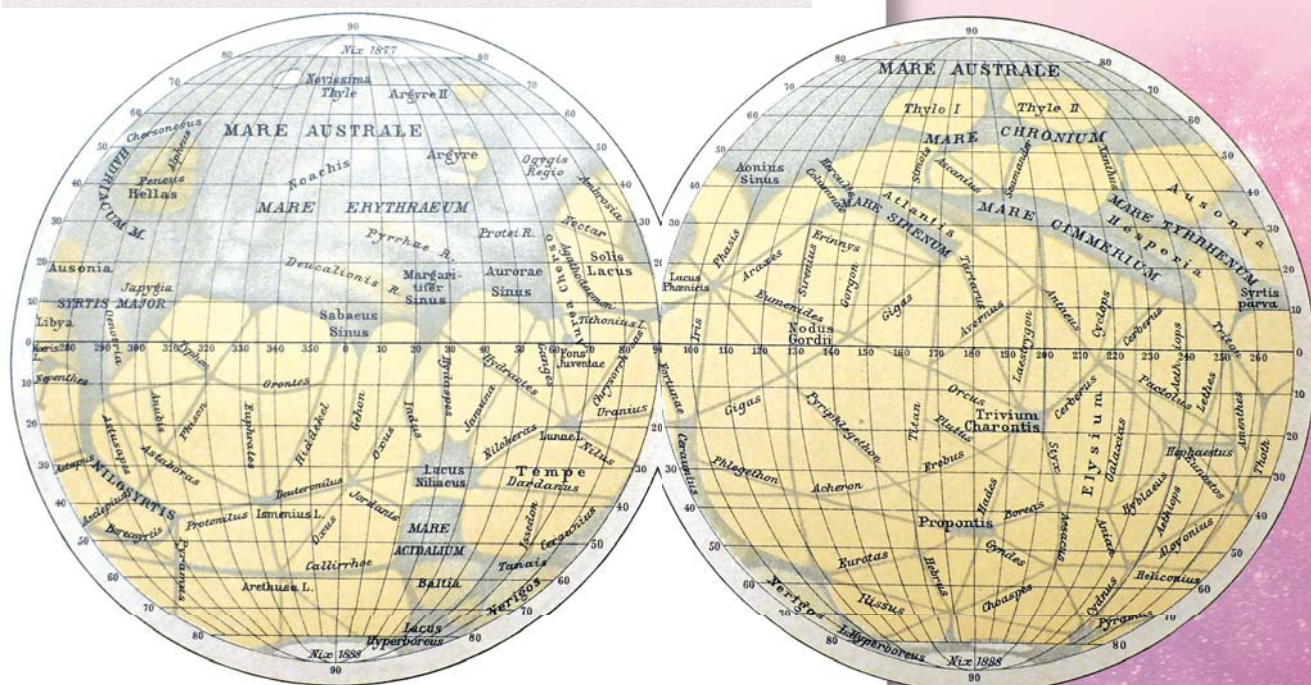
В настоящее время несколько марсоходов исследуют поверхность планеты в надежде найти явные признаки воды и жизни. Дополнительного исследования ожидают

полярные ледяные шапки, состоящие из углекислоты и водяного льда. Они увеличиваются зимой и уменьшаются летом.



По наблюдениям Марса во время его великого противостояния в конце XIX в. (когда он находился в перигелии своей орбиты) итальянским астрономом Дж. Скиапарелли была составлена карта планеты. Многие астрономы того времени полагали, что каналы на поверхности планеты имеют искусственное происхождение. В настоящее время поверхность Марса изучена детально космическими станциями, никаких каналов не обнаружено.

Карта Марса
Дж. Скиапарелли



Марс имеет два естественных спутника — Фобос и Деймос, которые видны лишь в сильные телескопы. Оба спутника сфотографированы космическими станциями. Они оказались бесформенными глыбами размерами $27 \times 21 \times 19$ км (Фобос) и $15 \times 12 \times 8$ км (Деймос) и похожи на астероиды. Поверхность спутников покрыта кратерами диаметрами от 50 м до 10 км, несомненно являющимися результатом метеоритных ударов, так как в недрах малых тел вулканическая деятельность невозможна.

Фобос

Деймос



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что общего у планет земной группы? Чем это сходство обусловлено?
- В чём различия планет земной группы? Чем эти различия обусловлены?

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ. ПЛАНЕТЫ-КАРЛИКИ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каковы физические свойства Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.
- Как проявляется вулканическая деятельность на спутнике Юпитера Ио.
- Какова природа колец планет-гигантов.
- Что представляют собой и где расположены планеты-карлики.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие планеты относят к верхним планетам?
- Как формулируются законы Кеплера?

К планетам-гигантам относят Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Все они имеют большие размеры и массы и при этом низкую среднюю плотность. Их орбиты располагаются между Главным поясом астероидов и поясом Койпера. Планеты-гиганты очень быстро вращаются вокруг своих осей, причём экваториальные зоны вращаются быстрее, чем полярные. Результатом быстрого вращения планет является их заметное сжатие, при котором экваториальный радиус ощутимо больше полярного.

Все планеты-гиганты находятся далеко от Солнца и, независимо от смены времён года, на них всегда господствуют очень низкие температуры. Планеты этой группы отличаются также наличием колец и большого числа спутников.

ЮПИТЕР Юпитер настолько велик, что его масса почти в 2,5 раза превышает суммарную массу остальных планет и в 318 раз больше массы Земли. Видимый диск Юпитера — это верхние слои его протяжённой атмосферы. Даже в небольшие телескопы хорошо заметно сжатие планеты вдоль её оси вращения, равное $\frac{1}{16}$, т.е. экваториальный диаметр диска в 1,07 раза больше полярного. Экваториальный радиус планеты равен 71 400 км и в 11,2 раза превосходит радиус Земли. Ускорение свободного падения на планете в 2,67 раза больше земного. Значительное сжатие Юпитера объясняется быстрым вращением, имеющим зональный характер: экваториальная зона вращается с периодом $9^{\text{ч}}50,5^{\text{м}}$, а умеренные зоны — медленнее, с периодом $9^{\text{ч}}56^{\text{м}}$, т.е. Юпитер вращается не как твёрдое тело, а как жидкое или газообразное.

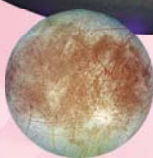
По современным сведениям, Юпитер состоит примерно на 74% из водорода, на 20% — из гелия и на 6% — из более тяжёлых химических элементов, находящихся в недрах планеты.

Вокруг Юпитера обращается многочисленная семья спутников, четыре из которых — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто (Галилеевы спутники) — самые крупные, сравнимы по размерам с Луной; они хорошо видны даже в бинокль. Остальные имеют размеры от 10 до 280 км и неправильную форму.

Полярное сияние
на северном полюсе
Юпитера



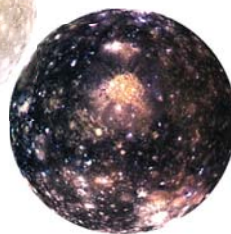
Ио



Европа



Ганимед



Каллисто

Поверхность спутника Ио весьма своеобразна, она вся залита продуктами извержения вулканов и имеет металлический блеск. На Ио наблюдались извержения нескольких вулканов.

Огромные трещины и сравнительно ровная ледяная поверхность Европы толщиной 50–100 км скрывает океан воды глубиной в десятки километров. Наличие воды не исключает возможности присутствия в ней по крайней мере простейших организмов, так что учёные уже сейчас обсуждают возможность экспедиции на Европу с целью поиска жизни подо льдом в океане.

С помощью космических аппаратов вокруг Юпитера было обнаружено кольцо, внешний радиус которого близок к 126 000 км. Кольцо очень тонкое, обращено к Земле ребром, и поэтому с Земли его не видно.

САТУРН Сатурн с его огромным кольцом более других планет-гигантов похож на Юпитер. Его масса в 95 раз и экваториальный радиус (60 370 км) в 9,5 раз превышают земные. Ускорение силы тяжести на Сатурне в 1,15 раза превышает земное.

Структура Сатурна такая же, как у Юпитера, он тоже вращается как нетвёрдое тело с периодами в $10^{\text{ч}}14^{\text{м}}$ (экваториальный пояс) и в $10^{\text{ч}}39^{\text{м}}$ (умеренные пояса). Средняя плотность Сатурна равна 690 кг/м^3 .

У Сатурна обнаружено много спутников с поперечниками от 34 до 5150 км.

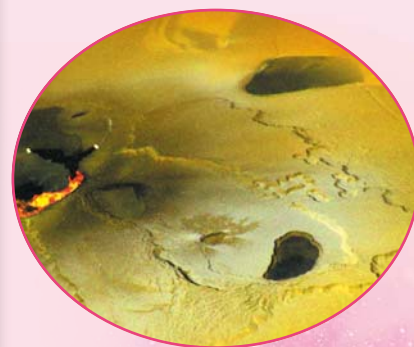
Самый большой спутник — Титан — виден в телескопы школьного типа. Он почти в полтора раза больше Луны по диаметру, окружён плотной азотной атмосферой и обращается вокруг Сатурна за $15^{\text{д}}22^{\text{ч}}48^{\text{м}}$ на среднем расстоянии 1 221 900 км. При посадке на него спускаемого модуля космической станции «Кассини» были обнаружены озёра и реки из жидкого метана.

Температура на поверхности Титана равна -179 К . Поверхности крупных спутников покрыты множеством кратеров самых различных размеров. Подавляющее большинство кратеров имеют ударное происхождение.

У Сатурна имеется кольцо, открытое ещё в 1657 г. голландским физиком Х. Гюйгенсом (1629–1695). Позже выяснилось, что это не одно, а семь тонких плоских концентрических колец, которые отделены друг от друга тёмными промежутками. Все они располагаются вокруг планеты в плоскости её экватора, и общая их ширина — несколько тысяч километров.

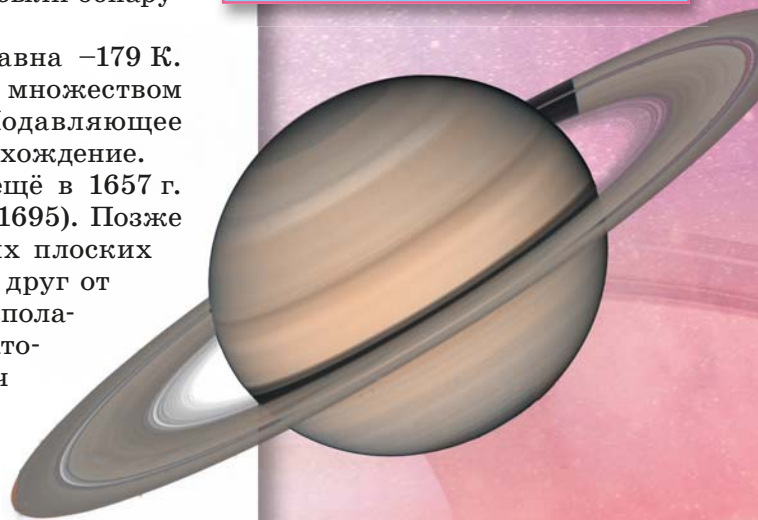
В небольшие телескопы видны только два кольца и тёмный промежуток между ними, называемый щелью Кассини по имени французского астронома Д. Кассини (1625–1712), обнаружившего этот промежуток в 1675 г. Кольца не сплошные, а состоят из мириадом твёрдых

Участок поверхности спутника Ио с потоками лавы слева (красный цвет) и чёрные кальдеры вулканов



ЗАДАЧА № 13

Во время противостояния измеренный средний угловой радиус Юпитера $\theta = 23,4''$, среднее расстояние Юпитера от Солнца $a = 5,2 \text{ а. е.}$, определите линейный радиус планеты. Спутник Юпитера Ио обращается вокруг планеты по круговой орбите с периодом 1,77 суток, определите массу и плотность Юпитера.

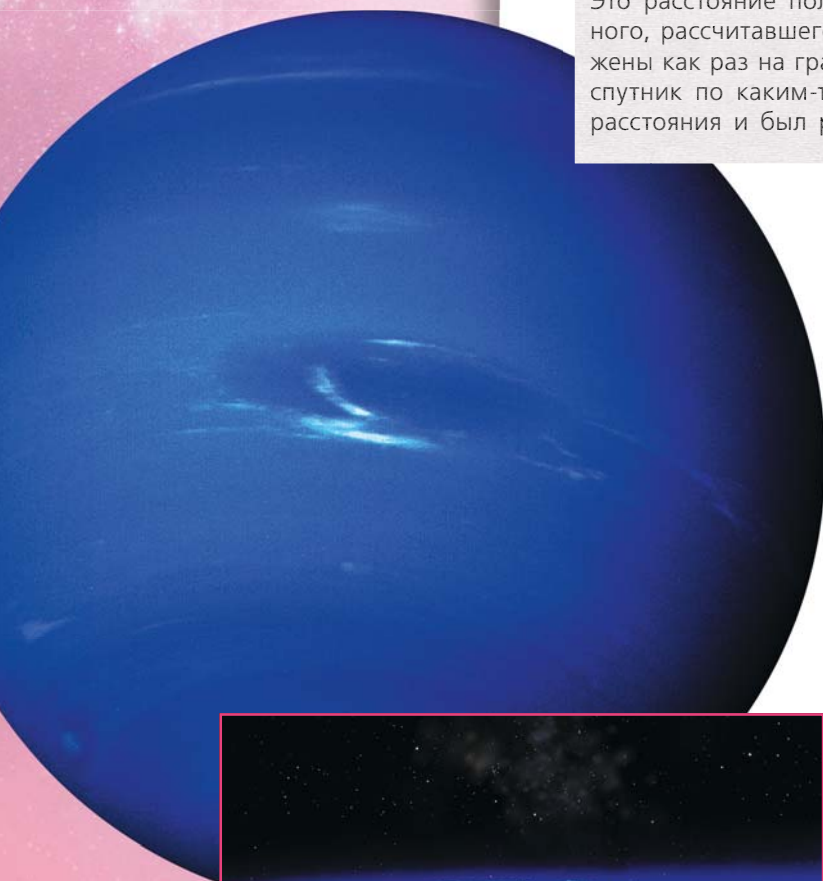


(каменных и ледяных) обломков различных размеров — от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров, которые, как крошечные спутники, обращаются вокруг планеты. Эта огромная система колец в сравнении со своим диаметром и шириной удивительно тонкая: её толщина не превышает двух километров.



Образование кольца у Сатурна и других планет-гигантов связано с разрушающим действием приливов на спутники со стороны планеты. Так как сила тяготения со стороны планеты убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, то ближайшая к планете часть спутника сильнее притягивается к планете, а противоположная — слабее. Разница этих сил — приливная сила — стремится растянуть спутник. Чем ближе спутник к планете, тем эта приливная сила больше. На расстоянии от планеты, примерно равном двум её радиусам, приливная сила сравнивается с собственной силой тяжести на поверхности спутника. Спутник разрушается. Это расстояние получило название *предела Роша* в честь учёного, рассчитавшего его. У Юпитера и Сатурна кольца расположены как раз на границе предела Роша. По-видимому, большой спутник по каким-то причинам сблизился с планетой до этого расстояния и был разрушен.

Нептун



УРАН И НЕПТУН По своим физическим свойствам Уран и Нептун являются близнецами, как Венера и Земля. Видимая поверхность (диск) каждой планеты представляет собой плотные слои протяжённой атмосферы, состоящей из молекулярного водорода, гелия, метана и аммиака. Измерения показали, что температура видимой поверхности Урана близка к -150°C , а Нептуна к -170°C и повышается в глубинных слоях.

Ось вращения Урана наклонена под углом всего 8° к плоскости орбиты, но планета вращается в обратном направлении. Уран как бы катится на боку по плоскости своей орбиты. Благодаря этому на Уране тропики расположены почти у полюсов, а полярные круги — около экватора.

В 1977 г. с помощью телескопа, установленного на самолёте, было открыто кольцо вокруг Урана.

В 1986 г. автоматическая межпланетная станция «Вояджер-2» сфотографировала с близкого расстояния кольцо Урана, находящееся на расстоянии около 50 000 км от планеты.

Его толщина составляет всего 1 км. Уран окружён также многочисленным семейством спутников.

Радиус Нептуна равен 24 300 км, масса составляет 17,2 земной массы, средняя плотность — 1729 кг/м^3 .

У Нептуна восемь спутников, самый крупный — Тритон — обращается вокруг планеты в обратном направлении на расстоянии 355 300 км. Нептун также окружён кольцом.



Уран

ПЛАНЕТЫ-КАРЛИКИ Термин «карликовые планеты» появился в 2006 г. при разработке новой классификации объектов планетных систем, в том числе Солнечной системы. Причиной этому послужила череда открытий малых планет за пределами орбиты Нептуна в начале XXI в.

К карликовым планетам Солнечной системы на сегодняшний день относятся Церера, Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида. Эта группа небесных тел пока что остаётся наименее изученной ввиду их удалённости (кроме Цереры) от центра нашей системы.



Эрида



Церера



Макемаке



Плутон



Хаумеа

Одна из планет-карликов — Плутон — с момента своего открытия в 1930 г. и до 2006 г. даже считалась девятой планетой Солнечной системы.

О физической природе Плутона известно очень мало. Он вращается вокруг оси в обратном направлении (как Уран и Венера) с периодом $6^{\text{д}}9,4^{\text{ч}}$.

В 1978 г. у Плутона был открыт первый спутник, названный Хароном, отстоящий от планеты на расстояние 17 000 км. Плутон и Харон всё время повернуты одной стороной друг к другу, так что их периоды обращения вокруг оси и вокруг друг друга одинаковы и равны $6^{\text{д}}9,4^{\text{ч}}$. Плутон и Харон называли двойной планетой. Позже у Плутона были обнаружены ещё 4 спутника.

В самом начале XXI века было открыто несколько тел на ещё более далёких орбитах вокруг Солнца. Одна из таких малых планет, Седна, в настоящее время находится неподалёку от точки перигелия своей орбиты, но удалена при этом на 76 а. е. от Солнца. В афелии её расстояние от Солнца может достичь почти 1000 а. е.! Орбиты самых далёких известных объектов имеют некоторые особенности, которые указывают на существование ещё одной, девятой планеты Солнечной системы, удалённой от Солнца на сотни астрономических единиц. Её положение в нашем небе неизвестно, и поэтому пока её не удастся найти. Но, возможно, уже через некоторое время мы станем свидетелями выдающегося открытия и вновь сможем сказать о том, что в Солнечной системе 9 больших планет.



Плутон

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

Измерьте высоту вулканического выброса на спутнике Ио и оцените скорость, с которой вещество выбрасывается из жерла вулкана.

Радиус Ио равен 1820 км, масса $8,9 \cdot 10^{22} \text{ кг}$.

Оцените ширину щели Кассини в километрах.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова природа астероидов.
- Где «живут» кометы.
- Что такое метеоры и метеориты.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие небесные тела есть в Солнечной системе?
- Как формулируется закон всемирного тяготения?

Орбиты двух многочисленных групп астероидов, названных Гречами и Троянцами, интересна тем, что они проходят в вершинах равносторонних треугольников, стороны которого равны расстоянию от Юпитера до Солнца (a). Тело расположенное вблизи этих точек, устойчиво сохраняет это положение, вращаясь в поле действия Солнца и Юпитера.



МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В состав Солнечной системы входят не только Солнце и планеты. Огромное количество более мелких объектов вращается по различным орбитам вокруг Солнца. Термин «малое тело» введён Международным астрономическим союзом в 2006 г. для описания объектов Солнечной системы, которые не являются ни планетами, ни карликовыми планетами, ни их спутниками. К малым телам относятся: **астероиды**, или малые планеты; **кометы**; метеорные тела, или **метеороиды** (т.е. просто небольшие камни); пыль и газ. Среди малых тел можно выделить карликовые планеты (этот термин был введён после открытия Плутона и подобных ему объектов).

АСТЕРОИДЫ В 1801 г. итальянский астроном Дж. Пиацци случайно обнаружил звездообразный объект, движение которого указывало на то, что он относится к Солнечной системе. Всего через год был открыт ещё один слабый объект. Оба объекта двигались вокруг Солнца на расстоянии от него 2,8 а.е. Эти небесные тела имели малые размеры, поэтому их называли *малыми планетами* или *астероидами* (звездоподобные). Они были названы соответственно Церера (сейчас она относится к планетам-карликам) и Паллада. В настоящее время открыто несколько тысяч малых планет.

Движение всех малых планет происходит в прямом направлении. Большинство периодов малых планет составляет от 3,5 до 6 лет, что соответствует средним расстояниям до Солнца 2,3—3,3 а.е.

Хотя отдельные малые планеты подходят довольно близко к Земле, изучать их, как правило, невозможно из-за того, что они очень малы. Размеры некоторых астероидов измерялись по времени покрытия ими звёзд (затмения звёзд астероидами). Так, самый крупный астероид, Паллада, имеет ширину 560 км, а Веста — 380 км. Размеры большинства астероидов можно оценить по их блеску. К этому типу космических объектов относят тела размером от 30 м до сотен километров.

Астероиды — бесформенные образования. На фотографии с близкого расстояния (**б**) представлен астероид Ида с размерами 60×22 км; его спутник Дактиль имеет размеры около километра.

Массы астероидов можно определить непосредственно, если они имеют спутники, а также оценить как произведение объёма и плотности. Предполагается, что плотность астероидов мало отличается от плотности крупных метеоритов, падавших на Землю. Так, подобным образом была определена масса одного из крупнейших астероидов

Паллады — $2,6 \cdot 10^{20}$ кг. Общая масса всех астероидов небольшая, существенно меньше массы любой планеты.

АСТЕРОИДНАЯ ОПАСНОСТЬ Исследования показали, что около 65 млн лет назад произошло столкновение Земли с астероидом размерами в несколько километров. В результате взрыва в небо поднялись гигантские облака пыли, а глобальные пожары подняли на большую высоту пепел, которые на долгое время скрыли Солнце. Наступившее резкое длительное похолодание привело к вымиранию динозавров и многих видов других животных. На месте столкновения на территории современной Мексики образовался гигантский кратер диаметром 180 км. В настоящее время астрономам известно около 400 астероидов диаметром в несколько километров и свыше 300 тыс. размерами свыше 100 метров, они имеют орбиты, пересекающие орбиту Земли и представляют опасность для жизни на планете. Наблюдения и слежение за этими потенциально опасными астероидами позволят предупредить такие столкновения и в дальнейшем с помощью космических аппаратов предотвратить их.

КОМЕТЫ Эти небесные объекты получили своё название от греческого «*кометас*» — хвостатая или косматая (звезда). Действительно, яркие кометы, видимые иногда невооружённым глазом, обладают хвостом протяжённостью в несколько градусов и даже десятков градусов. Яркие кометы появляются сравнительно редко, в среднем одна комета за 10–15 лет. Слабые же по блеску кометы появляются часто. На фотографиях звёздного неба ежегодно обнаруживают по несколько комет.

Большинство комет находятся в нашей Солнечной системе. Под действием притяжения Солнца они, как и планеты, обращаются вокруг него по вытянутым эллиптическим орбитам.

Самой известной является комета Галлея (в), названная так в честь первого исследователя комет, который ещё в XVII в. предсказал появление именно этой кометы в определённом году, вычислив по наблюдениям предшественников её периодичность, равную 76 годам.

Комета Галлея движется по очень вытянутой эллиптической орбите с большой полуосью $a = 18$ а.е. и эксцентриситетом $e = 0,967$. В перигелии она сближается с Солнцем до расстояния 0,59 а.е., заходя внутрь орбиты Венеры, а в афелии удаляется до 35,3 а.е. за орбиту Нептуна. Последний раз эта комета предсказуемо появилась в 1986 г. Во время прохождения её вблизи Солнца был осуществлён пролёт двух советских космических станций «Вега-1» и «Вега-2» и ещё двух аппаратов на минимально возможном расстоянии от кометы с целью изучения формы и физических свойств её головы и хвоста. Фотографирование ядра кометы Галлея советскими космическими станциями с расстояния



ЗАДАЧА № 14

Комета Галлея обращается вокруг Солнца с периодом 76 лет. В 1986 г. она прошла на минимальном расстоянии от Солнца около 0,59 а.е. Определите её расстояние в афелии.

В прежние времена появление комет наводило на людей панический страх; в них видели предвестников бедствий.



Ядро кометы Чурюмова–Герасименко, на которое в 2014 г. была совершена мягкая посадка КА «Филы» миссии «Розетта»



В Солнечной системе множество загадочных тел. Одно из них столкнулось в 1908 г. с нашей планетой. О природе «гостя» мы так ничего не узнали. Однако этот метеорит вызвал грандиозный взрыв в тайге, около реки Тунгуска. очевидцы тех событий говорили о ярком сиянии, его наблюдали в разных частях света. 80 млн деревьев на площади в 2000 км² были повалены в мгновение ока чудовищной силой. Выгорела огромная площадь. Но самое интересное, что кратера от удара тела так и не нашли. Наиболее вероятно, это был осколок кометы Энке, орбита которой близка к траектории движения Тунгусского тела до столкновения с Землёй.

около 8000 км показало, что оно имеет неправильную форму и размеры 16×18×8 км. В следующий раз эту комету можно будет увидеть в 2062 г.

На больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твёрдого вещества из льда, застывших газов и пыли, замороженных частиц метеорного вещества. При приближении к Солнцу лёд начинает таять и испаряться, вокруг ядра кометы, начальные размеры которого не превышают десятков километров, образуется протяжённая оболочка — кома. Под действием давления солнечного света и солнечного ветра часть газов комы отталкивается в сторону, противоположную Солнцу, образуя хвост кометы. Иногда размеры комы достигают величин, сравнимых с диаметром Солнца. Так, например, диаметр комы Большой Сентябрьской кометы 1882 г., одной из ярчайших в истории наблюдений, был равным 1,5 млн км, а длина её хвоста достигла 300 млн км. При плотности вещества ядра кометы около 600 кг/м³ и объёме порядка 1000–1 000 000 км³ оценка массы кометы даёт 10¹⁵–10¹⁸ кг.

За несколько сот оборотов вокруг Солнца комета теряет вещество и полностью разрушается. Конец существования кометы не означает её исчезновения. Глыбы, камни и пылинки её ядра продолжают двигаться по той же орбите вокруг Солнца, что и сама бывшая комета. Если их орбита пересекает земную орбиту, то ежегодно, когда Земля попадает в точку пересечения, наблюдаются метеорные дожди.

По современным представлениям основное количество долго живущих комет прилетает к нам из облака Оорта, в котором находится огромное количество кометных ядер.

МЕТЕОРЫ И МЕТЕОРИТЫ Метеоры (от греч. *метеорос* — парящий в воздухе) — вспыхивающие в земной атмосфере при вторжении в неё извне мельчайшие твёрдые частицы. В народе метеоры часто называют падающими звёздами.

В межпланетном пространстве хаотически движется множество таких частиц, получивших общее название **метеорных тел** или микрометеоритов. Массы подавляющего большинства таких тел измеряются десятками и тысячными долями грамма и в редких случаях — несколькими граммами. Скорости их движения относительно Земли варьируются от 11 до 72 км/с. Попадая в земную атмосферу, они не испытывают резкого торможения и либо остаются взвешенными в ней, либо медленно оседают на земную поверхность. Но если в атмосферу влетает крупная частица, то из-за трения о воздух она быстро раскаляется, вспыхивает и порождает метеор. Чем больше масса и скорость частицы, тем ярче метеорная вспышка. В среднем по всему небу за 1 час появляются 5–6 ярких метеоров.

Большинство метеоров вспыхивает на высоте 70–80 км над земной поверхностью, полностью распыляясь в атмосфере. При своём движении в атмосфере метеорные

частицы вызывают свечение молекул воздуха. Поэтому яркие метеоры оставляют после себя светящиеся следы, иногда видимые на протяжении нескольких секунд.

Помимо отдельных метеорных частиц, вокруг Солнца движутся целые их рои, называемые метеорными потоками. Они порождены распадающимися или уже распавшимися кометами. Каждый метеорный рой обращается вокруг Солнца с постоянным периодом, равным периоду обращения породившей этот рой кометы, и многие из них в определённые дни года встречаются с Землёй. В эти дни число метеоров значительно возрастает, а если метеорный рой компактный, то наблюдаются метеорные, или звёздные, дожди, когда в одной ограниченной области неба за одну минуту вспыхивают десятки метеоров.

Многие метеорные потоки связаны с кометами. Так, метеорный поток, исходящий из созвездия Лиры, — Лириды — порождён яркой кометой Тэтчер, открытой в 1861 г., поток Персеиды — яркой кометой Свифта-Туттля, открытой в 1862 г., Ориониды — кометой Галлея, а метеорный поток Андромениды — распавшейся кометой Биэлы. Помимо пыли и мелких частиц, в межпланетном пространстве движется множество твёрдых тел размерами от нескольких сантиметров до десятков метров (условной границей считается 30 м). Они получили название **метеороидов**. Выпавшие на Землю метеороиды называются **метеоритами**. Самый крупный железный метеорит Гоба найден на территории Намибии; он имеет размеры $3 \times 3 \times 1$ м и массу 60 т.

По химическому составу метеориты делятся на три группы: каменные, железокаменные и железные. В каменных метеоритах содержится около 70% кислорода и кремния, немного железа, магния и других элементов. В железокаменных — около половины железа, 40% кислорода, магния и кремния. Железные метеориты на 91% состоят из железа и на 8% — из никеля. Никаких новых химических элементов, неизвестных на Земле, в метеоритах не найдено, что полностью подтверждает единство вещества как на Земле, так и вне её.

На месте падения крупных метеоритов образуются метеоритные кратеры значительных размеров. Такие кратеры обнаружены в Аризоне (США), Канаде, на Таймыре (Россия) и в других местах. Например, Аризонский метеоритный кратер имеет диаметр 1207 м, глубину 174 м и высоту окружающего его вала от 40 до 50 м.

Метеориты падают не только на Землю, но и на другие планеты и их спутники. При отсутствии у планет и их спутников атмосферы даже небольшие метеориты, падающие с большой скоростью на поверхность этих тел, взрываются, плавят поверхность и образуют на ней кратеры внушительных размеров. Крупные метеориты могут образовать кратеры диаметром в несколько десятков километров. Это подтверждается обилием метеоритных кратеров на поверхностях Луны, Меркурия, Марса и спутников Марса, Юпитера, Сатурна и Урана.

Метеоритный кратер в Аризоне (США)



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое астероиды?
- Из чего состоят кометы?
- Как возникают метеорные потоки?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Когда возникла Солнечная система.
- Какие физические процессы привели к пространственному разделению на планеты земной группы и планеты-гиганты.
- Где сформировались ядра комет.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие объекты присутствуют в Солнечной системе?
- По каким законам движутся планеты?

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОИСХОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

На протяжении многих веков вопрос о происхождении Солнечной системы и Земли волновал прежде всего философов, так как фактический материал в этой области почти полностью отсутствовал. Первые научные гипотезы происхождения Земли и Солнечной системы, основанные на астрономических наблюдениях, были выдвинуты только лишь в XVIII в.

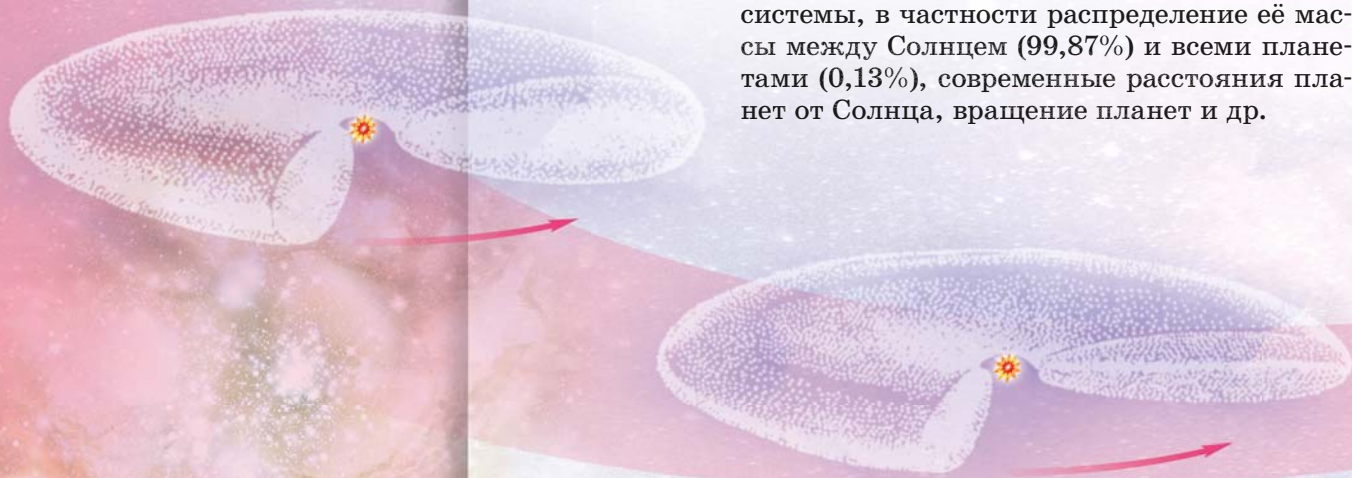
КОСМОГОНИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ШМИДТА По современным представлениям образование Солнечной системы связано с формированием Солнца из газопылевой среды.

Считается, что газопылевое облако, из которого около 5 млрд лет назад образовалось Солнце, медленно вращалось. По мере сжатия скорость вращения облака увеличивалась, и оно приняло форму диска. Центральная часть диска дала начало формированию Солнца, а его внешние области — планет.

Этой схемой вполне объясняются различия в химическом составе и массах планет земной группы и планет-гигантов. Действительно, по мере разгорания Солнца лёгкие химические элементы (водород, гелий) под действием давления излучения покидали центральные области облака, уходя к его периферии. Поэтому планеты земной группы сформировались из тяжёлых химических элементов с малыми примесями лёгких и получились небольших размеров.

Из-за большой плотности газа и пыли излучение Солнца слабо проникало к периферии протопланетного облака, где царила низкая температура и пришедшие газы намерзали на твёрдые частицы. Поэтому далёкие планеты-гиганты получились крупными и состоящими в основном из лёгких химических элементов.

Эта космогоническая гипотеза объясняет и ряд других закономерностей Солнечной системы, в частности распределение её массы между Солнцем (99,87%) и всеми планетами (0,13%), современные расстояния планет от Солнца, вращение планет и др.



Она разработана в 1944—1949 гг. советским академиком О. Ю. Шмидтом (1891—1956) и развита его сотрудниками и последователями.

ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАНЕТ Согласно гипотезе Шмидта, процесс формирования планет представляется следующим образом. В дискообразном газопылевом облаке вследствие взаимодействия его частиц возникали многочисленные сгущения. Множество мелких сгущений разрушалось от взаимных столкновений, а какие-то выпадали на крупные сгущения, в результате чего они увеличивались в размерах и уплотнялись, постепенно создавая зародыши планет.

Неупругие удары при столкновениях сгущений вели к тому, что зародыши планет постепенно обособлялись, а их орбиты всё более походили на окружности.

Со временем выжили лишь те наиболее крупные зародыши, которые располагались далеко друг от друга и не оказывали существенного взаимного гравитационного воздействия, поэтому их орбиты вокруг Солнца стали устойчивыми. Из этих зародышей на протяжении сотен миллионов лет и сформировались большие планеты.

Между орбитами Марса и Юпитера, где значительное гравитационное влияние Юпитера препятствовало росту сгущений и нарушало устойчивость их орбит, образовались малые планеты — астероиды, которые и в нашу эпоху часто сталкиваются друг с другом и с планетами.

На самой периферии начального газопылевого облака из остатков лёгких газов и незначительного количества пыли возникло множество долгопериодических комет.

Анализ содержания радиоактивных элементов в земной коре, исследования метеоритов и лунного грунта, а также геологические данные указывают на то, что возраст Земли, вероятно, близок к 4,5 млрд лет.

Солнце и его планеты начали формироваться около 5 млрд лет назад. Благодаря спокойной эволюции Солнца, умеренно обогревающего Землю, на ней более 3,7 млрд лет назад зародилась жизнь, которая за этот длительный промежуток времени эволюционировала в разумную.

По современным представлениям, Луна — единственный крупный спутник планеты земной группы — образовалась в результате столкновения молодой Земли с другой протопланетой, похожей по размерам и массе на Марс. Удар пришёлся почти по касательной, но полностью разрушил меньшую из планет, превратив её в облако осколков на орбите вокруг Земли. Аналогично образованию планет, осколки сталкивались и постепенно соединялись в крупный спутник Земли — Луну, которая когда-то обращалась значительно ближе к Земле.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Каким образом произошло формирование Солнца согласно современным представлениям?
- Каким образом произошло формирование планет?

ЗАДАЧА № 15

Количество энергии от Солнца, которое падает на квадратный метр поверхности планеты (освещённость) $E \sim 1/r^2$, оцените, во сколько раз различаются освещённость поверхности Меркурия и Марса.

ЗАДАЧА № 16

Оцените радиус действия силы притяжения Земли r по отношению к Солнцу, т. е. расстояние от планеты, в пределах которого притяжением Солнца, например на спутник, в первом приближении можно пренебречь.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Солнечная система простирается почти до границы облака Оорта и кончается там, где притяжение Солнца сравнивается с притяжением соседних звёзд.
- Планеты земной группы, в отличие от планет-гигантов, имеют меньшие массы и размеры, состоят из тяжёлых химических элементов, расположены ближе к Солнцу, медленно вращаются, имеют мало спутников.
- Большая часть замёрзших комет находится за орбитой Нептуна в поясе Койпера и облаке Оорта.
- Планеты земной группы Меркурий, Венера и Марс по внутреннему строению похожи на Землю.
- Планеты-гиганты имеют большие массы и состоят в основном из лёгких химических элементов водорода и гелия, удерживают вокруг себя по несколько десятков спутников, быстро вращаются, обладают сильными магнитными полями и все имеют гигантские кольца вокруг себя.
- За орбитой Нептуна располагаются объекты нового класса планет-карликов (Плутон и другие объекты с размерами порядка 1–2 тыс. км). К ним относится также астероид Церера.
- Между орбитами Марса и Юпитера движутся около 100 000 астероидов. На их движение большое влияние оказывает притяжение Юпитера.
- Кометы, пролетая по вытянутым эллиптическим орбитам вблизи Солнца, нагреваются, испаряются, а под действием давления света и солнечного ветра образуют гигантские хвосты. Вдали от Солнца они остывают, и хвосты у них исчезают.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М. М. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.

Сурдин В. Г. Солнечная система. — М.: Физматлит, 2008.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как вы думаете: на Марсе происходят сильные землетрясения? Аргументируйте свой ответ.
- Как вы думаете: если Луна будет приближаться к Земле, что произойдёт и почему?
- Как вы объясните существование железных и каменных метеоритов?
- Вода на поверхности Марса не может находиться в жидком состоянии. Как можно объяснить наличие высохших русел рек на Марсе?

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>



Глава 5

АСТРОФИЗИКА И ЗВЁЗДНАЯ АСТРОНОМИЯ

- МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
- СОЛНЦЕ
- ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА
- ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗД
- ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЁЗД
- БЕЛЫЕ КАРЛИКИ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ, ПУЛЬСАРЫ, ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ
- ДВОЙНЫЕ, КРАТНЫЕ И ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЁЗДЫ
- НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ ЗВЁЗДЫ
- ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Самая холодная известная звезда — это коричневый карлик CFBDSIR 1458+10B, имеющий температуру всего около 100°C .

Самая горячая известная звезда — это голубой сверхгигант, находящийся в нашей Галактике под названием «Дзета Кормы». Её температура более $42\,000^{\circ}\text{C}$.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как устроены телескопы рефлектор и рефлектор.
- Как устроен радиотелескоп.
- Для чего используют радиоинтерферометры.

ВСПОМНИТЕ:

- Где и как работают самые крупные оптические телескопы?
- Для чего предназначены гамма-телескопы?

МЕТОДЫ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электромагнитные волны порождаются при движении электрически заряженных частиц (электронов и ионов) в электромагнитном поле. Оно обладает некоторыми особенностями, позволяющими определить его природу. Вот поэтому современная астрофизика применяет разнообразную и часто технически очень сложную аппаратуру, предназначенную для регистрации различных диапазонов электромагнитных волн.

ИЗЛУЧЕНИЕ НЕБЕСНЫХ Тел

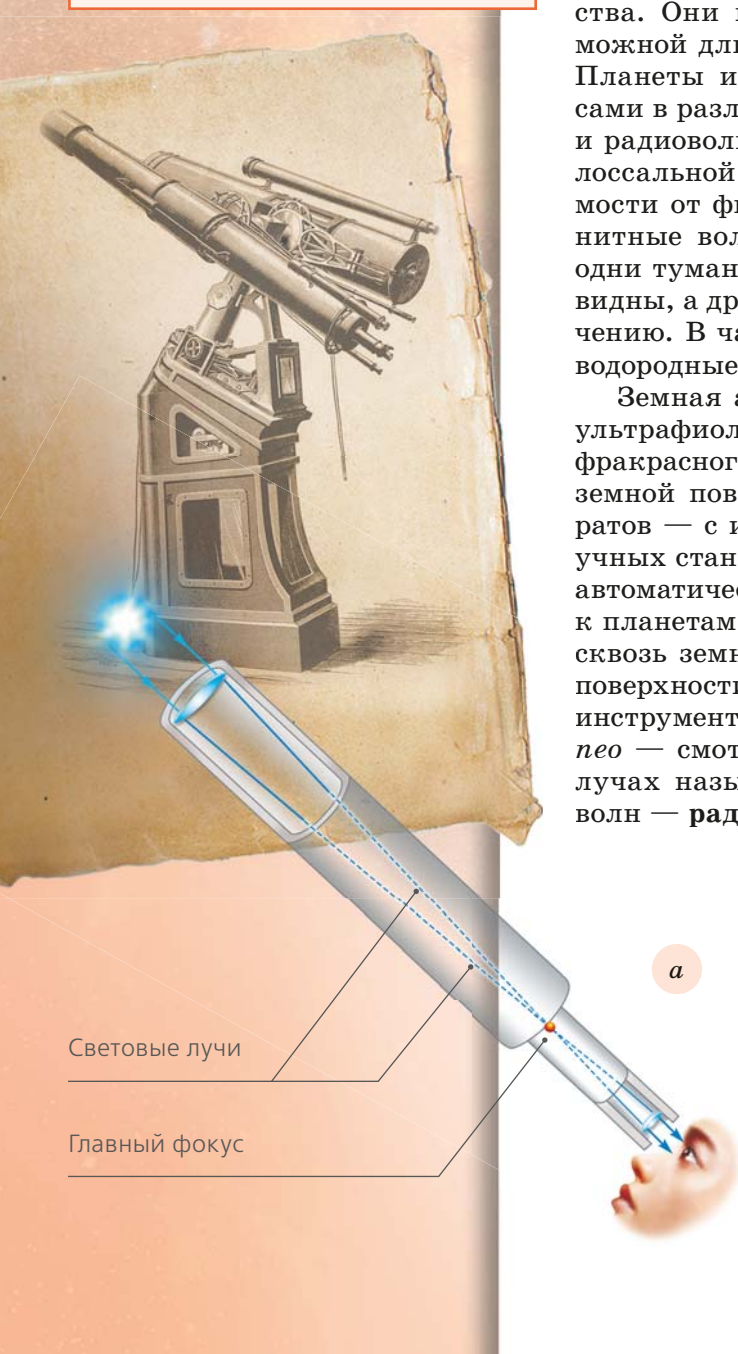
Солнце и звёзды представляют собой огромные шарообразные тела из горячего вещества. Они излучают электромагнитные волны всевозможной длины, от гамма-лучей до длинных радиоволн. Планеты и их спутники отражают солнечный свет и сами в различной степени излучают инфракрасные лучи и радиоволны. Разреженные газовые туманности — колоссальной протяжённости газовые облака — в зависимости от физического состояния излучают электромагнитные волны строго определённой частоты. Поэтому одни туманности, излучающие в визуальном диапазоне, видны, а другие обнаруживаются лишь по их радиоизлучению. В частности, невидимые межзвёздные холодные водородные облака испускают радиоволны $\lambda = 21$ см.

Земная атмосфера поглощает гамма-, рентгеновское, ультрафиолетовое излучение и значительную долю инфракрасного. Излучение небесных тел, не доходящее до земной поверхности, исследуется с космических аппаратов — с искусственных спутников и орбитальных научных станций, обращающихся вокруг Земли, а также с автоматических межпланетных станций, направляемых к планетам Солнечной системы. Излучение, проходящее сквозь земную атмосферу, изучается непосредственно с поверхности Земли. Для этого созданы астрономические инструменты — телескопы (от греч. *теле* — вдалеке и *скопео* — смотрю). Телескопы для наблюдений в световых лучах называются **оптическими**, а для приёма радиоволн — **радиотелескопами**.

ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Существует два основных вида оптических телескопов — линзовые, или **рефракторы** *а*, и зеркальные, или **рефлекторы** *б*. У рефракторов объектив, собирающий световые лучи, изготовлен из стеклянных линз, а у рефлекторов объективом служит вогнутое зеркало.

Основное назначение телескопов состоит не в достижении большого увеличения, а в том, чтобы собрать как можно больше световой энергии от небесного тела и раз-



личить как можно меньшие детали. От небесных тел к Земле приходят параллельные лучи света, из которых в глаз попадает лишь ничтожная доля, поскольку диаметр зрачка очень мал: не превышает 6–7 мм.

Объектив телескопа, имея значительные размеры (диаметр D), воспринимает световой поток и, концентрируя его, позволяет видеть слабые небесные объекты, недоступные невооружённому глазу. Диаметр объектива D и его фокусное расстояние F определяют важную характеристику телескопа — светосилу:

$$A = \frac{D}{F}.$$

Чем больше светосила A , тем более ярким получается изображение протяжённого объекта в фокальной плоскости телескопа. При визуальных наблюдениях фокальное изображение светила рассматривается в окуляре (от лат. *ocularis* — глазной и *oculus* — глаз), состоящий из короткофокусной линзы, поэтому размеры протяжённого светила представляются увеличенными. Увеличение телескопа равно

$$W = \frac{F}{f},$$

где F — фокусное расстояние объектива, а f — фокусное расстояние окуляра.

Диаметр объектива определяет разрешающую способность (или разрешение) телескопа — способность телескопа видеть отдельно близко расположенные объекты и мелкие детали на поверхности небесного тела. Разрешение телескопа выражается минимальным углом θ между двумя точками, которые можно чётко различить.

Разрешающая способность телескопа обратно пропорциональна диаметру объектива и прямо пропорциональна длине электромагнитных волн, воспринимаемых телескопом. Вычисленное в секундах дуги разрешение:

$$\theta = 251\,640'' \cdot \frac{\lambda}{D},$$

где длина волны λ и диаметр объектива D выражены в одинаковых единицах.

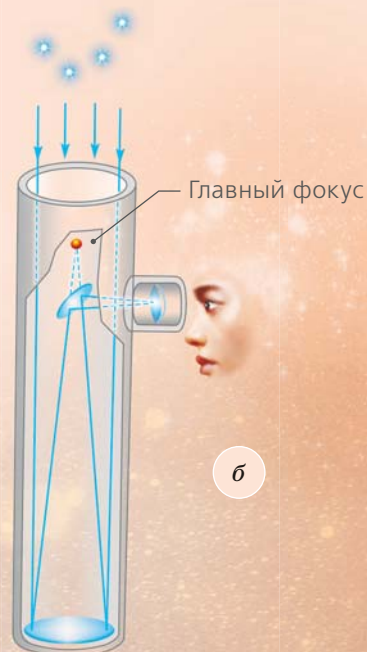
Оптические телескопы, предназначенные для визуальных наблюдений, рассчитаны на восприятие световых волн длиной $\lambda = 550$ нм, которые наиболее эффективно воздействуют на человеческий глаз. Диаметры объективов оптических телескопов выражают в миллиметрах, поэтому длину световой волны следует представить в тех же единицах. Тогда разрешающая способность телескопа равна

$$\theta = \frac{140''}{D},$$

где D — диаметр объектива (в мм).

Рефрактор (от лат. *refractus* — преломлённый) — телескоп, в котором линзы преломляют световые лучи.

Рефлектор (от лат. *reflectere* — отражать) — телескоп, в котором зеркало отражает лучи.



б



ЗАДАЧА № 17

Какое минимальное угловое расстояние между компонентами двойной звезды может быть видно в телескопы с диаметром 10 см и 1 м и какова оптическая мощность этих телескопов?

Большой Телескоп
Азимутальный



Стационарный
радиотелескоп РАТАН-600



Так, типичный школьный телескоп с диаметром объектива $D = 10$ см имеет разрешающую способность $1,4''$. Это означает, что если две звезды на небе отстоят друг от друга на угловое расстояние более $1,4''$, то они в этот телескоп могут быть видны по отдельности при условии хороших атмосферных условий и качества оптики.

Если расстояние между ними менее $1,4''$, то они будут видны как одна точка.

Предельный (наименьший) блеск звёзд, видимый в телескоп, характеризует проникающую способность телескопа (m_t), часто называемую его оптической мощностью, которую вычисляют по формуле

$$m_t = 2,1 + 5 \cdot \lg D,$$

где D — диаметр объектива (в мм).

Самый крупный телескоп в России — Большой Телескоп Азимутальный Специальной астрофизической обсерватории РАН, установленный в горах Северного Кавказа. Диаметр его объектива составляет 6 м.

В настоящее время построены оптические телескопы с диаметром 10 м. Несколько таких телескопов, объединённых в единую систему, могут работать как телескоп с диаметром около 16 м.

РАДИОТЕЛЕСКОПЫ Космическое радиоизлучение впервые было обнаружено в 1931 г. американским инженером Карлом Янским (1905—1950) при изучении им атмосферных радиопомех. В апреле 1933 г. Янский установил, что радиоизлучение исходит от Млечного Пути. В 1944 г. было открыто радиоизлучение Солнца. С 1946 г. началось строительство и установка в астрономических обсерваториях радиотелескопов для приёма радиоизлучения небесных объектов.

Радиотелескопы состоят из антенны и чувствительного радиоприёмника. Доходящее до Земли радиоизлучение подавляющего большинства небесных тел настолько мало, что для его приёма необходимы антенны с полезной площадью в тысячи и десятки тысяч квадратных метров. Конструкции антенн весьма разнообразны. Так, сравнительно небольшими антеннами (до 100 м в диаметре) служат металлические вогнутые зеркала, а также каркасы параболической и цилиндрической формы, покрытые металлической сеткой. Они отражают и фокусируют радиоволны на приёмник.

Крупный стационарный радиотелескоп РАТАН-600 установлен вблизи станицы Зеленчукской Ставропольского края. Его приёмная антенна имеет вид замкнутого кольца диаметром 600 м.

Отражатели наиболее крупных радиотелескопов собираются из плоских металлических зеркал, расположенных сплошной полосой параболического сегмента. Такие радиотелескопы неподвижны, а их приёмники способны перемещаться в небольших пределах.



Крупный радиотелескоп с диаметром сплошного зеркала 500 м, построенный в Китае

Однако это не ограничивает возможностей радиотелескопов, так как в суточном вращении неба каждый небесный объект обязательно проходит в поле их обзора, а радиотелескопы способны принимать радиоизлучение в любое время суток.

У крупного стационарного радиотелескопа диаметром 300 м, установленного в Аресибо (Пуэрто-Рико), антенной параболической формы служит кратер потухшего вулкана; кратер забетонирован и сверху покрыт металлическим слоем.

Разрешающая способность радиотелескопов тоже зависит от диаметра их антенн и длины воспринимаемых радиоволн. Однако она всегда ниже, чем у оптических телескопов, так как длина радиоволн значительно больше длины световых волн.

Если два радиотелескопа установлены на значительном расстоянии друг от друга (один из них может быть в космосе), одновременно воспринимают радиоизлучение одного и того же источника и подают сигналы на общий радиоприёмник, то разрешение резко повышается. Два таких спаренных радиотелескопа называются радиоинтерферометром, а при расстоянии между радиотелескопами в тысячи километров — радиоинтерферометром со сверхдлинной базой. Разрешение такого радиоинтерферометра достигает $0,001''$, т.е. превышает разрешение оптических телескопов, а у космического телескопа «Радиоастрон» оно в сотни раз лучше.

Стационарный радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико)



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- В чём разница между телескопами рефрактором и рефлектором?
- Что такое разрешающая способность телескопа?
- Для чего используют радиотелескопы?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каковы основные характеристики Солнца.
- Каково строение солнечной атмосферы.
- Что такое солнечная активность.

ВСПОМНИТЕ:

- Как протекают термоядерные реакции?
- Что такое эклиптика?

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА

Среднее расстояние до Земли	$1,5 \cdot 10^{11}$ м
Средний диаметр	$1,39 \cdot 10^9$ м
Масса	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг
Средняя плотность	1,4 г/см ³
Ускорение свободного падения на экваторе	$274 \text{ м/с}^2 = 27,96 \text{ g}$
Температура короны	$1,5 \cdot 10^6$ К
Температура ядра	$1,4 \cdot 10^7$ К

СОЛНЦЕ

Солнце — источник жизни на Земле. Оно даёт свет, тепло и обеспечивает жизнедеятельность всего растительного и животного мира.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА Солнце — лишь одна из бесчисленного множества звёзд, существующих в природе. Благодаря своей близости к Солнцу мы имеем возможность изучать происходящие на нём процессы и по ним судить об аналогичных процессах в звёздах, непосредственно невидимых из-за колоссального их удаления.

Шарообразное Солнце представляется нам светящимся диском. Видимая поверхность Солнца называется фотосферой, радиус которой считается радиусом Солнца.

На среднем расстоянии Земли от Солнца, равном $a_0 = 1 \text{ а. е.} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$, угловой радиус фотосферы $\theta = 16'$, поэтому линейный радиус Солнца

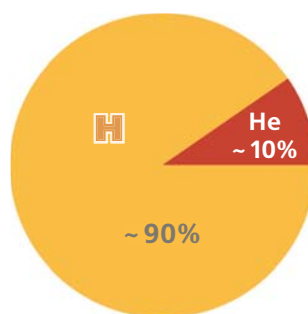
$$R_{\odot} = a_0 \cdot \sin \theta = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км} \cdot 0,00465 \cong 700\,000 \text{ км},$$

что в 109 раз превышает радиус Земли.

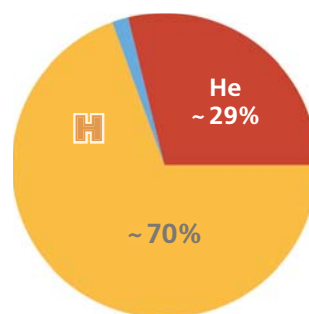
Масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$. Средняя плотность Солнца $\rho_{\odot} = 1400 \text{ кг/м}^3$.

Ускорение свободного падения на поверхности Солнца в 28 раз больше, чем на поверхности Земли, и равно 274 м/с^2 .

На фотографических снимках Солнца часто видны тёмные пятна, возникающие в его фотосфере. Их можно увидеть в телескоп, если изображение Солнца спроектировать на белый лист бумаги, установленный за окуляром.



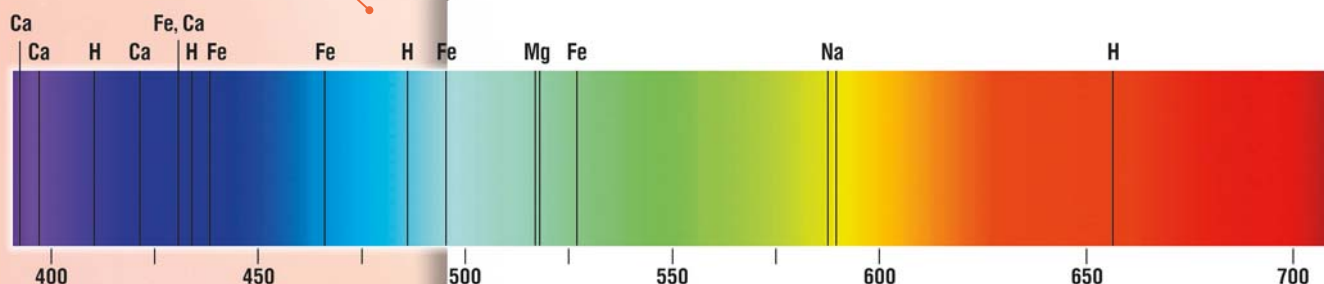
по числу атомов



по массе

СОСТАВ СОЛНЦА

a



Если в течение нескольких дней следить за пятнами, то можно заметить их перемещение, что указывает на вращение Солнца вокруг оси. Такие наблюдения показали, что Солнце вращается не как твёрдое тело. Период его обращения вокруг оси вблизи экватора составляет 25 суток, а вблизи полюса — 30 суток. Линейная скорость вращения Солнца на экваторе составляет 2 км/с.

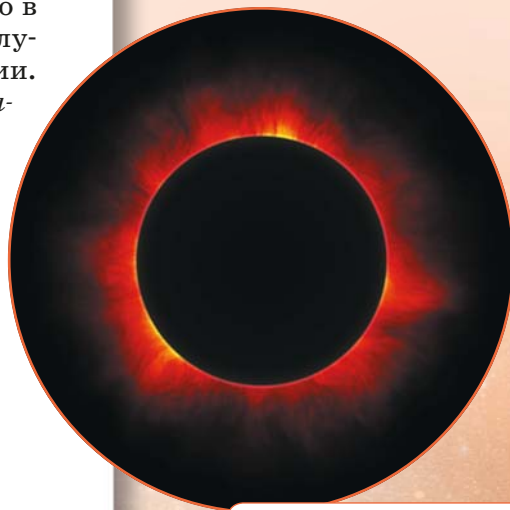
Измерения освещённости, которую создаёт Солнце на Земле, показали, что на земную поверхность площадью в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно к солнечным лучам, каждую секунду поступает от Солнца 1370 Дж энергии. Это значение солнечной энергии получило название *солнечной постоянной* $E_{\odot} = 1,37 \text{ кВт/м}^2$.

По ней можно рассчитать светимость Солнца $L_{\odot}$, или мощность солнечного излучения, — энергию, излучаемую Солнцем за 1 с со всей его поверхности. Для этого достаточно умножить солнечную постоянную на площадь сферы, в центре которой находится Солнце, а радиус равен расстоянию от Земли до Солнца $a_0 = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$. Так как площадь сферы радиуса a_0 равна $S = 4\pi a_0^2$, то светимость Солнца

$$L_{\odot} = S \cdot E_{\odot} = 4 \cdot 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{11} \text{ м})^2 \cdot 1,37 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 \cong \cong 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

Если принять, что мощность современных атомных электростанций близка к 10^9 Вт , то Солнце излучает почти в $4 \cdot 10^{17}$ раз больше энергии, чем производит каждая такая электростанция.

Визуальные наблюдения Солнца в телескоп можно проводить только с помощью специальных солнечных светофильтров.



Масса Солнца:
 $1,99 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

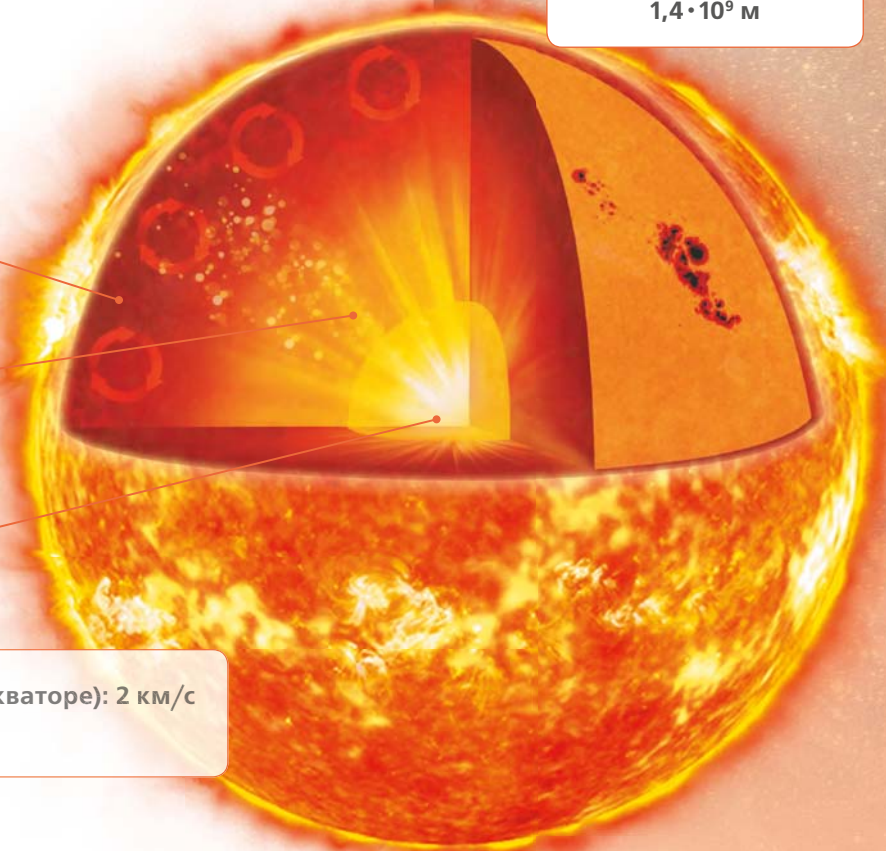
Диаметр Солнца:
 $1,4 \cdot 10^9 \text{ м}$

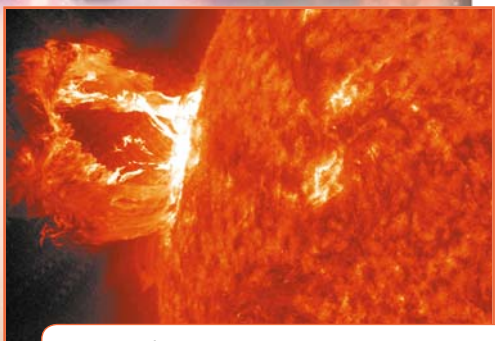
Конвективная зона

Зона лучистого переноса

Ядро

Скорость вращения Солнца (на экваторе): 2 км/с
Период вращения: 25 сут.





Протуберанец — вещество, которое удерживается над поверхностью Солнца магнитным полем.

Скорость движения вещества: десятки и сотни км/с.

Температура: до 20 тыс. К.

Толщина: 5–10 тыс. км, высота — десятки тыс. км.

На долю Земли приходится всего лишь одна двухсот-миллиардная доля энергии, излучаемой Солнцем, но и её достаточно для поддержания многообразия жизни на нашей планете.

Судить о температуре Солнца (и звёзд) мы можем только по его излучению. Солнце является источником излучений различных длин волн: от длинноволнового радио до коротковолнового рентгеновского и гамма-излучения.

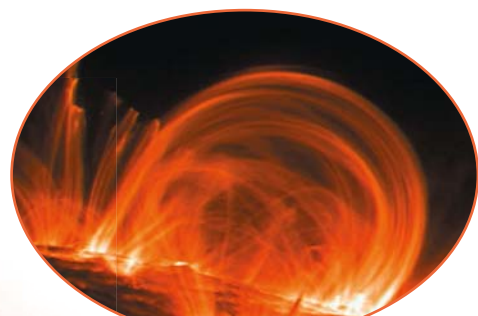
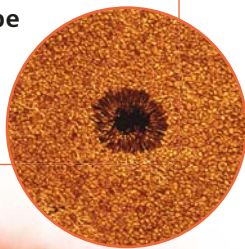
На рисунке **a** (с. 80) показан наблюдаемый спектр Солнца в видимом диапазоне длин волн, полученный с помощью спектрографа. На нём мы видим, что на фоне непрерывного спектра (цветная радуга) видны линии поглощения различных химических элементов.

По наличию спектральных линий астрономы определяют химический состав Солнца. Оказалось, что Солнце почти на 71% состоит из водорода, 27% составляет гелий, на остальные химические элементы приходится около 2% массы.

Гранулы — образования в фотосфере Солнца.

Температура: около 6000 К.

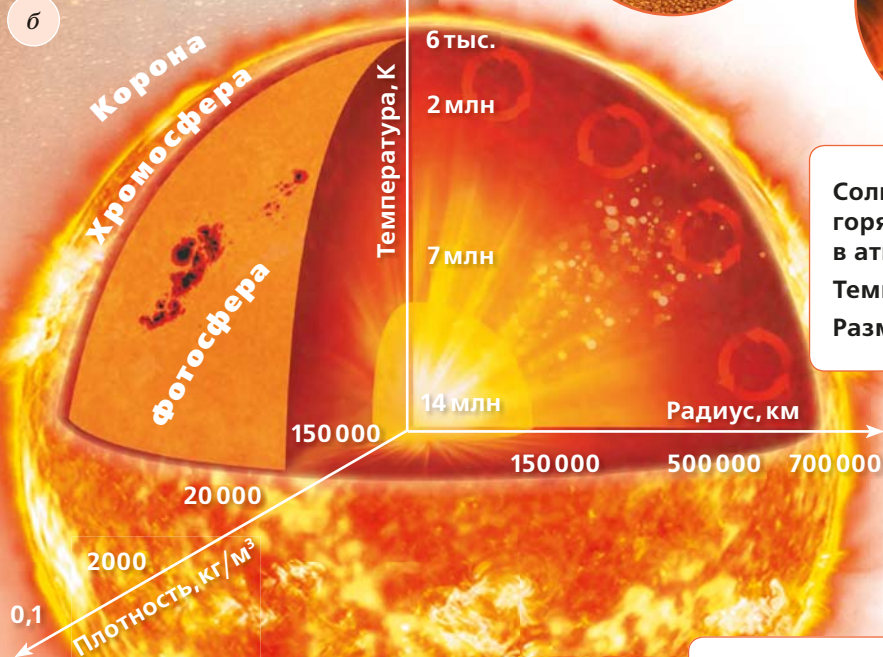
Размеры: около 1000 км.



Солнечные вспышки — горячие выбросы энергии в атмосфере Солнца.

Температура: миллионы °С.

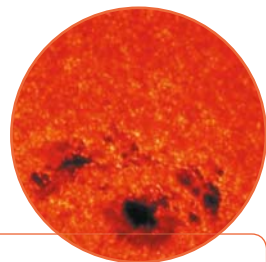
Размеры: десятки тыс. км.



Солнечные пятна — области на поверхности с пониженной температурой.

Температура: около 4500 °С.

Размеры: до нескольких десятков тыс. км.



Астрономы предполагают, что излучение Солнца близко по своим характеристикам излучению абсолютно чёрного тела.

Согласно закону Вина, длина волны, на которую приходится максимум излучения $\lambda_{\max}$, связана с температурой T формулой

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{T (\text{К})}.$$

Максимум излучения Солнца приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, следовательно, температура должна быть

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{\max}} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} = 5800 \text{ К}.$$

Другой метод оценки температуры основан на законе Стефана–Больцмана, который гласит: мощность излучения с квадратного метра поверхности абсолютно чёрного тела i пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры, т. е.

$$i = \sigma T^4 \text{ Вт/м}^2,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ — постоянная величина.

Так как площадь солнечной поверхности $S = 4\pi R_{\odot}^2$, то светимость Солнца

$$L_{\odot} = i \cdot S = \sigma T^4 \cdot 4\pi R_{\odot}^2 = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

Отсюда следует, что температура солнечной фотосферы

$$T = \sqrt[4]{\frac{L_{\odot}}{\sigma 4\pi R_{\odot}^2}}.$$

Подставляя в эту формулу указанные выше значения величин, получим, что $T = 5800 \text{ К}$.

Вычисленная по закону Стефана–Больцмана температура несколько отличается от температуры, полученной по закону смещения Вина, но эти различия невелики. При столь высокой температуре фотосфера находится в газообразном состоянии и бурное перемешивание в ней газа приводит к непостоянству температуры различных её участков. Поэтому среднюю температуру солнечной фотосферы можно считать близкой к 6000 К .

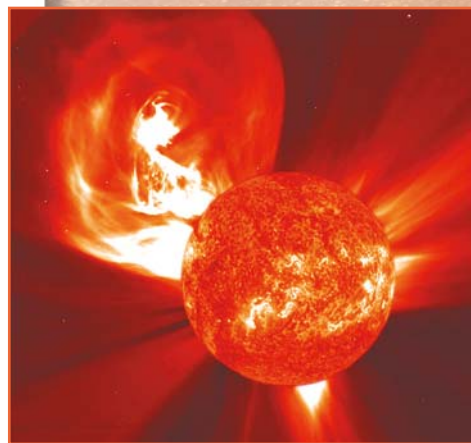
СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ Все виды излучений, которые мы воспринимаем от Солнца, образуются в его самых верхних слоях, в атмосфере.

Самый глубокий и плотный слой атмосферы — фотосфера — имеет толщину около 200 км , плотность вещества в ней 10^{-5} кг/м^3 , что значительно меньше плотности земной атмосферы.

Несмотря на малое значение толщины и плотности, фотосфера непрозрачна для всех видов излучений, обра-

ЗАДАЧА № 18

Как выглядит Солнце ($m = -26,74^{\text{м}}$) с ближайшей к нам земноподобной планеты, обращающейся вокруг Проксимы Центавра, параллакс которой равен $0,751''$?





МОИ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведите наблюдения за солнечными пятнами.

«ПОМОЩНИК»

● Наведите телескоп на Солнце, не глядя в него.

При наблюдениях Солнца категорически запрещается смотреть в окуляр телескопа во избежание потери зрения!

● Спроектируйте изображение Солнца на белый экран и зарисуйте.

● Подсчитайте полное число пятен N и число групп пятен g . Отдельное пятно тоже считается группой.

● Подсчитайте число Вольфа $W = 10g + N$, которое характеризует солнечную активность.

● Если возможно, повторите наблюдения через несколько дней. Обратите внимание на перемещение пятен по диску Солнца.



зующихся в более глубоких слоях Солнца, поэтому мы не можем заглянуть в его подфотосферные слои. В фотосфере видна зернистая структура, получившая название грануляции (б).

Характерные угловые размеры гранул, напоминающих по виду рисовые зёрна, составляют 1–2", но линейные их размеры достигают тысяч и более километров. Наблюдения показывают, что грануляция находится в непрерывном движении и изменении. Гранулы живут от 5 до 10 мин, на их месте появляются новые.

Исследование характера движения вещества в гранулах показало, что в центре более яркой и горячей части гранулы происходит подъём из-под фотосферы более горячего вещества и опускание под фотосферу более тёмного и холодного вещества, окаймляющего гранулу. Скорость подъёма и опускания газа составляет около 1 км/с, а разница между температурой горячего и холодного вещества близка к 300 К. Таким образом, грануляция на Солнце указывает на то, что энергия в фотосферу поступает из более глубоких и горячих слоёв Солнца путём конвекции.

На ярком фоне фотосферы наблюдаются тёмные пятна. Размеры солнечных пятен могут достигать свыше 100 000 км! Такие крупные пятна хорошо видны даже невооружённым глазом (конечно, только сквозь тёмный светофильтр).

На фоне ослепительно яркой фотосферы пятно нам кажется чёрным. Однако измерения показали, что яркость пятен в 5–10 раз меньше яркости окружающей фотосферы, а их реальный цвет — красноватый. По этим измерениям, используя закон излучения Стефана–Больцмана, легко оценить температуру пятен, которая оказалась около 4500 К.

Наблюдения показали наличие сильного магнитного поля в пятнах. В некоторых пятнах магнитная индукция достигает 0,5 Тл, в то время как в среднем в фотосфере она составляет 10^{-4} – 10^{-5} Тл.

Сильное магнитное поле пятен является причиной их низкой температуры. Это объясняется тем, что вещество фотосферы представляет собой плазму, состоящую из заряженных частиц. Сильное магнитное поле тормозит движение плазмы, замедляет её конвекцию и тем самым ослабляет поступление тепла из внутренних слоёв Солнца. В результате температура вещества в области пятен уменьшается, и пятна выглядят тёмными на фоне яркой фотосферы.

На рисунке в показана фотография Солнца, полученная во время полного солнечного затмения. На снимке хорошо видна внешняя часть солнечной атмосферы — корона, имеющая вид лучистого жемчужного сияния, яркость которого в миллион раз меньше яркости фотосферы. Солнечная корона прослеживается до расстояний в десять и более радиусов Солнца.

Наблюдения показали, что солнечная корона нагрета до температуры около $2 \cdot 10^6$ К. При такой температуре вещество короны представляет собой полностью ионизованную плазму, которая в основном излучает в рентгеновских лучах.

И действительно, при наблюдениях в рентгеновские телескопы, которые установлены на космических астрономических обсерваториях за пределами земной атмосферы, солнечная корона представляется в полной красе, в то время как поверхность Солнца — её фотосфера — практически не видна.

Во время полных солнечных затмений на краю Солнца во внутренних слоях солнечной короны наблюдаются протуберанцы — струи горячего вещества, имеющие вид выступов и фонтанов (в). Одни из них — спокойные протуберанцы — в течение многих часов висят над солнечной поверхностью, другие — эруптивные (взрывные) — внезапно с огромной скоростью взлетают над поверхностью, быстро поднимаются до высоты в десятки и даже сотни тысяч километров и также быстро падают вниз (г).

Из короны в межпланетное пространство истекает непрерывный поток частиц (протонов, ядер гелия, ионов, электронов), называемый солнечным ветром. Частицы солнечного ветра покидают солнечную корону со скоростью около 800 км/с, поэтому солнечное притяжение не может их удерживать. Вблизи Земли скорость солнечного ветра достигает 400 км/с.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ Наблюдения показывают, что число солнечных пятен меняется со временем с периодом около 11 лет.

Когда наблюдается максимальное число пятен, то говорят о максимуме солнечной активности. В годы максимума солнечной активности значительно возрастает число мощных протуберанцев, одновременно с солнечной активностью меняется и форма солнечной короны.

Одним из самых значительных проявлений солнечной активности являются солнечные вспышки, во время которых выделяется колоссальная энергия — в течение десятка минут до 10^{25} Дж энергии.

Благодаря наблюдениям со спутников учёные установили, что во время солнечных вспышек происходит резкое увеличение ультрафиолетового излучения, появляется мощное рентгеновское и гамма-излучение.

Датчики быстрых заряженных частиц, установленные на искусственных спутниках, показали, что при мощных солнечных вспышках в межпланетное пространство выбрасываются с огромными скоростями, иногда достигающими до 100 000 км/с, мириады частиц, обладающих большой кинетической энергией и получивших название солнечных космических лучей. Их основной состав — ядра атомов водорода, гелия, а также электроны.

Вспышки и другие проявления солнечной активности оказывают влияние на биологические земные явления, на физические условия в земной атмосфере и околоземном космическом пространстве. Так, с отсутствием пятен в течение почти 70 лет связывают наступление малого ледникового периода, наступившего в Европе в XVII в. Рост деревьев, распространение эпидемий и даже войны связаны с одиннадцатилетним циклом солнечной активности.



Советский учёный А. Л. Чижевский собрал подробные сведения о периодичности эпидемических заболеваний и сопоставил их с данными о солнечной активности. На основании обнаруженной связи он в 1929 г. предсказал некоторые эпидемии на 35 лет вперёд.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Каков химический состав Солнца?
- Опишите строение солнечной атмосферы.
- Что такое солнечная активность?
- Какие явления на Земле связаны с солнечной активностью?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова температура в центре Солнца.
- Что является источником энергии Солнца.
- Каково строение Солнца.
- Что такое солнечные нейтрино.

ВСПОМНИТЕ:

- Что представляет собой солнечная атмосфера?
- Как проявляется солнечная активность?

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Мы не можем непосредственно заглянуть внутрь Солнца, поэтому представление о его внутреннем строении получаем только на основе теоретического анализа, используя наиболее общие законы физики и такие характеристики Солнца, как масса, радиус, светимость.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА

Солнце не расширяется и не сжимается, оно находится в гидростатическом равновесии, так как силе гравитации, стремящейся сжать Солнце, препятствует сила газового давления изнутри.

Для оценок представим Солнце в виде двух равных половинок, центры масс которых находятся на расстоянии $R_{\odot}$ (a). Используя закон Менделеева–Клапейрона, определим давление газа на границе между двумя половинами:

$$P = \frac{A\rho T}{\mu},$$

где газовая постоянная $A = 8,31$ Дж/(К·моль), μ — молярная масса вещества, ρ — его плотность, T — абсолютная температура.

В действительности и плотность и температура внутри Солнца меняются с глубиной. Для расчётов можно использовать среднее значение плотности $\rho_{\odot} = 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³. Так как внутри Солнца водород ионизован, его молярная масса будет $\mu_{\odot} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кг/моль (для атомарного водорода, из которого состоит тонкий внешний слой Солнца, молярная масса в два раза больше).

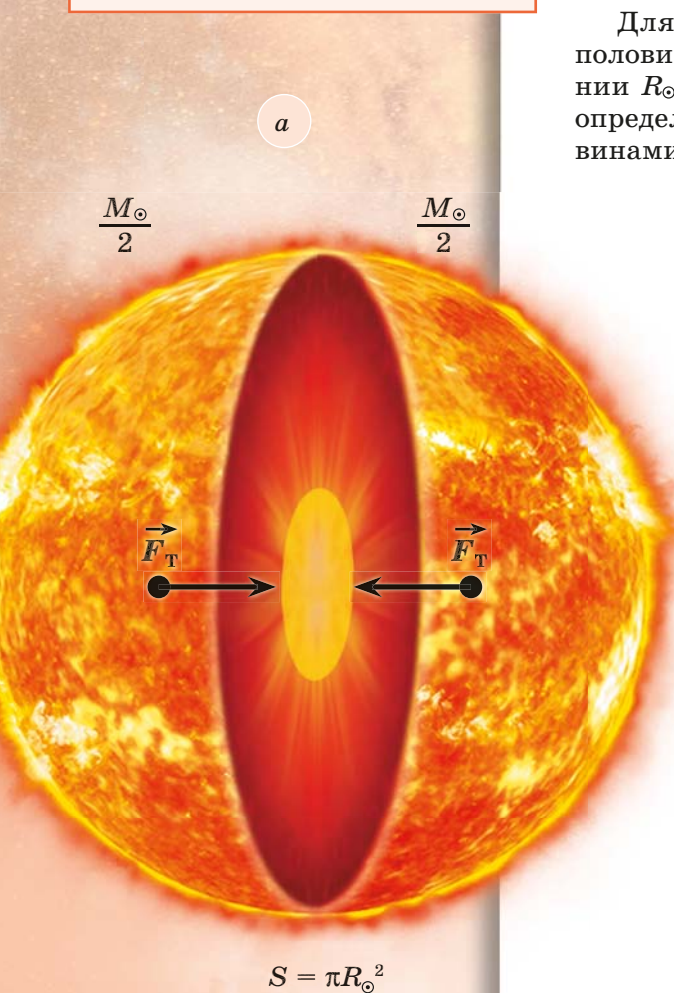
Согласно закону тяготения Ньютона, сила притяжения между двумя половинками, стремящаяся сжать Солнце,

$$F_{\text{т}} = \frac{G \left(\frac{M_{\odot}}{2} \right) \left(\frac{M_{\odot}}{2} \right)}{R_{\odot}^2} = \frac{GM_{\odot}^2}{4R_{\odot}^2},$$

где $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ кг⁻¹·м³·с⁻² — гравитационная постоянная.

Так как поверхность, разграничивающая обе половинки, имеет площадь $S = \pi R_{\odot}^2$, то создаваемое на ней силой притяжения давление

$$P_{\text{д}} = \frac{F_{\text{т}}}{S} = \frac{GM_{\odot}^2}{4\pi R_{\odot}^4}.$$



Масса Солнца

$$M_{\odot} = \frac{\rho_{\odot} 4\pi R_{\odot}^3}{3},$$

поэтому знаменатель $4\pi R_{\odot}^3$ в формуле может быть представлен в виде

$$3 \frac{R_{\odot}}{\rho_{\odot}} \frac{4}{3} \pi R_{\odot}^3 \rho_{\odot} = \frac{3R_{\odot} M}{\rho_{\odot}}.$$

Тогда давление

$$p_d = \frac{GM_{\odot}^2}{3R_{\odot} M_{\odot}} \rho_{\odot} = \frac{GM_{\odot} \rho_{\odot}}{3R_{\odot}}. \quad (1)$$

Подставляя в выражение (1) значения параметров, найдём

$$p_d = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{(\text{кг} \cdot \text{с}^2)} \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{3 \cdot 7 \cdot 10^8 \text{ м}} \times 1,4 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 8,9 \cdot 10^{13} \text{ Па},$$

что в 900 млн раз больше атмосферного давления у поверхности Земли.

Приравнивая давление, создаваемое гравитацией, к газовому, препятствующему сжатию Солнца, получим

$$A \frac{\rho_{\odot}}{\mu_{\odot}} T = \frac{GM_{\odot} \rho_{\odot}}{3R_{\odot}},$$

откуда средняя температура солнечного вещества

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{3} \frac{G}{A} \mu_{\odot} \frac{M_{\odot}}{R_{\odot}} = \\ &= \frac{1}{3} \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}} \times \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{7 \cdot 10^8 \text{ м}} = 4 \cdot 10^6 \text{ К}. \end{aligned}$$

То, что средняя температура Солнца близка к $4 \cdot 10^6 \text{ К}$, а на поверхности Солнца она равна 6000 К , означает, что температура Солнца меняется с глубиной.

Более точные расчёты показывают, что температура в центре Солнца превышает среднюю почти в 3,5 раза и достигает значения 14 млн К ($T_c = 14 \cdot 10^6 \text{ К}$). На расстоянии $0,7R_{\odot}$ температура падает до 10^6 К . Плотность вещества в центре Солнца равна $1,5 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$, что более чем в 100 раз выше его средней плотности.

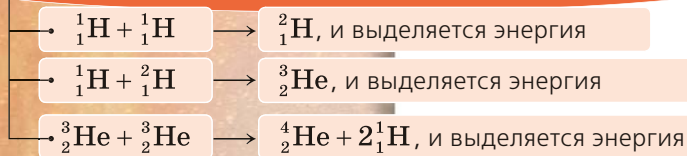
Термоядерные реакции протекают в центральной области Солнца радиусом, равным $0,3R_{\odot}$. Эта область получила название ядра. Вне ядра температура недостаточна для протекания термоядерных реакций.

Энергия, выделяемая одним килограммом солнечного вещества в секунду, равна

$$\frac{L_{\odot}}{M_{\odot}} = \frac{4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}}{2 \cdot 10^{30} \text{ кг}} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

На первый взгляд величина небольшая, она примерно равна количеству теплоты, выделяемому одним килограммом гниющих листьев. Но химической энергии, запасённой в листьях, при таком энерговыделении едва хватает на год.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА СОЛНЦЕ



ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Для поддержания наблюдаемой светимости Солнца в течение длительного времени необходимы достаточные запасы его внутренней энергии и процессы, перерабатывающие эту энергию в излучение.

Солнце, по современным данным, существует около 5 млрд лет, причём его светимость за это время существенно не изменилась, следовательно, запасов внутренней энергии солнечного вещества должно хватить ещё на миллиарды лет. Поэтому единственным приемлемым источником энергии являются термоядерные реакции синтеза химических элементов.

При реакции синтеза из четырёх ядер атомов водорода (четырёх протонов) образуется ядро атома гелия, два позитрона, два нейтрино и выделяется энергия связи $\Delta E = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж:



Для протекания ядерных реакций необходима температура в несколько миллионов кельвинов, при которой участвующие в реакции частицы с одинаковым электрическим зарядом смогли бы получить достаточную энергию для взаимного сближения, преодоления электрических сил отталкивания и слияния в одно новое ядро.

Именно такие реакции протекают в недрах Солнца. Расчёты показывают, что в результате термоядерных реакций синтеза из водорода массой 1 кг образуется гелий массой 0,99 кг и выделяется около $q = 9 \cdot 10^{14}$ Дж энергии.

Теперь можно оценить, на сколько времени хватит запасов водорода, чтобы поддерживать наблюдаемое свечение Солнца — время жизни Солнца.

Запас ядерной энергии

$$E = M_{\odot} \cdot q = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{14} \text{ Дж/кг} = 1,8 \cdot 10^{45} \text{ Дж}.$$

Если учесть, что Солнце состоит на 70% из водорода и ядерные реакции протекают только в центре, в солнечном ядре, масса которого составляет около $0,1M_{\odot}$, а температура достаточно высокая для протекания термоядерных реакций, то

$$E_{\odot} = 0,7 \cdot E = 1,26 \cdot 10^{44} \text{ Дж}.$$

Если поделить эти запасы ядерной энергии на светимость Солнца $L_{\odot}$, то мы получим время жизни Солнца:

$$t_{\odot} = \frac{E_{\odot}}{L_{\odot}} = M_{\odot} \cdot \frac{q}{L_{\odot}} = \frac{1,26 \cdot 10^{44} \text{ Дж}}{4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}} = 3 \cdot 10^{17} \text{ с} = 10^{10} \text{ лет}.$$

Таким образом, запасов энергии на Солнце хватит на 10 млрд лет. По современным данным, Солнце существует уже около 5 млрд лет.

СТРОЕНИЕ СОЛНЦА

Энергия, выделившаяся в ядре Солнца, переносится наружу, к поверхности, двумя способами: лучистым и конвективным. В первом случае энергия переносится излучением, во втором — при механических движениях нагретых масс вещества.

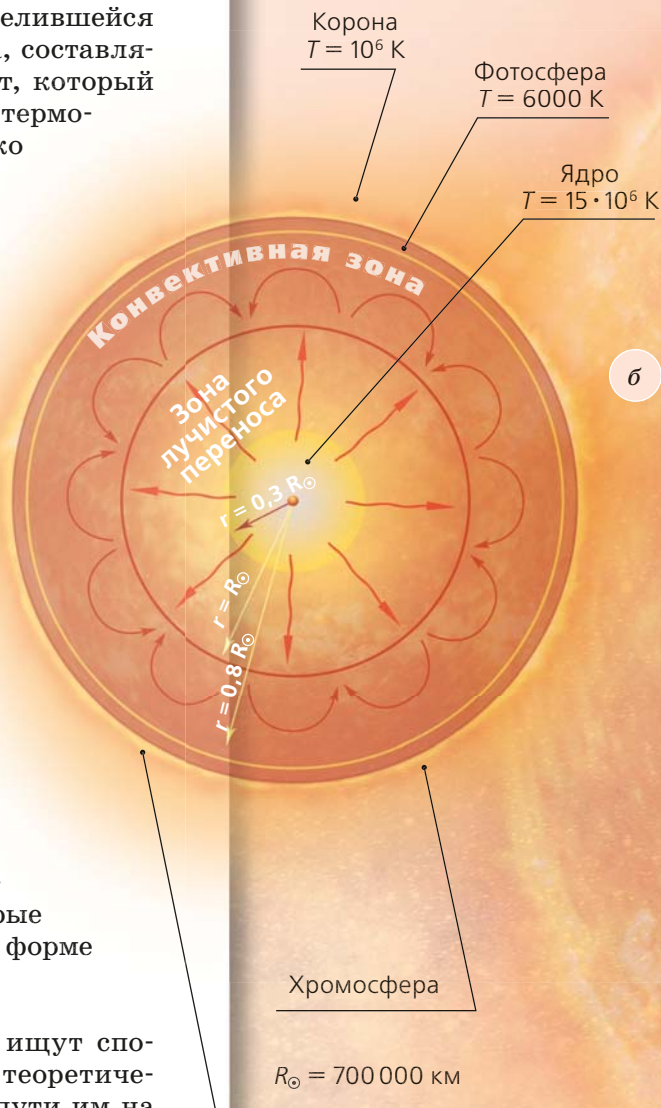
Лучистый перенос энергии происходит в ядре и далее до расстояний $(0,7—0,8)R_{\odot}$ от центра Солнца, далее к поверхности энергия переносится конвекцией (б). Проявление конвекции наблюдается в виде грануляции в фотосфере. Время, которое требуется энергии, выделившейся в ядре, чтобы достигнуть поверхности Солнца, составляет несколько миллионов лет. Так что тот свет, который доходит до Земли сегодня, был выработан в термоядерных реакциях в центре Солнца несколько миллионов лет назад.

Интересен сам механизм лучистого переноса. Гамма-излучение, возникающее при термоядерных реакциях, сразу поглощается атомами окружающего вещества. Атом при этом возбуждается, а затем быстро излучает гамма-квант, переходя в исходное состояние. Излучённый атомом квант уже движется в другом направлении. Далее это излучение поглощается и переизлучается другими атомами, направление излучения всё время меняется. Таким образом, излучение движется наружу не по прямой вдоль радиуса, а по ломаной, длина которой значительно больше радиуса Солнца. Пройти радиус Солнца по прямой излучение может почти за 2 с, в действительности путь излучения настолько удлиняется, что энергия, переносимая им, выходит наружу около миллиона лет. На своём пути наружу излучение претерпевает такие изменения, что γ -лучи, которые возникли в центре Солнца, выходят наружу в форме излучения видимого диапазона длин волн.

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

Конечно, астрономы ищут способы заглянуть внутрь Солнца и проверить теоретические представления о его строении. На этом пути им на помощь пришли физики, изучающие элементарные частицы. Дело в том, что при термоядерных реакциях синтеза гелия из водорода наряду с выделением энергии происходит рождение элементарных частиц — нейтрино.

Выяснилось, что, в отличие от другого излучения, нейтрино практически не задерживается веществом. Возникая в недрах Солнца и распространяясь со скоростью света, они через 2 с покидают поверхность Солнца и через 8 мин достигают Земли.



ЗАДАЧА № 19

Определите температуру звёзд по измеренным их угловым диаметрам и освещённости, создаваемой ими на Земле, указанным в скобках.

а) α Льва ($0'',0014$ и $E = 2,26 \times 10^{-8}$ Вт/м² с);

б) α Орла ($0'',003$ и $E = 1,5 \times 10^{-8}$ Вт/м² с);

в) α Ориона ($0'',016$ и $E = 5,3 \times 10^{-8}$ Вт/м² с).

Если бы удалось измерить этот поток нейтрино от Солнца, то мы смогли бы непосредственно судить о физических процессах, протекающих внутри Солнца.

Для наблюдения солнечных нейтрино советский академик Б. М. Понтекоров предложил способ их обнаружения по регистрации ядер атомов аргона, образующихся при взаимодействии хлора с нейтрино.

Для этого под руководством американского учёного Дж. Дэвиса был изготовлен большой резервуар объёмом 400 м³, наполненный жидким веществом, в состав которого входили атомы хлора.

Так как атомы аргона могут образовываться из атомов хлора при их взаимодействии с быстрыми частицами, проникающими из космического пространства, то во избежание этого резервуар поместили в глубокой шахте. Для нейтрино толстый слой земли не помеха, а космические частицы поглощаются им.

На что же рассчитывали астрономы, ставя такой эксперимент? Ожидаемый у Земли поток солнечных нейтрино легко оценить по солнечной светимости.

Так как при образовании одного ядра атома гелия выделяется энергия связи $\Delta E = 4,3 \cdot 10^{-12}$ Дж и излучаются два нейтрино, то легко подсчитать число ядер атомов гелия, образующихся в недрах Солнца каждую секунду. Для этого достаточно светимость Солнца $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$ Вт разделить на энергию связи.

Умножая полученное частное на два, найдём число нейтрино, ежесекундно излучаемых Солнцем со всей его поверхности:

$$N = \frac{2L_{\odot}}{\Delta E} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}}{4,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}} \approx 2 \cdot 10^{38} \frac{\text{нейтрино}}{\text{с}}.$$

Эти нейтрино распространяются от Солнца во все стороны, и так как расстояние от Земли до Солнца

$$a_0 = 1 \text{ а. е.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м},$$

то следует ожидать, что на земную поверхность площадью 1 м² каждую секунду должно попадать число нейтрино

$$n = \frac{N}{4\pi a_0^2} = \frac{2 \cdot 10^{38}}{4 \cdot 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{11})^2} \approx 7 \cdot 10^{14} \frac{\text{нейтрино}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}.$$

В результате взаимодействия этого потока нейтрино с хлором в резервуаре должно образоваться всего несколько десятков атомов аргона, которые и следует обнаружить химическим путём. Отсюда понятны трудности «вылавливания» этих десятков атомов аргона среди колоссального числа атомов, содержащихся в резервуаре. Почти сорокалетнее исследование Дэвиса показало, что обнаруженный поток солнечных нейтрино соответствует расчётному потоку и нашим основным представлениям о внутреннем строении Солнца.

ВАШЕ МНЕНИЕ:

На сколько времени хватит энергии Солнца?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Каковы физические характеристики Солнца?
- Опишите процесс ядерной реакции, которая происходит в недрах Солнца.
- Зачем исследуют поток нейтрино, поступающий от Солнца?

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЁЗД

Как и Солнце, звёзды освещают Землю, но из-за огромного расстояния до них освещённость, которую они создают на Земле, на много порядков меньше солнечной.

ТЕМПЕРАТУРА И ЦВЕТ ЗВЁЗД Имеется связь между звёздной величиной и освещённостью, создаваемой звездой:

$$m = -2,5 \lg E - 19 \text{ или } E = 10^{-0,4(19+m)}.$$

Наблюдения показали, что среди звёзд встречаются в сотни тысяч раз более мощные, чем Солнце, и звёзды со светимостями в десятки тысяч раз меньшими, чем у нашего Солнца.

Определения температур поверхности звёзд показали, что от температуры поверхности звезды зависит её видимый цвет и наличие спектральных линий поглощения тех или иных химических элементов в её спектре.

Так, Сириус сияет белым цветом и его температура равна почти 10 000 К. В спектре хорошо видны линии поглощения атомами водорода (H_α , H_β , H_γ). Звезда Бетельгейзе (α Ориона) имеет красный цвет и температуру поверхности около 3000 К. В спектре самых холодных звёзд (рис. *a*) видны линии молекул оксида титана TiO . Солнце жёлтого цвета, имеет температуру 5800 К.

По температуре, цвету и виду спектра все звёзды разбили на спектральные классы, которые обозначаются буквами O, B, A, F, G, K, M.

Почему же спектры звёзд различны, хотя их химический состав примерно одинаков? Дело в том, что при температуре около 3000 К существуют молекулярные соединения, которые и вызывают в спектре фотосферы звезды полосы поглощения. При более высокой температуре молекулярные соединения распадаются, и соответствующие им спектральные полосы исчезают. Зато хорошо видны линии, свойственные нейтральным металлам, атомы которых возбуждаются и поглощают свет определённых длин волн, соответствующих их природе.

22

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каковы основные характеристики звёзд.
- Что лежит в основе спектральной классификации звёзд.
- Что представляет собой диаграмма «Спектральный класс — светимость звёзд».
- Какова связь между массой и светимостью звезды.

ВСПОМНИТЕ:

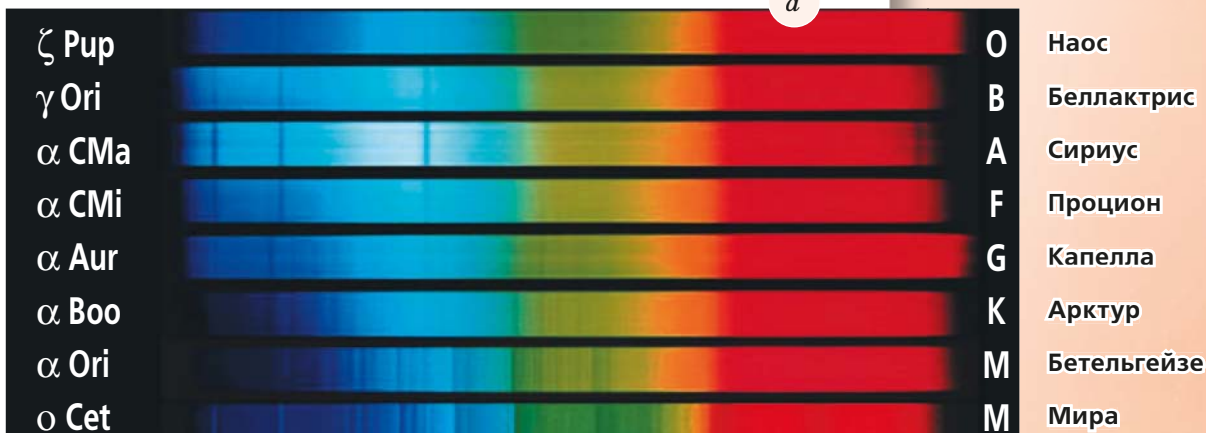
- Каков источник энергии Солнца?
- Каково строение Солнца?

Полярная звезда имеет звёздную величину $m = 2^m$ и создаёт освещённость на поверхности Земли $E = 4 \cdot 10^{-9}$ Вт/м², что в 3000 млрд раз меньше освещённости, создаваемой Солнцем. Расстояние до Полярной звезды составляет 200 пк, или около 650 св. лет ($r = 6 \cdot 10^{18}$ м). Поэтому светимость Полярной звезды:

$$L_p = 4\pi r^2 \cdot E = 4 \cdot 3,14 \cdot (6 \cdot 10^{18} \text{ м})^2 \times 4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^2 = 6 \cdot 10^{29} \text{ Вт} = 4600 L_\odot.$$

Несмотря на малую видимую яркость этой звезды, её светимость в 4600 раз превышает солнечную.

Спектры звёзд различных спектральных классов



Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Типичные звёзды
O	Голубой	40 000	Наос (ζ Кормы)
B	Белый, голубой	25 000	Беллактрис (γ Ориона)
A	Белый	10 000	Сириус
F	Жёлтый, белый	8000	Альтаир (α Орла)
G	Жёлтый	6000	Солнце
K	Жёлтый, оранжевый	4500	Альдебаран (α Тельца)
M	Оранжевый, красный	3000	Бетельгейзе (α Ориона)

Спектральная классификация звёзд

Чтобы понять, чем объясняются наблюдаемые различия звёзд разных групп, вспомним связь между светимостью, температурой и радиусом звезды: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$.

Сравним две звезды спектрального класса К. Одна — звезда главной последовательности (ГП), другая — красный гигант (КГ). У них одинаковая температура $T = 4500$ К, а светимости различаются в тысячу раз:

$$\frac{L_{\text{КГ}}}{L_{\text{ГП}}} = \left(\frac{R_{\text{КГ}}}{R_{\text{ГП}}} \right)^2,$$

$$\frac{R_{\text{КГ}}}{R_{\text{ГП}}} = \left(\frac{L_{\text{КГ}}}{L_{\text{ГП}}} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \sqrt{(1000)} \approx 30,$$

т.е. звёзды — красные гиганты больше по размерам в десятки раз, чем звёзды главной последовательности.

При температуре 6000 К многие металлы ионизируются, и поэтому в спектрах появляются линии ионизированных металлов. Атомы же водорода и гелия проявляют себя слабо, так как такая и более низкие температуры недостаточны для возбуждения всей водородной и гелиевой массы и только некоторая часть их атомов поглощает свет. Но если температура фотосферы близка к 10 000 К, то энергии излучения вполне достаточно, чтобы возбуждать почти все атомы водорода, поэтому в спектрах А-звёзд водородные линии поглощения особенно интенсивны.

При температуре около 20 000 К значительная часть атомов водорода ионизована и спектральные водородные линии поглощения ослаблены. Зато такая температура вызывает активное возбуждение атомов гелия. Этим и объясняются интенсивные линии поглощения гелия в спектрах В-звёзд.

Наконец, при температуре около 30 000 К уже многие атомы гелия ионизованы, а атомы кислорода и азота претерпевают многократную ионизацию, поэтому в спектрах О-звёзд хорошо проявляются спектральные линии, соответствующие этим ионам.

ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА—РЕССЕЛА Имеется ещё одна интересная связь между спектральным классом звезды и её светимостью, которая представляется в виде диаграммы «Спектр — светимость» (также её называют диаграммой Герцшпрунга—Рессела в честь астрономов Э. Герцшпрунга и Г. Н. Рессела, построивших эту диаграмму).

На диаграмме чётко выделяются четыре группы звёзд:

- **главная последовательность.** На неё ложатся параметры большинства звёзд. К звёздам главной последовательности относятся Солнце, Сириус. Плотности звёзд главной последовательности сравнимы с солнечной плотностью;

- **красные гиганты.** К этой группе в основном относятся звёзды красного цвета с радиусами, в десятки раз превышающими солнечный, например звезда Арктур (α Волопаса), радиус которой превышает солнечный в 25 раз, а светимость — в 140 раз;

- **сверхгиганты.** Звёзды со светимостями, в десятки и сотни тысяч раз превышающими солнечную. Радиусы этих звёзд в сотни раз превышают радиус Солнца. К сверхгигантам красного цвета относится Бетельгейзе. При массе примерно в 15 раз больше солнечной её радиус превышает солнечный почти в 1000 раз. Средняя плотность этой звезды составляет всего $2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, что более чем в 60 000 раз меньше плотности воздуха;

- **белые карлики.** Группа звёзд в основном белого цвета со светимостями в сотни и тысячи раз меньше солнечной. Эти звёзды имеют радиусы почти в сто раз меньше солнечного и по размерам сравнимы с планетами. Примером белого карлика служит звезда Сириус В — спутник

Сириуса. При массе, почти равной солнечной, и размере в 2,5 раза больше Земли имеет гигантскую среднюю плотность $\rho = 3 \cdot 10^5 \text{ т/м}^3$.

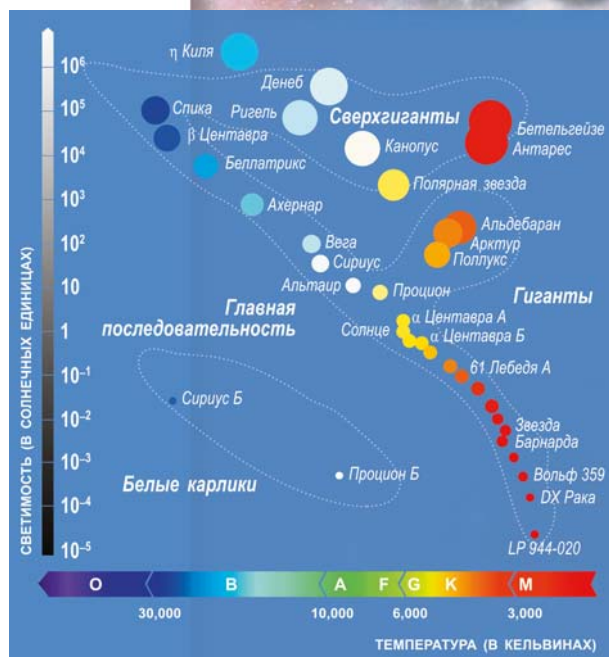
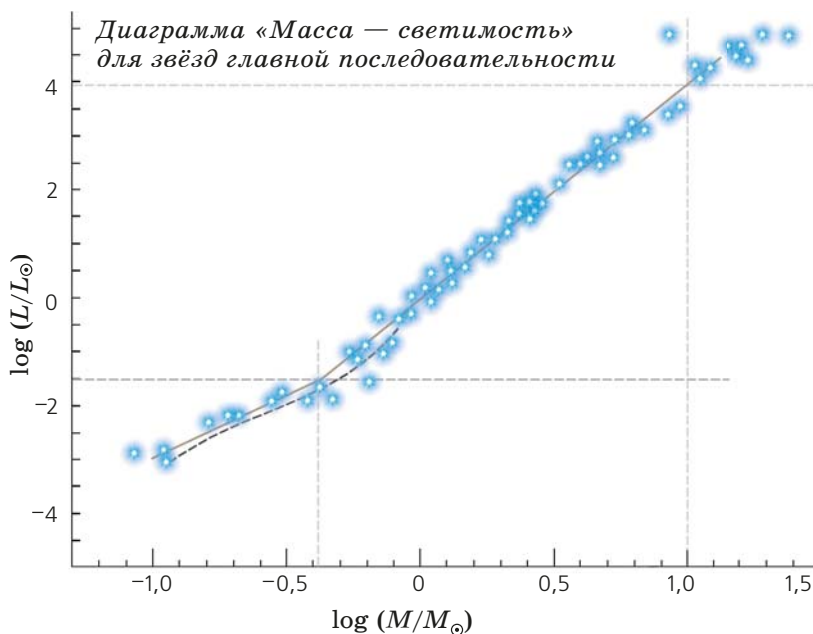
КОРИЧНЕВЫЕ КАРЛИКИ Новый многочисленный класс звёзд с низкой температурой поверхности, излучающих в основном в инфракрасных лучах, имеют массы, всего в десятки раз превышающие массу планеты Юпитер. Так, самый холодный коричневый карлик, обнаруженный в созвездии Лиры, имеет температуру поверхности от -23° С до 127° С . На его поверхности, как полагают астрономы, условия благоприятны для жизни.

ИЗНАЧАЛЬНО МАССЫ ЗВЁЗД удалось измерить только у звёзд, входящих в состав двойных систем. Масса определялась по параметрам орбит звёзд и периоду их обращения друг вокруг друга с использованием третьего обобщённого закона Кеплера. Оказалось, что массы всех звёзд лежат в пределах $0,05M_\odot < M < 100M_\odot$.

Для звёзд главной последовательности с массой от 0,5 до 2 масс Солнца имеется связь между массой звезды и её светимостью: чем больше масса звезды, тем больше её светимость.

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

Для других диапазонов масс эта зависимость несколько мягче. Так, звезда спектрального класса В с массой 20 масс Солнца будет иметь светимость около 60 000 светимостей Солнца.



Диаграмма

«Спектр — светимость»: по оси ординат отложена светимость в светимостях Солнца, а по оси абсцисс — спектральный класс и температура

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

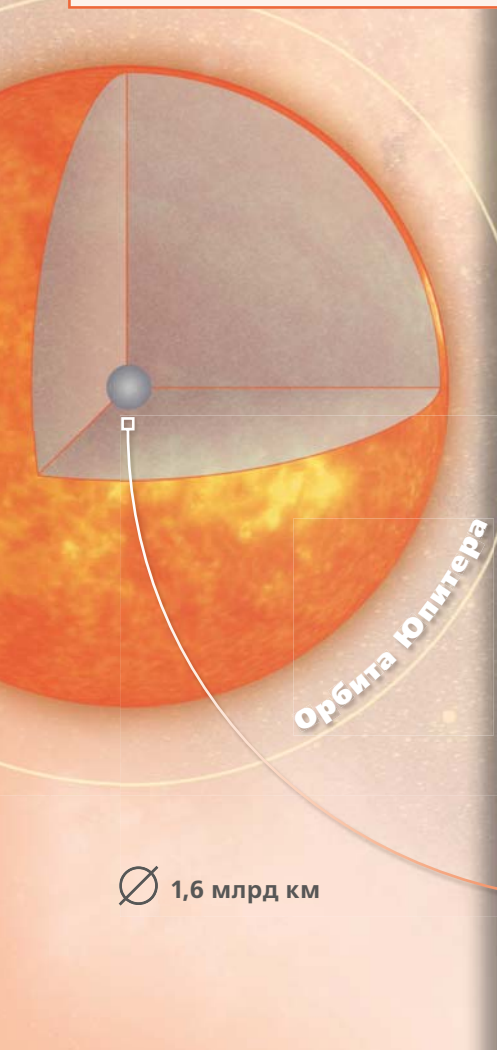
- Во сколько раз различаются светимости звёзд главной последовательности с массами $M_1 = 5M_\odot$ и $M_2 = 50M_\odot$?
- В звёздах какого спектрального класса водородные линии серии Бальмера наиболее сильные?
- Если звезда главной последовательности А более массивная, чем звезда главной последовательности В, то какая из них обладает большей светимостью? У какой из них время жизни больше?
- Существуют две звезды одинаковой светимости, одна из которых находится на расстоянии 10 пк, а другая — 1000 пк от Земли. Во сколько раз различаются освещённости, создаваемые этими звёздами на Земле? На сколько отличаются их видимые звёздные величины?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как устроены звёзды главной последовательности.
- Как устроены звёзды — красные гиганты и сверхгиганты.

ВСПОМНИТЕ:

- Что представляет собой диаграмма «Спектр — светимость»?
- Какова связь между массой и светимостью звёзд?



ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЁЗД

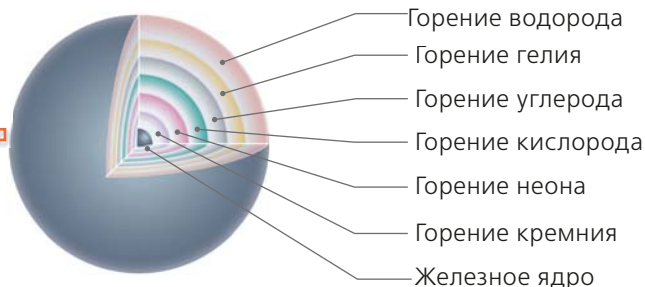
У всех звёзд главной последовательности источником энергии являются термоядерные реакции синтеза гелия из водорода. Но эффективность этих реакций сильно зависит от температуры: чем больше масса звезды, тем выше температура в её недрах и тем выше темп выделения энергии.

СТРОЕНИЕ ЗВЁЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ Звёзды с массой, меньшей или сравнимой с солнечной, по своему внутреннему строению похожи на Солнце. Энергия из ядра звезды уносится излучением, а вблизи поверхности, за счёт большего поглощения, она переносится конвекцией, причем толщина конвективного слоя увеличивается у менее массивных звёзд.

У звёзд большой массы темп энерговыделения в ядре настолько велик, что излучение не успевает уносить энергию из центральных областей, и там появляется конвективная зона: нагретое вещество поднимается вверх, меняясь местами с охлаждённым. Зона излучения смещается к внешним областям звезды.

СТРОЕНИЕ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ Отличительной особенностью этих звёзд является отсутствие ядерных реакций в самом центре, несмотря на высокие температуры. Ядерные реакции протекают в тонких слоях вокруг плотного центрального ядра.

Температура звезды уменьшается к поверхности, и в каждом слое идёт определённый тип термоядерных реакций. В самых внешних слоях ядра, где температура составляет около 15 млн К, из водорода образуется гелий. Глубже, где температура выше, из гелия образуется углерод, далее из углерода — кислород. В самых глубоких слоях у очень массивных звёзд при термоядерных реакциях образуется железо.



Более тяжёлые химические элементы образовываться с выделением энергии не могут. Их образование требует затрат энергии.

Итак, в красных гигантах и сверхгигантах формируются слоевые источники энергии и образуется большинство химических элементов, вплоть до атомов железа.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Каково строение звёзд главной последовательности?
- Какова отличительная особенность красных гигантов?

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ, ПУЛЬСАРЫ И ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ

Эти звёзды были названы белыми карликами, так как сначала среди них были обнаружены звёзды белого цвета, а значительно позже — жёлтого и других цветов.

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ Размеры белых карликов небольшие, всего лишь тысячи и десятки тысяч километров, т. е. сравнимы с размерами Земли. Но их массы близки к массе Солнца, и поэтому их средняя плотность — сотни килограммов в кубическом сантиметре.

Примером такой звезды служит спутник Сириуса, обозначаемый обычно как Сириус В. У этой звезды с температурой поверхности 25 000 К диаметр чуть превышает диаметр Земли, а масса равна солнечной, так что средняя плотность превышает 100 кг/см³.

Из-за высокой плотности атомы внутри белых карликов раздавлены, электроны не связаны с ядрами и ведут себя независимо от них. В отличие от других звёзд термоядерные реакции в недрах белых карликов не протекают. Их недра состоят из ядер гелия и других тяжёлых элементов.

Эти звёзды светят за счёт запасов тепловой энергии, выработанной в процессе предыдущих этапов эволюции. Через миллиарды лет запасы такой энергии иссякнут, белые карлики остынут и перестанут светиться.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ В 1967 г. астрономы с помощью радиотелескопов обнаружили удивительные радиоисточники, которые испускали периодические импульсы радиоизлучения. Эти объекты называли *пульсарами*.

Периоды импульсов пульсаров, которых сейчас известно около 1800, заключены в пределах от нескольких секунд до 0,001 с. Удивляла высокая стабильность повторения импульсов. Так, первый открытый пульсар, который обозначается как PSR 1919, расположенный в неярком созвездии Лисички, имел период повторения импульсов $T = 1,33730110168$ с.

Высокая стабильность периода, доступная только в современных атомных часах, заставила вначале предположить, что астрономы имеют дело с сигналами, посылаемыми внеземными цивилизациями.

В конце концов было доказано, что за явление пульсара ответственны быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильным магнитным полем.

24

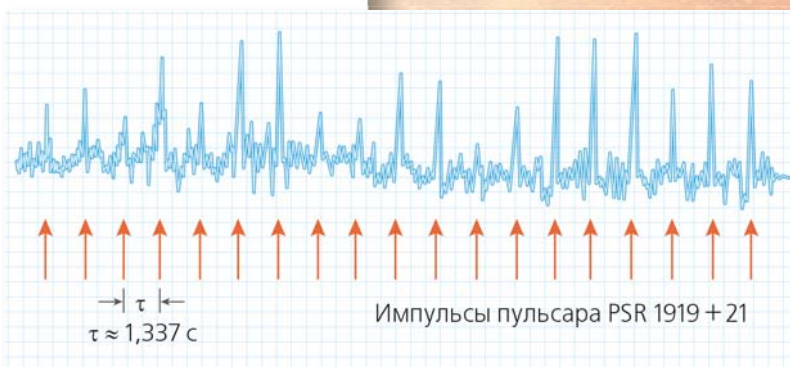
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как устроены звёзды белые карлики.
- Как устроены и проявляют себя нейтронные звёзды.
- Что представляет собой чёрная дыра.

ВСПОМНИТЕ:

- Что представляет собой диаграмма «Спектр — светимость»?

Теория и наблюдения указывают на то, что массы белых карликов не превышают $1,4M_{\odot}$. Этот предел на массу белых карликов получил название **предел Чандрасекара**.



Открытие в 1967 г. пульсаров почти полгода держалось в секрете, так как их удивительная стабильная периодичность навела исследователей на мысль, что пульсары имеют искусственное происхождение. Действительно, только сложные радиофизические приборы могут дать периодический сигнал с такой высокой степенью стабильности.

Поэтому первые три пульсара были обозначены как LGM-1, LGM-2, ... Буквы означают *Little Green Men* — Маленькие Зелёные Человечки. Современное общепринятое обозначение PSR.

Узконаправленное радиоизлучение формируется в области магнитных полюсов. Поэтому период следования импульсов радиоизлучения равен периоду вращения нейтронной звезды. Эти необычные звезды имеют радиусы около 10 км и массы, сравнимые с солнечной. Плотность нейтронной звезды фантастическая:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{2 \cdot 10^{30} \text{ кг}}{\frac{4}{3}\pi (10^4 \text{ м})^3} = 4,8 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3,$$

она сравнима с плотностью вещества в ядрах атомов. При такой плотности вещество звезды состоит из плотно упакованных нейтронов. По этой причине такие звезды получили название *нейтронных* звезд.

Их существование было предсказано ещё в 30-х гг. XX в. советским физиком Л.Д. Ландау. Он теоретически доказал, что в определённых условиях под действием внешнего давления, вызванного большой массой звезды, атомы в её недрах могут быть разрушены. При этом протоны и нейтроны, входящие в ядра атомов, сблизятся настолько тесно, что плотность возрастёт до $2 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$. Протоны, захватив свободные электроны от разрушенных атомов, превратятся в нейтроны, так что возникнет сверхплотная нейтронная звезда с размерами, составляющими десятки километров.

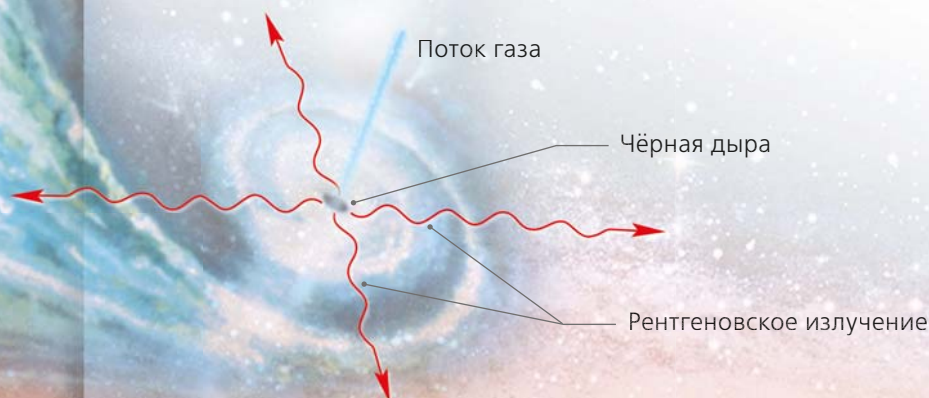
ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ В конце XVIII в. известный астроном и математик П. Лаплас привёл простые, основанные на теории тяготения Ньютона рассуждения, которые позволили предсказать существование необычных объектов, получивших название *чёрные дыры*.

Известно, что для преодоления притяжения небесного тела с массой M и радиусом R нужна вторая космическая скорость:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

При меньшей скорости тело станет спутником небесного тела, при $V \geq V_2$ оно навсегда покинет небесное тело и никогда не вернётся к нему. Для Земли $V_2 = 11,2 \text{ км/с}$, на поверхности Солнца $V_2 = 617 \text{ км/с}$.

Голубой сверхгигант



На поверхности нейтронной звезды с массой, равной массе Солнца, и радиусом около 10 км $V_2 = 170\,000 \text{ км/с}$ и составляет всего около $0,6$ скорости света.

Как видно из формулы для V_2 , если радиус небесного тела $R_g = 2GM/c^2$, то вторая космическая скорость будет равна скорости света: $c = 300\,000 \text{ км/с}$.

При ещё меньших размерах вторая космическая скорость будет превышать скорость света. По этой причине даже свет не сможет покинуть небесное тело и дать информацию о процессах, происходящих на его поверхности, нам — далёким наблюдателям.

Таким образом, если тело с массой M имеет радиус

$$R_g = 2GM/c^2,$$

то ни один сигнал не покинет его и не достигнет внешнего далёкого наблюдателя. Этот предельный радиус называется *гравитационным радиусом*. Для чёрной дыры солнечной массой $M_\odot = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$ гравитационный радиус равен $R_g = 3 \text{ км}$.

Чёрные дыры благодаря своему гравитационному полю могут захватывать вещество, находящееся в окружающем пространстве.



Около 25 лет назад было обнаружено, что есть два пульсара, которые вращаются друг вокруг друга и излучают гравитационные волны, которые уносят энергию из этой системы. В результате они приближаются, период их вращения друг вокруг друга уменьшается. Поэтому рано или поздно они столкнутся. Но это были лишь косвенные свидетельства существования гравитационных волн. Теперь они напрямую обнаружены. Зарегистрированный всплеск гравитационных волн возник на последних мгновениях при слиянии двух чёрных дыр — «остатков» закончивших свою жизнь звёзд, причём эти «остатки» обладали большими массами, в десятки раз превышающими солнечную массу. В 2017 г. наблюдалось гравитационное излучение от слияния двух нейтронных звёзд, которое сопровождалось всплеском γ -излучения.

В настоящее время обнаружены чёрные дыры в составе двойных звёздных систем. Так, в созвездии Лебедя наблюдается тесная двойная система: одна из звёзд, излучающая видимый свет, — обычная звезда спектрального класса В, другая невидимая звезда малого размера излучает рентгеновские лучи и имеет массу около 10 масс Солнца. Эта невидимая звезда представляет собой чёрную дыру размером около 30 км.

Рентгеновское излучение испускает не сама чёрная дыра, а нагретый до нескольких миллионов градусов газовый диск, вращающийся вокруг чёрной дыры радиусом около 200 км. Этот диск состоит из вещества, которое чёрная дыра своим тяготением вытягивает из яркой звезды.

Лаплас писал: «Священная звезда с плотностью, равной плотности Земли, и диаметром в 250 раз больше диаметра Солнца не даёт ни одному лучу достичь нас из-за своего тяготения, поэтому возможно, что самые яркие небесные тела Вселенной оказываются по этой причине невидимыми».

Действительно, плотность Земли $\rho = 5,52 \text{ г/см}^3$; при радиусе небесного тела $R = 250 R_\odot = 1,74 \cdot 10^{13} \text{ см}$ его масса $M = 1,21 \cdot 10^{41} \text{ г}$, вторая космическая скорость на его поверхности будет равна $V_2 = 304\,500 \text{ км/с}$, т. е. будет больше скорости света.

ЗАДАЧА № 20

Найдите сумму масс компонентов двойной звезды η Кассиопеи, параллакс которой $0,17''$, период обращения спутника 530 лет и угловой размер большой полуоси орбиты $12''$.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Как устроены нейтронные звёзды?
- Что представляют собой чёрные дыры?

ДВОЙНЫЕ, КРАТНЫЕ И ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЁЗДЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое двойные и кратные звёзды.
- Что такое цефеиды.

ВСПОМНИТЕ:

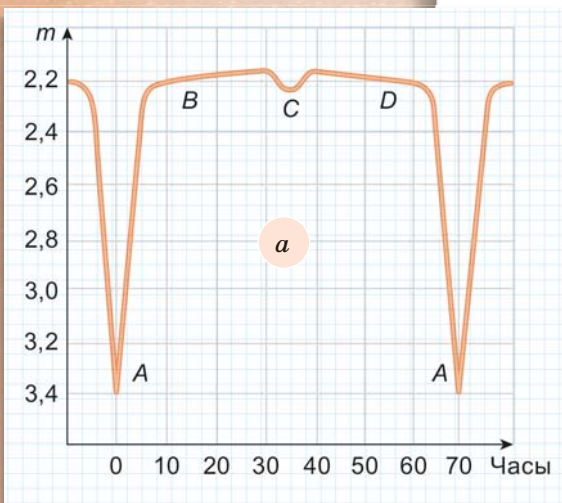
- Что представляет собой диаграмма «Спектр — светимость»?

Телескопические наблюдения показали существование большого количества физически связанных двойных и кратных звёзд. Невооружённым глазом можно увидеть несколько двойных звёзд.

ДВОЙНЫЕ И КРАТНЫЕ ЗВЁЗДЫ Мицар — средняя звезда в «ручке ковша» созвездия Большая Медведица — имеет слабенький спутник 5^m Алькор на угловом расстоянии 5'. Наблюдения в крупные телескопы показали, что эти две яркие звезды входят в состав шестикратной звёздной системы, все они связаны общим тяготением.

Хорошо знакомая нам Полярная звезда является тройной звёздной системой, также тройной является ближайшая к Земле α Центавра.

Большой интерес у астрономов вызывает изучение двойных звёзд. Длительные наблюдения за ними позволяют определить элементы эллиптических орбит, по которым они вращаются вокруг друг друга, а по ним определить массу каждой звезды в отдельности. Это пока единственный прямой метод определения масс звёзд.



ЗАТМЕННО-ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЁЗДЫ Если плоскость их орбиты в двойной системе проходит через наблюдателя, то видно, как одна звезда периодически закрывает другую, и наблюдаются периодические изменения блеска этой двойной системы.

С древнейших времён известна такая переменная звезда β Персея, что отражено в её названии — Алголь, которое в переводе с арабского означает «Глаз дьявола». Недаром древние греки называли её «Глаз горгоны Медузы, убитой героем Персеем».

Её блеск меняется в пределах от 2,2^m до 3,4^m с периодом 2,87 суток.

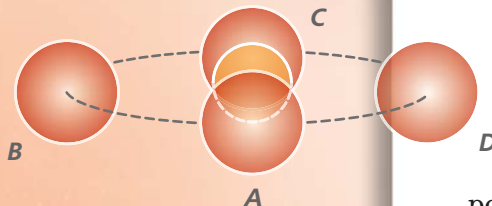
Изменения блеска этой звезды связаны с её двойственной природой. Большая по размерам холодная звезда периодически закрывает маленькую, но более яркую звезду, которая обращается вокруг неё (*a*).

Период изменения блеска равен периоду обращения одной звезды вокруг другой.

Неглубокий вторичный минимум на кривой блеска появляется, когда маленькая яркая звезда проходит по диску большой звезды.

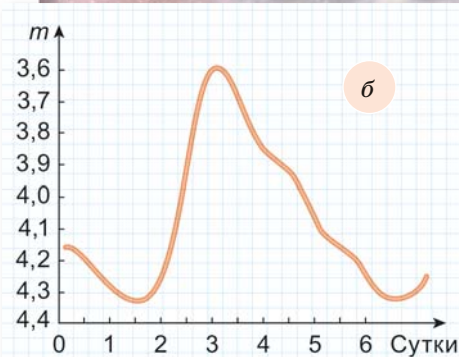
Алголь и многие другие похожие по своей природе переменные звёзды получили название *затменно-переменные звёзды*.

Изучение характера изменения блеска и спектров звёзд, входящих в эти двойные системы, позволило определить их массы, радиусы и свойства атмосфер.



ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЁЗДЫ

Особый класс переменных звёзд составляют пульсирующие переменные звёзды, которые меняют свой блеск при пульсациях и изменениях температуры поверхности. Такой известной переменной является звезда красный сверхгигант Мира (Удивительная) в созвездии Кита. Она то исчезает совсем, становясь звездой $9,1^m$, то делается красной и яркой звездой $3,5^m$. Но самой известной пульсирующей переменной звездой является звезда δ Цефея, имеющая чёткий период изменения блеска 5,4 суток. Кривая изменения её блеска представлена на рисунке б.



Как было показано российским астрофизиком С.А. Жевакиным, причиной пульсаций звёзд является сравнительно тонкий слой вещества звезды, расположенный на определённой глубине и состоящий из частично ионизованного гелия. При сжатии звезды этот слой делается плотнее, поэтому он задерживает энергию, идущую из центра звезды. Это приводит к увеличению давления, препятствующего сжатию. В силу чего сжатие в итоге прекращается, и начинается процесс расширения. При расширении звезды указанный слой делается более прозрачным, энергия просачивается наружу, давление падает и становится таким, что сила тяготения останавли-

вает расширение и заставляет звезду сжиматься. Затем всё повторяется сначала. Слой частично ионизованного гелия по своему действию напоминает клапан в дизельном моторе, который в момент сжатия впрыскивает внутрь цилиндра энергию и толкает поршень. Поэтому описанный механизм пульсаций звёзд получил название дизельного или клапанного механизма. Только у звёзд-гигантов и сверхгигантов строение таково, что слой частично ионизованного гелия расположен на достаточной глубине, чтобы эффективно работал клапанный механизм, поддерживающий пульсации переменных звёзд. У обычных звёзд и Солнца пульсации не возникают и, что самое главное, не поддерживаются.

Переменные звёзды, похожие по характеру изменчивости на звезду δ Цефея, получили название **цефеиды**.

Причина переменчивости блеска цефеид — радиальные пульсации. Атмосферы цефеид то расширяются, то сжимаются. При сжатии атмосфера звезды разогревается, а при расширении охлаждается. Мы видим цефеиду наиболее яркой, когда она сравнительно небольшая, но горячая.

Пульсации цефеид проявляются не только в изменениях блеска. Учёным удалось определить взаимосвязь периода изменчивости цефеид и их светимости: чем больше период изменчивости, тем больше светимость.

Хорошо известная нам Полярная звезда является одной из ближайших цефеид.

Цефеиды являются звёздами высокой светимости, поэтому видны даже в далёких галактиках, и их используют для измерения расстояний до галактик. Определив период изменения блеска из наблюдений, по зависимости период — светимость можно определить светимость звезды, а по ней — расстояние до цефеиды, а если она входит в звёздную систему (звёздное скопление, галактику), то и расстояние до этой звёздной системы.

Такой метод является одним из важнейших методов измерения расстояния до галактик. Поэтому цефеиды называют маяками Вселенной.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

● Наблюдения показали, что яркая звезда по спектру относится к звезде главной последовательности спектрального класса В8 и имеет массу $3,2 M_{\odot}$. Вторая звезда относится к красным гигантам спектрального класса К. Расстояние между ними $0,062$ а.е., период обращения одной вокруг другой возьмите из кривой изменения блеска Алголя. Определите суммарную массу системы и массу второй звезды.

● Вокруг звезды Процион (α Малого Пса) на расстоянии 14 а.е. вращается слабый спутник с периодом около 41 г. Оцените суммарную массу двойной системы.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как и почему вспыхивают новые звёзды.
- Как взрываются сверхновые звёзды.

ВСПОМНИТЕ:

- Что представляет собой диаграмма «Спектральный класс — светимость звёзд»?

Многочисленный класс звёзд спектральных классов К и М, неожиданно меняющих свой блеск на несколько звёздных величин, получил название **вспыхивающих звёзд**. По многим характеристикам вспышки на них похожи на солнечные и связаны с магнитными полями в активных областях их атмосферы. К вспыхивающим звёздам относится ближайшая к Земле Проксима в тройной системе звёзд α Центавра.

**Вспышка
новой звезды**

НОВЫЕ И СВЕРХНОВЫЕ ЗВЁЗДЫ

Иногда на небе появляются звёзды там, где их раньше не видели. Их называли новыми звёздами. Они появляются внезапно, причём их светимость и, следовательно, блеск быстро возрастают. Изучение фотографий звёздного неба показывает, что до вспышки эти звёзды были очень слабыми.

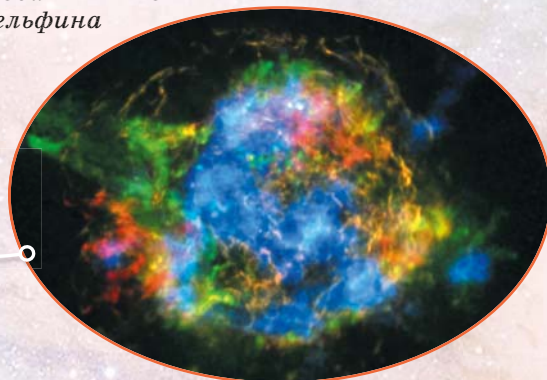
НОВЫЕ ЗВЁЗДЫ Примерами могут служить новые звёзды в созвездии Орла (июнь 1918 г.) и в созвездии Лебедя (23 августа 1975 г.). Судя по фотографиям, блеск новой звезды в созвездии Орла за три дня до вспышки был 11^m , а за четыре дня увеличился до $-0,5^m$, т.е. возрос почти в 40 тыс. раз! Затем она стала слабеть, примерно через 200 дней перестала быть видимой невооружённым глазом, а ещё через год ослабела до прежнего значения 11^m .

Новая звезда в созвездии Лебедя до вспышки имела блеск около 21^m , а в максимуме вспышки — до $1,9^m$, т.е. за несколько дней её светимость возросла в 40 млн раз!

Наблюдения показали, что внешняя оболочка звезды во время вспышки расширяется со скоростью от 1000 до 2500 км/с. Примерно через полгода-год вокруг ослабевшей звезды становится видимой в телескопы светлая расширяющаяся газовая туманность — эта сброшенная оболочка, освещаемая звездой, удаляется от неё и со временем рассеивается в пространстве. Сама же звезда возвращается к прежнему состоянию. Следовательно, при вспышке новая звезда не разрушается, а лишь сбрасывает с себя оболочку массой около 10^{-6} — 10^{-4} солнечной массы — величина незначительная в сравнении с массой вспыхнувшей звезды. В настоящее время известно около 200 новых звёзд, большинство из которых вспыхнуло в Млечном Пути.

Выяснилось, что как новые вспыхивают звёзды низкой светимости и высокой температуры. Оказалось, что многие новые звёзды являются тесными парами, состоящими из белого карлика и обычной звезды спектрального класса К или М.

Вспышка новой звезды в созвездии Дельфина



Вещество обычной звезды, богатое водородом, под действием гравитации со стороны белого карлика перетекает на него. По мере накопления вещества на белом карлике давление и температура в образовавшейся оболочке увеличиваются, и при достижении критического значения происходит термоядерный взрыв, сбрасывающий эту оболочку с белого карлика.

Подобные процессы могут повторяться. Действительно, некоторые звёзды вспыхивают повторно, и часто они называются повторными новыми.

СВЕРХНОВЫЕ ЗВЁЗДЫ Иногда в недрах некоторых звёзд происходят взрывы такой колоссальной мощности, что они разрушают всю звезду. Во время взрыва светимость и блеск таких звёзд, называемых сверхновыми звёздами, возрастают в десятки и сотни миллионов раз, и они становятся настолько яркими, что могут быть видны невооружённым глазом даже днём.

Вспышки сверхновых звёзд — очень редкое явление в нашей Галактике. За последние 1000 лет в нашей Галактике наблюдалось по меньшей мере пять сверхновых звёзд: в 1006, 1054, 1572, 1604 и 1667 гг. Сверхновую звезду, вспыхнувшую в ноябре 1572 г. в созвездии Кассиопеи, наблюдал датский астроном Т.Браге, который отметил, что звезда по яркости сравнима с Венерой. Через 16 месяцев звезда исчезла. Сверхновую звезду, вспыхнувшую в 1604 г. в созвездии Змееносца, наблюдали Г.Галилей и И.Кеплер.

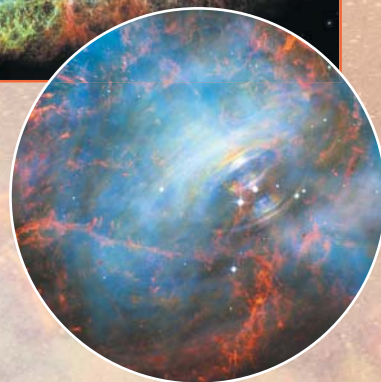
Особый интерес представляет сверхновая звезда, вспыхнувшая в июле 1054 г. в созвездии Тельца. Исторические сведения о ней были найдены в китайских хрониках. Теперь на месте сверхновой звезды 1054 г. наблюдается газовая, быстро расширяющаяся Крабовидная туманность, в центре которой находится пульсар, интенсивно излучающий радиоволны.

На месте сверхновой звезды 1667 г. в созвездии Кассиопеи тоже имеется неправильная волокнистая газовая туманность, являющаяся мощным источником радиоизлучения (Кассиопея А).

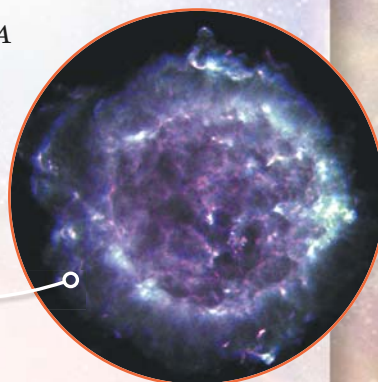
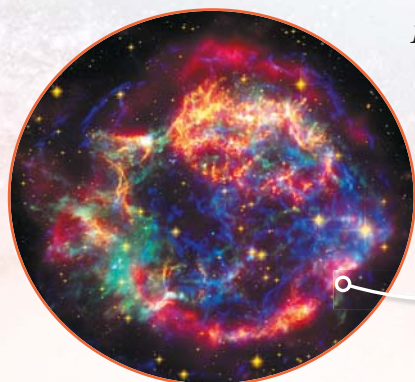
В «Истории династии Сун» написано: «В первом году периода Ши-Хо, в пятую луну, в ночь Чи-Чью звезда-гостья появилась... на восточном небе созвездия Тьен-Куан... (Теперь входит в созвездие Тельца.) Она была видна днём в течение 23 суток...»

На протяжении двух лет звезда была видна невооружённым глазом. Упоминание о ней имеется и в летописях японских астрономов.

Крабовидная туманность



Кассиопея А





Облака святящегося газа в
«Большом Магеллановом
Облаке»

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

● Во время вспышки сверхновой звезды её светимость достигала $L_{\text{max}} = 10^{10} L_{\odot}$ около 50 суток. Оцените, на сколько времени хватило бы нашему Солнцу той энергии, которую выделила сверхновая звезда в течение 50 суток.

● За счёт какого процесса взрываются новые звёзды и сверхновые первого типа?

● Какие химические элементы образуются при взрывах сверхновых звёзд?

● Посмотрите вокруг себя: что отсутствовало бы из того, что вы видите, если бы не было взрывов сверхновых звёзд?

24 февраля 1987 г. наблюдалась вспышка сверхновой звезды в Большом Магеллановом Облаке. За двое суток блеск этой звезды увеличился от 15^{m} до 4^{m} , т. е. её светимость возросла в 25 тыс. раз! Сброшенная звездой оболочка расширялась со скоростью около 16 000 км/с.

Во время максимума вспышки сверхновых звёзд их светимость может в десятки миллиардов раз превышать светимость Солнца.

Мощность взрыва настолько велика, что вещество разрушенной звезды разбрасывается во все стороны со скоростью от 5000 до 20 000 км/с.

Из-за высокой температуры в недрах звезды выброшенный газ находится в плазменном состоянии и создаёт сильное магнитное поле, в котором элементарные частицы при торможении порождают мощное радиоизлучение. Поэтому можно предположить, что обнаруженные в нескольких местах Млечного Пути радиоизлучающие газовые волокнистые туманности возникли при разрушении сверхновых звёзд. Во время вспышки сверхновой звезды в спутнике Млечного Пути — Большом Магеллановом Облаке наблюдалась вспышка нейтрино.

Грозит ли подобная вспышка нашему Солнцу? Исследования показывают, что взрывам подвержены далеко не все, а лишь в конце своей жизни особые по структуре звёзды, к которым наше Солнце не принадлежит, а поэтому вспыхнуть не может.

Различают два основных типа сверхновых звёзд. У **сверхновых первого типа** взрывается звезда белый карлик, входящая в состав тесной двойной системы. Как и в новых звёздах, в такой системе происходит перетекание вещества из обычной звезды на белый карлик. Но белый карлик в системе имеет массу, близкую к предельной массе (**предел Чандрасекара, 1,4 массы Солнца**), поэтому достаточно небольшого количества вещества, выпавшего на него, и равновесие в звезде нарушается, белый карлик быстро сжимается (этот процесс сжатия называется коллапсом) до размеров нейтронной звезды. За секунды выделяется гравитационная энергия, которая переходит в тепло и кинетическую энергию взрыва.

У **сверхновых второго типа** взрывается массивная звезда на стадии гигантов и сверхгигантов, когда масса плотного ядра достигает предела Чандрасекара, и происходит коллапс ядра. Выделяется огромная потенциальная энергия, которая разбрасывает внешние части звезды со скоростями выше нескольких тысяч километров в секунду.

По наблюдениям изменения блеска сверхновой можно определить, к какому типу она относится.

Во время взрыва сверхновой происходит образование химических элементов тяжелее железа.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЁЗД

Эволюция звезды — последовательность изменений, которым звезда подвергается в течение её жизни, т. е. на протяжении миллионов или миллиардов лет, пока она излучает свет и тепло. В течение таких колоссальных промежутков времени изменения оказываются весьма значительными.

ЖИЗНЬ ЗВЁЗД В Млечном Пути наблюдаются газопылевые облака. Некоторые из них настолько плотные, что начинают сжиматься под действием собственного тяготения. По мере сжатия плотность и температура облака повышаются, и оно начинает излучать волны в инфракрасном диапазоне спектра. На этой стадии сжатия облако получило название **протозвезды**.

Длительность стадии сжатия протозвёзд различна: при массе меньше солнечной — сотни миллионов лет, а у массивных — всего лишь сотни тысяч лет.

Когда температура в недрах протозвезды повышается до нескольких миллионов кельвинов, в них начинаются термоядерные реакции превращения водорода в гелий. При этом выделяется огромная энергия, препятствующая дальнейшему сжатию. Разогреваясь до самосвечения, протозвезда превращается в обычную звезду главной последовательности диаграммы Герцшпрунга—Рессела.

Светимость и поверхностная температура сформировавшихся звёзд зависят от их массы, поэтому они принадлежат к различным спектральным классам, т. е. находятся на различных участках главной последовательности: массивные звёзды — выше Солнца, а звёзды малой массы — ниже его.

Время t_* пребывания звёзд на главной последовательности определяется мощностью излучения звезды (светимостью) и запасами ядерной энергии. Оно рассчитывается тем же способом, что и время жизни Солнца.

Подставляя в формулу вместо массы и светимости Солнца массу и светимость звезды и учитывая, что светимость звезды $L_* \sim M_*^4$, получаем

$$t_* = \frac{E_*}{L_*} = \frac{q \cdot M_*}{L_*} = \frac{q \cdot M_\odot}{L_\odot} \cdot \left(\frac{M_\odot}{M_*} \right)^3 =$$

$$= t_\odot \cdot \left(\frac{M_\odot}{M_*} \right)^3 = 10^{10} \left(\frac{M_\odot}{M_*} \right)^3 \text{ лет.}$$

Исходя из этих расчётов, можно утверждать, что звёзды спектральных классов О, В и А, находящиеся на главной последовательности, — это молодые звёзды.

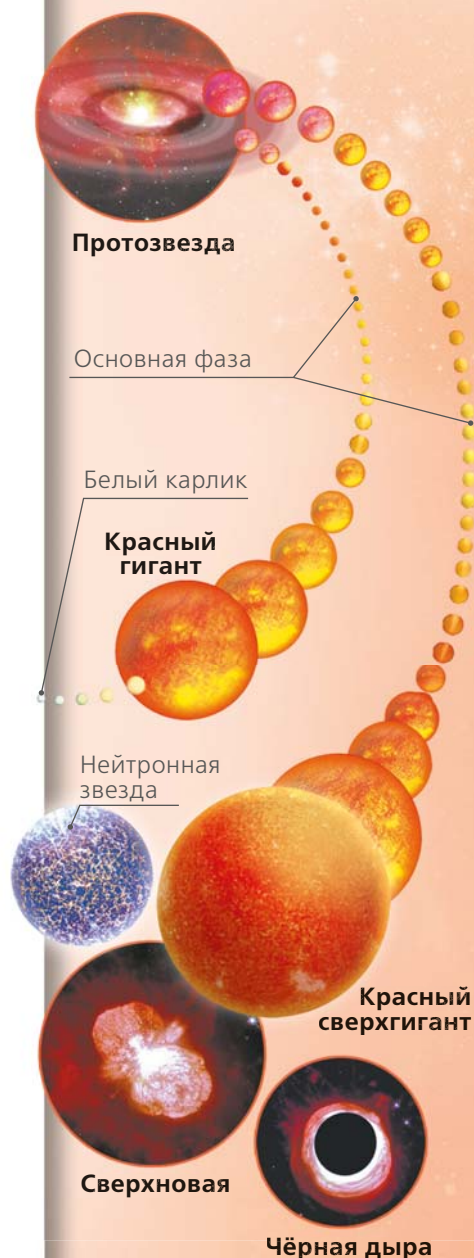
27

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Как рождаются, живут и умирают звёзды.

ВСПОМНИТЕ:

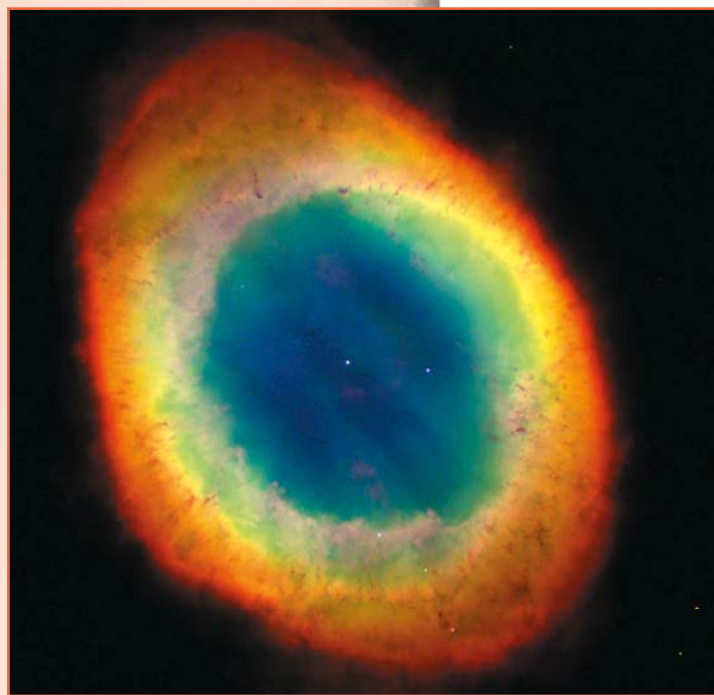
- Как и почему вспыхивают новые звёзды?
- Как взрываются сверхновые звёзды?



Спектральный класс	Время жизни на главной последовательности (лет)
O	$< 10^6$
B	10^7
A	10^8
F	10^9
G	10^{10}
K	10^{11}
M	$> 10^{11}$

ЗАДАЧА № 21

Расстояние до планетарной туманности «Кольцеобразная» в созвездии Лиры $r = 660$ пк, угловой диаметр $\theta = 130''$, измеренная скорость расширения туманности $\omega = 0,01''/\text{год}$. Оцените линейную скорость, размер туманности и время её жизни.



Планетарная туманность M57 «Кольцо» в созвездии Лиры

После выгорания водорода в недрах звёзд образуется гелиевое ядро, а термоядерные реакции превращения водорода в гелий начинают происходить в тонком слое у границы ядра.

В гелиевом ядре при создавшейся температуре ядерные реакции происходить не могут, и оно резко сжимается до плотности свыше $4 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^3$. Вследствие сжатия температура в ядре возрастает. Рост температуры зависит от массы. Для звезды с массой чуть меньше солнечной температура всегда остаётся меньше 80 млн К. Поэтому сжатие ядра приводит только к бурному выделению ядерной энергии в тонком слое у границы ядра.

У Солнца температура ядра при сжатии станет выше 80 млн К, и в нём начнутся термоядерные реакции превращения гелия в углерод.

У более массивных звёзд температура настолько высока, что возможны термоядерные реакции образования азота, кислорода и более тяжёлых химических элементов. Выходящая из ядра и его окрестностей энергия вызывает повышение газового давления, под действием которого фотосфера звезды расширяется.

Энергия, приходящая к фотосфере из недр звезды, распространяется теперь на большую площадь, чем раньше. В связи с этим температура фотосферы понижается. Звезда сходит с главной последовательности, постепенно превращаясь в красного гиганта или сверхгиганта в зависимости от массы, и становится старой звездой.

Раздувшаяся оболочка звезды небольшой массы уже слабо притягивается её ядром и, постепенно удаляясь от него, образует планетарную туманность. После окончательного рассеяния оболочки остаётся лишь горячее ядро звезды — белый карлик. У звезды типа Солнца останется углеродный белый карлик.

Эволюция массивных звёзд происходит более бурно. В конце своей жизни такая звезда может взорваться сверхновой звездой, а её ядро, резко сжавшись, превратится в сверхплотный объект — нейтронную звезду или даже в чёрную дыру.

Так, в Крабовидной туманности, оставшейся после взрыва сверхновой, наблюдается пульсар с периодом пульсаций 0,033 с.

Сброшенная оболочка, обогащённая гелием и другими тяжёлыми элементами, образовавшимися в недрах звезды и во время взрыва, рассеивается в пространстве и служит материалом для формирования звёзд нового поколения.

ВОЗРАСТ ЗВЁЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ Определить возраст отдельной звезды в точности может быть трудно. По её спектральному классу мы можем только определить время её жизни на главной последовательности.

Замечательный способ определить возраст звёзд дают нам наблюдения звёздных скоплений. Так как звёзды различной массы в звёздных скоплениях образуются примерно одновременно, то диаграмма «Спектр — светимость» только что родившегося скопления содержит звёзды всех спектральных классов, которые находятся на стадии главной последовательности. В нём отсутствуют красные гиганты, сверхгиганты и белые карлики.

Со временем массивные звёзды умирают, и главная последовательность такого старого скопления не будет содержать массивных звёзд спектральных классов О, В и т. д. в зависимости от возраста. Эти звёзды переходят в гиганты и сверхгиганты и далее вообще взрываются. Появляются белые карлики.

По спектральному классу звёзд, только начинающих переходить в красные гиганты (так называемая точка поворота на диаграмме «Спектр — светимость»), которые умирают в данный момент, мы можем судить о возрасте всего скопления.

На рисунке **а** представлена такая диаграмма старого скопления МЗ. В нём на главной последовательности отсутствуют звёзды спектрального класса О, В, А, а звёзды спектрального класса F, с массой чуть больше солнечной, только начинают умирать. Следовательно, возраст этого скопления — несколько миллиардов лет.

Самые старые звёздные скопления имеют возраст до 13 млрд лет, т. е. они возникли на ранних этапах эволюции Вселенной, когда её возраст был около 1,5 млрд лет. Есть все основания полагать, что в начале образовывались скопления звёзд, затем они объединялись, формируя галактики.

В частности, есть основания полагать, что Солнце — звезда третьего поколения. Благодаря этому существуем и мы с вами. Мы состоим из тяжёлых элементов (углерода, железа, кальция и др.), которых не было в первичном веществе и первых звёздах. Тяжёлые элементы — прах первого поколения звёзд, и мы состоим из этого праха.

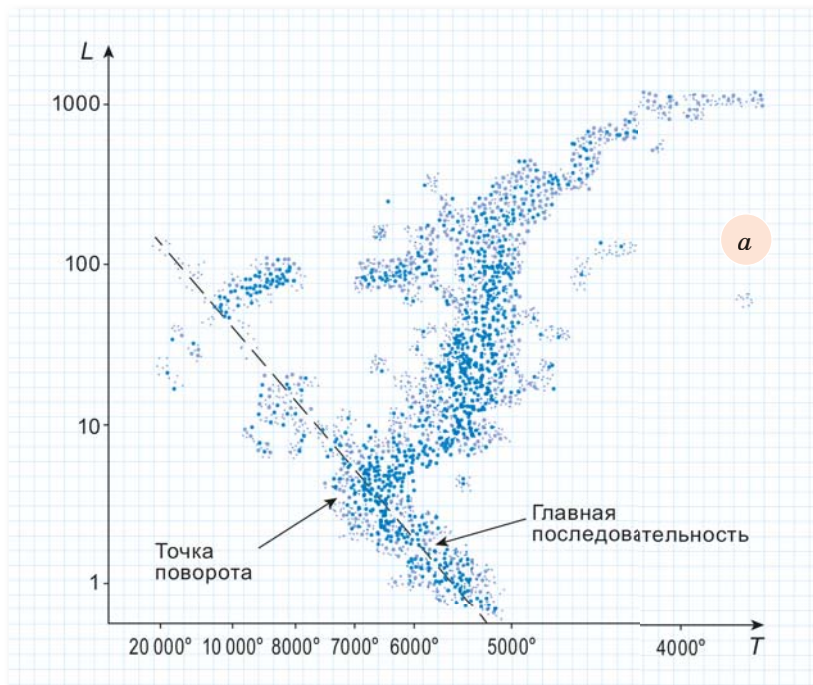


Диаграмма
«Спектр — светимость»
шарового скопления МЗ

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Опишите эволюцию звёзд.
- Как определить возраст звёздных скоплений?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

ЗАДАЧА № 22

Годичный параллакс звезды Бетельгейзе (α Ориона) равен $\pi \approx 0,0062''$, видимая звёздная величина $m = 0,5^m$. Найдите расстояние до неё в парсеках и в световых годах, определите освещённость, создаваемую звездой на Земле, абсолютную звёздную величину M (звёздную величину звезды, если бы она была расположена на расстоянии 10 пк) и светимость.

ЗАДАЧА № 23

Используя спектральную классификацию звёзд оцените по видимой звёздной величине, цвету и параллаксу (указаны в скобках) угловой и линейный диаметры, светимость, температуру звёзд; η Большой Медведицы ($-0,41^m$, бело-голубой, $\pi = 0,004''$) и ϵ Большой Медведицы ($+1,09^m$, белый, $\pi = 0,008''$).

● Температура поверхности Солнца 6000 К, светимость $4 \cdot 10^{26}$ Вт, масса $2 \cdot 10^{30}$ кг, температура в центре Солнца 14 млн К. Солнце светит за счёт термоядерных реакций синтеза гелия из водорода, подтверждением этого являются наблюдения солнечных нейтрино.

● По спектральным наблюдениям на Солнце обнаружены все известные химические элементы, но на водород приходится около 71%, на гелий — 27%, а на все остальные — около 2% массы Солнца.

● Солнечная корона имеет температуру около 2 млн К, она хорошо видна во время полных солнечных затмений или в космические рентгеновские телескопы.

● По виду спектра, цвету и температуре звёзды разбиты на спектральные классы O, B, A, F, G, K, M.

● Звёзды главной последовательности, к которым относится Солнце, по своему строению похожи на него.

● Нейтронные звёзды наблюдаются как пульсары — источники пульсирующего радиоизлучения с периодом пульсаций от 0,001 с до нескольких секунд.

● Особое место среди звёзд занимают чёрные дыры, так как они ничего не излучают и обнаруживаются по влиянию их сильного гравитационного поля на окружающую среду и звёздных соседей.

● Особое место среди переменных звёзд занимают пульсирующие звёзды большой светимости — цефеиды, у которых обнаружена чёткая связь между периодом пульсаций и светимостью.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М.М. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.

Сурдин В.Г. Звёзды. — М.: Физматлит, 2008.

Сурдин В.Г. Небо и телескоп. — М.: Физматлит, 2009.

Сурдин В.Г. Солнечная система. — М.: Физматлит, 2008.

Энциклопедия для детей. Т.8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Как вы думаете, химический состав Солнца в ядре сильно отличается от химического состава фотосферы? Аргументируйте свой ответ.

● Как оценить температуру поверхности Солнца по непрерывному спектру его излучения?

● Как вы можете объяснить появление тёмных спектральных линий в солнечном спектре с точки зрения атомных процессов?

● Объясните, почему по наблюдениям солнечных нейтрино мы заглядываем в ядро Солнца, а с помощью исследования потоков излучения мы этого сделать не можем.

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>



Глава 6

МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ — НАША ГАЛАКТИКА

- ГАЗ И ПЫЛЬ В ГАЛАКТИКЕ
- РАССЕЯННЫЕ И ШАРОВЫЕ ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ
- СВЕРХМАССИВНАЯ ЧЁРНАЯ ДЫРА В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ



ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Млечный круг

Этот круг принадлежит к числу заметных на небе и называется Млечным. Сыновья Зевса не могли получить небесных почестей, если они не отведали от сосцов Геры. Вот почему, говорят, Геракла, едва он родился, Гермес принёс на небо и приложил к сосцу Геры. Младенец начал сосать, но Гера, заметив это, стряхнула его, а остаток молока вылился и образовал Млечный круг.

Эратосфен

«Превращения в созвездия
(Катастеризмы)»

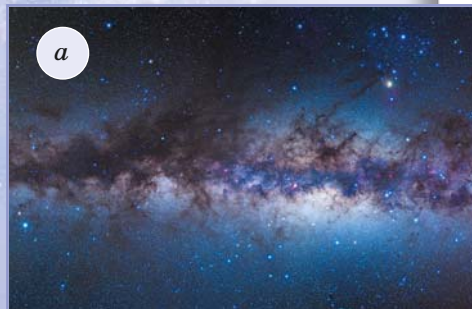
Комментарии к учебнику
астрономии Арата 315 г. до н. э.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как образуются отражательные туманности.
- Почему светятся диффузные туманности.
- Как концентрируются газовые и пылевые туманности в Галактике.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие этапы эволюции проходят звёзды?
- Каковы характеристики звёзд?



Наблюдая Млечный Путь в телескоп, Г. Галилей в конце 1609 г. установил, что он состоит из колоссального множества очень слабых звёзд. Его звёздная структура хорошо видна даже в обычный бинокль.

МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ тянется серебристой полосой по обоим полушариям, замыкаясь в звёздное кольцо. Наблюдения позволили установить, что все звёзды образуют огромную звёздную систему, названную Галактикой (от греч. *галактикос* — молочный), подавляющее большинство звёзд которой сосредоточено в Млечном Пути. Наше Солнце с системой обращающихся вокруг него тел тоже входит в состав Галактики.

Линия, проходящая посередине вдоль всего Млечного Пути, называется галактическим экватором, а образующая его плоскость — галактической плоскостью.

На рисунке **a** показана часть Млечного Пути от созвездия Орла до созвездия Киля.

От созвездия Лебедя до созвездия Центавра Млечный Путь выглядит раздвоенным. Отсутствие звёзд в тёмной части Млечного Пути объясняется наличием разреженной тёмной пылевой и газовой материи, концентрирующейся в пространстве к галактической плоскости. Эта материя поглощает и ослабляет свет далёких звёзд.

ГАЗОПЫЛЕВЫЕ ТУМАННОСТИ Газ и пыль распределены очень неоднородно, наблюдаются плотные тёмные облака пыли. Когда эти плотные облака освещены яркими звёздами, они отражают их свет, и тогда мы видим отражательные туманности, как те, что видны в скоплении звёзд Плеяды. Если около газопылевого облака имеется горячая звезда, то она возбуждает свечение газа, и тогда мы видим диффузную туманность, примером которой служит туманность Ориона.

Туманность Ориона



В газопылевую туманность Ориона погружено много горячих звёзд спектральных классов О и В, расстояние до туманности около 400 пк. Так как видимые размеры туманности Ориона около 60', то легко подсчитать, что её протяжённость в пространстве составляет около 7 пк. В светлых диффузных туманностях газ необычайно разрежен, его плотность не превышает 10^{-22} — 10^{-23} г/см³. Следовательно, можно оценить массу Большой туманности Ориона примерно в 300 масс Солнца.

Вблизи всех светлых диффузных туманностей или внутри их обязательно находятся звёзды спектральных классов О и В. Они своим мощным ультрафиолетовым излучением нагревают газы, входящие в состав туманностей, до температуры более 10 000 К, возбуждают свечение газа в спектральных линиях, свойственных каждому газу. Поэтому в спектрах диффузных туманностей присутствуют отдельные яркие линии, по которым установлена газовая природа и химический состав туманностей. Основную массу газа составляет водород, но присутствуют также гелий, кислород и другие газы.

Свечение этих линий, а также зелёной линии водорода придаёт светлым диффузным туманностям зеленоватую окраску. Как оказалось, межзвёздный газ и пыль в галактике разделяются на две фазы: горячую и разреженную с температурой $\sim 10\,000$ К и концентрацией $\sim 0,1$ — 1 см⁻³; холодную и плотную с $T \sim 100$ К и концентрацией ~ 10 — 100 см⁻³. Эти фазы находятся в равновесии между собой, так как их давления равны. Наличие плотной холодной фазы в межзвёздной среде создаёт условия, в дальнейшем способствующие образованию звёзд.

В газопылевых туманностях возникают и формируются молодые звёзды. Наблюдения в космические телескопы в инфракрасном диапазоне позволили обнаружить много протозвёзд в плотных туманностях типа Мексиканский залив и туманности Орёл.

Наиболее яркими в спектрах диффузных туманностей являются две зелёные линии (длиной волны $\lambda = 5007\text{Å}$ и $\lambda = 4959\text{Å}$), которые длительное время приписывали неизвестному в земных условиях химическому элементу — небулию (от лат. *nebula* — туманность). Но для небулии не было места в таблице Менделеева. В конце концов выяснили, что эти линии излучает дважды ионизованный кислород (кислород, у которого оторвано два электрона) в необычайно разреженной среде, недостижимой в земных лабораториях.

Туманность Орёл



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Размер туманности Ориона 7 пк, а плотность $5 \cdot 10^{-25}$ г/см³. Оцените массу туманности, выразив её в массах Солнца. Считая, что туманность состоит из атомов водорода, оцените концентрацию атомов.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как устроены рассеянные звёздные скопления.
- Как устроены шаровые скопления.
- Как распределены скопления в Галактике.

ВСПОМНИТЕ:

- Каковы основные этапы эволюции звёзд?

РАССЕЯННЫЕ И ШАРОВЫЕ ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

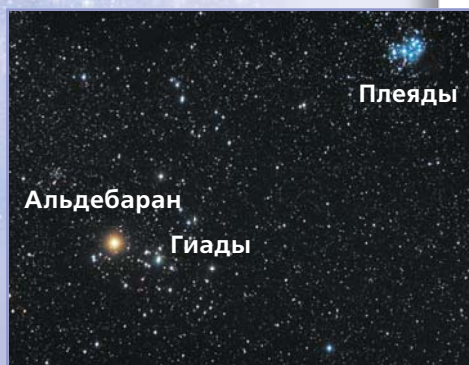
В Млечном Пути, кроме отдельных, двойных и кратных звёзд, наблюдаются скопления звёзд.

РАССЕЯННЫЕ ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ На небесной сфере можно наблюдать бесформенные скопления звёзд, похожие на скопление звёзд Плеяды и содержащие несколько сотен звёзд.

Так, в скоплении звёзд Плеяды в созвездии Тельца невооружённым глазом различают 7–8 звёзд блеском от 3^м до 5^м, в сильный бинокль их видно около 50, а на фотографиях с длительной экспозицией насчитывается около 300 слабых звёзд вплоть до блеска 17^м. Размер скопления всего около 16 пк. На диаграмме «Спектр — светимость» точка поворота соответствует сравнительно молодому возрасту скопления в 50 млн лет.

Другая сравнительно тесная группа звёзд, напоминающая по форме треугольник и называемая Гиадами, находится рядом с Альдебараном — главной звездой созвездия Тельца.

Эти и аналогичные им тесные звёздные группы неправильной формы получили название **рассеянных звёздных скоплений**. В каждом звёздном скоплении звёзды имеют общее происхождение, связаны между собой взаимным тяготением и вместе движутся в пространстве. Рассеянные звёздные скопления относят к плоской составляющей Галактики, так как они сравнительно молодые и расположены вблизи плоскости Млечного Пути, где концентрируются газ, пыль и молодые звёзды.



Млечный Путь содержит несколько сотен миллиардов звёзд



Солнечная система расположена между спиральными рукавами на расстоянии 23–28 тыс. св. лет от центра Галактики

Так может быть виден Млечный Путь сбоку. Галактика NGC 5146



ШАРОВЫЕ ЗВЁЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ Кроме рассеянных, наблюдаются звёздные скопления сферической и эллипсоидальной формы, называемые **шаровыми**. Их сейчас известно около 150. Все они недоступны невооружённому глазу, так как удалены от нас на тысячи и десятки тысяч парсеков. Примером может служить шаровое скопление M13 в созвездии Геркулеса (а).

Шаровые звёздные скопления содержат десятки и сотни тысяч звёзд, а линейные размеры этих скоплений лежат в пределах от 20 до 100 пк. Поэтому, несмотря на обилие звёзд, средние расстояния между ними в скоплении измеряются тысячами астрономических единиц.

В составе шаровых звёздных скоплений много красных гигантов и переменных звёзд, отсутствуют газ и пыль. Множество красных гигантов свидетельствует о значительном возрасте шаровых скоплений, который у наиболее старых превышает 13 млрд лет.

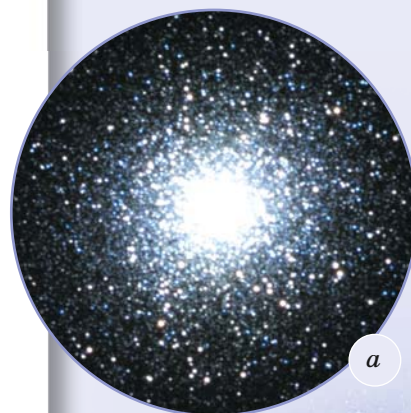
В отличие от рассеянных, шаровые звёздные скопления не разбросаны вдоль Млечного Пути. Они концентрируются к центру Галактики и образуют гало. Они являются представителями сферической составляющей Галактики.

Исследование распределения звёзд, газа и пыли показало, что наш Млечный Путь — Галактика представляет собой плоскую систему, имеющую спиральную структуру. В Галактике около 200 млрд звёзд. Среднее расстояние между звёздами в Галактике около 5 световых лет. Но в центре Галактики, в её ядре, плотность звёзд значительно выше и расстояния между звёздами в сотни раз меньше, чем среднее значение плотности.

Центр Галактики, который расположен в направлении созвездия Стрельца, скрыт от нас большим количеством газа и пыли, поглощающих свет звёзд. При проведении наблюдений в инфракрасном диапазоне, которое газ и пыль плохо поглощают, ядро Галактики хорошо видно.

Мы находимся внутри Галактики, поэтому нам трудно представить её внешний вид, но во Вселенной есть много других похожих галактик, по ним мы можем судить о нашем Млечном Пути. Тёмная полоса обусловлена газом и пылью, которые концентрируются к плоскости галактики, как и в нашем Млечном Пути.

Галактика вращается. Солнце, находящееся на расстоянии около 8 кпк (26 000 св. лет) от центра Галактики, вращается со скоростью около 220 км/с, совершая один оборот почти за 250 млн лет. Внутри орбиты Солнца сосредоточена масса около $10^{11} M_{\odot}$, а полная масса Галактики оценивается в несколько сотен миллиардов солнечных масс.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какие звёздные скопления называют рассеянными?
- Какие звёздные скопления называют шаровыми?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Как обнаружили сверхмассивную чёрную дыру в центре Галактики.

● В каких объектах образуются космические лучи.

ВСПОМНИТЕ:

● Что представляют собой чёрные дыры?

СВЕРХМАССИВНАЯ ЧЁРНАЯ ДЫРА В ЦЕНТРЕ ГАЛАКТИКИ

В настоящее время астрономы тщательно изучают центр нашей Галактики, а именно его свойства, процессы, в нём происходящие, определяют структуру всей Галактики.

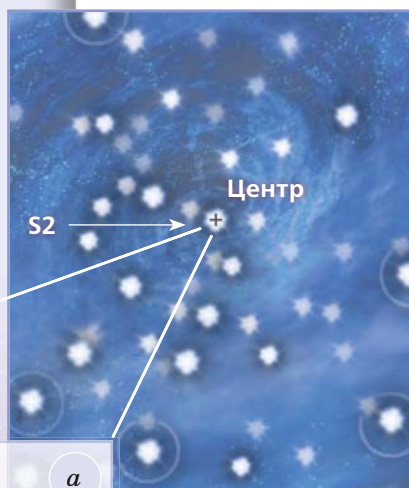
ОБНАРУЖЕНИЕ ЧЁРНОЙ ДЫРЫ Наблюдения за орбитами звёзд около центра Галактики показали, что там, в небольшой области, с размерами, сравнимыми с размерами Солнечной системы, сосредоточена невидимая масса, превышающая 4 млн солнечных масс.

Обычная звезда не может иметь такую большую массу. Если это скопление почти 2 млн звёзд и в таком маленьком объёме, сравнимом с объёмом Солнечной системы, то почему мы их не видим?

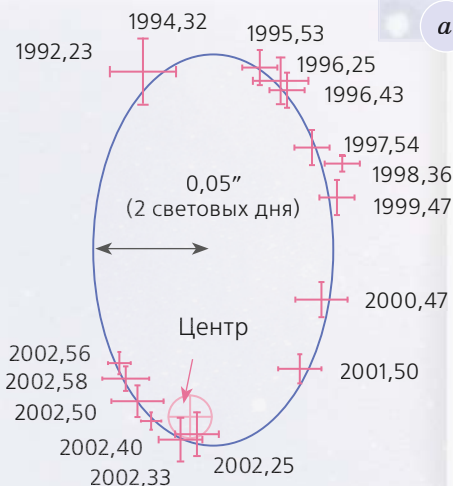
На снимке их всего несколько. Единственное объяснение — мы имеем дело с чёрной дырой огромной массы. Радиус этой чёрной дыры $R_g = 12 \cdot 10^9$ км, что почти в 17 раз больше, чем радиус Солнца.

Как считают учёные, мощное γ -излучение, которое идёт из центра Галактики и гигантских пузырей, окружающих его, связано с активностью чёрной дыры в центре Галактики.

Сверхмассивная чёрная дыра в центре Млечного Пути и движение звезды S2 вокруг неё по эллиптической орбите



a



Пока не удаётся построить модель, объясняющую природу γ -излучения в пузырях и центре Галактики.

Так как энергия γ -квантов, которые наблюдаются, равна 1–10 ГэВ, то и частицы, которые их излучают, должны иметь не меньшую энергию. Если это электроны, то они должны быть релятивистские, т.е. двигаться со скоростью, близкой к скорости света, и иметь энергию $E \geq 1 \text{ ГэВ} = 2 \cdot 10^3 \cdot mc^2$ (это соответствует скорости электрона, только на ~0,5 м/с меньшей скорости света). Либо γ -кванты образуются при аннигиляции частиц и античастиц с массами больше (или сравнимыми) с массами протонов. Но откуда могут взяться такие частицы?

Сейчас развиваются теории, в которых наличие γ -излучения связывают с тёмной материей. Она, по оценкам, составляет основную невидимую массу Галактики. Так как эта материя, по-видимому, очень слабо взаимодействует с обычным веществом, то мы её и не видим. Но своей гравитацией она значительно влияет на строение Галактики. Находясь в центре Галактики, массивная чёрная дыра, пока ещё неизвестным образом, создаёт наблюдаемое γ -излучение Галактики.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В ГАЛАКТИКЕ

Кроме газа и пыли, наша Галактика заполнена космическими лучами — релятивистскими частицами — протонами, электронами и ядрами атомов других химических элементов, которые движутся со скоростями, близкими к скорости света. Под действием магнитного поля, которое тоже пронизывает всю Галактику, космические лучи движутся по запутанным траекториям, не покидая Галактику.

Релятивистские электроны космических лучей, двигаясь в магнитном поле, излучают радиоволны. Это радиоизлучение астрономы исследуют с помощью радиотелескопов, изучая распределение магнитного поля и космических лучей в Галактике.

Источником мощного радиоизлучения оказалась Крабовидная туманность, которая в оптическом диапазоне представляется как диффузная светящаяся туманность. Эта туманность находится на месте взрыва сверхновой звезды. Взрыв был настолько мощным, что сверхновая звезда была видна в течение нескольких месяцев днём. В максимуме блеска она светила, как миллиарды звёзд, и поэтому, несмотря на свою удалённость от нас, была видна даже днём.

Наряду с остатками взорвавшейся звезды в этой туманности осталась нейтронная звезда — плотное ядро взорвавшейся звезды. Эта нейтронная звезда наблюдается как пульсар.

Таких остатков взрывов сверхновых, излучающих радиоволны, наблюдается довольно много в Галактике. Именно они поставляют космические лучи в межзвёздном пространстве Галактики.

ЗАДАЧА Солнце вращается вокруг центра Галактики на расстоянии 8 кпк со скоростью 220 км/с. Чему равна масса Галактики внутри орбиты Солнца?

Дано:

$$V_{\odot} = 220 \text{ км/с} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$$

$$r_{\odot} = 8 \text{ кпк} = 2,4 \cdot 10^{20} \text{ м}$$

M_{Γ} — ?

Решение:

Центростремительное ускорение, которое испытывает Солнце под действием притяжения массы Галактики:

$$a = \frac{V_{\odot}^2}{r_{\odot}} = \frac{GM_{\Gamma}}{r_{\odot}^2}, \quad M_{\Gamma} = \frac{V_{\odot}^2 \cdot r_{\odot}}{G},$$

$$M_{\Gamma} = \frac{(2,2 \cdot 10^5 \text{ м/с})^2 \cdot 2,4 \cdot 10^{20} \text{ м}}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}} = 1,7 \cdot 10^{41} \text{ кг} = 8 \cdot 10^{10} M_{\odot}.$$

Ответ: $M_{\Gamma} = 8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$.

Ядро Крабовидной туманности

**ЗАДАЧА № 24**

Гамма-телескоп им. Ферми, наблюдал мощное гамма излучение центральных областей Галактики с энергиями гамма квантов $\epsilon_{\gamma} \approx 2 \text{ ГэВ}$. Оцените из закона сохранения энергии, какую энергию и скорость должен иметь электрон, чтобы излучать данные гамма кванты и насколько она отличается от энергии покоя электрона.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- По наблюдениям за движением звезды вокруг чёрной дыры (отмечена крестиком на рис. **а**) определите период вращения и большую полуось орбиты звезды. Используя третий обобщённый закон Кеплера, определите массу чёрной дыры, а по массе найдите её гравитационный радиус.
- Почему мы не видим чёрную дыру, хотя хорошо видим, как вокруг неё вращаются звёзды?
- Шаровое скопление M13 содержит около 500 000 звёзд, имеет радиус около 84 св. лет. Оцените среднее расстояние между звёздами в скоплении и сравните его с расстоянием до α Центавра.

ЗАДАЧА № 25

Шаровое звёздное скопление М13 в созвездии Геркулеса имеет видимую звёздную величину $5,8^m$, находится на расстоянии 7600 пк. Оно состоит из звёзд типа Солнца. Оцените полное число звёзд в этом скоплении.

ЗАДАЧА № 26

Какой будет звёздная величина Солнца, если его удалить на расстояние 10 пк?

ЗАДАЧА № 27

Средний столб в туманности «Столбы творения» (рис. на с. 13) имеет высоту около 1 пк и ширину около 0,15 пк, концентрация газа составляет $n \approx 10^7$ ат/см³. Принимая форму столба цилиндрической, оцените массу газа в нём, полагая, что он состоит из водорода. Сколько звёзд с массами, сравнимыми с солнечной, могут в нём образоваться?

Астронет

<http://www.astronet.ru>

Элементы: популярный сайт о фундаментальной науке

<http://elementy.ru/>

Популярная механика

<http://popmech.ru>

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Межзвёздная среда состоит из газа и пыли, распределение которых носит клочковатую структуру.
- Межзвёздный газ, состоящий в основном из водорода, разделён на две фазы: горячую и разреженную и холодную и плотную.
- В плотных холодных облаках имеются условия для образования звёзд.
- Межзвёздные газ и пыль концентрируются в узком слое вблизи плоскости Млечного Пути.
- Рассеянные скопления в основном содержат несколько сотен звёзд, много газа, пыли и молодые массивные звёзды, что указывает на их молодость. Распределены они в основном в плоскости Галактики.
- Шаровые звёздные скопления содержат сотни тысяч звёзд, они компактны, не содержат газа и пыли, в них нет массивных горячих звёзд. Они содержат маломассивные звёзды и имеют большой возраст.
- По диаграмме «Спектр — светимость» определяют возраст скоплений и звёзд, в них входящих.
- Солнце расположено на расстоянии 8000 пк от центра Галактики и вращается вокруг него со скоростью 220 км/с.
- По наблюдениям в инфракрасных лучах за движением звёзд в центре Галактики была обнаружена сверхмассивная чёрная дыра массой 2 млн солнечных масс.
- Центр Галактики является мощным источником гамма-излучения, а взрывы сверхновых звёзд образуют космические лучи высоких энергий.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М.М., Чаругин В.М. Астрофизика. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.: Просвещение, 1988.

Ефремов Ю.Н. Млечный путь. — Фрязино: Век 2, 2007.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как определяют наличие пыли в межзвёздной среде?
- Как вы думаете, за счёт каких процессов нагреваются и охлаждаются межзвёздные газ и пыль?
- Какие наблюдения указывают на спиральную структуру нашей Галактики?
- Наше Солнце движется по отношению к близким звёздам со скоростью около 17 км/с по направлению к точке, называемой апексом, расположенной в созвездии Геркулеса. Как это было обнаружено?



Глава 7

ГАЛАКТИКИ

- КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК
- АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ
- СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Невероятно тусклое скопление 1000 звёзд, которое вращается вокруг Млечного Пути, — самая лёгкая по массе галактика из когда-либо открытых. Эта карликовая галактика была обнаружена в созвездии Овна в 2007 г. и получила название *Segue 2*. Её материя удерживается вместе благодаря небольшому скоплению тёмной материи.

Эта галактика всего в 900 раз ярче Солнца, тогда как (для сравнения) Млечный Путь в 20 млрд раз ярче нашей звезды.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как классифицируют галактики по форме.
- Как определяют расстояние до галактик по красному смещению.
- Как формулируется закон Хаббла.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое шаровые и рассеянные звёздные скопления?
- Как можно определить расстояние до звёзд и звёздных скоплений?

КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК

Наблюдения за переменными звёздами — цефеидами позволили определить расстояния до многих звёздных скоплений и туманностей. В 20-х гг. XX в. было установлено, что многие туманности, называвшиеся ранее эллиптическими и спиральными, находятся за пределами нашей Галактики и являются самостоятельными звёздными системами — галактиками. По числу входящих в них звёзд они не уступают нашей звёздной системе. Изучение строения галактик, их распределение и движение в пространстве имеют решающее значение для понимания законов эволюции всей части наблюдаемой нами Вселенной.

КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК Число галактик, доступных наблюдениям в крупнейшие телескопы, достигает десятков миллиардов. Несмотря на исключительное многообразие внешнего вида, большинство галактик всё же можно объединить в несколько основных типов: эллиптические (*E*), спиральные (*S*) и неправильные (*Ir*).

К **эллиптическим** галактикам относятся те из них, которые имеют вид кругов или эллипсов. Их яркость плавно уменьшается от центра к периферии. Никакой внутренней структуры у этих галактик нет. Наблюдения показывают, что эти галактики не вращаются как единое целое, в них очень

КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК**ЛИНЗОВИДНАЯ ГАЛАКТИКА****ВСЕЛЕННАЯ****ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ ГАЛАКТИКА**

мало газа и пыли, поэтому в них новые звёзды не образуются, они состоят в основном из старых звёзд. Массы самых крупных эллиптических галактик достигают величины $10^{13} M_{\odot}$.

Спиральные галактики состоят из ядра и нескольких спиральных рукавов, или ветвей. У обычных спиральных галактик (*S*) эти ветви отходят непосредственно от ядра. У пересечённых спиральных галактик (они обозначаются *SB*) ядро пересекается по диаметру поперечной полосой — перемычкой (баром). От концов этой перемычки и начинаются спиральные ветви. Так, одна из ближайших к нам звёздных систем — Туманность Андромеды — является спиральной галактикой, а галактика *NGC1300* — спиральная галактика с перемычкой. Считают, что наша Галактика похожа на спиральную галактику с перемычкой.

Спиральные галактики вращаются, в них много газа и пыли, которые концентрируются к плоскости галактики в спиральных рукавах, в них много молодых горячих звёзд спектральных классов О и В. Эти звёзды возбуждают свечение диффузных газовых туманностей, разбросанных вместе с пылевыми облаками вдоль спиральных ветвей. Обилие газовых пылевых облаков и присутствие в них голубых звёзд спектральных классов О и В говорят об активных процессах образования звёзд, происходящих в спиральных рукавах этих галактик. Массы спиральных галактик составляют от 10^{10} до $10^{12} M_{\odot}$.

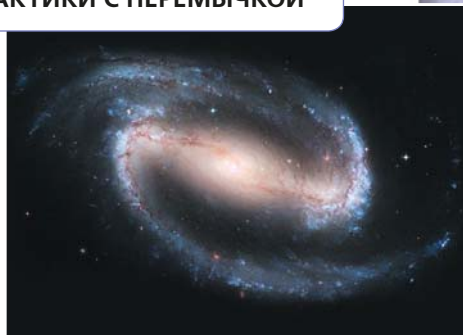


СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ



НЕПРАВИЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ

СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ С ПЕРЕМЫЧКОЙ





К **неправильным** галактикам относятся те, у которых отсутствует чётко выраженное ядро и не обнаружена вращательная симметрия. Примерами неправильных галактик служат Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако — самые близкие к нам галактики, видимые невооружённым глазом в южном полушарии неба, вблизи Млечного Пути. Эти две галактики являются спутниками нашей Галактики.

Специальный класс галактик представляют **взаимодействующие** галактики. Обычно это двойные галактики, между которыми наблюдаются светлые перемычки, «хвосты» и т. д. Из-за близкого расположения друг к другу их формы искажаются силой взаимного тяготения, которая вызывает приливы у каждой из них.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ В СПЕКТРАХ ГАЛАКТИК.

ЗАКОН ХАББЛА Свет галактик в основном представляет собой суммарный свет миллиардов звёзд и газа. Для изучения физических свойств галактик астрономы используют методы спектрального анализа света. Наблюдения показывают, что линии в спектрах всех известных галактик смещены к красному концу. Это явление было названо **красным смещением**. При этом отношение смещения спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ к длине волны λ_0 оказалось для всех линий одинаковым в спектре данной галактики. Количественно красное смещение характеризуется величиной

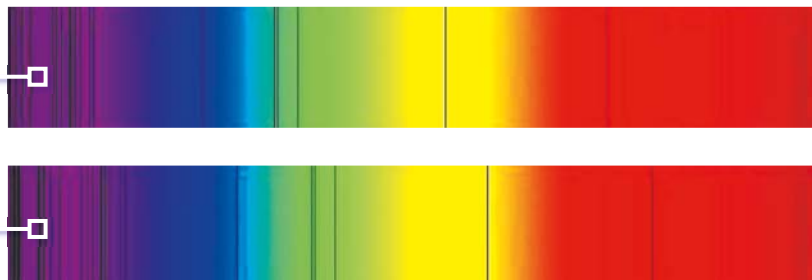
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0},$$

где λ_0 — длина волны спектральной линии, наблюдаемой в лаборатории, назвали красным смещением.

Общепринятая интерпретация этого явления связана с эффектом Доплера, согласно которому смещение спектральных линий вызвано движением (удалением) излучающего объекта (галактики) со скоростью v по направлению от наблюдателя.

Линии поглощения в спектре Солнца

Линии поглощения в спектре скопления галактик



При малых красных смещениях ($z \ll 1$) скорость объекта может быть найдена по формуле Доплера:

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

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

После того как по красному смещению были найдены скорости галактик, известный астроном Э. Хаббл установил интересную зависимость, называемую **законом Хаббла: скорость удаления галактик возрастает прямо пропорционально расстоянию до них:**

$$v = H \cdot r.$$

В этой формуле коэффициент пропорциональности H называют *постоянной Хаббла*, численное значение которой зависит от выбранных единиц. Если в законе Хаббла скорость выражена в километрах в секунду, а расстояние в мегапарсеках (1 мегапарсек = 10^6 парсек), то постоянная Хаббла $H = 68$ км/(с·Мпк).

Используя закон Хаббла, удаётся определить расстояния до очень далёких галактик и других внегалактических объектов по их красному смещению.

Так, самый близкий к нам квазар 3C273 имеет красное смещение $z = 0,158$. Это означает, что он удаляется от нас со скоростью

$$v = c \cdot z = 3 \cdot 10^5 \text{ (км/с)} \cdot 0,158 = 47\,400 \text{ км/с.}$$

Из закона Хаббла следует, что расстояние до этого квазара равно

$$r = v / H = 700 \text{ Мпк} = 2 \text{ млрд св. лет.}$$

Предполагают, что в галактиках существует массивное гало со слабоизлучающими объектами, такими, как маломассивные звёзды — коричневые карлики, юпитероподобные планеты, массы которых недостаточны, чтобы стать звёздами; остывшие белые карлики, нейтронные звёзды и чёрные дыры. Возможно, существует особый вид материи, который не участвует в сильном электромагнитном взаимодействии, но проявляет себя только в гравитационных эффектах.

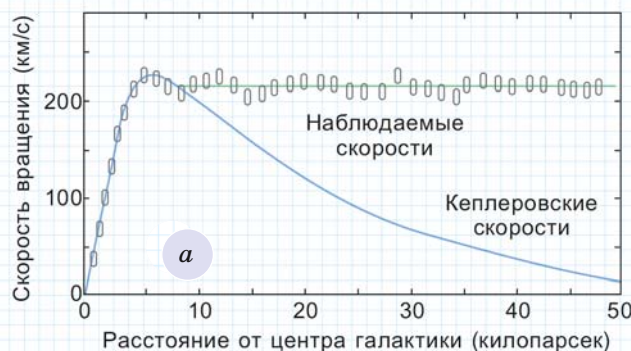
ЗАДАЧА № 28

Измеренная скорость вращения звёзд вокруг центра галактики на расстоянии $r = 50$ кпк от него $v \approx 200$ км/с. Оцените массу галактики (см. график ниже).

ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ В ГАЛАКТИКАХ Массу галактик можно определить двумя способами. Во-первых, зная светимость галактики и деля её на светимость звёзд, входящих в неё, мы непосредственно получаем число звёзд в галактике. Умножая это число на массу отдельной звёзды, мы получаем полную массу.

Во-вторых, мы можем получить массу галактики, измеряя скорости движения звёзд, газовых туманностей и скоплений на различных расстояниях от её центра.

Если бы вся масса была сосредоточена в звёздах, то на расстояниях, больших, чем видимый радиус галактик, скорость соответствовала бы круговой скорости (её называют **кеплеровской скоростью**). Она показана на рисунке **а** непрерывной линией. Наблюдаемая скорость почти постоянная. Это указывает на то, что в галактиках присутствует материя, масса которой существенно больше массы вещества, сосредоточенного в звёздах, и она занимает больший объём, чем видимый объём галактик. Эту материю называют «тёмная материя».



Скорость вращения галактики на различных расстояниях от центра

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Как формулируется закон Хаббла?
- Какими способами можно определить массу галактик?

АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова природа активности галактик.
- Какова природа квазаров.

ВСПОМНИТЕ:

- Как определяют расстояние до галактик по красному смещению?

Радионаблюдения за галактиками показали, что большинство из них являются слабыми источниками радиоизлучения, основная доля их излучения приходится на свет звёзд галактики.

АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ Однако существуют такие галактики, радиоизлучение которых не только сравнимо, но и значительно превышает их оптическое излучение. Эти галактики получили название **радиогалактик**.

В ядрах некоторых галактик происходят бурные процессы выделения энергии. Такие галактики получили название **активных галактик**.

Так, в галактике M87 в созвездии Девы наблюдается яркий выброс вещества со скоростью 3000 км/с, масса этого выброса составляет $10^5 M_{\odot}$. Эта галактика оказалась мощным источником радиоизлучения.

На фотографии показана одна из мощнейших радиогалактик — Центавр А. Галактика пересечена полосой поглощающего вещества.

Анализ свойств радиоизлучения показывает, что оно вызывается облаками горячей плазмы, выброшенными из ядра галактики и двигающимися со скоростью, близкой к скорости света.

КВАЗАРЫ Ещё более мощными источниками радиоизлучения являются квазары (англ. *quasar* — *QUASi stellar radio source*, т.е. похожий на звезду радиоисточник).

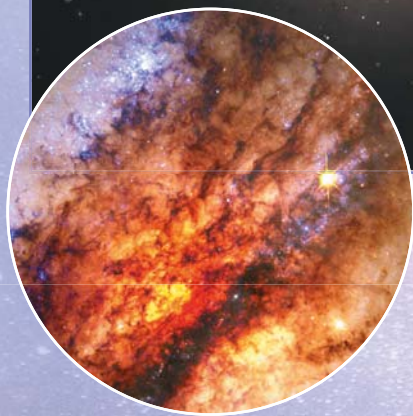
Примером такого источника является ближайший к нам квазар С273 в созвездии Девы. Его светимость достигает $10^{12} L_{\odot}$.

Светимости большинства квазаров в десятки и сотни раз превышают светимости обычных галактик.

Квазары являются также мощными источниками инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучения.

А вот размеры квазаров оказались небольшими, примерно 100—1000 а.е., т.е. всего лишь в десятки раз больше размеров Солнечной системы.

Тщательные исследования показали, что квазары представляют собой активные ядра галактик, структура которых пока недоступна современной технике наблюдений. По современным представлениям в ядрах галактик, как и в ядре нашей Галактики, находятся



массивные чёрные дыры. Поэтому наиболее разработанной моделью квазара является модель с массивной чёрной дырой, расположенной в центре определённого типа галактик с высокой звёздной плотностью.



Как же определили размеры квазаров? Они настолько малы и расположены так далеко, что ни один телескоп пока не может различить их структуру. Но в оптическом и рентгеновском диапазонах наблюдается сравнительно быстрая переменность с характерным временем Δt около суток. Согласно принципу причинности размер области излучения не может превышать величины

$$c \cdot \Delta t \sim 300\,000 \text{ км/с} \cdot 24 \text{ ч} = 26 \text{ млрд км} = 170 \text{ а.е.},$$

поэтому, как мы видим, квазар имеет размеры, сравнимые с размерами Солнечной системы. И в этом компактном объёме излучается энергия, сравнимая с излучением тысяч миллиардов Солнц. Теперь понятно, почему для описания его природы привлекается сверхмассивная чёрная дыра.

Длительное и мощное выделение энергии может быть полностью объяснено выпадением вещества галактики на чёрную дыру. Масса такой чёрной дыры составляет около $10^8 M_{\odot}$, а её радиус — $3 \cdot 10^8 \text{ км}$. Находясь в центре галактики с высокой звёздной плотностью, такая чёрная дыра может захватывать целые звёзды.

При падении на чёрную дыру звезда разрушается и формирует диск вокруг неё.

Потенциальная энергия разрушенной звезды переходит в кинетическую и тепловую.

Диск нагревается до миллионов кельвинов и излучает мощное рентгеновское, оптическое и другие виды излучений, формирует направленный выброс вещества со скоростью, близкой к скорости света.

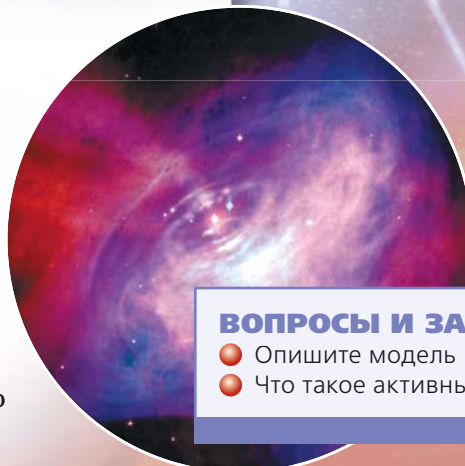
Для обеспечения наблюдаемой светимости квазаров достаточно, чтобы чёрная дыра захватывала хотя бы одну звезду в год.

При высоких плотностях звёзд в ядрах галактик такие частые захваты звёзд чёрной дырой вполне реальны. В обычных галактиках плотности звёзд в ядре невелики, поэтому захваты звёзд редки, и мы не видим проявления большой активности чёрных дыр у обычных галактик.

ЗАДАЧА № 29

Красное смещение квазара 3C273 равно $Z = 0,158$, а видимая звёздная величина $m = 12,8^m$, определите скорость удаления квазара и его светимость в светимостях Солнца. Какую массу теряет квазар каждую секунду на излучение?

Квазар



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Опишите модель квазара.
- Что такое активные галактики?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова природа скоплений галактик и роль тёмной материи в них.
- Какова природа рентгеновского излучения скоплений галактик.
- Что такое ячеистая структура распределения галактик.

ВСПОМНИТЕ:

- Какова природа активности галактик?

Чтобы удержать горячий газ в скоплении, необходима большая сила тяготения. Полная масса галактик, входящих в скопление, для этого недостаточна. Астрономы пришли к выводу, что и скопление должно быть заполнено большим количеством тёмной материи, способной удержать его от разрушения.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Известно, что диаметр нашей Галактики достигает почти 30 кпк (100 000 св. лет), диаметр галактики Андромеды (М31) равен 40 кпк. Расстояние до Туманности Андромеды составляет 670 кпк (2 млн св. лет), следовательно, превышает диаметры крупных галактик почти в 20 раз. Средние же расстояния между звёздами примерно такие же, как между Солнцем и α Центавра, т.е. около 275 000 а.е., и больше диаметра Солнца ($1,4 \cdot 10^6$ км $\cong$ 0,01 а.е.) в 27,5 млн раз. Таким образом, галактики значительно теснее сближены в пространстве, чем звёзды между собой.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК Систематические исследования распределения галактик по небу показали, что наряду с отдельными галактиками наблюдаются скопления галактик. Так, наша Галактика, Туманность Андромеды, Большое и Малое Магеллановы Облака и ещё несколько звёздных систем образуют Местную группу, в которую входят 35 галактик.

Галактики Местной группы связаны общим тяготением и движутся вокруг общего центра масс.

Таким образом, скопления галактик являются гравитационно-связанными системами галактик и представляют собой одни из самых больших структур во Вселенной.

Сейчас известно около 4000 скоплений галактик, в которых насчитываются сотни и тысячи звёздных систем. В среднем диаметры скоплений близки к 8 Мпк (26 млн св. лет). Одним из наибольших является скопление галактик в созвездии Волосы Вероники. Оно находится на расстоянии около 70 Мпк от нас и занимает на небе участок диаметром 12° . В этом богатом скоплении насчитывается около 40 000 галактик.

Наш Млечный Путь вместе с Местной группой галактик находится на окраине скопления галактик, центр которого находится в созвездии Девы.



РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

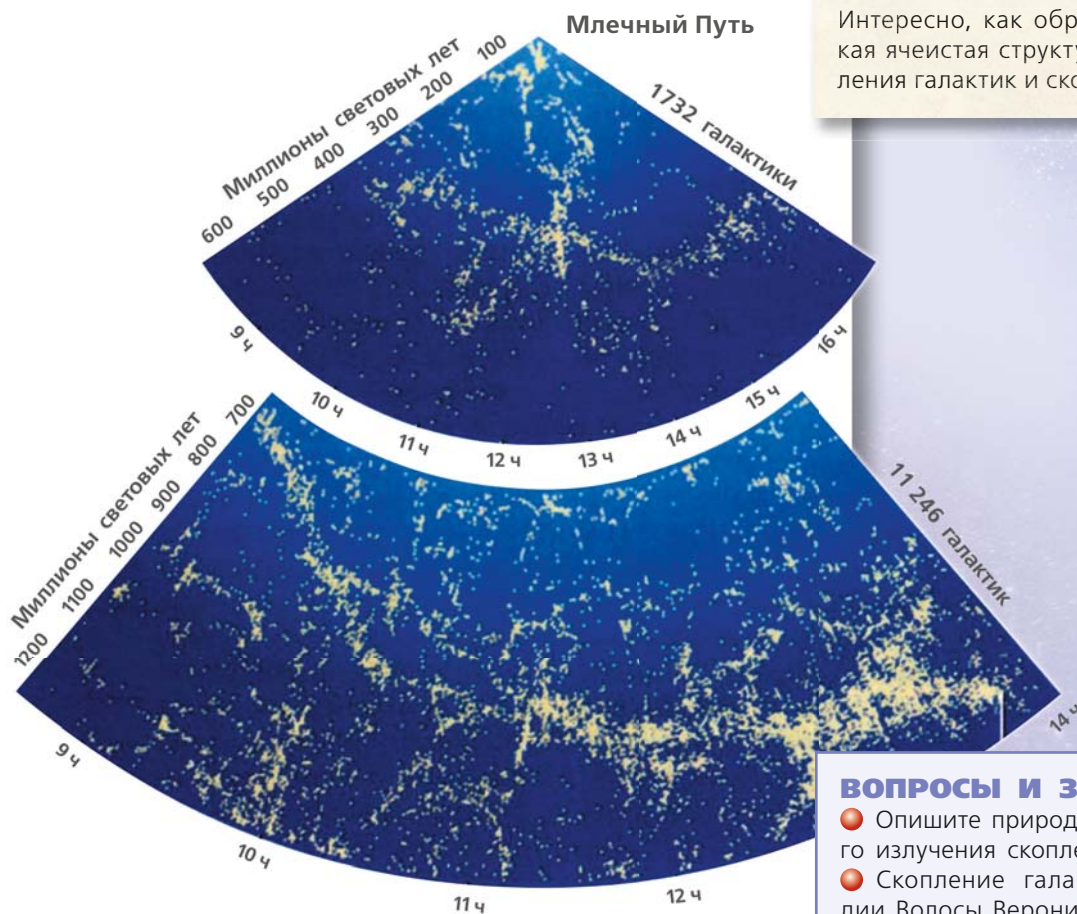
Кроме галактик, скопления содержат и газ. Как показали наблюдения на космических рентгеновских телескопах, скопления галактик являются мощными источниками рентгеновского излучения, которое испускает нагретый до температуры свыше 10^9 К очень разреженный межгалактический газ. Его концентрация оказалась около 1000 атомов водорода в 1 м^3 .

Общее количество межгалактического газа сравнимо с массой всех галактик в скоплении.

ЯЧЕИСТАЯ СТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Астрономы измерили расстояния до многих галактик и определили, как они распределены в пространстве. И получилась очень интересная картина.

Большая часть галактик и скоплений галактик сосредоточена в «стенках ячеек», практически пустых внутри. Характерный размер ячеек около 100 Мпк, толщина стенок 3–4 Мпк. Наиболее крупные скопления галактик располагаются в узлах, образованных пересечением нитей (рёбер) ячеек. Дуги, протянувшиеся от края и до края карты и расположенные на расстоянии 400 млн св. лет и 800–900 св. лет, получили названия соответственно «Большая стена галактик» и «Великая стена галактик». Интересно, как образовалась такая ячеистая структура распределения галактик и скоплений?



Наша Галактика расположена наверху, и мы наблюдаем галактики в направлениях, указанных прямым восхождением.

Слева — расстояния до галактик в световых годах, справа — число галактик, которые использовались при построении распределения.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Опишите природу рентгеновского излучения скоплений галактик.
- Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники имеет радиус около 7 Мпк и содержит около 40 000 галактик. Оцените плотность галактик в скоплении (в единицах $1/\text{пк}^3$) и среднее расстояние между ними. Как вы думаете, часто ли эти галактики сталкиваются?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

ЗАДАЧА № 30

Скопление галактик в созвездии Дева содержит около 2500 галактик, имеет угловой радиус $\theta \approx 6^\circ$ и находится на расстоянии около 16 Мпк. Определите линейный радиус скопления, концентрацию галактик в нём и среднее расстояние между галактиками. Как вы думаете, часто ли по космическим масштабам сталкиваются галактики в этом скоплении?

ЗАДАЧА № 31

Рентгеновские телескопы обнаружили в скоплениях межгалактический газ с концентрацией $n = 10^3$ ат/м³ и температурой $T = 3 \cdot 10^7$ К. Оцените массу горячего газа в скоплении галактик в созвездии Девы. $R = 1,6$ Мпк, объём $V = 4\pi/3 R^3 = 17$ Мпк³, газ состоит в основном из ионизованного водорода $m_H = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

● Галактики по форме делят на четыре основные группы: эллиптические, спиральные, спиральные с перемычкой и неправильные.

● Эллиптические галактики не вращаются, почти не содержат газа и пыли и молодых горячих звёзд.

● Спиральные галактики и спиральные галактики с перемычкой вращаются, имеют много газа и пыли, много молодых массивных горячих звёзд, расположенных в спиральных рукавах, в которых идёт активный процесс образования звёзд.

● Неправильные галактики медленно вращаются, содержат много молодых горячих звёзд.

● Закон Хаббла: скорость, с которой от нас удаляется галактика, пропорциональна расстоянию до неё.

● По характеру вращения галактик была определена масса галактики и её распределение вдоль радиуса. Оказалось, что полная масса галактики в несколько раз превышает ту, которая заключена в звёздах. Эта невидимая масса получила название «тёмная материя».

● Активность квазаров связана с активностью сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики.

● Галактики, как и звёзды, собираются в скопления, содержащие до тысяч галактик, которые удерживаются вместе взаимным тяготением. Основную массу скопления составляет невидимая тёмная материя.

● Наблюдаемая ячеистая структура распределения галактик и скоплений галактик является самой крупной структурой распределения материи во Вселенной.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М. М., Чаругин В. М. *Астрофизика. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся.* — М.: Просвещение, 1988.

Ефремов Ю. Н. *Звёздные острова: Галактики звёзд и Вселенная галактик.* — Фрязино: Век 2, 2007.

Сурдин В. Г. *Галактики.* — М.: Физматлит, 2013.

Энциклопедия для детей. Т. 8. *Астрономия.* — М.: Аванта+, 2013.

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Каким образом астрономы по кривой вращения галактики определяют её массу?

● Объясните, как по красному смещению определяют скорость удаления галактики.

● Почему без наличия тёмной материи скопления галактик должны были разрушиться?

Глава 8

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

- КОНЕЧНОСТЬ И БЕСКОНЕЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ – ПАРАДОКСЫ КЛАССИЧЕСКОЙ КОСМОЛОГИИ
- РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ
- МОДЕЛЬ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ И РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Первое реальное представление о Вселенной было получено в 1990 г., когда на низкую околоземную орбиту был запущен телескоп «Хаббл». За первые годы его работы были обнаружены миллионы галактик, а их общее число в видимой Вселенной по подсчётам учёных могло составлять от 100 до 200 миллиардов. И каждая из этих галактик содержит в себе миллиарды звёзд. Уже тогда учёные были поражены истинными масштабами Вселенной. Но теперь количество галактик в видимой Вселенной может составлять около 1 триллиона, что минимум в 10 раз превышает предыдущие расчёты.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как связан закон всемирного тяготения с представлениями о конечности и бесконечности Вселенной.
- Какие противоречия раскрывает фотометрический парадокс.
- Почему необходимо привлечение общей теории относительности для построения модели Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Из каких объектов состоит Вселенная?

КОНЕЧНОСТЬ И БЕСКОНЕЧНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ — ПАРАДОКСЫ КЛАССИЧЕСКОЙ КОСМОЛОГИИ

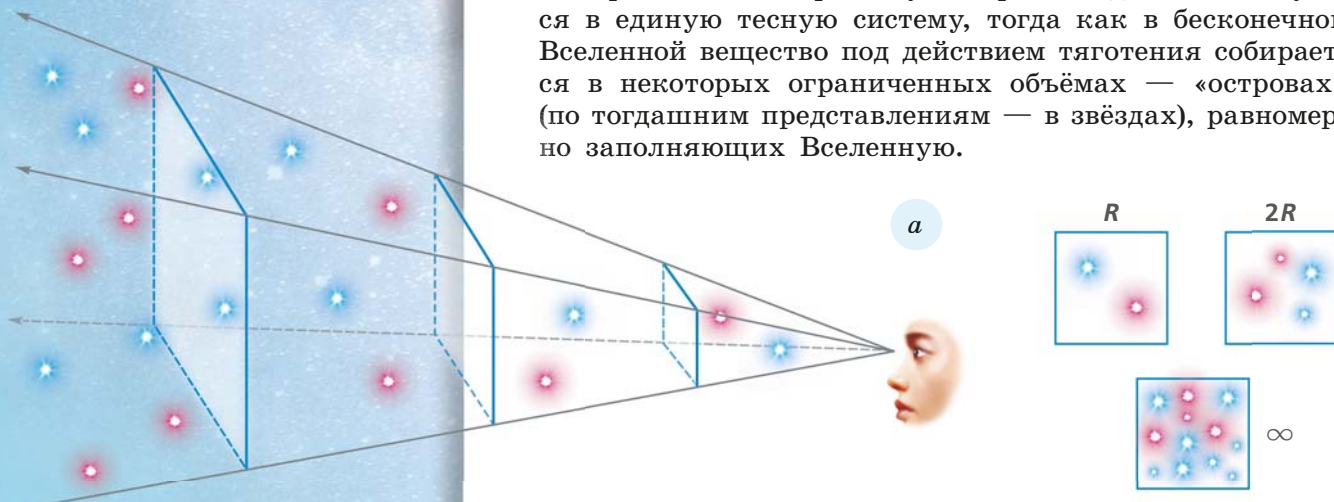
Астрономия изучает не только отдельные небесные тела и их группы: звёзды, планеты, скопления звёзд, галактики и их скопления, объектом её изучения является Вселенная как единое целое. При изучении небесных тел мы можем сравнивать их между собой, проследить их эволюцию. При изучении Вселенной мы этого делать не можем, так как Вселенная уникальна, мы не можем посмотреть на неё со стороны и сравнить с другой Вселенной.

КОСМОЛОГИЯ Раздел астрономии, изучающий строение и развитие (эволюцию) Вселенной в целом, называется **космологией** (от греч. *космос* — мир, Вселенная и *логос* — учение). В компетенцию космологии входит объяснение наблюдаемого распределения галактик в пространстве и их движение (разбегание).

Во времена Античности и в Средние века многие учёные полагали, что Вселенная конечна и ограничена сферой неподвижных звёзд. Этой точки зрения придерживались даже Н. Коперник и Т. Браге. Кроме этого, Вселенная представлялась статичной, т.е. не меняющейся со временем — звёзды застыли на своих местах, наблюдались только периодические движения в Солнечной системе.

С развитием науки, всё полнее раскрывающей физические процессы, происходящие в окружающем нас мире, большинство учёных постепенно перешли к материалистическим представлениям о бесконечности Вселенной. Огромное значение имело открытие И. Ньютоном закона всемирного тяготения.

Одним из важных следствий этого закона явилось утверждение, что в конечной Вселенной всё её вещество за ограниченный промежуток времени должно стянуться в единую тесную систему, тогда как в бесконечной Вселенной вещество под действием тяготения собирается в некоторых ограниченных объёмах — «островах» (по тогдашним представлениям — в звёздах), равномерно заполняющих Вселенную.



ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС Конечно, в рамках ньютоновской механики и теории гравитации возникали серьёзные проблемы при предположении о бесконечности Вселенной. Одна из таких проблем получила название *фотометрического парадокса*.

Иногда этот парадокс формулируют в виде вопроса: почему ночью небо тёмное? Казалось бы, имеется тривиальный ответ: ночью темно, так как Солнце находится под горизонтом. Но это не так.

В бесконечной статичной Вселенной имеется бесконечное число звёзд. Поэтому, если мы будем смотреть в каком-то направлении, то наш луч зрения рано или поздно наткнётся на звезду. Поэтому всё небо должно быть покрыто сплошной стеной из дисков звёзд разных угловых размеров. Причём дисков с меньшими угловыми размерами было бы больше.

Если предположить, что все звёзды похожи на Солнце, то любой участок неба должен быть таким же ярким, как Солнце. Но этого нет. Ночью темно. Если бы Вселенная была конечной, то в ней было бы конечное число звёзд и небо не было столь ярким. Но предположение о конечности Вселенной противоречило бы наблюдаемому равномерному распределению звёзд в ней. Ведь согласно теории тяготения Ньютона все звёзды в ограниченной Вселенной рано или поздно должны были собраться в одно место (а).

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ Большое значение для развития современных представлений о строении и развитии Вселенной имеет общая теория относительности, созданная А. Эйнштейном. Она обобщает теорию тяготения Ньютона для массивных тел и скоростей движения вещества, сравнимых со скоростью света.

Действительно, в галактиках сосредоточена колоссальная масса вещества, а скорости далёких галактик и квазаров сравнимы со скоростью света.

Согласно общей теории относительности гравитационное взаимодействие передаётся с конечной скоростью, равной скорости света. (По теории Ньютона гравитационное взаимодействие передаётся мгновенно.)

Общая теория относительности накладывает определённые ограничения на геометрические свойства пространства, которое уже нельзя считать евклидовым.

Согласно этой теории время не имеет абсолютного характера, а движение и распределение материи в пространстве нельзя рассматривать в отрыве от геометрических свойств пространства и времени. Гравитационное поле представляет собой искривление пространства-времени, создаваемое массивными телами.

Общая теория относительности, в частности, утверждает, что распределение и движение материи изменяют геометрические свойства пространства-времени, и наоборот, распределение и движение материи сами зависят от геометрии пространства-времени. Тяготение же согласно общей теории относительности есть результат изменений, вносимых присутствием материи в свойства пространства-времени, и передаётся с наибольшей скоростью, с которой возможна передача взаимодействия, — со скоростью света. И лишь в достаточно слабых и статических гравитационных полях при небольших скоростях движения, значительно меньших скорости света, закон тяготения Эйнштейна переходит в закон тяготения Ньютона. Качественно уравнения, полученные Эйнштейном (аналог законов механики Ньютона), выглядят так:

Величины, характеризующие геометрию пространства-времени: кривизна, сумма углов в треугольнике

=

$$\frac{8\pi G}{c^4}$$

Величины, характеризующие материю: масса, плотность, давление, скорость

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое фотометрический парадокс?
- Какое значение имеет общая теория относительности для астрономии?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое космологическая модель Вселенной.
- Как определить возраст Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое фотометрический парадокс?
- В чём суть общей теории относительности?

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

Впервые космологическую модель Вселенной в рамках общей теории относительности рассмотрел советский математик А. Фридман. Он показал, что Вселенная, однородно заполненная веществом, должна быть нестационарной, и тем самым объяснил наблюдаемую картину разбегания галактик.

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСЕЛЕННОЙ В зависимости от средней плотности вещества Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. При расширении Вселенной скорость разбегания галактик должна быть пропорциональна расстоянию до них — вывод, подтверждённый Э. Хабблом открытием красного смещения в спектрах галактик. Критическое значение плотности вещества, от которой зависит характер движения и геометрия Вселенной, равно:

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где G — гравитационная постоянная, $H = 68 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$ — постоянная Хаббла.

Для построения модели Вселенной используется общая теория относительности. Несмотря на это, понять основные особенности наблюдаемой картины расширения Вселенной можно и в рамках теории тяготения И. Ньютона. Это связано с тем, что в небольших масштабах Вселенной применима теория тяготения Ньютона. Поэтому расширение Вселенной можно проследить по характеру движения одной галактики, которая удаляется от нас со скоростью, меньшей скорости света.

Рассмотрим далёкую галактику, находящуюся на расстоянии R от нас (a). На её движение оказывает притяжение только то вещество, которое находится внутри сферы с радиусом R , остальное вещество Вселенной

не влияет своим притяжением на движение галактики. Масса вещества, находящегося внутри сферы с радиусом R и плотностью ρ , равна $M = \rho \cdot (4/3\pi)R^3$.

Эта галактика как бы находится на поверхности шара с данной массой и радиусом. Из наблюдений видно, что галактика движется по закону Хаббла со скоростью $v = H \cdot R$. Если эта скорость окажется меньше второй космической скорости для этого шара, то наблюдаемое удаление галактики сменится в конце концов приближением, т.е. расширение Вселенной сменится сжатием.



Если скорость будет больше или равна второй космической скорости, то галактика будет неограниченно удаляться, т.е. наблюдаемое расширение носит неограниченный характер.

Посмотрим внимательнее, от чего зависит характер будущего расширения Вселенной. Для этого сравним соответствующие выражения для скорости галактики и второй космической скорости:

$$\frac{v}{v_2} = \frac{HR}{\sqrt{\frac{2GM}{R}}} = \frac{HR}{\sqrt{\frac{8}{3}\pi G\rho R^2}} = \sqrt{\frac{3H^2}{8\pi G\rho}} = \sqrt{\frac{\rho_{кр}}{\rho}}.$$

Критическое значение средней плотности вещества, от которой зависит характер его движения, равно:

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где G — гравитационная постоянная, $H = 68 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$ — постоянная Хаббла.

Помня, что $1 \text{ пк} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ км}$ и поэтому $1 \text{ Мпк} = 3,08 \cdot 10^{19} \text{ км}$, найдём $H = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Тогда критическая плотность вещества

$$\rho_{кр} = \frac{3(2,2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1})^2}{8 \cdot 3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)} \approx 0,9 \cdot 10^{-26} \text{ кг/м}^3,$$

или $\rho_{кр} = 0,9 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3$.

Если средняя плотность вещества во Вселенной больше критической ($\rho > \rho_{кр}$), то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, а при средней плотности, равной или меньшей критической ($\rho \leq \rho_{кр}$), расширение не прекратится. Вне зависимости от плотности гравитация с большей или меньшей силой тормозит расширение Вселенной.

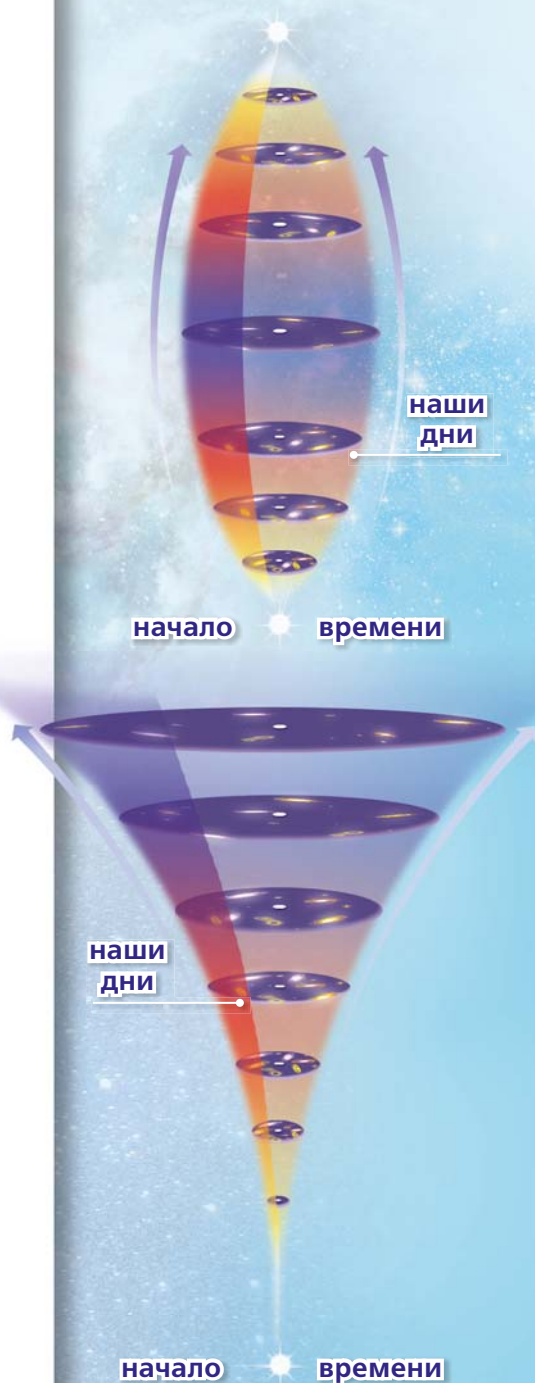
Что касается геометрических свойств Вселенной, то при $\rho > \rho_{кр}$ во Вселенной будут работать законы геометрии Римана. В частности, в ней сумма углов в треугольнике больше 180° , как в геометрии на сфере.

Если $\rho < \rho_{кр}$, то во Вселенной будут работать законы геометрии Лобачевского, в ней сумма углов в треугольнике меньше 180° , как геометрия типа поверхности седла.

Если $\rho = \rho_{кр}$, то во Вселенной будут работать законы хорошо знакомой нам геометрии Евклида, где сумма углов в треугольнике равна 180° , как на плоскости.

Если средняя плотность Вселенной больше критической ($\rho > \rho_{кр}$), то в будущем расширение Вселенной сменится сжатием, а при средней плотности, равной или меньшей критической ($\rho \leq \rho_{кр}$), расширение не прекратится. Мы не знаем средней плотности вещества во всей Вселенной, но можем подсчитать эту плотность в доступной изучению части Вселенной — в *метагалактике*.

Модели возможной эволюции Вселенной



По современным представлениям Вселенная существенно больше по размерам, чем та её часть, которую мы наблюдаем.

Доступную наблюдениям Вселенную иногда называют *метагалактикой*. За её пределами расположены галактики, от которых свет не может дойти до нас, они как бы находятся за горизонтом.

По этой причине радиус наблюдаемой Вселенной называют *горизонтом видимости*. Свет от галактик, расположенных за горизонтом видимости, в настоящее время не наблюдаем.

ЗАДАЧА № 32

Полагая, что радиус наблюдаемой Вселенной возрастает пропорционально возрасту Вселенной $R \sim t$, оцените момент времени, когда во Вселенной стали образовываться галактики.

РАДИУС МЕТАГАЛАКТИКИ

В первом приближении радиус Метагалактики можно оценить, разделив скорость света на постоянную Хаббла:

$$R_M = \frac{c}{H} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}}{68 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}} = 4,4 \cdot 10^3 \text{ Мпк} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ св. лет},$$

$$\text{или } R_M = 1,3 \cdot 10^{26} \text{ м}.$$

Как уже отмечалось, в видимой части Вселенной наблюдается около 100 млрд крупных галактик ($N = 10^{11}$), похожих и непохожих на нашу Галактику. Каждая из них состоит примерно из $n = 10^{11}$ звёзд. Принимая массы звёзд в среднем близкими к массе Солнца $M_\odot = 10^{30} \text{ кг}$ (большинство звёзд имеют массу меньше или сравнимую с солнечной), находим, что в объёме

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

содержится масса $M = NnM_\odot$, откуда средняя плотность вещества

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{NnM_\odot}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{10^{11} \cdot 10^{11} \cdot 10^{30} \text{ кг}}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,3 \cdot 10^{26} \text{ м})^3} = 1,1 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{или } \rho = 1,1 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3.$$

ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ

Если наблюдения пока не позволяют нам с определённой точностью сказать о характере будущего расширения Вселенной, то время, когда в прошлом это расширение началось, мы можем оценить из закона Хаббла.

Действительно, если наблюдаемая нами галактика удаляется со скоростью v и сейчас, после начала расширения, находится на расстоянии r от нас, то своё удаление от нас она начала примерно в момент

$$t_{\text{вс}} = \frac{r}{V} = \frac{r}{Hr} = \frac{1}{H} = \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}} = 0,45 \cdot 10^{18} \text{ с} = 14 \cdot 10^9 \text{ лет}.$$

Эти рассуждения применимы для любой галактики. Таким образом, около 14 млрд лет назад всё вещество Вселенной было сосредоточено в небольшом объёме и плотность вещества была настолько высокой, что ни галактик, ни звёзд не существовало. Не существовало ни атомов, ни молекул, а была сверхплотная смесь элементарных частиц. По последним данным, точное значение возраста Вселенной оценивается в 13,8 млрд лет.

Пока не ясны ни природа физических процессов, протекавших до этого сверхплотного состояния вещества, ни причины, вызвавшие расширение Вселенной. Ясно

одно, что со временем расширение привело к значительному уменьшению плотности вещества, и на определённом этапе расширения стали формироваться галактики и звёзды.

Некоторые видят в наблюдаемом разбегании галактик аналогию с разлётом вещества во время взрыва, поэтому описанная теория расширения Вселенной получила название теории Большого взрыва, а время

$$t_B = 1/H = 14 \text{ млрд лет,}$$

прошедшее с начала этого взрыва, называют возрастом Вселенной.

Расширение Вселенной и связанное с ним наблюдаемое разбегание галактик объясняют отсутствие фотометрического парадокса. Действительно, из-за эффекта Доплера свет далёких галактик и звёзд испытывает красное смещение, энергия световых квантов уменьшается, меньше света приходит от этих галактик.

Кроме этого, мы видели, что Вселенная ограничена в размерах радиусом Вселенной. Этими двумя положениями и объясняется то, что небо ночью тёмное.



В микромире частицы и античастицы всегда рождаются парами, и мы вправе были ожидать равные количества вещества и антивещества во Вселенной.

А вдруг есть места, состоящие полностью из антивещества. И всё же почему наблюдаемая часть Вселенной состоит из вещества? По современным представлениям наблюдаемая асимметрия вещества и антивещества возникла в первые секунды после рождения Вселенной.



ЗАДАЧА № 33

Полагая, что радиус наблюдаемой Вселенной возрастает пропорционально возрасту Вселенной $R \sim t$, а расстояние между галактиками пропорционально радиусу наблюдаемой Вселенной и современная плотность вещества равна $\rho_0 = 1,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3$, оцените, какой была средняя плотность вещества Вселенной в момент образования галактик.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Опишите космологическую модель Вселенной в рамках общей теории относительности.
- Как можно оценить возраст Вселенной?

МОДЕЛЬ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ И РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Где, когда и как образовалось основное количество гелия во Вселенной.

● Какие наблюдения указывают на высокие температуры вещества Вселенной в начале расширения.

ВСПОМНИТЕ:

● Почему необходимо привлечение общей теории относительности для построения модели Вселенной?

Теорию Большого взрыва, или, как она первоначально называлась, модель горячей Вселенной, предложил российский и американский физик Г.Гамов.

Общие представления о физических условиях на ранних стадиях расширения Вселенной можно получить из анализа химического состава вещества.

МОДЕЛЬ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Естественно предположить, что до образования звёзд вещество состояло из простейшего химического элемента — водорода. Поэтому первые звёзды, сформировавшиеся из этого вещества, были чисто водородными. При термоядерных реакциях в недрах звёзд образовывался гелий. В дальнейшем часть их вещества возвращалась в межзвёздную среду либо при взрывах сверхновых, либо при спокойном сбросе вещества (как в планетарных туманностях), либо в процессах, сходных с солнечным ветром.

Из сброшенного вещества формировалось новое поколение звёзд. Исходя из этого можно предположить, что весь наблюдаемый во Вселенной гелий (его около 30% по массе) образовался в недрах звёзд.

Чтобы проверить это предположение, проведём простую оценку. Вспомним, что в термоядерных реакциях синтеза гелия из водорода в недрах Солнца каждую секунду выделяется $4 \cdot 10^{26}$ Дж энергии (светимость Солнца $L_{\odot}$). При образовании одного ядра гелия выделяется энергия

$$\Delta E = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Поэтому каждую секунду в Солнце образуется 10^{38} ядер атомов гелия, или $6,7 \cdot 10^{11}$ кг гелия. Полагая, что возраст Галактики чуть меньше возраста Вселенной:

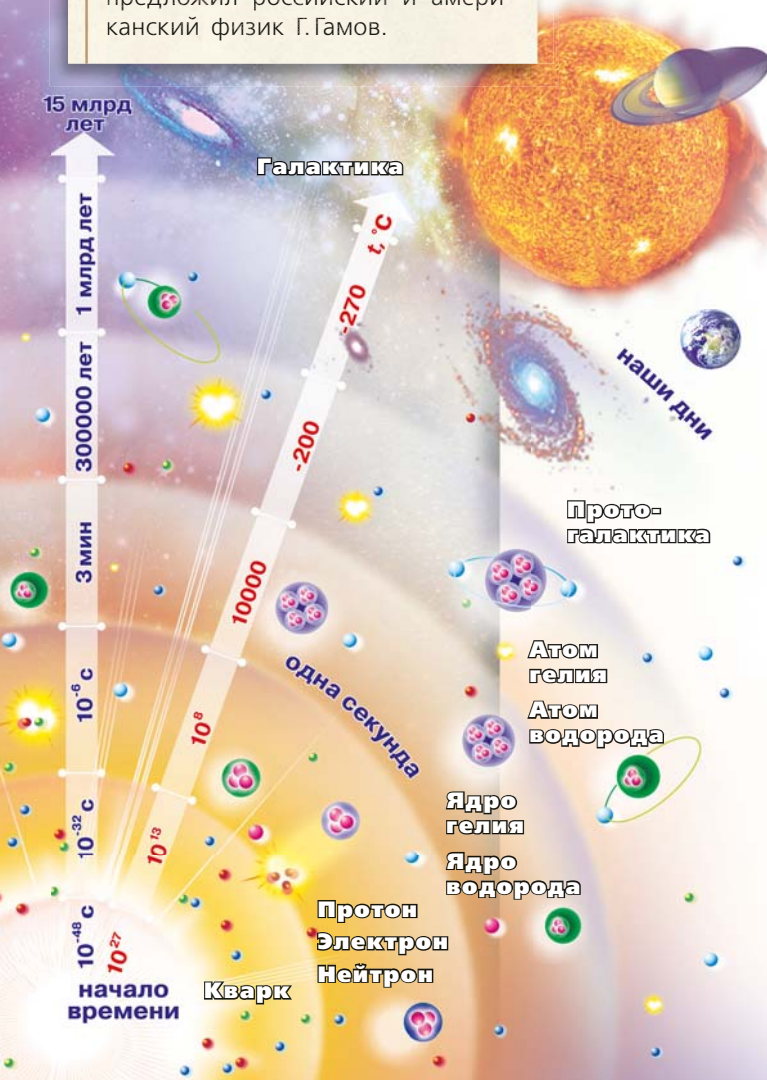
$$1,3 \cdot 10^{10} \text{ лет} = 3,9 \cdot 10^{17} \text{ с,}$$

легко подсчитать массу гелия, которая могла бы образоваться во всех звёздах (10^{11} звёзд) за этот промежуток времени:

$$6,7 \cdot 10^{11} \text{ кг/с} \cdot 10^{11} \cdot 3,9 \cdot 10^{17} \text{ с} = 2,6 \cdot 10^{40} \text{ кг.}$$

Это составляет 13% от всей массы звёзд Галактики ($2 \cdot 10^{41}$ кг), что существенно меньше наблюдаемой массы гелия.

Исходя из этого астрофизик Г.Гамов пришёл к выводу, что основная масса гелия образовалась не в звёздах, а на ранних стадиях расширения Вселенной, ещё до формирования в ней звёзд. Если учесть, что образование гелия в



термоядерных реакциях возможно лишь при температуре свыше нескольких миллионов кельвинов, то на ранних этапах расширения Вселенная была не только плотной, но и горячей. Поэтому принятая в настоящее время модель расширяющейся Вселенной получила название *модели горячей Вселенной*.

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Итак, на ранних этапах расширения вещество Вселенной имело огромную плотность и очень высокую температуру. Было также излучение, которое находилось в равновесии с веществом. По мере расширения температура вещества уменьшалась и, следовательно, уменьшалась температура теплового излучения, которая к тому времени должна была снизиться до 3 К (-270°C).

Это предсказание современной космологии подтвердилось открытием в 1965 г. микроволнового излучения, максимум которого приходится на длину волны

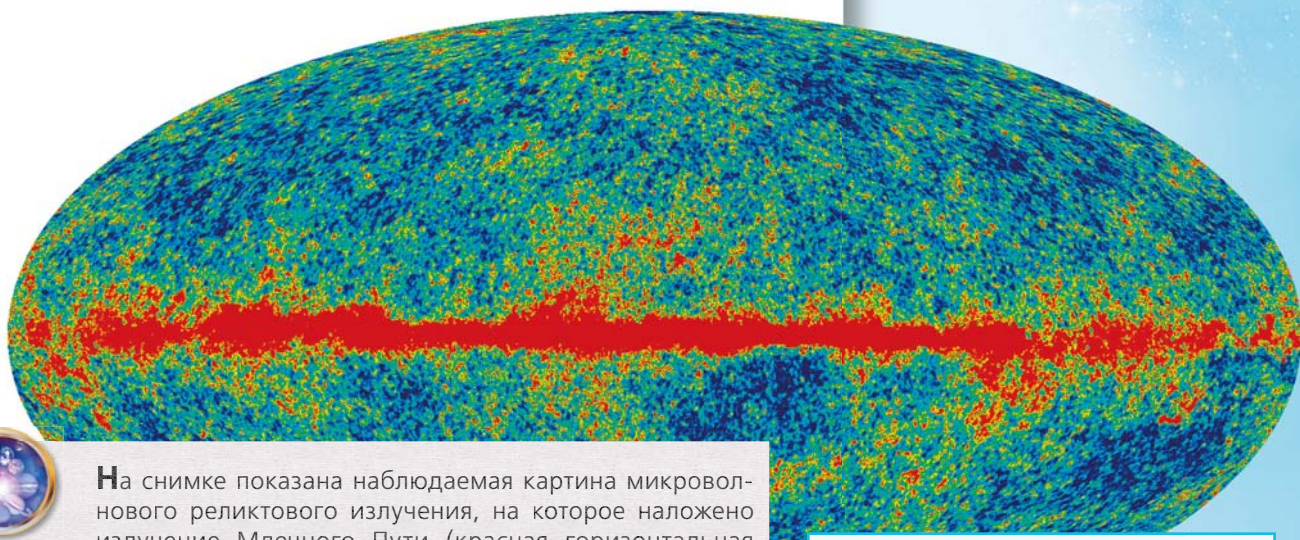
$$\lambda_{\text{max}} \sim 1,1 \text{ мм},$$

что согласно закону смещения Вина соответствует температуре излучения $T = 2,7 \text{ К}$.



Георгий (Джордж) Антонович Гамов
(1904—1968)

Выдающийся российский и американский физик-теоретик, астрофизик.



На снимке показана наблюдаемая картина микроволнового реликтового излучения, на которое наложено излучение Млечного Пути (красная горизонтальная полоса). Мелкозернистая структура распределения реликтового излучения указывает на неоднородности в распределении вещества в эпоху формирования излучения. Из этих неоднородностей в дальнейшем образовались звёзды и галактики.

Как показали наблюдения, это излучение не связано ни с одним из известных небесных тел или их систем. Оно равномерно заполняет видимую Вселенную, т. е. характеризует горячее и сверхплотное состояние вещества в начале расширения. Поэтому это излучение получило название *реликтового излучения*, т. е. оставшегося от ранних этапов эволюции Вселенной.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Объясните, почему современная модель расширяющейся Вселенной названа моделью горячей Вселенной.
- Что такое реликтовое излучение?
- Полагая, что радиус Вселенной возрастает в зависимости от времени, оцените, когда во Вселенной стали образовываться галактики (время, когда галактики касались друг друга).

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

ЗАДАЧА № 34

Полагая, что все масштабы во Вселенной меняются пропорционально радиусу Вселенной R , а максимум реликтового излучения приходится на длину волны $\lambda_{\text{max}} = 1 \text{ мм}$, оцените, на какой диапазон длин волн приходился максимум излучения и какой была температура излучения Вселенной в момент образования галактик.

● При большой плотности расширение Вселенной должно смениться сжатием, а геометрия Вселенной будет похожа на геометрию на сфере. Если плотность маленькая, то расширение будет вечным, геометрия Вселенной будет похожа на геометрию Лобачевского. Только при плотности, равной критической, геометрия будет Евклидовой, как на плоскости, и расширение будет вечным.

● Вселенная в прошлом была плотной и горячей настолько, что в ней шли термоядерные реакции синтеза гелия из водорода, именно по этой причине сейчас основная масса вещества состоит из водорода и гелия.

● Реликтовое излучение является излучением, которое осталось от горячего состояния вещества в начале расширения Вселенной.

ПОДРОБНЕЕ...

Дагаев М. М., Чаругин В. М. *Астрофизика. Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся.* — М.: Просвещение, 1988.

Ефремов Ю. Н. *Звёздные острова: Галактики звёзд и Вселенная галактик.* — Фрязино: Век 2, 2007.

Энциклопедия для детей. Т. 8. *Астрономия.* — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Возраст Вселенной 13,5 млрд лет. Сейчас мы наблюдаем в самые мощные телескопы первые галактики, от которых свет идёт почти 12,5 млрд лет, так что они излучили свет, когда возраст Вселенной был всего около миллиарда лет. Как вы думаете, нарастив мощь телескопов, сможем ли мы увидеть начало Вселенной или хотя бы первые часы?

● Как вы думаете, до каких глубин ранней Вселенной мы можем экстраполировать наши знания, хотя общая теория относительности, на которой основана современная космология, применима до нулевых размеров Вселенной?

● Как вы думаете, что было до того, как возникла Вселенная, которую мы наблюдаем?

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>

Глава 9

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АСТРОНОМИИ

- УСКОРЕННОЕ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ И ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ
- ОБНАРУЖЕНИЕ ПЛАНЕТ ОКОЛО ДРУГИХ ЗВЁЗД
- ПОИСК ЖИЗНИ И РАЗУМА ВО ВСЕЛЕННОЙ

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

Вопрос о происхождении жизни, о её разумных формах волновал науку с античных времён. Римский философ Лукреций Кар (98–55 гг. до н.э.) в своей поэме «О природе вещей» писал: «Весь этот видимый мир вовсе не единственный в природе, и мы должны верить, что в других областях пространства имеются другие земли с другими людьми и другими животными».

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как тёмная материя увеличивает массу Вселенной.
- Как открыли ускоренное расширение Вселенной.
- Какова природа силы всемирного отталкивания.

ВСПОМНИТЕ:

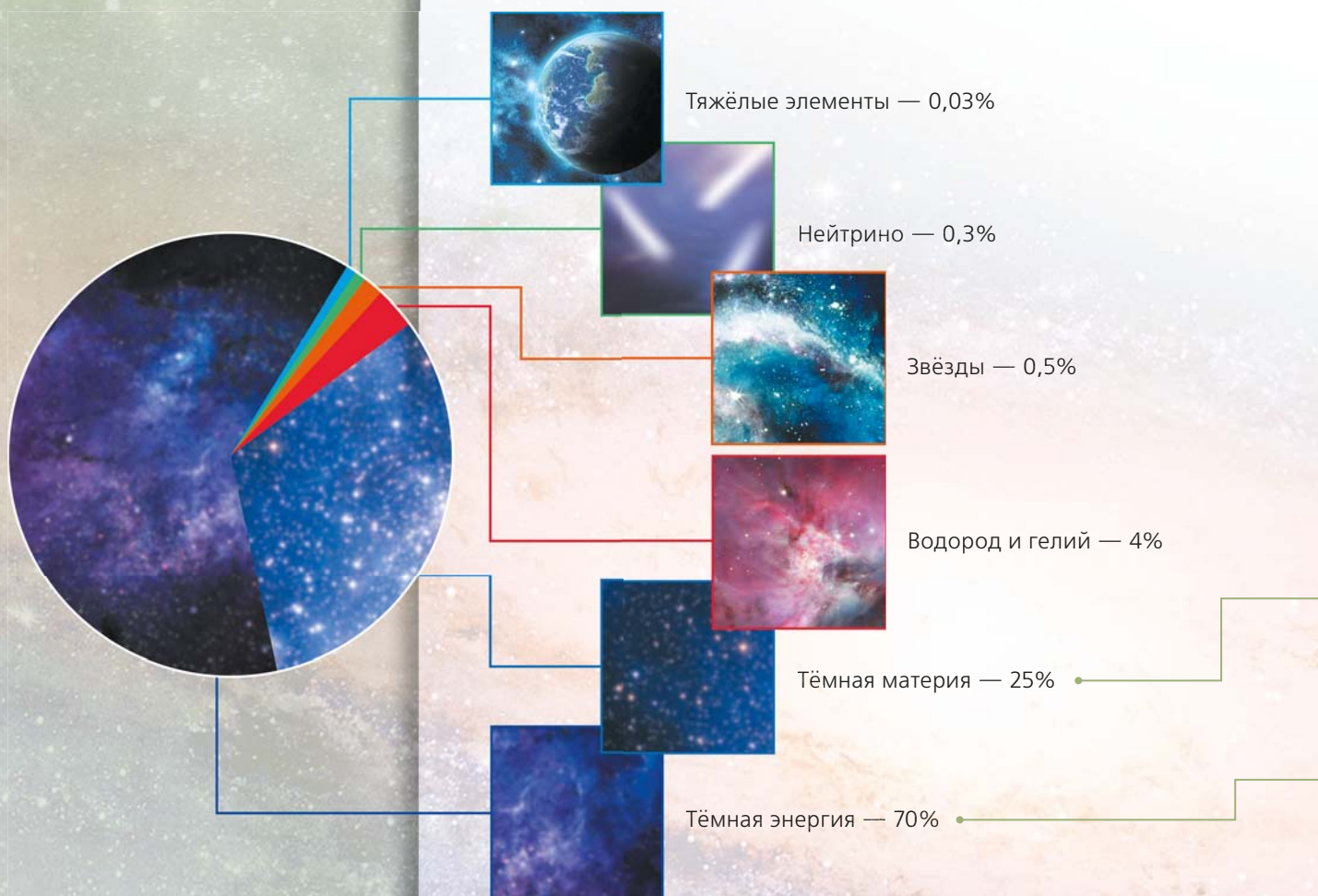
- Какой закон описывает расширение Вселенной?

УСКОРЕННОЕ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ И ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Исследуя собственное вращение галактик, астрономы обратили внимание на то, что скорости звёзд, 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.

ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ 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 приведённое значение средней плотности Вселенной нужно увеличить почти в три раза.



УСКОРЕННОЕ РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ И ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Делать выводы о бесконечном расширении Вселенной пока преждевременно, так как ряд наблюдений указывают на существование во Вселенной более экзотической по свойствам тёмной материи, которая получила название *тёмной энергии*. По своей массе она превышает все другие формы материи и вносит основной вклад в расширение Вселенной.

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 определить расстояние до них. Оказалось, что это расстояние больше, чем даёт 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 определённого 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 тёмная материя и энергия стала преобладать над обычной материей, когда возраст Вселенной был около 7 млрд лет.

Тёмная материя не испускает электромагнитного излучения и потому не доступна для наблюдения. Её можно обнаружить только по её массе, т.е. гравитационному влиянию на другие объекты, в том числе и свет.

Тёмная энергия влияет на скорость расширения Вселенной.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое тёмная материя и тёмная энергия?
- Полагая, что радиус Вселенной возрастает пропорционально времени, оцените, в какой момент времени от начала Вселенной в расширении стала преобладать тёмная энергия.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЛАНЕТ ОКОЛО ДРУГИХ ЗВЁЗД

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие наблюдения указывали на существование невидимых спутников у звёзд.
- Какими методами можно обнаружить экзопланеты.
- Какие наблюдения указывали бы на существование жизни на поверхности экзопланет.

ВСПОМНИТЕ:

- Какими методами проводятся астрономические наблюдения?

В начале XIX в., изучая собственное движение звёзд, астрономы обратили внимание на то, что движение Сириуса не было прямолинейным, он испытывал периодические отклонения от прямой траектории. Было предположение, что вокруг Сириуса вращается невидимая звезда, которая своим притяжением приводит к видимым колебаниям Сириуса.

НЕВИДИМЫЕ СПУТНИКИ ЗВЁЗД

Когда для наблюдений стали использовать более мощные телескопы, около Сириуса обнаружили слабую звезду — белый карлик. Это открытие подтолкнуло астрономов к более тщательному исследованию движений звёзд.

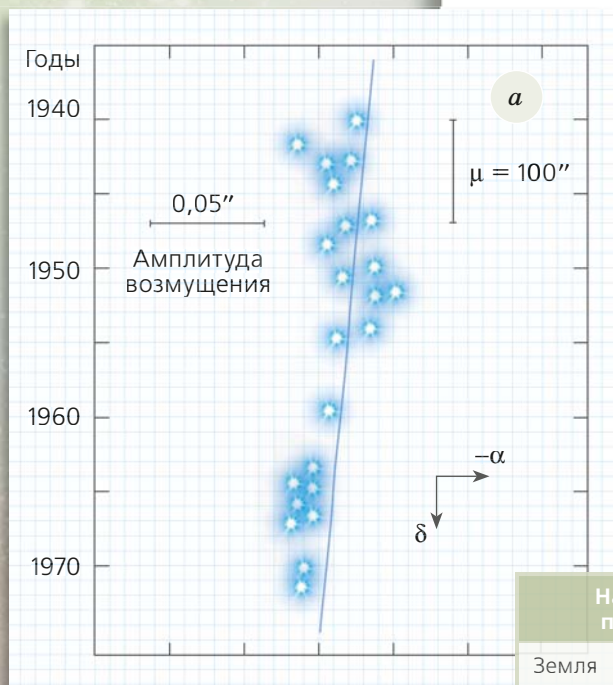
Рассмотрим схему наблюдаемого пути близкой к нам звезды Барнарда за 30 лет (a). Сплошная линия — невозмущённое движение звезды на фоне далёких звёзд. Кружки показывают реальное возмущённое движение, вызванное тёмными спутниками.

Теоретический анализ движения показал существование вокруг неё трёх спутников. Первый находится на расстоянии 1,8 а.е., второй — 2,8 а.е., третий — 4,5 а.е. от звезды Барнарда, а их массы соответственно равны 1,3, 0,6, 0,7 массы Юпитера.

Возможно, вокруг звезды вращаются и менее массивные спутники с массами, сравними с массой Земли, но их влияние на движение звезды настолько мало, что их трудно обнаружить.

Потенциально обитаемые экзопланеты

Название планеты	Индекс подобия	Расстояние (св. лет)	Год открытия
Земля	1.00	0	—
Kepler-438b	0,90	470	2015
Проксима Центавра b	0,87	4,224	2016
Kepler-296e	0,85	1089,6	2014
KOI-3010.01	0,84	1213,4	2011
Gliese 667 Cc	0,84	23,6	2011
Kepler-442b	0,83	1291,6	2015
Kepler-62e	0,86	1199,7	2013
Kepler-452b	0,83	1400	2015
Gliese 832 c	0,81	16,1	2014
Kepler-283c	0,79	1496,8	2011



МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

В настоящее время для поиска планет за пределами Солнечной системы (экзопланет) используют и другие методы, основанные на наблюдениях: по ослаблению света от звезды, когда планета проходит по её диску и заслоняет часть звезды; по измерению доплеровского смещения спектральных линий в звёздном спектре из-за движения звезды вокруг центра масс звезды и экзопланеты.

Трудность поиска экзопланет состоит в том, что для обнаружения планеты типа Земли скорости, которые нужно измерить, составляют несколько метров в секунду, а ослабление света звезды составит доли процента.

ЭКЗОПЛАНЕТЫ С УСЛОВИЯМИ, БЛАГОПРИЯТНЫМИ ДЛЯ

ЖИЗНИ

Несмотря на все трудности, к настоящему времени обнаружено свыше 4000 экзопланет. В основном это планеты-гиганты. Среди них сотни планет с массами, сравнимыми с массой Земли, и около 40 экзопланет, расположенных на расстояниях от звезды, на которых они получают достаточно тепла для формирования комфортных условий жизни на поверхности. Среди них есть близкие к Земле, например планеты, расположенные около звезды τ Кита.

Теперь основная цель наблюдений — обнаружение атмосферы у этих экзопланет и определение её химического состава. Если в химическом составе будет обнаружен кислород, углекислый газ, метан, то на этих планетах возможно наличие жизни.



Открытие большого числа экзопланет заставило учёных более глубоко исследовать проблемы возникновения и эволюции жизни на планетах. Так, вне зоны, благоприятной для жизни вокруг Солнца, на спутнике Юпитера Европе под ледяной корой существует гигантский тёплый водяной океан, подогреваемый теплом, выделяемым за счёт действия приливных сил со стороны Юпитера и соседних спутников. В этом океане могут существовать и развиваться живые организмы. Поэтому в будущем планируются запуски спускаемых аппаратов на Европу, которые проникнут в этот океан. Более того, высказывались обоснованные предположения о существовании жизни на поверхности спутника Сатурна Титана, на котором обнаружены реки и озёра с жидким метаном и метановые облака. Как считают учёные, при тех низких температурах метан по своим физическим свойствам похож на воду при земных условиях и может служить основой для жизни.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Что такое экзопланеты?
- Какими методами они обнаруживаются?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как развивались представления о существовании жизни во Вселенной.
- Как оценивают количество высокоразвитых цивилизаций в Галактике.
- Как пытались обнаружить и послать сигналы внеземным цивилизациям.

ВСПОМНИТЕ:

- Какими способами астрономы ведут поиски экзопланет?

За эти взгляды, противоречащие священному писанию, католическая церковь жестоко расправилась с Дж. Бруно. Судом святейшей инквизиции он был признан неисправимым грешником и сожжён заживо в Риме на площади Цветов 17 февраля 1600 г.

ПОИСК ЖИЗНИ И РАЗУМА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Благодаря церкви, которая опиралась на учение Птолемея, Земля считалась центром Вселенной. Жизнь и человек созданы Богом только на Земле. И только гениальный Н. Коперник в первой четверти XV в. низвёл Землю из центра Вселенной, поместив её на третье место от центрального Солнца.

ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ Первые телескопические наблюдения Г. Галилея показали, что на Луне видны горы и моря, как на Земле. Напрашивался вывод о возможности жизни на ней.

Эти мысли ясно выразил Дж. Бруно, ярый приверженец теории Коперника. Он писал: «Существуют бесчисленные солнца, бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца... На этих мирах обитают живые существа».

Многие астрономы искали проявление жизни на планетах Солнечной системы. Так, открытие Дж. Скиапарелли каналов и морей на Марсе во время Великого противостояния планеты в конце XIX в. вызвало большой интерес к проблеме связи с марсианской цивилизацией. Предлагали прорубить в сибирской тайге просеки в виде теоремы Пифагора с гигантскими квадратами на катетах и гипотенузе, засеять их пшеницей, и тогда на зелёном фоне тайги «марсиане» увидят этот рисунок и в конце концов дадут нам знать о себе.

ФОРМУЛА ДРЕЙКА К проблеме поиска связи с внеземными цивилизациями учёные обратились в конце 50–60 гг. XX в. Учёные К. Саган, Ф. Дрейк и И. Шкловский попытались на основе знаний из астрономии, биологии, химии, социологии и других естественных наук оценить количество разумных цивилизаций в нашей Галактике, с которыми мы могли бы надеяться связаться в настоящее время. Фрэнк Дрейк предложил следующую формулу для оценки числа $N_{\text{ц}}$ цивилизаций в Галактике:

$$N_{\text{ц}} = R_{\text{зв}} \cdot f_{\text{пл}} \cdot n \cdot f_{\text{ж}} \cdot f_{\text{раз}} \cdot f_{\text{св}} \cdot T,$$

где $R_{\text{зв}} \cong 1$ звёзд/год — скорость образования звёзд спектральных классов от F до M. Время жизни этих звёзд свыше 4 млрд лет, что достаточно для возникновения и эволюции жизни до разумной на планете;

$f_{\text{пл}} \cong 1$ — доля звёзд, имеющих планетные системы, т. е. полагают, что все солнцеподобные звёзды имеют планетные системы;

$n \cong 0,1$ — среднее число планет в планетной системе, имеющих благоприятные для жизни условия (в Солнечной системе только Земля, т. е. $n = 1/8$);

$f_{\text{ж}} \cong 1$ — доля планет, у которых при хороших условиях рано или поздно жизнь обязательно возникнет, как на Земле;

$f_{\text{раз}} \cong 1$ — доля планет, где жизнь возникла и благодаря естественному отбору эволюционировала в разумную;

$f_{\text{св}} \cong 1$ — доля возникших высокоразвитых цивилизаций, у которых появилось желание и возможность связи с другими цивилизациями;

T — время жизни высокоразвитой цивилизации в годах. Полагают, что наша высокоразвитая цивилизация уже прожила почти 60 лет, начиная с того момента, как мы построили радиотелескопы и получили возможность посылать сигналы с Земли и принимать сигналы из космоса. Если мы не уничтожим сами себя, то наша цивилизация просуществует несколько миллионов лет.

Подставив в формулу Дрейка приведённые цифры, получим число цивилизаций в нашей Галактике:

$$N_{\text{ц}} \cong 100\,000.$$

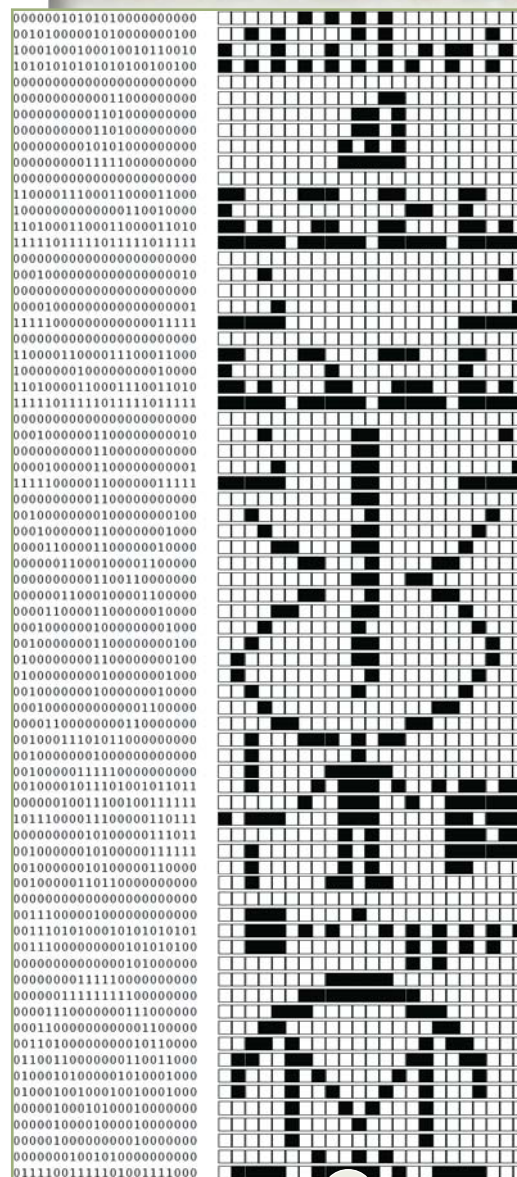
Одна высокоразвитая цивилизация на 1 000 000 звёзд!

Расчёты показали, что в Млечном Пути должно быть от одной цивилизации (нашей земной) до миллиона. В крупные радиотелескопы астрономы пытаются услышать эти цивилизации. Первые наблюдения в рамках поиска внеземных цивилизаций были проведёны в 1960 г. Тогда астрономы, используя радиотелескоп с диаметром антенны в 25 м, прослушивали две близкие звезды, похожие на Солнце, τ Кита и ϵ Эридана в надежде услышать радиосигналы искусственной природы. Сигналы пока так и не были обнаружены.

С помощью гигантских антенн радиотелескопов Центра дальней космической связи в Евпатории были отправлены послания в сторону нескольких ближайших звёзд, похожих на наше Солнце.



В 1974 г. с радиотелескопа в Аресибо было отправлено послание **а** в сторону шарового скопления М13 в созвездии Геркулеса, содержащее 1679 бит информации и посланное на радиочастоте 2380 Мгц (длина волны 12,6 см). Сообщение представляет собой развёртку кадра с 23 столбцами и 73 строками. На развёртке изображена фигура человека и схема Солнечной системы. Справа указан рост в единицах длины волны ($14 \times 12,6 \text{ см} = 176 \text{ см}$). Слева — численность населения Земли (около 4 млрд человек, в двоичной системе). В верхней части — последовательность чисел от 1 до 10 в двоичном коде. Затем следует последовательность чисел 1, 6, 7, 8 и 15 — порядковые номера важнейших для нас химических элементов: водорода, углерода, азота, кислорода и фосфора. Под ними 12 групп из пяти чисел каждая — это формулы важнейших для жизни молекул. И ещё ниже — двойная спираль молекулы ДНК. До скопления М13 сигнал будет двигаться 25 000 лет и обратно столько же, если нам ответят. Так что через 50 000 лет мы всё узнаем!



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какое время для жизни развитой цивилизации вы подставили бы в формулу Дрейка и почему?
- Некоторые учёные полагают, что $T = 100$ лет. Как вы думаете, правы они или нет?
- Почему из анализа формулы Дрейка исключили более горячие звёзды спектральных классов О, В и А?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

ЗАДАЧА № 35

Так как основное количество звёзд в Галактике концентрируется в сравнительно тонком диске с радиусом $R \approx 15\,000$ пк и толщиной $h \approx 1000$ пк, и полагая, что $N_{\text{ц}} = 100\,000$ развитых цивилизаций распределены среди звёзд равномерно, оцените расстояние до ближайшей цивилизации. Сколько лет лететь до неё даже со скоростью, близкой к скорости света?

● Наблюдения вспышек сверхновых звёзд в очень далёких галактиках позволили определить расстояния до них независимо от метода красных смещений. Полученное различие в оценках расстояний указывает на ускоренное расширение Вселенной на больших расстояниях. Это говорит о том, что наряду с силой всемирного тяготения между телами во Вселенной действует сила всемирного отталкивания.

● По-видимому, эта сила отталкивания является проявлением особой формы материи, которая называется тёмной энергией. Одним из её свойств является то, что она обладает отрицательным давлением.

● В настоящее время обнаружено свыше 4000 экзопланет, определены их массы и расстояния до звезды, вокруг которой они обращаются. Среди них всего около 40 с массами, сравнимыми с массой Земли, и расположенных на расстояниях от звезды, обеспечивающих комфортные условия для образования и эволюции жизни на ней.

● Для поиска внеземных цивилизаций проводится прослушивание космического пространства, а также посылаются закодированные послания в области Галактики, где, возможно, существует разумная жизнь.

ПОДРОБНЕЕ...

Ефремов Ю.Н. Звёздные острова: Галактики звёзд и Вселенная галактик. — Фрязино: Век 2, 2007.

Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. — М.: Едиториал УРСС, 2002.

Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. — М.: Аванта+, 2013.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Мы говорим, что если экзопланета находится в пределах определённых расстояний от звезды, то на ней возможно возникновение и эволюция жизни. Чем определяются эти условия и пределы расстояний (их ещё называют поясом жизни вокруг звезды)?

● Почему у звёзд спектральных классов O, B и A не стоит искать разумную жизнь?

Астронет
<http://www.astronet.ru>

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

Популярная механика
<http://popmech.ru>



ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

Глава 1

1. *Ответ:* $R \approx r \cdot \sin \theta = 4,7$ св. лет; $t \approx r/v \approx 1000$ лет назад. 2. *Ответ:* линейный диаметр $D = r \cdot \sin \theta = 25000 \cdot 6,7 \cdot 10^{-3} = 84$ св. лет; объём $V = \pi(D)^3/6 = 2,4 \cdot 10^6$ (св. лет)³, концентрация звёзд $n = N/V = 10^6/2,4 \cdot 10^6 = 0,4$ (св. лет)⁻³; среднее расстояние между звёздами $\approx 1/n^{1/3} = 1,4$ св. лет. Это расстояние в 4,5 раза меньше, чем расстояние до ближайшей звезды.

Глава 2

3. *Ответ:* $\alpha = 10^h 05^m$, $\delta = 12^\circ 30'$; Москва $h_{\text{вк}} = 90^\circ - \varphi + \delta = 47^\circ 45'$; Мурманск $h_{\text{вк}} = 33^\circ 32'$. 4. *Ответ:* Условие прохождения через зенит $h_{\text{вк}} = 90^\circ$ или $\varphi = \delta$, так что Солнце бывает в зените в пределах широт $-23,5^\circ \leq \varphi \leq 23,5^\circ$ — тропики, в пределах тропика Рака и Козерога. Условие невосходимости светила $h_{\text{вк}} < 0$ или широт $\varphi > 23,5^\circ$, поэтому в день зимнего солнцестояния, когда $\delta = -23,5^\circ$, на широтах $\varphi \geq -66,5^\circ$ за полярным кругом Солнце не восходит и наступает полярная ночь. 5. *Ответ:* $T_n = T_0 + n + 1$. В Краснодаре $T = 5^h 08^m$; в Иркутске $T = 11^h 08^m$. 6. *Ответ:* Всемирное время $T_0 = T_M - 3 = 9^h$, тогда $\lambda = T_\lambda - T_0 = 14^h 15^m 12^s$.

Глава 3

7. *Ответ:* $q = a(1 - e) = 2,12$ а. е., $Q = a(1 + e) = 3,42$ а. е., $T = a\sqrt{a} = 4,6$ года, $S = T_0 \cdot T/(T - T_0) = 1,28$ г, $V = 2\pi a/T = 30$ км/с, $\sqrt{a} = 18$ км/с. 8. *Ответ:* $V_{2M} = 4,2$ км/с, $V_{2A} = 7$ см/с. Так что на астероиде лучше не прыгать, а то улетишь навсегда. 9. *Ответ:* $a_{\text{КА}} = 0,86$ а. е., время полёта $t_{\text{КА}} = 0,4$ года = 146 суток. Угол между направлением от Венеры к Солнцу и от Солнца к Земле равен $(\omega_B - \omega_Z) \cdot t_{\text{КА}} = (1,6 - 1) \cdot 146 = 87,6^\circ$, т. е. вблизи наибольшего восточного удаления Венеры. Последующий запуск КА к Венере через синодический период 1,6 года. 10. *Ответ:* период обращения спутника $T = 24$ звёздных часа, плоскость орбиты совпадает с плоскостью земного экватора, орбита является круговой. Радиус круговой орбиты $a = \sqrt[3]{GMT^2/4\pi^2} = 4,2 \times 10^7$ в = 42 000 км. Высота над поверхностью Земли около 36 000 км. 11. *Ответ:* пусть $\omega_0 = 360^\circ/T_0$ — угловая скорость, Земли $\omega = 360^\circ/T$ — угловая скорость планеты. Как видно из рисунка, нижнее соединение планеты (1) повторится через синодический период уже в другом мест орбиты (2). Земля пройдёт путь $L_0 = \omega_0 \cdot S$, $L = \omega \cdot S$. Как видно из чертежа $L - L_0 = 360^\circ$. Отсюда получаем уравнение синодического движения $1/S = 1/T - 1/T_0$. Для Венеры $T = 0,615$ года, $S = T_0 \cdot T/(T_0 - T) = 1,6$ года.

Глава 4

12. *Ответ:* эксцентриситет $e = 0,017$, $Q = 1,017$ а. е., $q = 0,983$. Мы ближе к Солнцу в перигелии, чем в афелии на 5,1 млн км. 13. *Ответ:* $R = a \cdot \sin \theta = 150 \cdot 10^6 \cdot 5,2 \times \sin 23,4'' = 71000$ км. Так как $V = 2\pi R/T = \sqrt{2GM/R}$, $M = 2\pi R^3/GT = 1,9 \cdot 10^{27}$ кг, $\rho = 340$ кг/м³. 14. *Ответ:* среднее расстояние (большая полуось орбиты) от Солнца равно $a = T^{2/3} = 17,94$ а. е., афелийное расстояние $Q = 2a - q = 35,4$ а. е. 15. *Ответ:* $E_\phi/E_\sigma = (a_\sigma/a_\phi)^2 = 15,5$. 16. *Ответ:* сравним силы притяжения небесного тела с массой m Солнцем и планетой Земля на расстоянии r от планеты. Если a — расстояние планеты от Солнца, то $F_\odot = GM_\odot \cdot m/(a - r)^2 = GM_\odot \cdot m/r^2$. Полагая, что $r \ll a$, имеем, что $r \propto a \times \sqrt{M_\odot/M_\oplus}$, $\rho = 150 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^{24}/2 \cdot 10^{30}} = 260000$ км. Интересно, что Солнце притягивает Луну сильнее, чем Земля, так как она находится на расстоянии большем, чем радиус действия силы тяготения Земли.

Глава 5

17. *Ответ:* $\theta = 140''/D$ (мм). Для первого телескопа $\theta = 1,4''$, для второго телескопа $0,14''$. Оптическая мощь — наименьший блеск звезды $m_T = 2,1 + 5 \lg D$ (мм); для первого телескопа $m_T = 7,1^m$ для второго телескопа $m_T = 17,1^m$. 18. *Решение.* $r = 1/\pi = 1,3$ пк = 268 000 а. е., $m = -26,74 + 5 \lg 268000 = +0,4^m$. 19. *Решение.* Используем формулы $L = \sigma T^4 4\pi R^2$, $R = r \cdot \sin(\theta/2)$, $r = 1/\pi$ пк, 1 пк = $3 \cdot 10^{16}$ м. *Ответ:* а) 13 600 К; б) 8400 К; в) 3000 К. 20. *Решение.* $a = a''/\pi'' = 76$ а. е., $M^1 + M^2 = a^3/T^2 = 1,6M_\odot$.

21. Решение. Диаметр $D = r \cdot \sin \theta = 0,43 \text{ пк} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ км}$. Линейная скорость расширения $v_{\text{расш}} = r \cdot \sin 0,01'' \approx 30 \text{ км/с}$. Возраст $t \approx \theta/\omega = 13000 \text{ ктп}$. **22. Решение.** $r_{\text{ПК}} = 1/\pi = 1/0,0062 \approx 161 \text{ пк} = 530 \text{ св. лет}$. Освещённость $E = 10 - 0,4^{(19+m)} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$. Так как освещённость $E \sim 1/r^2$, то из формулы (с. 91) имеем $M = m + 5 - 5 \times \lg r_{\text{ПК}} = 0,8 + 5 - 5 \lg 200 = -5,5^m$. **23. Решение.** Используя спектральную классификацию, определяем температуру звезды, по параллаксу находим расстояние до звезды, по связи освещённости E со звёздной величиной находим E , а по расстоянию находим светимость $L = E4\pi r^2 = \sigma T^4 4\pi R^2$. **Ответ:** $\theta = 2R/r = 0''0014$, $38_{\odot} D_{\odot}$; $\theta = 0'',0017$, $23 D_{\odot}$.

Глава 6

24. Ответ: Энергия электрона должна быть больше энергии, излучённого гамма кванта $E \geq \varepsilon_{\gamma} \approx 2 \text{ ГэВ} = 4000 \text{ мс}^2$, здесь $mc^2 = 0,5 \text{ МэВ}$ — энергия покоя электрона. Согласно теории относительности $E = mc^2/\sqrt{1 - (v/c)^2}$. Поэтому $v = c\sqrt{1 - (mc^2/E)^2} \approx c(1 - 0,000000003)$, т.е. отличаться всего на 9 м/с от скорости света. **25. Решение.** Освещённость, создаваемая скопление на Земле $E = 10^{-0,4(19+m)} \approx 10^{-10} \text{ Вт/м}^2$. Светимость скопления $L = 4\pi \cdot r^2 \cdot E = 6,5 \cdot 10^{31} \text{ ит/м}^2 \approx 150\,000$ звёзд типа Солнца. **26. Ответ:** $M = +4,8^m$, эта звёздная величина называется абсолютной звёздной величиной. **27. Решение.** Объём облака равен $V = \pi R^2 H \approx 0,02 \text{ пк}^3 = 5,4 \cdot 10^{53} \text{ см}^3$, а масса облака равна $M = n \cdot m_{\text{H}} \cdot V \approx 9 \cdot 10^{36} \text{ г} = 4500 M_{\odot}$, т.е. может образоваться скопление 4500 звёзд с массами, сравнимыми с солнечной.

Глава 7

28. Решение. Центростремительное ускорение равно ускорению силы тяжести, поэтому $M = v^2 \cdot r/G = 9 \cdot 10^{41} \text{ кг} = 4,5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$. **29. Решение.** $v = Z \cdot c = 47000 \text{ км/с}$. Из закона Хаббла находим $r = v/H = 47000 \text{ км/75 (км/с} \cdot \text{Мпк)} \approx 630 \text{ Мпс}$. Освещённость на Земле $E = 10^{-0,4(19+m)} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ Вт/м}^2$, светимость $L = 4\pi r^2 \cdot E = 9 \cdot 10^{38} \text{ Вт} \approx 2 \cdot 10^{12} L_{\odot}$. Потеря массы каждую секунду $\Delta M = L/c^2 = 10^{22} \text{ кг/с} \approx 1,7 M_{\odot}$. **30. Решение.** Радиус $R = r \cdot \sin \theta = 16 \cdot \sin 6^\circ = 1,6 \text{ Мпк}$, объём $V = 4\pi/3 R^3 = 17 \text{ Мпк}^3$, концентрация галактик $n = N/V = 2500/17 \approx 150 \text{ Мпк}^{-3}$. Среднее расстояние между галактиками $l \approx 1/\sqrt[3]{n} \approx 0,2 \text{ Мпк}$. Всего в несколько десятков раз превышают размеры галактик. Наверное, они часто сталкиваются друг с другом. **31. Решение.** $M = n \cdot m_{\text{H}} \cdot V = 10^3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-27} \cdot 4,6 \cdot 10^{65} = 7,8 \cdot 10^{42} \text{ кг} = 3,9 \cdot 10^{13} M_{\odot}$, т.е. масса сравнима с массой нескольких сотен галактик.

Глава 8

32. Решение. В настоящее время возраст Вселенной $t = t_{\text{вс}} \approx 13 \cdot 10^9$ лет, расстояние между галактикам r примерно в 20 раз больше их диаметров D , так как в процессе расширения Вселенной размеры галактик практически не менялись, то за момент образования галактик можно принять время $t_{\text{Г}}$, когда галактики соприкасались, т.е. когда расстояние между их центрами было равно их диаметру: $r(t_{\text{Г}}) = D$. $r(t_{\text{Г}})/r(t_{\text{вс}}) = t_{\text{Г}}/t_{\text{вс}} = D/20D = 1/20$. $t_{\text{Г}} = t_{\text{вс}}/20 = 650 \text{ млн лет}$. Галактики стали образовываться во Вселенной, когда её возраст был около 650 млн лет. **33. Решение.** В настоящее время расстояние между галактиками примерно в 20 раз превышает их диаметры, а в момент образования можно считать, что они соприкасались, т.е. расстояние между центрами галактик было сравнимо с их диаметрами, а радиус Вселенной составлял 1/20 от современного радиуса. Так как плотность $\rho \sim R^{-3}$, то в эпоху образования галактик $\rho = \rho_0(R_0/R)^3 = 1,3 \cdot 10^{-27} \cdot 20^3 \approx 10^{-23} \text{ кг/м}^3$. **34. Решение.** Используя закон смещения Вина и современное значение температуры реликтового излучения $T_0 = 2,7 \text{ К}$, а также, что $\lambda \sim R$, имеем в момент образования галактик: $\lambda = \lambda_{\text{max}}(R_{\text{Г}}/R_0) = 1 \text{ мм}/20 = 0,05 \text{ мм} = 5000 \text{ А}$, т.е. максимум излучения приходился на оптический диапазон длин волн. Так как $T \sim 1/\lambda$, то $T = T_0 \cdot (R_0/R) = 2,7 \cdot 20 = 54 \text{ К}$.

Глава 9

35. Решение. Объём Галактики, в которой сосредоточено основное количество звёзд $V = \pi \cdot R^2 \cdot h = 8 \cdot 10^{11} \text{ пк}^3$. Средняя концентрация цивилизаций $n_{\text{ц}} = N_{\text{ц}}/V = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ 1/пк}^3$, тогда среднее расстояние между цивилизациями будет $l \approx 1/\sqrt[3]{n_{\text{ц}}} = \sqrt[3]{8 \cdot 10^6} = 200 \text{ пк} = 650 \text{ св. лет}$, так что лететь к ним со скоростью, близкой к скорости света придётся около 650 лет.