

С.М. Андрюшечкин

ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ



$E=mc^2$

2022

С. М. АНДРЮШЕЧКИН

ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ИЗДАТЕЛЬ
С. М. АНДРЮШЕЧКИН
2022

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я72
А65

Рецензенты:

Сурдин В. Г. – кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета МГУ, старший научный сотрудник отдела изучения Галактики и переменных звёзд ГАИШ
(г. Москва, Россия)

Рыб К. А. – преподаватель астрономии и физики лицея «ЛОРД»
(г. Петропавловск, Казахстан)

А65 Андрюшечкин, С. М.

Основы астрономии : учебное пособие / С.М. Андрюшечкин. – Москва : Издатель С. М. Андрюшечкин, 2022. – 88 с.

ISBN 978-5-6046327-2-7

Учебное пособие предназначено для учащихся старших классов общеобразовательных организаций. Содержание пособия составляет рассмотрение основ астрономических знаний в следующем порядке: происхождение и эволюция Вселенной – галактики – звёзды – Солнечная система.

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я72

Данное учебное пособие в целом и никакая его часть не могут быть скопированы без разрешения владельца авторских прав.

ISBN 978-5-6046327-2-7

© Андрюшечкин С. М., 2022

Оглавление

Предисловие	4
§ 1. Происхождение и эволюция Вселенной	6
Космология и её теоретический базис	6
Основные свойства Вселенной. Закон Хаббла	12
Сценарии эволюции Вселенной	18
Модель горячей Вселенной	19
Вершина «айсберга»	20
§ 2. Галактики	23
Крупномасштабная структура Вселенной	23
Галактики. Общая характеристика	25
Наша Галактика – Млечный Путь	28
Чёрные дыры	31
§ 3. Звёзды	34
Основные характеристики звёзд	34
Звёзды: их рождение, жизнь и смерть	36
Переменные звёзды	41
§ 4. Солнечная система	44
Происхождение и эволюция Солнечной системы	44
Система «Земля – Луна»	48
Планеты Солнечной системы	50
Законы движения планет	59
Изменчивая картина	63
Самое важное в пособии «Основы астрономии»	70
P. S.	71
Ответы к заданиям	72
Предметно-именной указатель	72
Список литературы	74

Предисловие

Новая Российская энциклопедия определяет астрономию как науку о природе и свойствах небесных тел, о строении Вселенной¹.

В качестве самостоятельного обязательного предмета астрономия вернулась в старшие классы российской школы сравнительно недавно, а до того времени комплекс астрономических знаний излагался в школьном курсе физики.

Это не случайно – ведь ещё в начале прошлого века ученые указывали, что «Цели преподавания элементарной астрономии или космографии: обобщение законов механики, физики и углубление их в представлении учащихся»². По этой причине сведения из всех разделов астрономии не могут не рассматриваться с опорой на школьный курс физики. Например, часть вопросов, рассматриваемых в пособии, составляла ранее содержание одного из разделов учебника физики³. При этом в пособии автор позволил себе отдельные вопросы осветить более подробно, чем в учебнике, и отказался от деления учебного материала на обязательный и дополнительный материал.

Изложение основ астрономических знаний идёт в следующем порядке: происхождение и эволюция Вселенной – галактики – звёзды – Солнечная система. Такой подход позволяет «смещать фокус» от рассмотрения наиболее общих форм организации материи к её более «мелким» структурам, тем самым прослеживая основные этапы её развития.

¹ Новая Российская энциклопедия: В 12 т. / Редкол.: А. Д. Некипелов, В. И. Данилов-Данильянц, В. М. Карев и др. Москва: Изд-во «Энциклопедия»: ИД «ИНФРА-М», 2003. Т. 2: А–Баяр. 2005. С. 663.

² Труды Всероссийского совещания преподавателей физики, химии и космографии / под ред. А. А. Глаголевой, Е. Е. Дьякова, С. Н. Жаркова и др. Москва, 1918. С. 225.

³ Андриюшечкин, С. М. Физика. 11 кл. : учеб. для общеобразоват. организаций (базовый уровень) / С. М. Андриюшечкин. Москва: Баласс, 2013. 336 с.

Условные обозначения, использованные в пособии:



– вопрос, на который следует ответить, прежде чем дальше читать текст пособия;



– формулировка проблемы;






– важнейшие понятия, которые следует запомнить;



– основные понятия, изученные в параграфе. Понятия, набранные **жирным** шрифтом, наиболее важные.

Каждый параграф пособия завершается заданиями, выполнение которых поможет вам лучше освоить изучаемый материал. Рядом с номером задания имеется кружок, цвет которого указывает на то, какие умения формируются при выполнении задания:

-  – задания учат организовывать свою деятельность: ставить цели, планировать шаги по её достижению, оценивать результат;
-  – задания учат работать с информацией: находить, осмысливать и критически оценивать её, преобразовывать и использовать, фиксировать различными способами;
-  – задания на развитие предметных умений.

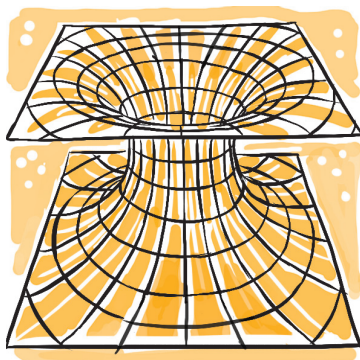
Успехов!



Вспомните, что вы изучали ранее и ответьте на вопросы:

- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Каков источник энергии звёзд?
- Какие небесные тела входят в состав Солнечной системы?

§ 1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ



Всё течёт, всё меняется.
Высказывание, приписываемое
Гераклиту из Эфеса (ок. 520 – ок. 460 до н. э.),
древнегреческому философу

Вам уже известны основы физических теорий, описывающих законы движения различных форм материи.

Космология и её теоретический базис.

Космология (от греческого *kósmos* – мир, Вселенная и *lógos* – слово, учение) – раздел астрономии, изучающий Вселенную как единое целое. На протяжении всей истории человеческой цивилизации представления о строении окружающего мира являлись неотъемлемым элементом человеческой культуры, отражая опыт научного познания природы, соответствующий определённой эпохе.

Задача изучения Вселенной как единого целого означает рассмотрение физических явлений гигантского масштаба и в пространстве, и во времени. По этой причине в космологии, как правило, используют специальные единицы измерения расстояния – астрономическая единица, световой год, парсек. *Астрономическая единица* (сокращённо обозначается а. е.) – внесистемная единица длины, используемая в астрономии, близкая к среднему расстоянию от Земли до Солнца.

$$1 \text{ а. е.} = 149\,597\,870\,700 \text{ м.}$$

$$1 \text{ а. е.} \approx 150 \text{ млн км.}$$

Световой год (сокращённо обозначается св. г., св. лет) – расстояние, которое свет проходит за год.

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

$$1 \text{ св. г.} \approx 9000 \text{ млрд км.}$$



Как вычислено значение светового года в километрах?

$$1 \text{ св. г.} = 9,33 \cdot 10^4 \text{ а. е.}$$

Парсек (сокращённо обозначается пк) – расстояние, с которого отрезок длиной в одну астрономическую единицу, перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в одну угловую секунду (рис. 1).

$$1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а. е.}$$

$$1 \text{ пк} \approx 3,26 \text{ св. лет.}$$

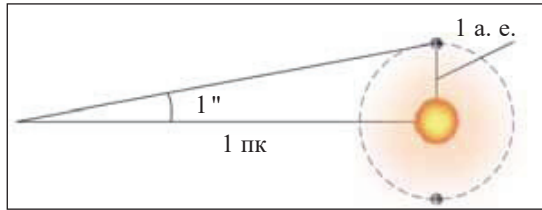


Рис. 1

Каким образом астрофизики измеряют гигантские расстояния во Вселенной? Один из способов – метод «стандартной свечи». Удалите две одинаковые зажжённые свечи на расстояние 1 и 2 м от места наблюдения. Очевидно, что от более удалённой (2 м) свечи в глаз наблюдателя будет поступать в четыре раза меньше световой энергии, чем от ближней (1 м) свечи. Действительно, ведь площадь сферы s , освещаемой свечой, зависит от квадрата радиуса сферы r :

$$s = 4\pi r^2.$$

Полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени, то есть мощность излучения, в астрономии называют *светимостью* звезды L . Так, светимость Солнца L_{\odot} составляет около $4 \cdot 10^{26}$ Вт.

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт.}$$

Астрономы, как правило, в качестве единицы измерения светимости используют не ватты, а за единицы светимости принимают светимость Солнца. Если, например, сказано, что светимость звезды Сириус равна $25L_{\odot}$, это означает, что мощность излучения звезды в 25 раз больше мощности Солнца.

Различные звёзды имеют разную светимость, которая и больше, и меньше, чем светимость Солнца. По этой причине, чтобы методом «стандартной свечи» сравнивать расстояния, на которые удалены астрономические объекты, необходимо, естественно, выбирать объекты одинаковой светимости.

Для измерения расстояний в космологических масштабах на роль «стандартной свечи» лучше всего подходят взрывы звёзд определённого типа. Так как эти взрывы происходят при достижении определённых физических условий в звезде, то их максимальная светимость (мощность) примерно одинакова и составляет около 3 млрд светимостей Солнца. При такой огромной светимости подобные астрономические объекты наблюдаются вплоть до расстояния в миллиарды световых лет.

Временные масштабы наиболее продолжительных космологических событий могут превосходить десятков миллиардов лет.

Теоретическую основу современной космологии составляет созданная в начале XX века Альбертом Эйнштейном *релятивистская теория тяготения – общая теория относительности*.

В основе теории тяготения Эйнштейна лежит факт равенства инертной массы, входящей в уравнение II закона Ньютона

$$F = ma, \quad (1.1)$$

и гравитационной массы, входящей в закон тяготения

$$F = \frac{GmM}{r^2}. \quad (1.2)$$

Инертная масса m является мерой инертности тела [уравнение (1.1)], гравитационная масса m характеризует свойство тела притягиваться к другому телу массой M [уравнение (1.2)].

Если эти массы равны, то из уравнений (1.1) и (1.2) можно выразить ускорение, приобретаемое телом под действием силы всемирного тяготения, следующим образом:

$$a = G \frac{M}{r^2}.$$

Ускорение, приобретаемое телом под действием силы всемирного тяготения, не зависит от массы тела. Этот факт свидетельствует о *равенстве инертной и гравитационной масс*.



Альберт Эйнштейн (1879–1955).

Создатель общей теории относительности и других физических теорий (специальная теория относительности, квантовая теория фотоэффекта, квантовая теория теплоёмкости, теория броуновского движения, теория индуцированного излучения).

Разработанная Эйнштейном теория объяснила физическую сущность тяготения как изменение геометрических свойств пространства-времени – искривление пространства-времени вблизи тел, создающих гравитационное поле. Иными словами, если «пустое» пространство-время является евклидовым «плоским» пространством, то материя искривляет пространство-время (рис. 2). Как писал сам Эйнштейн: «Согласно общей теории относительности, геометрические свойства пространства не самостоятельны, но обусловлены материей».

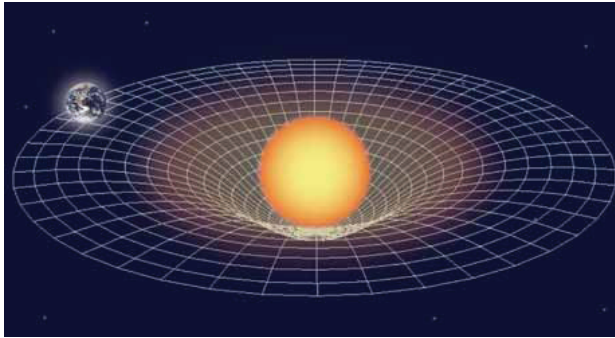


Рис. 2. С точки зрения ньютоновской теории тяготения, на любой предмет в окрестностях массивного тела (например, звезды) действует сила тяготения. С точки зрения эйнштейновской теории, массивное тело искривляет пространство-время и предмет движется в этом искривлённом пространстве-времени

Приведём в качестве иллюстрации пример, который обычно используют для пояснения данного утверждения. Представьте, что пространство – это упругая резиновая плёнка. Поместим на неё массивный шар так, чтобы плёнка прогнулась: чем тяжелее шар, тем больше прогиб. Шарик, катящийся по этой плёнке, будет отклоняться от первоначального направления движения, двигаясь около массивного шара. Чем ближе от массивного шара катится шарик, тем больше изгиб плёнки, тем больше будет отклонение шарика от первоначального направления движения. Точно так же в нашей Вселенной и тела, и излучение, проходя около массивных объектов, отклоняются. Именно этим объясняется вращение Земли вокруг Солнца, Луны – вокруг Земли.

Теория тяготения Эйнштейна крайне сложна математически. Да и осознать, как было сказано одним из известных физиков, что «тяготение – не чужеродная и физическая сила, действующая через пространство, оно есть проявление геометрии пространства именно там, где находится масса», весьма и весьма непросто!

Но у теории тяготения Эйнштейна есть одно безусловное достоинство, присущее любой «нормальной» физической теории, – она подтверждена экспериментально. Одно из первых экспериментальных доказательств теории было получено в 1919 году английским астрономом Артуром Стенли Эддингтоном (1882–1944). Во время солнечного затмения им было измерено отклонение световых лучей звёзд при прохождении света вблизи Солнца (рис. 4). Как писал Эйнштейн: «Согласно общей теории относительности луч света, проходя через гравитационное поле, должен искривляться подобно тому, как искривляется траектория тела, движущегося в гравитационном поле. Согласно этой теории можно ожидать, что луч света, проходящий мимо какого-либо небесного тела, должен отклониться в направлении последнего. ... Можно добавить, что половина этого отклонения вызывается, согласно этой теории, ньютоновским полем тяготения Солнца, а другая половина – геометрическим искажением («искривлением») пространства, обусловленным Солнцем».

Измеренное Эддингтоном отклонение световых лучей на угол около $1,75''$ было как раз таким, каким предсказывала теория тяготения Эйнштейна.

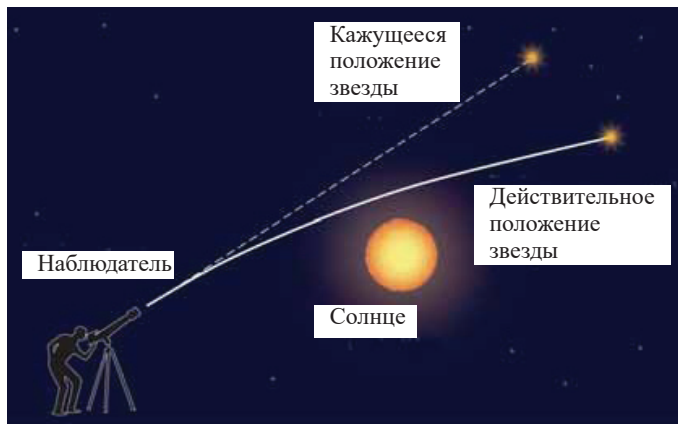


Рис. 3

Ещё одним ярким подтверждением общей теории относительности является экспериментальное подтверждение существования *гравитационных волн*, предсказанных А. Эйнштейном ещё в 1916 году. Гравитационные волны – распространяющиеся со скоростью света колебания поля тяготения, пространственно-временная «рябь» (изменение свойств пространства-времени), возникающие, например, при вращении космических объектов вокруг общего центра масс.

14 сентября 2015 года лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория (*LIGO*) зафиксировала гравитационную волну, возникшую при слиянии двух астрономических объектов (так называемых чёрных дыр) массой около 29 и 36 масс Солнца, находящихся от Земли на расстоянии 1,3 млрд св. лет.

На финальном этапе этого слияния, когда чёрные дыры столкнулись друг с другом на скорости около половины скорости света, возникли мощные гравитационные волны и выделилась энергия, соответствующая трём массам Солнца (вспомните знаменитую формулу Эйнштейна $E = mc^2$).

LIGO представляет собой уникальную установку (рис. 4), которая позволяет с помощью двух лазерных лучей «курсирующих» между зеркалами взад и вперёд в вакуумных трубах длиной 4 км и диаметром около 120 см фиксировать смещение зеркал на величину 10^{-19} м (десяти-тысячная часть диаметра протона!) под воздействием гравитационной волны. *LIGO* – международный проект, в котором задействовано более тысячи учёных из 20 стран, в том числе и две группы физиков из России.



Рис. 4. Детектор *LIGO* в г. Ливингстоне (штат Луизиана, США)

Работа по созданию детектора гравитационных волн и экспериментальное доказательство их существования было отмечено Нобелевской премией по физике (2017 год). Одновременно это ознаменовало рождение новой эры в астрономии – появление гравитационно-волновой астрономии. Ведь теперь учёные получили возможность вести наблюдения не только в различных диапазонах электромагнитного излучения, но и регистрировать гравитационные волны, излучаемые космическими объектами во Вселенной.

Основные свойства Вселенной. Закон Хаббла. Если взять булочку и отрезать от неё тонкий ломтик, то, рассматривая такой ломтик, мы увидим, что хлеб обладает определённой структурой: стенки из теста окружают воздушные пузыри. Об отдельном ломтике можно сказать, что он неоднороден и его свойства по разным направлениям неодинаковы (анизотропия). Так и Вселенная в малых масштабах неоднородна и анизотропна: имеются скопления вещества – планеты, звёзды, звёздные системы – галактики; имеются выделенные направления – например, направление оси вращения планеты, звезды.

Но какая будет наблюдаться картина, если перейти к крупным масштабам и выделить в пространстве Вселенной куб с ребром в триста миллионов световых лет? Современная космология утверждает, что число звёзд и звёздных систем – галактик – внутри такого куба будет примерно одинаковым, в какой бы части Вселенной этот куб ни находился (в видимой части Вселенной можно разместить несколько тысяч таких кубов). Это означает, что *в больших масштабах Вселенная однородна и изотропна*. Утверждение о крупномасштабной однородности и изотропии Вселенной (одинаковости свойств по всем направлениям, отсутствии выделенного направления) получило в современной науке название **космологического принципа**.



Рис. 5

Одним из убедительных доказательств космологического принципа являются результаты, полученные с помощью космических астрономических спутников. Так, в мае 2009 г. Европейским космическим агентством был запущен спутник «Планк», который был выведен на орбиту на расстояние 1,5 млн км от Земли и проработал на этой орбите до октября 2013 г. (рис. 5). Телескоп «Планка» регистрировал электромагнитное излучение, возникшее в ранней Вселенной. В результате была полу-

чена наиболее полная и точная карта этого космического микроволнового фонового излучения и было установлено, что его интенсивность варьируется (изменяется) в зависимости от направления не более чем на 0,0005%.

Опираясь на космологический принцип, мы можем сделать ряд существенных выводов о строении Вселенной:

- у Вселенной не должно быть центра и пространственной границы (иначе бы нарушалось условие однородности Вселенной);
- Вселенная как целое не должна вращаться (иначе бы нарушалось условие изотропности Вселенной).



1.2. Почему из космологического принципа следует отсутствие у Вселенной «выделенной точки» – центра Вселенной?

Почему из космологического принципа следует отсутствие у Вселенной «выделенного направления» – оси вращения Вселенной?

Следующий экспериментальный факт, отражающий строение Вселенной, был установлен благодаря *эффекту Доплера*.

Одно из первых экспериментальных наблюдений эффекта Доплера было осуществлено в 1845 году для звуковых волн. В Нидерландах на недавно построенной железной дороге между Утрехтом и Амстердамом в ходе эксперимента курсировал локомотив, развивающий по тем временам огромную скорость до 70 км/ч, с вагон-платформой. Музыканты-горнисты, находящиеся на движущейся платформе, и музыканты, стоящие на земле вблизи железнодорожного пути, поочередно слушали друг друга. В первом случае источник звука (музыканты на движущейся платформе) приближался, а затем удалялся от приёмника звука (музыканты-слушатели на земле). Во втором случае приёмник звука (музыканты-слушатели на движущейся платформе) двигался относительно неподвижного источника звука (музыканты-горнисты на земле).

Эксперименты показали *изменение частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, при движении источника колебаний и наблюдателя относительно друг друга*. При сближении звук воспринимался как более высокий (увеличение частоты), а при удалении – как более низкий (уменьшение частоты).



1.3. Пусть мимо вас проезжает машина с включённой сиреной (сирена выдаёт звук определённого тона). Как будет меняться высота тона по мере приближения и удаления машины?

Объяснить данный эффект достаточно просто. Пусть источник волн и наблюдатель (приёмник волн) неподвижны и пусть источник излучает волны определённой частоты. Это означает, что гребни волн «покидают» источник через один и тот же определённый промежуток времени и, пройдя одно и то же неизменное расстояние, всякий раз через такой же промежуток времени фиксируются наблюдателем. Иными словами, наблюдатель регистрирует волну, частота колебаний которой равна частоте колебаний источника (рис 6, а).

Если же, например, источник волн движется в сторону наблюдателя, то гребню каждой последующей излучённой волны требуется меньше времени, чтобы дойти до наблюдателя, чем это было нужно гребню предыдущей волны. Значит, время между приходом двух «соседних» гребней сокращается, то есть наблюдатель регистрирует увеличение частоты колебаний (рис. 6, б). Удаление же источника волн от наблюдателя приводит к уменьшению частоты колебаний.

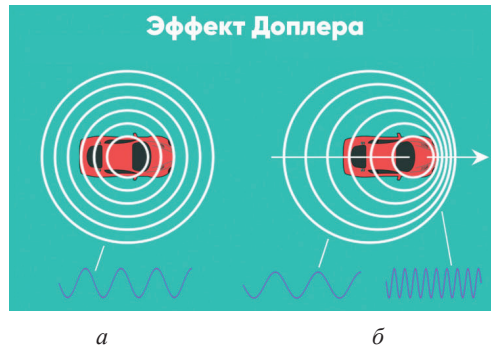


Рис. 6

Этот физический эффект получил название эффекта Доплера в честь австрийского учёного Кристиана Андреаса Доплера (1803–1853), который в 1842 году представил статью «О цветном свете двойных звёзд и некоторых других звёзд на небесах». Своеобразие и научная сила этой работы заключается в применении метода аналогии при рассмотрении волн различной физической природы: с общей точки зрения рассматриваются и акустические волны, и световые волны. В то время физикам уже было доподлинно известно, что звуковые волны – продольные волны в упругой среде с частотой колебаний от 16 до 20 000 Гц. Что касается света, то было установлено, что это также волновой процесс, хотя электромагнитная природа световых волн в то время ещё не была ясна.

Было уже известно, что высота звука определяется частотой колебаний упругой среды, в то время как цвет света – частотой соответствующих световых колебаний. Доплер первым обращает внимание на то, что восприятие звуковых и световых волн (высота звука и цвет света) зависят от движения наблюдателя (приёмника волн) или источника волн. Как писал сам Доплер: «Мы знаем из опыта, что достаточно глубоко сидящий корабль, который идёт навстречу волнам, за то же самое время принимает больше волн и с большей интенсивностью по сравнению с кораблём, который неподвижен или идёт в направлении волн. Если это спра-

ведливо для волн на воде, то почему это неприменимо с необходимыми изменениями для волн в воздухе или эфире?» («Волнами в эфире» Доплер называет световые волны.)

Эффект Доплера в наше время нашёл широкое практическое применение. Именно на основе этого эффекта осуществляется ультразвуковая диагностика, широко применяемая в медицине. Органы пациента «просвечивают» непрерывным или импульсным ультразвуком с частотой колебаний в несколько мегагерц. Изменение частоты ультразвука, отражённого от внутренних органов, стенок кровеносных сосудов, частиц крови (в основном от эритроцитов), позволяет медикам составить картину функционирования внутренних органов пациента, определить скорость и направление кровотока в кровеносных сосудах. Использован эффект Доплера и в полицейских радарх (слово заимствовано из английского языка, где *radar* – сложносокращённое существительное на базе *radio detecting and ranging* «обнаружение и определение расстояния посредством радио»). Радар излучает радиосигнал (длина волны излучения менее сантиметра) и регистрирует отражённый от движущегося автомобиля сигнал. По изменению частоты принятого радаром сигнала прибор определяет скорость приближения или удаления автомобиля от радара.

Первоначально работа Доплера была воспринята критически, так как будучи теоретической, не содержала отсылок к результатам каких-либо экспериментов, её подтверждающих. Ситуация изменилась после подтверждения эффекта вначале для звуковых волн. Затем в 1871 году было получено первое прямое экспериментальное подтверждение и для световых волн. Измерение частоты света, регистрируемого от противоположных краёв диска Солнца, дало различные значения, что объясняется вращением звезды вокруг своей оси.



1.4. Рассчитайте, с какой скоростью приближаются и удаляются к земному наблюдателю области Солнца, находящиеся на противоположных краях солнечного экватора.

Основной носитель информации, поступающий к нам от звёзд и звёздных скоплений – галактик, – это электромагнитное излучение (радиодиапазон, инфракрасное, видимое, рентгеновское излучение и гамма-излучение).

В соответствии с эффектом Доплера при удалении источника электромагнитного излучения от наблюдателя последний регистрирует увеличение длины волны излучения в сравнении с той длиной волны, что излучается неподвижным источником. Пусть λ_0 – длина волны излучения,

например водорода, в лабораторных условиях (на Земле), λ – длина волны излучения, регистрируемого от далёкой галактики. Астрономами ещё в начале XX века было установлено, что в спектрах галактик линии излучения у всех химических элементов смещены в красную сторону:

$$\lambda > \lambda_0.$$

Этот экспериментальный факт получил названия **явления красного смещения**.

Красное смещение, как ясно из эффекта Доплера, свидетельствует о движении галактик, об их взаимном удалении друг друга. Исходя из наблюдаемого для галактик факта красного смещения, астрономы сделали вывод, что Вселенная является нестационарной, она изменяется с течением времени – **наблюдается расширение Вселенной**.

Чем больше величина красного смещения, тем, в соответствии с теорией эффекта Доплера, больше скорость удаления источника электромагнитного излучения. Поэтому измерение величины красного смещения позволяет не только установить факт расширения Вселенной, но и измерить скорость разлёта галактик, скорость их удаления относительно друг друга.

В 1929 году выдающийся американский астроном Эдвин Пауэлл Хаббл (1889–1953), обобщив имевшиеся на тот момент данные о скоростях галактик и удалённости до них, пришёл к выводу, который в дальнейшем получил название *закона Хаббла*.

Далёкие галактики уходят от нас со скоростью, пропорциональной удалённости от нас. Чем дальше галактика, тем больше её скорость.

Формула закона Хаббла имеет вид

$$v_r = H \cdot r \tag{1.3}$$

где v_r – скорость удаления галактики;
 r – расстояние до галактики.

Коэффициент пропорциональности H был назван постоянной Хаббла. По совокупности современных данных, полученных различными методами, постоянную Хаббла принимают равной

$$H = (70 \pm 3) \frac{\text{км/с}}{\text{Мпк}}.$$



1.5. Чему равна относительная погрешность численного значения постоянной Хаббла?



Эдвин Пауэлл Хаббл (1889–1953).

Американский астроном. Оценил расстояние до некоторых из галактик, разработал основы их классификации, установил закономерность разлёта галактик.

В наше время закон Хаббла убедительно подтверждён имеющимися в распоряжении астрономов данными (рис. 7).

Так как скорость удаления галактик v_r надёжно определяется по величине их красного смещения, то закон Хаббла даёт простой способ установления расстояния до галактик r .

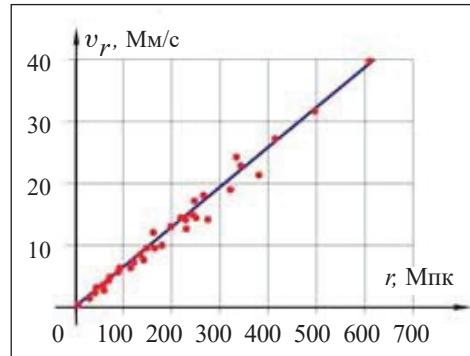


Рис. 7



1.6. Как определить расстояние до некоторой галактики, используя формулу закона Хаббла?

Пусть некоторая галактика находится от наблюдателя на расстоянии r . Если считать скорость движения галактики v_r неизменной, то для удаления на такое расстояние галактике потребовалось время t , равное

$$t = \frac{r}{v_r}.$$

Воспользуемся формулой закона Хаббла (1.3)

$$v_r = H \cdot r.$$

Тогда

$$t = \frac{1}{H}$$

$$t = 14 \text{ млрд лет.}$$

Каков смысл рассчитанного нами интервала времени t ? Так как значение постоянной Хаббла H одинаково для всех галактик, то это означает, что галактики начали своё движение одновременно, то есть расширение

Вселенной началось около 14 млрд лет тому назад. Следовательно, рассчитанное нами время есть не что иное, как оценка *возраста Вселенной*.

Около 14 млрд лет назад вещество Вселенной было сосредоточено в небольшом объёме, было настолько плотным, что ни галактики, ни звёзд ещё не существовало. Из этого сверхплотного состояния началось расширение Вселенной. В процессе такого расширения материя приняла те формы, в которых мы её наблюдаем в настоящее время, образовались звёзды и галактики. Такой процесс расширения Вселенной в современной космологии получил название *теории Большого взрыва*.

Сценарии эволюции Вселенной. Наблюдаемые учёными свойства пространства-времени нашей Вселенной (её крупномасштабная однородность и изотропность, нестационарность Вселенной) должны находить своё объяснение в рамках современной теории тяготения Эйнштейна. Напомним, что согласно этой теории под воздействием массы тел пространство-время искривляется, это приводит к искривлению траектории тел, движущихся в пространстве-времени, что и воспринимается как результат действия сил тяготения.

Впервые успешная попытка применить уравнения теории тяготения (общей теории относительности) к описанию Вселенной как единого целого была предпринята в 1922–1924 годах российским учёным Александром Александровичем Фридманом (1888–1925). Используя уравнения эйнштейновской теории тяготения, Фридман получил решения, из которых следовало, что Вселенная не может быть неизменной. Полученный результат был выдающимся достижением науки и в дальнейшем был подтверждён открытым Хабблом законом и наблюдаемым красным смещением галактик. Фридман выяснил, что характер дальнейшей эволюции Вселенной определяется тем, какова её средняя плотность ρ в сравнении с критическим значением плотности $\rho_{кр}$, равным

$$\rho_{кр} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

где G – гравитационная постоянная.

Если средняя плотность Вселенной меньше критической плотности ($\rho < \rho_{кр}$), то расширение будет вечным и скорость разлёта галактик всегда будет отлична от нуля. Если средняя плотность Вселенной равна критической плотности ($\rho = \rho_{кр}$), то расширение будет вечным, но скорость галактик в итоге станет равной нулю. Такие сценарии космологи называют вариантами «Открытой Вселенной». Если же средняя плотность Вселенной больше критической плотности ($\rho > \rho_{кр}$), то будет реализован вариант «закрытой Вселенной», в которой расширение сменится в будущем сжатием.



Александр Александрович Фридман (1888–1925). Выдающийся российский математик, физик и геофизик. Создатель теории нестационарной Вселенной. Один из создателей теории турбулентности и динамической метеорологии.

Модель горячей Вселенной. В начальный момент расширения Вселенной материя занимала сверхмалый объём, находилась в невообразимо плотном состоянии при гигантских температурах. По этой причине космологи называют модель расширяющейся Вселенной *моделью «горячей Вселенной»*. Гипотеза горячей Вселенной была высказана в 1946–1948 годах физиком российского происхождения Георгием Антоновичем Гамовым (1904–1968). При огромной температуре в начальный момент невозможно существование не только атомов, но и элементарных частиц; все известные типы взаимодействий (сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное) не отличаются друг от друга. Количественное описание этого этапа эволюции Вселенной учёным недоступно, так как требует рассмотрения процесса в рамках квантовой теории гравитации, которая ещё не создана.

При последующем расширении Вселенной и её охлаждении происходит разделение взаимодействий на известные нам виды, поэтапно возникают элементарные частицы из числа тех, что сейчас нам известны. В течение первых трёх минут происходит важнейший для дальнейшей эволюции Вселенной *процесс нуклеосинтеза* – образование ядер первичных химических элементов.

Расчёты, проведённые физиками-теоретиками для этого этапа расширения Вселенной, говорят, что в первичном веществе Вселенной ядра водорода составляли 75 %, ядра гелия – почти 25 %, и сотые доли процента приходились на ядра дейтерия, лития и других лёгких элементов. Данные значения совпадают с результатами наблюдения химического состава звёзд, полученного астрономами путём спектрального анализа.

Ещё одним убедительным доказательством правомерности модели горячей Вселенной стало обнаружение так называемого *реликтового излучения*, предсказанного Георгием Гамовым. На начальном этапе эволюции Вселенной возникли кванты электромагнитного излучения, до настоящего времени «путешествующие» во Вселенной. Расчёты теоретиков указывали на то, что в современной Вселенной максимум такого излучения должен приходиться на излучение с длиной волны около 2 мм.

В 1965 году подобное радиоизлучение, приходящее из космоса, было зарегистрировано американскими радиоастрономами. В настоящее время именно крайне малая величина анизотропии (зависимости от направления наблюдения) реликтового излучения, установленная современными космическими астрономическими спутниками, стала самым убедительным подтверждением космологического принципа.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в космологии в рамках теории Большого взрыва и модели горячей Вселенной, безусловно, впереди у учёных поиски ответов на многие вопросы. Так, современные теории не дают ответа на вопрос, что было до Большого взрыва, какими физическими законами описывалось состояние материи до расширения Вселенной.

Вершина «айсберга». Если взглянуть на ночное небо, то первое, что бросится в глаза, – это, конечно же, замечательная россыпь звёзд. Астрономы отметят, что ещё имеются различные газопылевые туманности. Звёзды, скопления звёзд, газопылевые туманности состоят из известных привычных нам атомов, атомных ядер (состоящих из протонов и нейтронов), электронов. Это вещество, во-первых, участвует в гравитационном взаимодействии, результат которого определяет характер движения астрономических объектов, а во-вторых, участвует в электромагнитном взаимодействии, излучая и поглощая свет различных диапазонов – от радиоволн до гамма-излучения, благодаря чему астрономы и могут обнаруживать и изучать этих «обитателей» Вселенной.

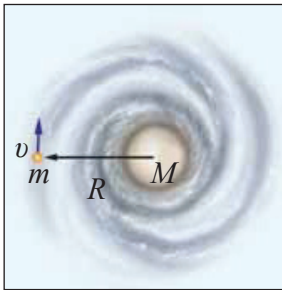


Рис. 8

Пусть астрономический объект с небольшой (по астрономическим масштабам) массой m находится на расстоянии R и вращается (подобно спутнику вокруг планеты) со скоростью v вокруг другого астрономического объекта, имеющего значительно большую массу M (рис. 8). Вращающийся объект будет в этом случае двигаться с центростремительным ускорением a_y , равным

$$a_y = \frac{v^2}{R}. \quad (1.4)$$

В соответствии со II законом Ньютона

$$m a_y = F, \quad (1.5)$$

где F – сила всемирного тяготения, действующая на вращающийся объект со стороны массивного центра тяготения

$$F = G \frac{mM}{R^2}. \quad (1.6)$$

Из соотношений (1.4) – (1.6) имеем

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

Скорость вращающегося объекта астрономы могут определить, используя эффект Доплера, и, тем самым, рассчитать массу центра тяготения.

Скупулёзный анализ движения наблюдаемых астрономических объектов привёл учёных к неожиданному заключению: наблюдаемое движение звёзд и их скоплений не может быть объяснено гравитационным воздействием только известных астрономических объектов. Астрономы пришли к выводу, что во Вселенной помимо светящегося, дающего электромагнитное излучение вещества звёзд и их скоплений, имеется невидимая (то есть не излучающая свет) материя. Эта, как называют её астрономы, *тёмная материя*, участвует только в гравитационном взаимодействии, и именно её гравитационное воздействие в основном определяет характер движения звёзд и их скоплений.

«Подозрения» о существовании тёмной материи возникли у астрономов ещё в тридцатых годах прошлого века и к настоящему времени превратились в общепризнанный научный факт. Учёным уже известно, что тёмная материя сродни обычному веществу в том смысле, что она способна собираться в гравитационные «сгустки» и участвует в гравитационном взаимодействии как обычное вещество. Учёные предполагают, что тёмная материя, скорее всего, состоит из сверхмассивных (100–1000 масс протона) стабильных электрически нейтральных элементарных частиц, слабо взаимодействующих с обычным веществом. Слабое взаимодействие тёмной материи с обычным веществом делает проблематичным его прямое обнаружение в земных условиях, но есть надежда, что если нынешние представления о природе тёмной материи верны, то в будущем она может быть зарегистрирована с помощью более мощных, чем современные, ускорителей заряженных частиц.

На рубеже XX и XXI веков астрономами был установлен ещё один знаменательный факт: анализ происходящего расширения Вселенной позволил учёным сделать вывод, что современная Вселенная не просто расширяется, а расширяется ускоренно. Если темп расширения Вселенной со временем нарастает, то необходимо вести речь об антигравитации. Гравитационное притяжение обычного вещества и тёмной материи замедляло бы разбегание астрономических объектов, а в нашей Вселенной, как видим, всё наоборот. Ускоренное расширение Вселенной вынудило учёных сделать вывод, что существует ещё один, третий тип материи, называемой астрономами *тёмной энергией*, «визитная карточка»

ка» которого – антигравитация. Первое слово в термине «тёмная энергия» подчёркивает, что эта форма материи не испускает и не поглощает свет, электромагнитное излучение, только гравитационно взаимодействуя с другими типами материи; слово «энергия» указывает, что мы имеем дело не со структурированным в частицы веществом, а с материей, равномерно «разлитой» по Вселенной, с одинаковой плотностью заполняющей всю Вселенную. Какова природа тёмной энергии? На этот вопрос у современной науки нет ответа, и установление природы тёмной энергии – это главная проблема астрофизики XXI века.

По результатам анализа результатов измерения реликтового излучения, выполненного с помощью астрономических спутников в первом – втором десятилетиях XXI века астрономами определено процентное содержание различных типов материи во Вселенной (рис. 9).

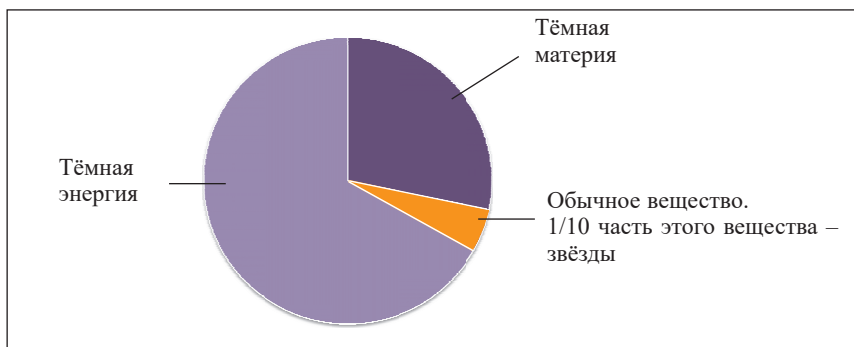


Рис. 9

Как верно заметил один из известных российских учёных, астроному со стажем нелегко смириться с мыслью, что на столь любимые им звёзды, которые до недавнего времени считались самыми важными астрономическими объектами, приходится менее 1% массы Вселенной!

Космология, астрономическая единица (а. е.), 1 а. е. \approx 150 млн км, световой год, 1 св. г. \approx 9000 млрд км, парсек (пк), 1 ПК \approx 3,26 св. лет, общая теория относительности Эйнштейна – релятивистская теория тяготения, космологический принцип, явление красного смещения как свидетельство расширения Вселенной, закон Хаббла, возраст Вселенной, теория Большого взрыва, сценарии возможной эволюции Вселенной, модель «горячей Вселенной», нуклеосинтез, реликтовое излучение, тёмная материя, тёмная энергия.

1.1 ● Известному американскому физику Джону Арчибальду Уилеру (1911–2008) принадлежит следующее афористичное изречение: «Геометрия предопределяет законы движения материи, а материя, в свою очередь, предписывает геометрии кривизну». Проанализируйте это изречение.

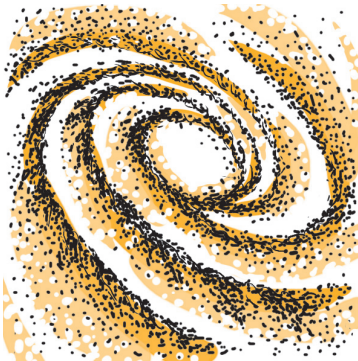
1.2 ● Немецкий философ, математик, церковно-политический деятель Николай Кузанский (1401–1464) ещё в пятнадцатом веке утверждал: «Вселенная есть сфера, центр которой всюду, а окружность нигде». Какой научный принцип отражает утверждение философа?

1.3 ● Галактика Вертушка в созвездии Большой Медведицы находится от Земли на расстоянии 27 млн св. лет. Определите скорость, с которой галактика удаляется от Земли.

1.4 ● Максимальная скорость разбегания галактик не может превышать скорости света. Оцените, исходя из закона Хаббла, максимальное расстояние, до которого мы можем наблюдать небесные тела, – радиус Вселенной.

1.5 ● По современным научным представлениям, возраст Вселенной составляет порядка 14 млрд лет. Означает ли это, что Вселенная была сотворена неким сверхъестественным образом?

§ 2. ГАЛАКТИКИ



Открылась бездна, звезд полна;
Звездам числа нет, бездне дна.

Михаил Васильевич Ломоносов
(1711–1765)

Вам уже известно, что Вселенная расширяется.

Крупномасштабная структура Вселенной. Основной космологический принцип утверждает однородность и изотропность Вселенной начиная с трёхсот миллионов световых лет. При меньшем масштабе во Вселенной имеются различные структурные образования: звёзды и их скопления, звёздные системы – галактики и группы галактик, объединяющие одну-две крупные галактики и несколько десятков мелких галактик.

Имеются также самые крупные гравитационно связанные объекты – скопления галактик, каждое из таких скоплений содержит тысячи галактик.

Наблюдения астрономов показали, что скопления галактик распределены неравномерно. Образно говоря, *Вселенная имеет ячеистую сотоподобную структуру* (рис. 10). Галактики и их скопления большей частью сосредоточены в «стенках» ячеек толщиной 3–4 Мпк. Внутри ячеек размером несколько десятков мегапарсеков плотность галактик как минимум в десять раз меньше, чем в среднем во Вселенной.

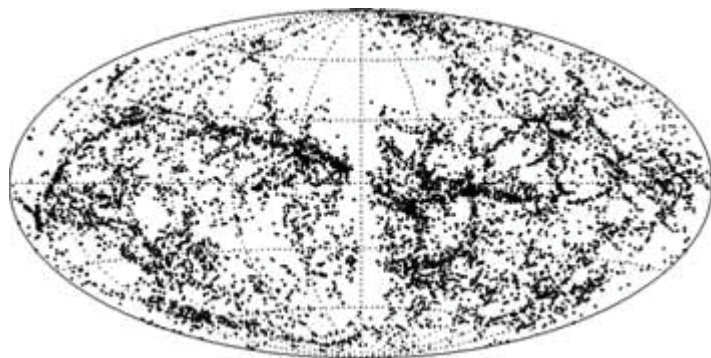


Рис. 10

Каким же образом в процессе эволюции Вселенной могла образоваться такого рода структура – «стенки» ячеек и пустоты? Астрофизики представляют этот процесс следующим образом. На начальном этапе развития Вселенной в ней случайно возникли области, в которых плотность была чуть больше средней плотности (области *a*, рис. 11). При расширении Вселенной области с повышенной плотностью расширялись чуть медленнее, чем Вселенная в целом, так как сила тяготения вещества к центру «сгустка» тормозит расширение. Одновременно области с меньшей плотностью (области *b*, рис. 11) расширялись чуть быстрее, чем Вселенная в целом. В результате по прошествии десятка миллиардов лет во Вселенной преобладают области с пониженной плотностью, и вещество большей частью сосредоточено в «стенках» ячеек (рис. 12).

Компьютерное моделирование процесса эволюции Вселенной подтверждает расчёты теоретиков. Незначительные неоднородности плотности в расширяющейся Вселенной должны привести к той ячеистой структуре, что наблюдается астрономами.

Ячейки – это, конечно же, не последняя, а промежуточная стадия развития структуры эволюционирующей Вселенной. Через миллиарды лет «стенки» ячеек разделятся на отдельные шарообразные сгущения. Таков,

по современным космологическим теориям, сценарий эволюции Вселенной.

Крупномасштабная структура Вселенной была предсказана российскими космологами и астрофизиками во главе с академиком Яковом Борисовичем Зельдовичем (1914–1987).

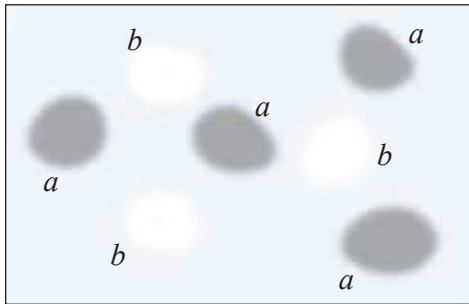


Рис. 11

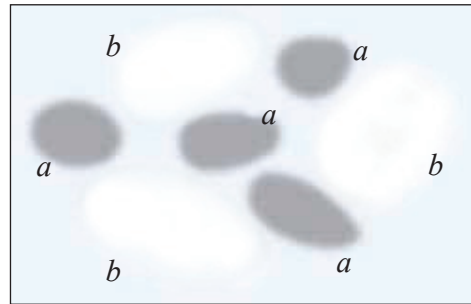


Рис. 12

Галактики. Общая характеристика. Основными структурными элементами – кирпичиками Вселенной – являются галактики. Астрономы, используя современные телескопы, улавливающие электромагнитное излучение, приходящее из глубины Вселенной с расстояния вплоть до 10–12 миллиардов световых лет, оценивают общее число всех галактик во Вселенной в несколько сотен миллиардов.

Сведения о галактиках занесены в специальные каталоги. Первый такой каталог, содержащий координаты более ста астрономических объектов, был составлен французским астрономом Шарлем Мессье (1730–1817) в XVIII веке. Некоторые из объектов Мессье действительно оказались галактиками и до настоящего времени обозначаются номерами его каталога (например, M31 – галактика Туманность Андромеды). Также широко известен более обширный каталог NGC – Новый общий каталог (New General Catalogue), номерами которого часто обозначают галактики (NGC 224 – галактика Туманность Андромеды). В настоящее время в распоряжении астрономов целый ряд каталогов галактик, в том числе составленных и по наблюдениям в радио-, рентгеновском или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра.

Даже ближайшие к нам галактики находятся на расстояниях в сотни тысяч световых лет. По этой причине различить невооружённым глазом на небе как туманные пятнышки можно лишь три из них: Туманность Андромеды (видна наблюдателю, находящемуся в Северном полушарии

Земли) и Большое и Малое Магеллановы Облака (видны в Южном полушарии). К концу XX века с помощью телескопов удалось различить отдельные звёзды не более чем в трёх десятках галактик. Ситуация значительно улучшилась лишь после запуска космического телескопа «Хаббл» (1990 г.) и ввода в строй 10-метровых наземных телескопов (1994–1996 гг.).



2.1. Как можно определить линейный размер галактики, если известно расстояние до неё и современные телескопы позволяют измерить угловой размер галактики? Как можно оценить массу галактики по вращению её частей?

Размеры галактик составляют от 20 до 800 тысяч световых лет, массы галактик могут составлять от десяти миллионов до тысячи миллиардов масс Солнца, в таких же пределах находятся и их светимости в сравнении со светимостью Солнца.

Именно в галактиках находится большая часть всех звёзд, существующих во Вселенной. *Число звёзд в галактике* может достигать сотен и даже тысячи миллиардов! Существуют и маленькие галактики, содержащие «всего лишь» миллионы звёзд. Помимо звёзд в состав галактик входят *межзвёздный газ, пыль*. Газ частью рассеян между звёздами, а частью образует громадные облака массой до миллиона масс Солнца. Существуют как плотные холодные газопылевые туманности, так и светящиеся туманности вокруг горячих звёзд.



Рис. 13.
Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако. Вид из Паранальской обсерватории (Чили). Фото Дж. Колозимо

Галактики весьма разнообразны по внешнему виду и структуре. *Неправильные галактики*. Не имеют чёткой геометрически правильной формы. Наиболее известными являются галактики Большое и Малое

Магеллановы Облака, названные так спутниками знаменитого мореплавателя Магеллана (около 1480–1521), наблюдавшими эти галактики в Южном полушарии. Магеллановы Облака внушительно выглядят на небе: Большое Магелланово Облако имеет видимый размер более 5° (десять видимых диаметров Луны), Малое Магелланово Облако имеет видимый размер в четыре диаметра Луны (рис. 13). Особенностью неправильных галактик является большое содержание в них межзвёздного газа – до 50% от общей массы галактики.

Эллиптические галактики составляют до четверти от общего числа галактик. Имеют дынеобразную форму, их фотографические изображения выглядят как овал – эллипс с ярко светящимся центром (рис. 14).

Линзовидные галактики по внешнему виду напоминают двояковыпуклую линзу (рис. 15). У галактик такого типа, как правило, ярко выражены такие элементы структуры, как *ядро галактики* – её центральная область, *галактический диск*, толщина которого в десятки раз меньше его радиуса, центральное утолщение диска и разреженное звёздное облако шарообразной формы, в которое погружён галактический диск. Среди звёздных систем линзовидных галактик примерно 20%.

Спиральные галактики имеют более сложную структуру, чем линзовидные галактики. Помимо галактического диска, его центрального утолщения и окружающей диск короны в таких галактиках по диску ещё проходят ветви – рукава галактик. Спиральный узор галактик состоит из двух и более (до десяти) рукавов, выходящих из центра галактики (рис. 16, 17).



Рис. 14. Эллиптическая галактика M87. Расстояние до галактики 60 млн св. лет. Радиус галактики 147 000 св. лет. Одна из крупнейших известных галактик с массой 2000–3000 млрд солнечных масс. Мощный источник радио- и гамма-излучения. Фото телескопа «Хаббл»



Рис. 15. Линзовидная галактика NGC 5010. Расстояние до галактики 140 млн св. лет. Фото телескопа «Хаббл»



Рис. 16. Галактика Туманность Андромеды. Расстояние до галактики 2,5 млн св. лет. Радиус – 110 000 св. лет. Двигается по направлению к Солнцу (имеет фиолетовое смещение). Фото Эд. Генри



Рис. 17. Галактика M101 Вертушка. Расстояние до галактики 27 млн св. лет. Радиус галактики 85 000 св. лет. Фото телескопа «Хаббл»

Вдоль спиральных рукавов сосредоточены самые молодые звёзды галактики, а также области плотных облаков межзвёздного газа, в которых продолжается процесс звёздообразования.

Причины, по которым в дисках галактик возникли такие элементы структуры, как спиральные рукава, ещё не в полной мере ясны астрофизикам, и над этой проблемой работают многие учёные.

Примерно половина всех галактик являются спиральными, к такому типу галактик относится и наша Галактика – Млечный Путь, в которой расположена Солнечная система.

Наша Галактика – Млечный Путь. При взгляде на звёздное небо в безлунную ночь внимание наблюдателя всегда привлекает светлая полоса, тянущаяся через всё небо. Это Млечный Путь (рис. 18).

Великий итальянский физик и астроном Галилео Галилей (1564–1642) первым из астрономов использовал телескоп для наблюдения небесных тел и обнаружил, что Млечный Путь состоит из колоссального числа звёзд. Известный английский астроном Уильям Гершель (1738–1822), изучая структуру Млечного Пути, установил, что Солнечная система входит в состав звёздной системы, имеющей форму диска. Солнце – одна из звёзд нашей Галактики – Млечного Пути – находится вблизи галактического диска, поэтому большинство звёзд и наблюдается нами в виде полосы Млечного Пути.

Если вспомнить известную половицу, что «за деревьями леса не видно», то станет понятно, как затруднительно астрономам изучать структуру нашей Галактики, находясь непосредственно в ней. Но, несмотря на это, многое в строении Галактики уже достоверно известно учёным (рис. 19).

Установлено, что наша Галактика является спиральной галактикой с перемычкой; отчётливо выделяются два рукава. Диаметр галактического диска составляет 100 000 св. лет, а в области центрального утолщения – 3000 св. лет. Центральная часть Галактики и её ядро закрыты от нас облаками космической пыли, делая невозможным обычные визуальные и фотографические наблюдения в видимом диапазоне. В настоящее время использование космических телескопов позволяет астрономам изучать ядро Галактики в инфракрасном и рентгеновском диапазонах длин волн.



Рис. 18. Млечный Путь

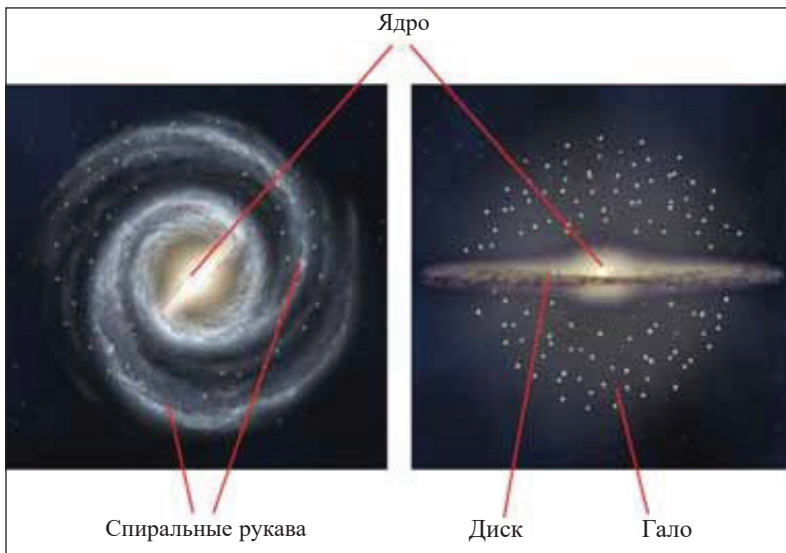


Рис. 19. Схема строения Галактики

Масса нашей Галактики, по оценкам астрономов, составляет около 1000 миллиардов масс Солнца, а число звёзд – несколько сотен миллиардов! Звёзды в Галактике распределены неравномерно, многие из них составляют скопления – группы звёзд, объединённые общим происхождением, положением в пространстве и движением. Вблизи галактического диска, как правило, находятся рассеянные скопления.

Известно более 2800 рассеянных скоплений, которые состоят из нескольких сотен или тысяч молодых ярких звёзд (рис. 20). Силы гравитационного взаимодействия между звёздами в скоплении недостаточны, чтобы сохранить его в первоначальном виде, и через сотни миллионов – миллиард лет рассеянные скопления распадаются.



Рис. 20. Рассеянное скопление M45 Плеяды. Расстояние до скопления 440 св. лет, радиус скопления 6 св. лет. Возраст скопления 100 миллионов лет. Содержит 1000 звёзд, масса скопления – 800 масс Солнца



Рис. 21. Шаровое скопление M13 (NGC 6205). Открыто астрономом Эдмондом Галлеем в 1714 г. Содержит несколько сотен тысяч звёзд. Расстояние до скопления 25 000 св. лет. Радиус скопления более 80 св. лет. Едва различимо невооружённым глазом в очень ясную ночь

В сферической звёздной области, окружающей галактический диск, находятся шаровые скопления (рис. 21). Это старейшие объекты нашей Галактики, возраст которых более 12 миллиардов лет.

Астрономам известно сейчас 150 шаровых скоплений, которые насчитывают до миллиона «глубоководных» звёзд. (Несмотря на большую концентрацию звёзд в шаровом скоплении, звёзды не только не соприкасаются, но и не сталкиваются друг с другом.)

По научным расчётам последнего времени, расстояние от Солнца до центра Галактики составляет примерно половину галактического радиуса (26000 св. лет). Следует отметить, что Солнце и Солнечная система в целом расположены в удачном месте Галактики, в её

«тихой заводи». Дело в том, что Солнечная система вращается вокруг центра Галактики со скоростью 220–240 км/с, совершая один галактический оборот за 200 миллионов лет. Волны уплотнения, образующие спиральные рукава, также вращаются, но с иной скоростью. По этой причине все звёзды – обитатели галактического диска – периодически попадают в спиральные рукава. В спиральных же рукавах происходят грандиозные процессы роста и гибели звёзд, что сопровождается выбросом мощного электромагнитного излучения в различных диапазонах. Это излучение было бы губительно для живого, и «атмосферный щит» не смог бы предохранить от него жизнь на Земле. Только в области Галактики, удалённой примерно на половину галактического радиуса от её центра, скорости вращения звёзд и спиральных рукавов совпадают. Именно в такой области и находится Солнечная система, что обеспечило ей несколько миллиардов лет «спокойного существования», необходимых для возникновения и сохранения жизни на Земле.

Чёрные дыры. В ядрах галактик, по мнению астрономов, находятся такие экзотические объекты, как чёрные дыры. *Чёрная дыра* – компактный (по астрономическим масштабам) и массивный объект, имеющий такое мощное гравитационное поле, что ничто, включая кванты электромагнитного излучения, не может преодолеть такое поле тяготения.

Оценим, каков должен быть радиус R астрономического объекта массой M , чтобы он превратился в чёрную дыру.

Будем рассуждать следующим образом: чем меньше радиус объекта, тем больше сила тяготения на поверхности объекта. Следовательно, тем больше должна быть скорость тела, стартующего с поверхности объекта, чтобы он смог покинуть объект. Но предельная скорость тела – это скорость света (измеряется в м/с). Сила тяготения помимо радиуса R (измеряется в м) зависит от массы объекта M (измеряется в кг) и гравитационной постоянной G (измеряется в $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{кг}^2}$ или $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2} = \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2\cdot\text{кг}}$).

Таким образом, предельный гравитационный радиус R , при котором астрономический объект может превратиться в чёрную дыру, зависит от массы объекта M , гравитационной постоянной G и скорости света c :

$$R = f(M, G, c).$$

Если проанализировать, каковы единицы измерения величин M , G , и c , то комбинация GM/c^2 имеет единицу измерения (или, как говорят в физике, размерность величины) метр.

Следовательно,

$$R \sim \frac{GM}{c^2}. \quad (2.1)$$

Для того чтобы записать последнее выражение в виде математического равенства, необходимо знать численное значение коэффициента пропорциональности между R и GM/c^2 . Это значение можно получить, лишь проведя строгий теоретический вывод, а не качественные рассуждения. Но, как правило, численные значения коэффициентов пропорциональности в физических формулах близки к единице. Таким образом, выражение (24.1) позволяет определить значение гравитационного радиуса с «точностью до порядка величины».

Точная формула для расчёта гравитационного радиуса имеет вид

$$R = 2 \frac{GM}{c}.$$

Сам термин «чёрная дыра» подчёркивает, что такой объект не может быть источником света либо иного электромагнитного излучения.



2.1. Каким же образом чёрная дыра может быть обнаружена?

Во-первых, чёрная дыра обнаруживается по тому гравитационному воздействию, которое она оказывает на окружающие тела.

Во-вторых, вещество, захваченное полем тяготения чёрной дыры, при приближении к чёрной дыре вращается вокруг неё всё быстрее и быстрее (вспомните, как убыстрятся вращение фигуриста, когда он прижимает руки к туловищу). При движении с различными скоростями относительно друг друга возникает взаимное трение потоков вещества. Это приводит к разогреву вещества до температуры в десятки и сотни миллионов градусов. В результате возникает мощное рентгеновское излучение (рис. 22).

Излучение, создаваемое диском вещества, вращающегося вокруг чёрной дыры, и позволяет обнаружить «пожирателя материи».

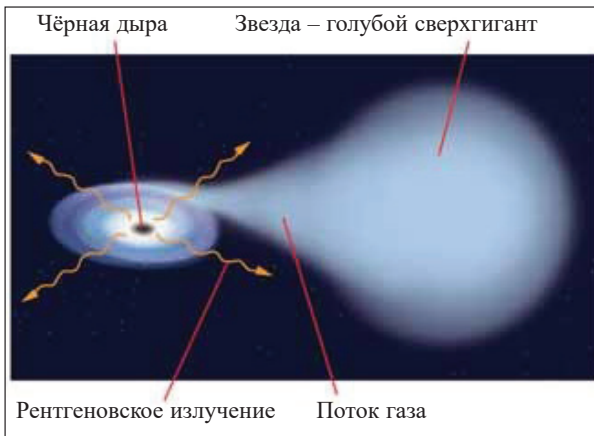


Рис. 22

С момента создания Эйнштейном в 1915–1916 годах современной теории тяготения (общей теории относительности) учёные представляли чёрную дыру как абсолютно поглощающий объект, но в последней четверти XX века физики-теоретики показали, что чёрная дыра благодаря квантовым эффектам может излучать, теряя энергию. Процесс испарения чёрной дыры можно упрощённо представить так: на «границе» чёрной дыры возникает пара частица – античастица. Одна из частиц падает внутрь чёрной дыры, а другая, оказавшаяся «чуть выше», – улетает, унося энергию (то есть часть массы чёрной дыры).

Крупномасштабная структура Вселенной; галактики; типы галактик: неправильные галактики, эллиптические галактики, линзовидные галактики, спиральные галактики; Галактика – Млечный Путь; строение Галактики: диск, спиральные рукава, рассеянные и шаровые звёздные скопления; вращение Галактики; чёрные дыры.

2.1 ● Проведя в 1922–1923 годах наблюдения спиральных туманностей Андромеды и Треугольника, американский астроном Эдвин Хаббл смог определить расстояния до этих астрономических объектов. (По современным, более точным, данным эти расстояния равны соответственно 2,5 и 3 млн св. лет.) Какой принципиальный вывод был сделан астрономами после сравнения этих расстояний с размером нашей галактики?

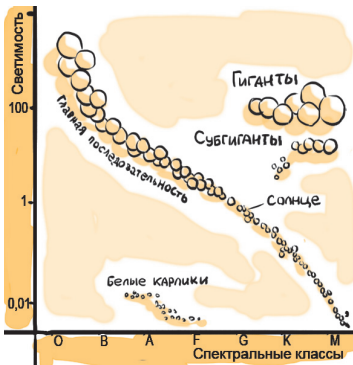
2.2 ● Оцените линейные размеры галактики Большое Магелланово Облако. (Подсказка. Используйте численные значения, приведённые в тексте параграфа.)

2.3 ● Выдающийся немецкий философ Иммануил Кант (1724–1804) в своём произведении «Всеобщая естественная история и теория неба» писал: «Если мы представим себе плоскость, проведённую через звёздное небо в безграничную даль, и предположим, что все неподвижные звёзды и звёздные системы относятся к этой плоскости таким образом, что их местоположение должно быть ближе к ней, чем к другим областям, то глаз, находящийся в той же плоскости, бросая взгляд на звёздное поле, увидит на полой сферической поверхности небесного свода наиболее плотное их скопление в направлении этой плоскости в виде довольно сильно светящегося пояса. Эта светлая полоса будет простираться по огромному кругу, если место наблюдателя находится в самой плоскости. В этом поясе будет бесчисленное множество звёзд, которые ввиду неразличимо малой величины светлых точек, порознь скрытых от глаза, и ввиду их кажущейся густоты дадут ровное голубоватое мерцание...» Соответствует ли данное высказывание философа современным научным представлениям? Ответ обосновать.

2.4 ● В центре Галактики, по мнению астрофизиков, располагается сверхмассивная чёрная дыра массой около 4,3 миллионов масс Солнца. Оцените гравитационный радиус такой чёрной дыры.

2.5 ● Солнечная система находится от центра Галактики на расстоянии 26 000 св. лет и вращается вокруг него, двигаясь со скоростью 220–240 км/с. Оцените, используя эти данные, какова масса центральной части Галактики.

§ 3. ЗВЁЗДЫ



Мир состоит из звёзд и людей.
Эмиль Верхарн (1855–1916),
бельгийский поэт

Вам уже известно, что источником энергии звёзд являются реакции термоядерного синтеза.

Основные характеристики звёзд. При взгляде на звёздное небо мы видим, что одни звёзды выглядят ярче, а другие тусклее. Это определяется тем, сколько энергии поступает от звезды на сетчатку глаза наблюдателя. Ещё во втором веке до нашей эры для удобства сравнения звёзд древнегреческий астроном Гиппарх (ок. 180 или 190 – 125 до н.э.) разделил все видимые невооружённым глазом звёзды на 6 классов *видимых звёздных величин*. Самые яркие звёзды были названы им звёздами 1-й величины, а самые тусклые – 6-й. В дальнейшем классификация Гиппарха была уточнена. Астрономы договорились считать, что разница в пять звёздных величин (например, с 1-й по 6-ю) соответствует изменению яркости звезды ровно в 100 раз. Были введены дробные звёздные величины. Так, к примеру, Полярная звезда имеет видимую звёздную величину 2,1. С помощью телескопов можно наблюдать звёзды до 26-й звёздной величины – то есть светорегистрирующее устройство телескопа чувствительнее, чем сетчатка глаза астронома-наблюдателя, в 100 000 000 раз.

С помощью видимой звёздной величины нельзя объективно охарактеризовать светимость звезды (мощность излучения звезды). Ведь звезда может тускло выглядеть на небе лишь потому, что она расположена очень далеко от наблюдателя. По этой причине астрономы используют и такое понятие, как абсолютная звёздная величина. Абсолютная звёздная величина – звёздная величина, которую бы имела звезда в случае наблюдения с расстояния 10 пк. Абсолютная звёздная величина Солнца составляет +4,8, а абсолютная звёздная величина Полярной звезды равна –3,64.



3.1. Светимость какой звезды – Солнца или Полярной – больше?

Светимость звёзд может различаться в миллиарды раз. Существуют звёзды со светимостью в сотни тысяч раз большей, чем светимость Солнца, а есть звёзды, чья светимость в десятки тысяч раз меньше светимости нашей звезды. (Абсолютные звёздные величины принимают значения от -9 до $+16$.)

Знаменитый американский физик Ричард Фейнман (1918–1988) как-то отметил, что самым выдающимся открытием астрономии было открытие того, что звёзды состоят из таких же атомов, что и Земля. *Химический состав звёзд* астрономам известен – звёзды состоят в основном из водорода и гелия. Это было установлено с помощью *спектрального анализа* – метода определения химического состава вещества по тому спектру, который излучается веществом. Вы знаете, что атомы различных химических элементов излучают свет различных частот и спектры атомов так же индивидуальны, как отпечатки пальцев у людей.

По распределению энергии излучения звезды по длинам волн также можно определить *температуру* её поверхности – ведь чем выше температура, тем больше доля коротковолнового излучения нагретым телом. По виду спектра, температуре поверхности звезды и её цвету звёздные спектры принято подразделять на определённые спектральные классы (таблица 1).

Таблица 1. Соотношение между спектральным классом, температурой и цветом звезды

Спектральный класс	Температура, К	Цвет
O	30 000	Голубой
B	20 000	Бело-голубой
A	10 000	Белый
F	8000	Жёлто-белый
G	6000	Жёлтый
K	5000	Оранжевый
M	3500	Красный

Чем выше температура, тем больше мощность излучения с единицы поверхности светящегося тела: мощность теплового излучения пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры поверхности тела. Так, например, абсолютная температура белых (спектральный класс A) и оранжевых (спектральный класс K) звёзд различается в 2 раза. Следовательно, мощности их излучения с единицы поверхности различаются в $2^4 = 16$ раз.

Но если известна мощность излучения с единицы поверхности звезды и её светимость (мощность излучения звезды со всей светящейся поверхности звезды), то можно определить площадь поверхности звезды, а значит, и её *радиус*. Размеры звёзд колеблются от размеров, сравнимых с диаметром Солнечной системы, до размеров планет. Существуют даже звёзды, имеющие размер всего в несколько километров. Напомним, что диаметр Солнца составляет 1,4 млн км.

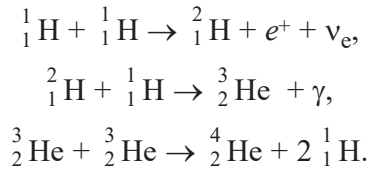
Ещё одна важная характеристика звезды – это её *масса*. К счастью для астрономов, примерно половина всех звёзд во Вселенной являются двойными системами. Двойные звёзды представляют собой гравитационно связанные объекты, вращающиеся вокруг общего центра масс. Измерение периодов обращения и расстояния между звёздами позволяет определить массы компонентов двойной системы. Оказалось, что по массе звёзды различаются не особо значительно: от нескольких десятков до примерно 0,1 массы Солнца.

Эти ограничения по массе физически понятны. При меньшей массе температура даже в центре небесного тела будет недостаточно высока для запуска термоядерной реакции. Ограничения по массе звезды «сверху» объясняются тем, что всякая обычная звезда – это раскалённый до гигантских температур газовый шар, который является ареной противоборства трёх сил. Это *сила тяготения*, сжимающая звезду, *сила газового давления*, распирающая звезду, и *сила светового давления*, помогающая силе газового давления.

При повышении массы звезды увеличивается сила тяготения, поэтому должно возрасти давление и температура звёздного вещества. Повышение температуры приведёт к значительному увеличению светимости звезды, возрастёт световое давление, нарушится равновесие трёх сил – звезда взорвётся.

Огромные различия в размерах звёзд, а значит, и в их объёмах, при незначительных размерах звёзд приводят к колоссальным различиям в *плотности звёзд* – средняя плотность звёзд различного типа имеет значение от 1 г/м³ до 10¹⁸ кг/м³.

Звёзды: их рождение, жизнь и смерть. Звёзды зарождаются в космических газопылевых облаках. При сжатии гравитационными силами сгустка газа его температура повышается. Когда температура в центре достигнет примерно десяти миллионов градусов, начинаются **термоядерные реакции** – образуется звезда. Для звёзд типа нашего Солнца наиболее вероятна следующая цепочка реакций:



Дальнейшую эволюцию звёзд астрофизики рассчитывают теоретически и сравнивают полученные результаты с результатами наблюдений за звёздами различных масс, химического состава и возраста. Отметим основные выводы, сделанные учёными при рассмотрении процесса эволюции звёзд.

Во-первых, время жизни звезды зависит от её массы. Чем больше масса звезды, тем, как это ни парадоксально, короче жизненный путь звезды. Почему? Это связано с тем, что чем больше масса звезды, тем больше её светимость. Как правило, светимость звезды L пропорциональна четвёртой степени массы звезды M :

$$L \sim M^4. \quad (3.1)$$

Таким образом, время жизни звезды t , которое определяется отношением массы звезды к темпу расходования энергии звездой (её светимостью), определится следующим отношением:

$$t \sim \frac{M}{L}$$

или с учётом соотношения (3.1)

$$t \sim \frac{1}{M^3}.$$

Наиболее массивные звёзды «живут» всего лишь несколько десятков миллионов лет. Звёзды с массой, близкой к массе Солнца, существуют 10–15 млрд лет, а звёзды с малой массой «растянут» скудные «запасы» водородного топлива на десятки миллиардов лет.

Во-вторых, большую часть времени (примерно 90%) звёзды проводят в «зрелом возрасте», когда их светимость практически неизменна. Лишь после того, как в центральной части звезды водород «перегорит» в гелий, звезду ждут быстрые и значительные перемены.

В-третьих, стареющая звезда превращается в звезду гигантских размеров (больше размеров Солнца в сотни раз) с колоссальной светимостью (больше светимости Солнца в сотни тысяч раз) спектрального класса К или М. Такие звёзды называют *красными гигантами*.



3.2. Какова температура поверхности звезды красного гиганта?

В общих чертах схема образования красного гиганта такова. После выгорания водорода в центре звезды образуется плотное гелиевое ядро, которое силами тяготения уплотняется, сжимается. Температура гелиевого ядра повышается до 100 млн кельвин, и возникают реакции синтеза между ядрами гелия, в частности, происходит их превращение в ядра углерода $^{12}_6\text{C}$. На внешней оболочке ядра в это же время происходит синтез водорода. В итоге «включение» дополнительной термоядерной реакции приводит к «перегреву» звезды и, как следствие, к расширению её газовой оболочки и увеличению светимости звезды.

Не минует стадии красного гиганта и наше Солнце. По расчётам учёных, это произойдёт через 6–7 млрд лет, и размеры Солнца будут так велики, что фактически оно достигнет Земли. (В таких условиях, конечно же, жизнь на Земле станет невозможной.)

В-четвёртых, финал в жизни звезды определяется тем, какова масса звезды после прохождения ею стадии красного гиганта, которая длится один-два миллиарда лет. Синтез ядер гелия, а затем синтез продуктов синтеза гелия – ядер углерода, азота, кислорода – завершается на стадии образования ядер железа. Дальнейшие слияния ядер не приводят к выделению энергии, они «энергетически невыгодны». В ядре звезды, лишённом источников энергии, сила газового давления и сила светового давления не могут противодействовать силе тяготения. Выгоревшее ядро звезды начинает сжиматься, и возможны различные сценарии дальнейшей эволюции звезды:

- при массе до 1,4 масс Солнца образуется звезда *белый карлик*,
- при массе от 1,4 до 2–3 масс Солнца образуется *нейтронная звезда*,
- если масса больше 2–3 масс Солнца, то возникает *чёрная дыра*.

Образование белого карлика. Если масса ядра звезды не превосходит примерно 1,4 массы Солнца, то сжатие ядра прекращается при достижении плотности вещества 1 млн т/м³! Остатки красного гиганта превращаются в звезду, называемую *белым карликом*. «Карликом» потому, что при массе, близкой к массе Солнца, размеры звезды сравнимы с размером Земли. «Белым» потому, что это горячая звезда. Благодаря малой поверхности белый карлик имеет светимость в тысячу раз меньше, чем светимость Солнца и, не обладая ядерным источником энергии, он будет постепенно остывать в течение миллиардов лет.

Остатки газовой мантии красного гиганта, окружающие белого карлика, образуют так называемую планетарную туманность (рис. 23).

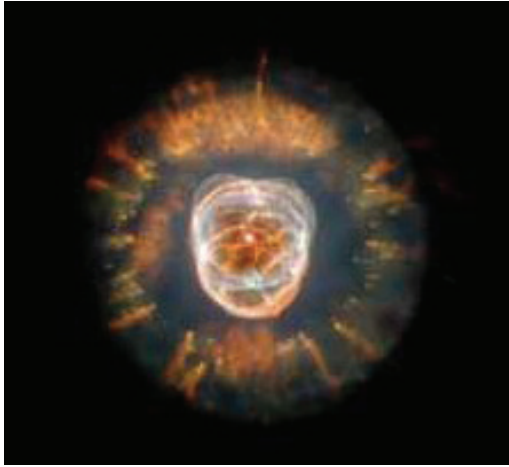


Рис. 23. NGC 2392. Планетарная туманность Эскимос. Открыта в 1787 году. Расстояние до туманности 300 св. лет. Видимые угловые размеры 1,4'. Видимая звёздная величина 9,9. Фото телескопа «Хаббл»



Рис. 24. Размеры нейтронной звезды в сравнении с размерами города Москвы

Образование нейтронной звезды. Если масса ядра звезды составляет от 1,4 до 2–3 масс Солнца, то процесс сжатия вещества прекращается только при достижении плотности ядерного вещества (до 100 млн т/см³!). При гигантской плотности электроны вдавливаются в протоны, и вся звезда состоит из нейтронов. Радиус такой *нейтронной звезды* крайне мал – всего около десяти километров (рис. 24).



3.3. Что происходит с частотой вращения астрономического объекта при его сжатии?

При сжатии огромной звезды красного гиганта до объекта размером всего в несколько десятков километров звезда раскручивается до очень большой скорости. Период вращения нейтронной звезды составляет сотые и даже тысячные доли секунды. С такой же частотой вращается и магнитное поле звезды, создавая огромное по напряжённости электрическое поле. На поверхности нейтронной звезды, где отсутствуют колоссальные давления, сохраняются протоны и электроны. Эти заряженные частицы ускоряются электрическим полем до скоростей, близких к скорости света, и становятся источниками мощного узконаправленного электромагнитного излучения. Источник такого излучения – нейтронная звезда – получил название *пульсар* (рис. 25).

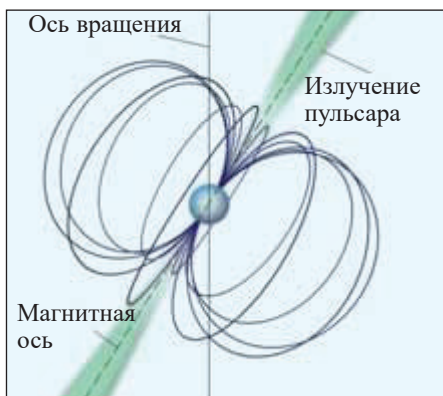


Рис. 25. Схема пульсара

Существование нейтронных звёзд было предсказано физиками практически сразу же после открытия в 1932 году элементарной частицы нейтрона. Но только в 1967 году радиоастрономами были обнаружены кратковременные радиоимпульсы, приходящие из космоса через строго определённое время. Это было столь удивительным явлением, что учёные вполне серьёзно предположили, что радиосигналы имеют искусственное происхождение и являются посланием внеземных цивилизаций. Но дело обстоит куда

прозаичнее – наблюдатели фиксируют радиолуч пульсара, который при вращении нейтронной звезды пробегает по поверхности Земли. Это совершенно аналогично тому, как моряк видит вспышки маяка на берегу моря, если маяк оборудован вращающимся прожектором. В наше время обнаружено более 2500 пульсаров.

Возникновение чёрной дыры. Что будет происходить, если «финальная» масса красного гиганта более 2–3 масс Солнца? В этом случае гравитационное сжатие не сможет остановиться на стадии нейтронной звезды и образуется один из самых экзотических астрономических объектов – *чёрная дыра* – источник сверхмощного гравитационного поля.

При сжатии тяжёлых остатков красного гиганта, завершающемся образованием нейтронной звезды или чёрной дыры, происходит ещё одно грандиозное астрономическое явление – вспышка сверхновой звезды.

Выделяющейся при сжатии ядра энергии оказывается достаточно для взрыва звезды. При вспышке сверхновой звезды в течение нескольких суток её блеск увеличивается на десятки звёздных величин, так что в максимуме процесса светимость сверхновой может превышать светимость всей галактики, в которой вспыхнула сверхновая – старая звезда, завершившая свою эволюцию взрывом.

Одна из таких вспышек сверхновых произошла в 1054 году на расстоянии от Земли всего в 6500 св. лет. Согласно записям арабских и китайских астрономов вспышка была видна невооружённым глазом даже в дневное время на протяжении 23 дней. В настоящее время на месте взрыва этой сверхновой наблюдаются остатки звезды – Крабовидная туманность (рис. 26).

В дальнейшем в 1969 году в недрах этой туманности был обнаружен пульсар. Это позволило астрономам сделать вывод, что остатком взрыва сверхновой звезды является не только расширяющаяся газовая туманность, но и нейтронная звезда или чёрная дыра в центре этой туманности.

Переменные звёзды. Зачастую мир звёзд воспринимается нами как мир, в котором не происходит никаких изменений, а если они и происходят, то в астрономических временных масштабах – сотни тысяч, миллионы, миллиарды лет. Такая изменчивость ускользает от непосредственного наблюдения. Но, оказывается, в мире звёзд существуют и переменные звёзды, то есть такие звёзды, чья изменчивость доступна наблюдению.

Таковыми переменными звёздами являются, например, *цефеиды*. Цефеиды – звёзды-гиганты спектральных классов F и G, у которых видимая звёздная величина заметно изменяется (с амплитудой от 0,5 до 2 звёздных величин) с периодом от нескольких суток до нескольких месяцев. Изучение цефеид показало, что у них периодически меняется температура поверхности звезды, цвет звезды, а также лучевая скорость (скорость по лучу зрения наблюдателя) поверхностных слоёв звезды. Эти изменения параметров звезды-цефеиды обусловлены «дыханием» звезды – периодическими сжатиями и расширениями наружных слоёв звезды. При сжатии температура поверхностного слоя звезды возрастает и, несмотря на уменьшение площади поверхности звезды, её яркость возрастает. При расширении звезды температура наружных слоёв уменьшается, и это приводит к уменьшению её яркости.

Изучению цефеид астрономы уделяли и уделяют много внимания. Это связано с тем, что для цефеид установлена зависимость между светимостью звезды и периодом её пульсаций: чем больше период колебаний цефеиды, тем больше её светимость.



Рис. 26. M1, NGC 1952. Крабовидная туманность. Открыта в 1731 году. Расстояние до туманности 6500 св. лет. Радиус туманности 5,5 св. лет (видимые угловые размеры $6 \times 4'$). Видимая звёздная величина 8,4. Туманность расширяется со скоростью около 1500 км/с

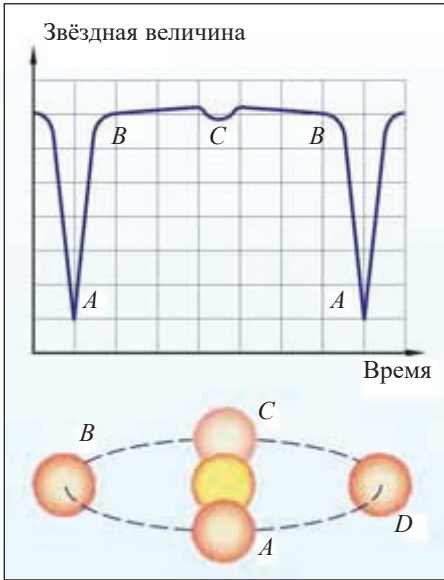


Рис. 27.
Схема затменно-переменной звезды

заслоняют друг друга от земного наблюдателя (рис. 27).

В двойных звёздных системах могут наблюдаться и более грандиозные (и физически более интересные) процессы, чем затмение одной звезды другой.

Если в двойной звезде одна из звёзд звезда типа нашего Солнца, а другая звезда – белый карлик, то образуется очень компактная система. Мощное поле тяготения белого карлика (не забывайте, что он карлик по размерам, но не по массе)



Рис. 28. Падение вещества звезды-донора на поверхность белого карлика

Допустим, что вы наблюдаете цефеиду с большим периодом колебаний, а значит, с высокой светимостью. Если при этом цефеида видна как тусклая звёздочка, следовательно, она находится на большом расстоянии от наблюдателя. Таким образом, благодаря цефеидам мы можем определить расстояние как до звёзд в нашей Галактике, так и расстояние до удалённых галактик, если в них видны пульсирующие звёзды-цефеиды.

Существуют звёзды (точнее, двойные звёзды), переменность блеска которых обусловлена, в отличие от цефеид, не физическими, а чисто геометрическими причинами. Это так называемые *затменно-переменные звёзды*. Обращаясь вокруг общего центра масс, звёзды периодически

перетягивает часть атмосферы солнцеподобной звезды на поверхность карлика (рис. 28). За некоторое время (от нескольких лет до сотен лет) происходит накопление вещества на поверхности белого карлика. Плотность и температура водорода в поверхностном слое возрастают до такой степени, что начинается термоядерный синтез гелия.

Из-за большой плотности вещества этот процесс развивается взрывообразно, и возникает вспышка *новой звезды*. Светимость новой звезды увеличивается в десятки и сотни тысяч раз, яркость изменяется до 12 звёздных величин. За время вспышки новой звезды (как правило, это менее года) выделяется такое количество энергии, которое при спокойной работе Солнца излучается им за 100 000 лет!

После гигантского термоядерного взрыва на поверхности белого карлика и сброса накопившейся оболочки (массой около 0,01 массы Солнца) система «звезда-донор – белый карлик» вновь готова к повторению процесса аккумуляции вещества с последующей вспышкой очередной новой звезды.

Основные характеристики звёзд: видимая звёздная величина, абсолютная звёздная величина, светимость, химический состав, температура, спектральный класс, радиус, масса, плотность; термоядерные реакции – источник энергии звёзд; зависимость времени жизни звезды от её массы; красные гиганты; варианты финальной стадии жизни звезды – возможность её превращения в белый карлик, нейтронную звезду, чёрную дыру; сверхновые звёзды; переменные звёзды: цефеиды, затменно-переменные звёзды, новые звёзды.

- 3.1 ● Абсолютная звёздная величина одной звезды равна +1,36, а абсолютная звёздная величина другой звезды равна –3,64. Во сколько раз различаются светимости этих звёзд? У какой звезды светимость больше?
- 3.2 ● Светимости двух звёзд, принадлежащих к одному спектральному классу, различаются в 10 000 раз. Во сколько раз различаются диаметры этих звёзд?
- 3.3 ● Сравните новые и сверхновые звёзды.
- 3.4 ● Возраст красного гиганта около 12 млрд лет. Оцените, сколько времени потребуется звезде, начальная масса которой в 5 раз больше красного гиганта, для достижения того же этапа звёздной эволюции.
- 3.5 ● Пусть звезда-цефеида больше Солнца по размеру в 100 раз и массивнее Солнца в 10 раз. Оцените период её колебаний. (Подсказка. «Поработайте» с единицами измерений физических величин, определяющих период колебаний.)

§ 4. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА



Две вещи наполняют душу всегда новым и всё более сильным удивлением и благоговением, чем чаще и продолжительнее мы размышляем о них – это звёздное небо надо мной и моральный закон во мне.

Иммануил Кант (1724–1804), выдающийся немецкий философ, разработал гипотезу происхождения Солнечной системы из первоначальной туманности

Вам уже известно, какие небесные тела составляют Солнечную систему.

Происхождение и эволюция Солнечной системы. Всякая научная теория происхождения и эволюции звёзд находит подтверждение (или опровержение) при изучении того множества звёзд различного вида и различного возраста, которые доступны нашему наблюдению. Солнечную же систему нам не с чем сравнивать. При рассмотрении вопроса о происхождении и эволюции Солнечной системы одна из основных трудностей заключается в том, что мы лишены возможности (по крайней мере, в настоящее время) наблюдать другие подобные системы, которые могли бы находиться на различных стадиях своего развития.

Теория, описывающая процесс возникновения и эволюции Солнечной системы, должна быть в состоянии объяснить основные особенности её строения:

1. Большая часть массы Солнечной системы сосредоточена в Солнце. Солнце в 330 000 раз массивнее Земли и больше нашей планеты в 109 раз. Масса всех планет Солнечной системы составляет чуть более одной тысячной доли от массы Солнца (рис. 29).



Рис. 29. Сравнение размеров Солнца и планет Солнечной системы

2. Орбиты всех планет близки к окружностям. Орбиты лежат приблизительно в одной плоскости (рис. 30). Все планеты движутся по орбитам в одном направлении, Солнце вращается в том же направлении вокруг оси, практически перпендикулярной плоскости планетной системы. Планеты вращаются в направлении орбитального движения планет (за исключением Венеры, которая крайне медленно вращается в обратном направлении, и Урана, который вращается, «лёжа на боку»).

3. Деление планет на две группы, различающиеся по массе, размерам, плотности, химическому составу и количеству спутников. Основные сведения о планетах приведены в таблице 6.

4. Наличие пояса малых тел – астероидов – между орбитами Марса и Юпитера. В настоящий момент астероидов – каменных обломков – обнаружено сотни тысяч. При столкновениях астероиды дробятся, и их осколки могут в итоге достигнуть поверхности Земли. Такие упавшие на поверхность Земли космические тела называют метеоритами. *Метеориты* – прекрасные образцы первозданного планетного вещества, которые в отличие от земных горных пород претерпели существенно меньше изменений (рис. 31).

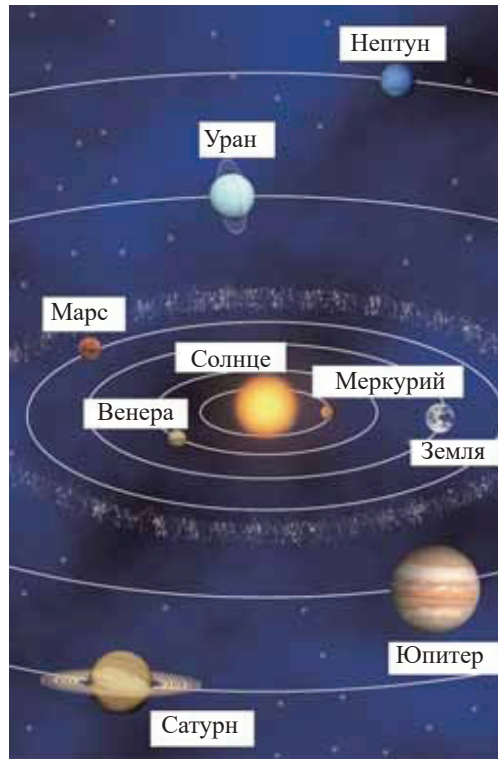


Рис. 30. Схема Солнечной системы (без соблюдения масштаба)



Рис. 31. Гоба – крупнейший из найденных метеоритов. Железный метеорит массой 66 тонн. Обнаружен в 1920 году в Юго-Западной Африке

Таблица 6. Планеты Солнечной системы

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Среднее расстояние от Солнца, а. е.	0,39	0,72	1,00	1,52	5,20	9,54	19,19	30,07
Период обращения вокруг Солнца, годы	0,24	0,61	1,00	1,88	11,86	29,46	84,02	164,78
Средний радиус, км	2440	6050	6371	3397	69 900	58 000	25 400	24 300
Период вращения	58,7 д	243,1 д	23 ч 56 м 4 с	24 ч 37 м 22 с	9 ч 50 м	10 ч 14 м	10 ч 49 м	15 ч 48 м
Средняя плотность, г/см ³	5,5	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,4	1,6
Масса, масс Земли	0,06	0,82	1,0	0,11	318	95,2	14,6	17,2
Число спутников ¹	-	-	1	2	80	83	27	14

5. Существование множества *кометных тел* на «окраинах» Солнечной системы. Будучи затянутым силами тяготения во внутренние области Солнечной системы, ядро кометы, состоящее в основном из льда, постепенно испаряется. Образуется газовый шлейф – кометный хвост (рис. 32). Периодически Земля пересекает орбиты комет. В этом случае остатки кометного вещества массой в несколько миллиграммов сгорают в атмосфере Земли. Явление возникающей при этом вспышки называют метеором.

Изучение вещества, составляющего ядро кометы, имеет значительный научный интерес, так как это представляет возможность выяснить, каким было то вещество, из которого и образовалась Солнечная система.

По современным научным представлениям, Солнце, планеты и их спутники образовались одновременно около 4,6 млрд лет назад путём гравитационного сжатия вращающегося газопылевого облака.

¹ Для планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) указано число спутников, достоверно известных на 1 января 2022 г. При дальнейшем изучении планет-гигантов могут быть открыты и новые их спутники.

Рис. 32. Комета Галлея. Наблюдалось 30 её сближений с Солнцем начиная с 240 г. до н. э. Период 75–76 лет. В 1986 году комету встретили пять космических аппаратов. Зарегистрировано твёрдое ядро кометы неправильной формы размером 16×8 км. В следующий раз комета появится в 2061 году



При сжатии размеры газопылевого облака уменьшились, и выросла скорость вращения облака. Образовался протопланетный диск диаметром примерно 200 а. е. и горячая звезда в центре. Молодое горячее Солнце в течение 100 млн лет выбрасывало вещество в окружающее космическое пространство. Мощное световое давление излучения звезды выметало атомы лёгких элементов из её окрестностей.

После стабилизации работы Солнца во внутренней области диска Солнечной системы образовались планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), а во внешней области из замёрзшей воды, метана, твёрдой углекислоты образовались планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Процесс формирования планет длился более 100 млн лет (рис. 33).

В настоящее время учёные уверены, что Земля возникла из холодной газопылевой массы и

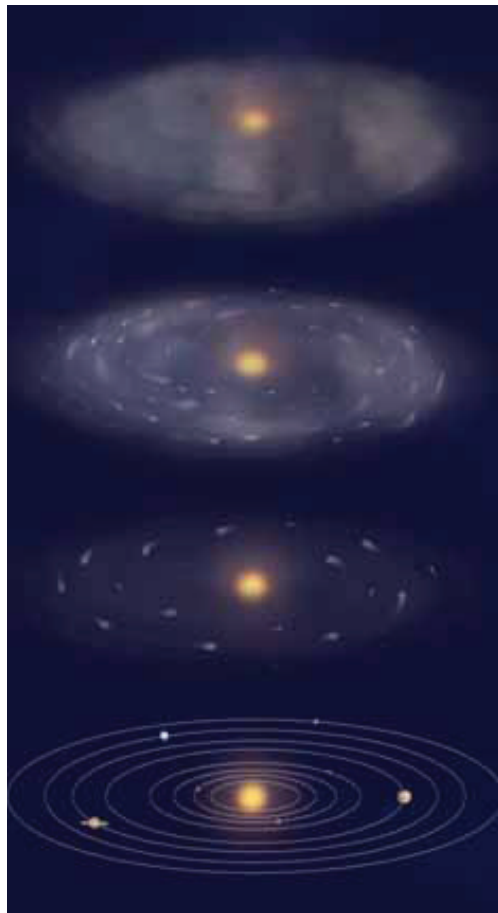


Рис. 33

разогрелась за счёт энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных элементов. Это привело к расплавлению земных недр, тяжёлые элементы, опустившись к центру планеты, образовали её ядро, а из более лёгких возникла земная кора.

Система «Земля – Луна». Спутники планет, как показывает теоретический анализ, проведённый учёными-астрофизиками, в большинстве случаев образовались путём гравитационной конденсации из газопылевых дисков, сформировавшихся вокруг планет.

Для Луны – спутника Земли – наиболее вероятен, по мнению учёных, сценарий её образования на околоземной орбите из нескольких крупных спутников при их столкновениях. Создана также теория, описывающая образование Луны как результат столкновения Земли с небесным телом, сравнимым по размерам с Марсом. Этот удар пришёлся по касательной, и в результате большая часть вещества ударившего в Землю космического тела и часть вещества земной мантии были выброшены на околоземную орбиту.

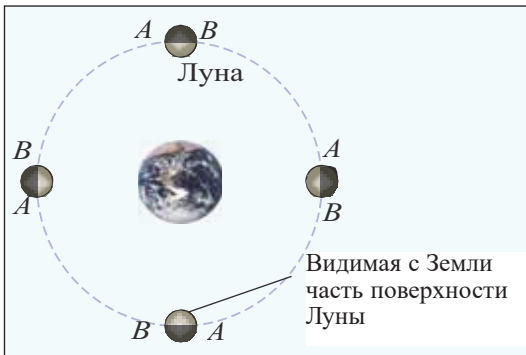


Рис. 34

Большинство астрономов склонно считать систему «Земля – Луна» двойной планетой. Действительно, Луна находится от Земли в среднем на расстоянии 384 000 км (0,0026 а. е.), Луна уступает Земле всего в 4 раза по размеру, а по массе – в 81 раз. Взаимное притяжение Земли и Луны обуславливает их вращение по орбитам, близким к круговым, вокруг общего центра масс (находящегося

внутри Земли на расстоянии около 4700 км от центра Земли).
Период обращения Луны вокруг Земли составляет 27,3 сут. С таким же периодом Луна вращается вокруг своей оси. По этой причине Луна оказывается повёрнутой к Земле всегда одной и той же стороной (рис. 34).

Эта синхронизация периодов не случайна. Вспомните, что тяготение Луны вызывает приливы на Земле. Подобно вынуждающей переменной силе, действующей на маятник, сила тяготения Луны колеблет водяные массы, и по поверхности океана движутся приливные горбы, дважды в сутки приводящие к приливам и отливам.



Видимая сторона Луны
(вид с Земли)

Обратная сторона Луны

Рис. 35

Вращающаяся вокруг своей оси Земля взаимодействует с движущимися водяными массами, это приводит к медленному торможению Земли (за каждые сто лет сутки на Земле удлиняются на 2 мс).

Аналогичным образом приливное трение, действующее на Луну со стороны Земли, за несколько миллиардов лет уравнило период обращения нашего спутника вокруг Земли и период его вращения вокруг своей оси.

Ввиду того, что Луна практически лишена атмосферы, для неё характерны значительные перепады температуры. В течение двухнедельного лунного дня поверхность нагревается до 130°C , а за двухнедельную лунную ночь охлаждается до минус 150°C . На поверхности Луны (рис. 35) выделяются светлые материки – старая гористая местность, более тёмные лунные моря – обширные равнинные области, залитые застывшей лавой, извергнутой из недр Луны (конечно же, лунные моря не содержат ни капли воды). Заметными деталями рельефа Луны являются также кольцеобразные кратеры метеоритного происхождения (рис. 36).



Рис. 36. Кратер Дедал. Диаметр 93,6 км, наибольшая глубина 3 км. Находится около центра обратной стороны Луны. Предложен как место будущего гигантского радиотелескопа (будет ограждён от радиопомех с Земли)

Планеты Солнечной системы. Планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля, Марс – сравнительно невелики по размерам и имеют большую плотность. Они сложены в основном из соединений кремния и железа.



Рис. 37. Снимок участка поверхности Меркурия, полученный АМС «Мессенджер». Аппарат был запущен в августе 2004 г., в январе 2008 г. совершил первый облёт планеты, в марте 2011 г. вышел на орбиту вокруг планеты

Меркурий. Ближайшая к Солнцу планета Меркурий находится на незначительном угловом расстоянии от светила и по этой причине её сложно наблюдать. Только во второй половине XX века учёные установили, что Меркурий вращается вокруг своей оси таким образом, что за трое меркурианских звёздных «суток» проходит два меркурианских «года». Меркурий – самая маленькая из планет Солнечной системы, его размеры чуть больше размеров Луны.

Изучение Меркурия радиоастрономическими, радиолокационными методами и с помощью космических аппаратов позволило определить температуру поверхности планеты, которая колеблется от 430 до -180°C . Получены фотографии поверхности (рис. 37),

которая напоминает лунную: метеоритные кратеры и следы эпох активного вулканизма в виде застывшей лавы. Если внешне Меркурий похож на Луну, то внутренне – на Землю. Меркурий, как и Земля, имеет железное ядро, которое является источником магнитного поля, хотя его величина слабее земного в сто раз.

Венера. Вторая внутренняя планета Солнечной системы – Венера – удаляется от Солнца на угловое расстояние не более 48° (рис. 38). Венера – яркий астрономический объект с видимой звёздной величиной -4 (уступает по яркости лишь Солнцу и Луне). Наиболее ярко Венера видна через некоторое время после захода Солнца или незадолго до восхода, что дало повод называть её Вечерней звездой или Утренней звездой. Венера обладает рекордной для планет земной группы атмосферой, которая была обнаружена Михаилом Васильевичем Ломоносовым ещё в 1761 году при прохождении Венеры перед диском Солнца¹.

¹ Последнее прохождение Венеры по диску Солнца произошло 6 июня 2012 года. Следующее прохождение произойдёт 11 декабря 2117 года.

Ломоносов обратил внимание на то, что в момент соприкосновения Венеры с диском Солнца и при схождении Венеры с диска Солнца возникало «тонкое, как волос, сияние». Ломоносов дал верное научное объяснение этому явлению, считая его результатом преломления солнечных лучей в атмосфере Венеры.

Рис. 38. Орбиты Венеры, Земли и Марса. B_1 и B_2 – точки наибольшего удаления Венеры от Солнца. С Земли в это время видна лишь часть освещённого полушария планеты в виде половины диска



Венера активно исследовалась с помощью автоматических межпланетных станций (рис. 39). Было установлено, что давление атмосферы, состоящей в основном из углекислого газа, на поверхности планеты превосходит 90 атмосфер, температура достигает 470 °С. Такая высокая температура обусловлена в первую очередь не близостью к Солнцу, а так называемым «парниковым эффектом».

Солнечное излучение достигает Венеры, а тепловое инфракрасное излучение поверхности планеты задерживается «углекислой шубой».



Рис. 39. Панорама поверхности Венеры. Передано АМС «Венера 14»



Рис. 40. Сравнительные размеры планет земной группы (слева направо): Меркурия, Венеры, Земли, Марса

Атмосфера планеты и облачный покров, образованный облаками из капелек концентрированной серной кислоты, надёжно прикрывают поверхность Венеры от непосредственного наблюдения. Только во второй половине XX века применение радиолокационных методов позволило определить, что Венера медленно вращается в направлении, обратном направлению вращения других планет. Радиолокационное картографирование выявило на поверхности Венеры возвышенности, сравнимые по размерам с земными материками, горные хребты высотой до 11 км, каньоны и низменности. Большая часть поверхности планеты покрыта застывшей базальтовой лавой.

Анализ рельефа Венеры позволил учёным выдвинуть гипотезу о том, что ранее на планете существовали океаны воды, испарившиеся к настоящему времени.

Земля. Третья по счёту планета Солнечной системы – Земля – на первый взгляд является рядовой планетой (рис. 40). Уникальная особенность Земли – это существование на ней жизни. Появление на планете вследствие её эволюции жизни оказало существенное влияние на ход последующих природных процессов на Земле. Наиболее ярко это проявилось, например, в изменении химического состава атмосферы Земли после появления бактерий, выделяющих при фотосинтезе кислород.

Изучение планет земной группы и изучение Земли взаимно дополняют и обогащают друг друга. Например, анализ парникового процесса на Венере позволяет с большей точностью прогнозировать последствия пренебрежения экологическими проблемами на Земле. С другой стороны, именно на Земле существует возможность, используя сейсмические волны, досконально изучить внутреннее строение нашей планеты. Эти исследования позволили высказать обоснованные предположения

о существовании в центре Земли помимо жидкого железного ядра, в котором циркулируют электрические токи – источники земного магнетизма, и внутреннего твёрдого ядра. Аналогичная гипотеза о наличии в недрах Венеры металлического ядра массой около четверти массы всей планеты, в котором нет направленного движения заряженных частиц, объясняет отсутствие магнитного поля на Венере.

Марс. Четвёртой по удалённости от Солнца планетой земной группы является Марс. Выбор названия планеты в честь бога войны в древнеримской мифологии, наверное, не случаен. При наблюдении поверхность Марса имеет красноватый оттенок, который ей придаёт оксид железа (рис. 41). Марс имеет два спутника небольших размеров и неправильной формы (рис. 42, а, б).

Марс – это планета, которая наиболее активно изучалась и изучается с помощью автоматических межпланетных станций. Часть из них находится на орбитах искусственных спутников, некоторые работают на поверхности Марса. С помощью марсоходов изучается рельеф и грунт на поверхности Марса, состав атмосферы и условия на планете (рис. 43).



Рис. 41. Марс. Снимок сделан космическим телескопом «Хаббл» 26 июня 2001 г.

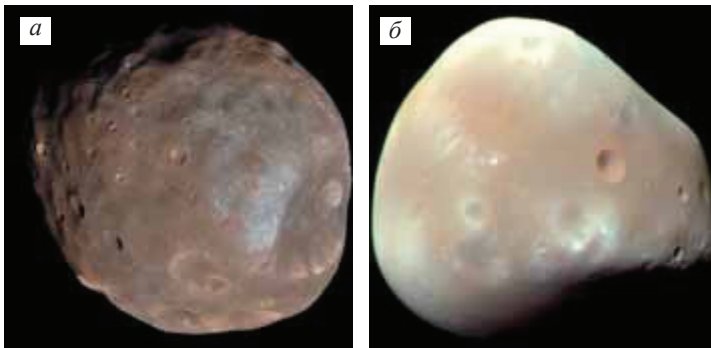


Рис. 42. Спутники Марса:

а – спутник Фобос. Размеры спутника 26×21 км. Снимок сделан аппаратом Mars Reconnaissance Orbiter 23 марта 2008 г.;

б – спутник Деймос. Поперечник спутника 13 км. Снимок сделан аппаратом Mars Reconnaissance Orbiter 21 февраля 2009 г.



Рис. 43. Закат на Марсе. Снимок сделан марсоходом «Оппортьюнити» 14 мая 2005 г.

Заметной деталью рельефа планеты является самый высокий вулкан в Солнечной системе – гора Олимп. На поверхности Марса также выделяются полярные шапки, состоящие из водяного льда и замёрзшей углекислоты. Диаметр, например, северной полярной шапки около 1000 км. Полярные шапки заметно меняются в зависимости от времени года на планете.

При таянии шапок в полярной области возрастает давление атмосферы, состоящей в основном из углекислого газа. Это приводит к перемещению атмосферных масс. Несмотря на то, что атмосфера крайне разрежена (её давление в 160 раз меньше в сравнении с земной), в условиях слабого тяготения (оно составляет менее 40% от земного) возникают гигантские пылевые бури. Бури могут бушевать несколько месяцев, поднимая на высоту более 10 км до миллиарда тонн пыли.

В настоящее время для Марса характерен крайне сухой и холодный климат со значительными сезонными и суточными перепадами температур при средней температуре около -50°C . Но изучение фотографий поверхности Марса убедительно свидетельствует о том, что когда-то на Марсе текли полноводные реки – обнаружены высохшие русла этих рек. Марсоходами найдены минералы, которые могли образоваться только в результате длительного воздействия воды.



4.1. Как зависит температура кипения воды от внешнего давления?

Следовательно, в прошлом атмосфера планеты должна была быть более плотной, а климат – более тёплым и влажным. Что послужило причиной столь серьёзного изменения на Марсе – вопрос открытый. Возможно, причина кроется в столкновении с крупным космическим телом, произошедшем в далёком прошлом.

Планеты-гиганты астрономы подразделяют на две группы. Это газовые гиганты (Юпитер, Сатурн) и ледяные гиганты (Уран и Нептун). В отличие от планет земной группы у газовых гигантов нет твёрдой внешней поверхности. Они образованы из водорода и гелия и находятся в основном в газообразном состоянии. Атмосфера, постепенно уплотняясь, образует жидкую мантию, и в недрах планет при давлении более миллиона атмосфер водород переходит в особое состояние – металлический водород. Токи, циркулирующие в таком ядре, являются источниками мощного магнитного поля. Это приводит к значительной электромагнитной активности газовых гигантов: мощное *радиоизлучение* планет, полярные сияния, гигантские молнии протяжённостью в тысячи километров.

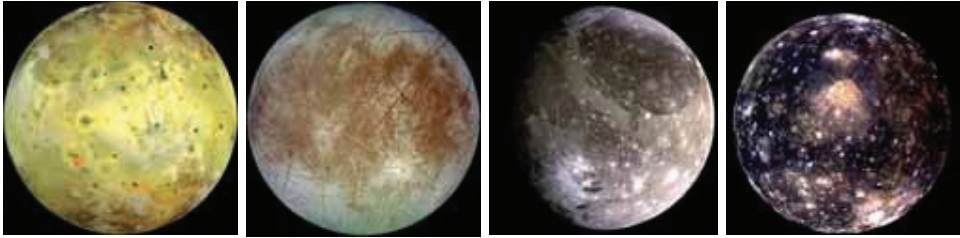
Юпитер и Сатурн. Эти планеты были известны ещё астрономам древности, но их активное изучение стало возможным только с началом телескопической эры в астрономии (1610 г.). Галилео Галилеем открыты четыре крупных спутника Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто), замечены кольца Сатурна. Но настоящий прорыв в изучении планет-гигантов был сделан в последние десятилетия XX века, когда к наземным и орбитальным телескопам было добавлено применение автоматических межпланетных станций.

В декабре 1973 года космический аппарат «Пионер-10» пролетел на расстоянии 132 000 км от облачного покрова Юпитера. Были получены данные о составе атмосферы планеты, уточнена её масса, измерено магнитное поле. Космическим аппаратом «Вояджер-1» сделаны качественные фотографии Юпитера (рис. 44).

В 1989 году был запущен космический аппарат «Галилео», который через 6 лет полёта достиг Юпитера и стал первым аппаратом, вышедшим на орбиту искусственного спутника планеты, где аппарат и функционировал до 2003 года. С аппарата в атмосферу Юпитера был сброшен спускаемый зонд. Благодаря работе космических аппаратов было установлено, что в космически холодной атмосфере Юпитера (-160°C) бушуют бури, скорость которых достигает 150 м/с.



Рис. 44. Юпитер. Снимок сделан «Вояджером-1» в январе 1979 года с расстояния 40 млн км. В декабре 2010 года «Вояджер-1» достиг пределов Солнечной системы, пролетев на тот момент около 17,5 млрд км. В июне 2012 года космический аппарат вышел на границу межзвёздного пространства. В настоящее время находится в работоспособном состоянии



Ио

Европа

Ганимед

Каллисто

Рис. 45. Наиболее крупные спутники Юпитера. Снимки сделаны космическим аппаратом «Галилео» в 2005 году

Было выяснено, что единственная постоянная деталь рельефа Юпитера – Большое Красное пятно, размер которого превосходит размеры Земли и которое было обнаружено при телескопических наблюдениях ещё в 1665 году, – есть не что иное, как долгоживущий вихрь в атмосфере Юпитера. Были изучены спутники Юпитера (рис. 45).

Автоматическими межпланетными станциями помимо спутников у Юпитера были обнаружены кольца. Но самой заметной системой колец обладает Сатурн (рис. 46). Кольца состоят из частичек льда и пыли размером от 1 см до 10 м. При диаметре колец 250 000 км они очень тонкие – толщина колец не достигает и 1 км. Помимо колец также выделяется спутник Сатурна Титан – единственный среди спутников планет Солнечной системы обладает плотной атмосферой. Сам спутник состоит из скальных пород и водяного льда, а его атмосфера – преимущественно из азота (рис. 47).



Рис. 46. Сатурн. Снимок сделан АМС «Кассини» в июле 2008 года



Рис. 47. Спутник Сатурна Титан. Снимок сделан АМС «Кассини» в 2004 году

Сатурн исследовала автоматическая межпланетная станция «Кассини». Она была запущена в 1997 году, в июле 2004 года достигла системы Сатурна и вышла на орбиту вокруг планеты. В январе 2005 года специальный зонд отделился от станции и спустился на поверхность спутника Сатурна Титан. В дальнейшем АМС «Кассини» изучала сезонные изменения, происходящие на Сатурне, совершала пролёты между Сатурном и его внутренним кольцом. В сентябре 2017 года аппарат был направлен в сторону Сатурна и перед тем как сгореть в атмосфере планеты передал научные данные о её составе и условиях в ней.

Уран и Нептун. Наименее изученные на сегодняшний день планеты Солнечной системы – это Уран и Нептун. Являясь планетами-гигантами (они больше Земли по размерам в 4 раза, а по массе в 15–17 раз), Уран и Нептун отличаются от двух других планет-гигантов – Юпитера и Сатурна. Это отличие в первую очередь связано не с более скромными размерами, чем у Юпитера и Сатурна, а с тем, что в недрах Урана и Нептуна отсутствует металлический водород, но присутствуют лёд и горные породы. Основу атмосферы планет составляют водород и гелий, находящиеся при низких температурах (до минус 220 °С).

Атмосфера на Уране находится в более спокойном состоянии, чем на других планетах-гигантах, а вот в атмосфере Нептуна зафиксированы самые сильные ветры среди планет Солнечной системы – до 580 м/с.

Уран был открыт при помощи телескопических наблюдений английским астрономом Уильямом Гершелем в 1781 году.

(Уран при благоприятных условиях виден даже невооружённым глазом, но он принимался наблюдателями за слабую звёздочку.)

Нептун – единственная планета, чьё существование было предсказано теоретически. Орбита планеты была вначале рассчитана по тому гравитационному воздействию, которое Нептун оказывает на движение Урана. Это было истинным триумфом науки – в сентябре 1846 года в первый же час наблюдения планета была обнаружена именно в той точке неба, на которую астрономам-наблюдателям указали астрономы-математики.



Рис. 48. Уран. Снимок сделан АМС «Вояджер-2» в 1986 г.



Рис. 49. Нептун. Снимок сделан АМС «Вояджер-2» в 1989 г.

Единственной автоматической станцией, которая исследовала планеты Уран и Нептун, был космический аппарат «Вояджер-2». Аппарат был запущен NASA (НАСА, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) в августе 1977 г., достиг окрестностей Урана в январе 1986 г., а Нептуна в августе 1989 г. «Вояджер-2» провёл изучение атмосферы и уникальных погодных условий на планетах. Были обнаружены новые спутники и системы колец. Изучена структура магнитных полей и получены фотографии планет и их крупных спутников (рис. 48, 49).

В последние годы одно из наиболее интересных исследований было проведено космическим зондом «Новые горизонты», созданным НАСА. Станция стартовала в январе 2006 года. Для запуска использовалась наиболее мощная американская ракета-носитель с установленными на её первой ступени четырьмя российскими двигателями. Это позволило «Новым горизонтам» покинуть окрестности Земли с самой большой из всех космических аппаратов скоростью – более 16 км/с (относительно Земли).

В конце февраля 2007 года аппарат совершил гравитационный манёвр в окрестностях Юпитера, были получены фотографии планеты и её спутников. В марте 2015 года была проведена очередная, седьмая по счёту, коррекция траектории (путём включения двигателя зонда); в это время зонд находился от Солнца на расстоянии около 4,77 млрд км, а расстояние до Плутона составляло 1 а.е. В июле 2015 года зонд «Новые горизонты» пролетел на расстоянии 12,5 тысяч километров от поверхности карликовой планеты (рис. 50, а, б). За девять дней наблюдений собрано 50 гигабит информации, которая передавалась с борта зонда на Землю более года – до конца октября 2016 года.

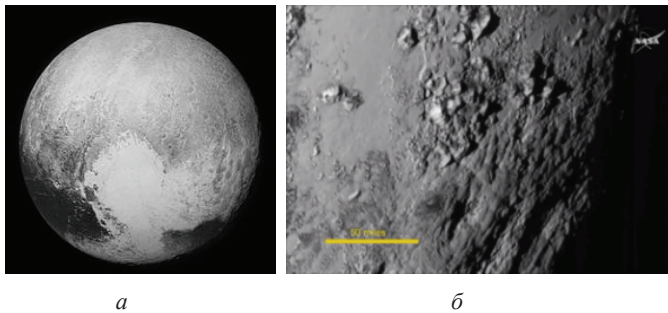


Рис. 50
 а – Плутон. Фотоснимок, сделанный зондом «Новые горизонты» при приближении к Плутону;
 б – поверхность Плутона: видны горы и равнина

В конце августа 2015 года группа управления НАСА направила космический зонд к новой цели, в сторону астероида MU69 Ульгима Туле, открытого с помощью космического телескопа «Хаббл» в 2014 году (то есть, уже после запуска аппарата). Зонд прошёл от астероида на расстоянии 2200 км, были исследованы его характеристики, получены фотографии. Ульгима Туле – самый далёкий объект, до которого «дотянулся» человек, он находится на расстоянии 43,4 а. е. от Солнца и 1 млрд км от орбиты Плутона.

Законы движения планет. Строение Солнечной системы и законы движения планет обусловлены действием сил всемирного тяготения.



4.2. Как формулируется закон всемирного тяготения?

Окончательная формулировка закона всемирного тяготения, как вы знаете, была сделана Ньютоном в 1687 году в его главном научном труде «Математические начала натуральной философии». Закон всемирного тяготения совместно с другими законами классической механики позволяет теоретически вывести законы движения планет и других небесных тел, составляющих Солнечную систему. Но к этому времени законы движения планет уже были сформулированы астрономами как обобщение имеющихся в их распоряжении данных о наблюдаемом движении планет Солнечной системы. Совпадение эмпирических (опытных) фактов и теоретических выводов стало убедительным доказательством справедливости законов классической механики.

Первая естественнонаучная и полностью разработанная математически теория движения тел Солнечной системы была создана выдающимся древнегреческим астрономом Клавдием Птолемеем (ок. 90 – ок. 160). Теория охватывала широкий круг проблем и обобщала громадный наблюдательный материал. Она широко использовалась на практике и позволяла вычислять положение планет относительно звёзд, предсказывать наступление солнечных и лунных затмений.



Клавдий Птолемей (ок. 90 – ок. 160). Древнегреческий астроном, математик, оптик, географ и теоретик музыки. Создатель геоцентрической системы мира. Его главный астрономический труд «Альмагест» был написан около 150 года и в течение пятнадцати веков (!) был основным учебником астрономии.

В разработанной Птолемеем системе мира, получившей название геоцентрической (от *geo* – Земля), Земля считалась неподвижной, Луна, планеты и Солнце совершают сложное движение, которое является комбинацией равномерных движений по окружностям определённого радиуса, центры которых, в свою очередь, также равномерно движутся по окружностям. Подобная комбинация круговых движений позволяла с достаточной для того времени точностью согласовывать результаты теоретических расчётов с результатами практических наблюдений за движением светил.



Николай Коперник (1473–1543).

Выдающийся астроном. Создатель гелиоцентрической системы мира, изложенной в его основном научном труде «О вращении небесных сфер» (1543 год). На пьедестале памятника учёному в Варшаве высечены слова, в полной мере отражающие суть открытия Коперника: «Остановивший Солнце, сдвинувший Землю».

Решающий шаг к созданию современной гелиоцентрической системы мира (от *гелио* – Солнце) был сделан выдающимся астрономом Николаем Коперником (1473–1543). В центре Вселенной у Коперника располагается Солнце, вокруг которого движутся планеты: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн. (Уран и Нептун на тот момент не были известны астрономам.) Суточное движение Солнца и смена дня и ночи объясняется вращением Земли вокруг оси. Смена времён года объясняется годичным движением Земли вокруг Солнца. Нашло своё простое объяснение и видимое с Земли петлеобразное движение планет (рис. 51).

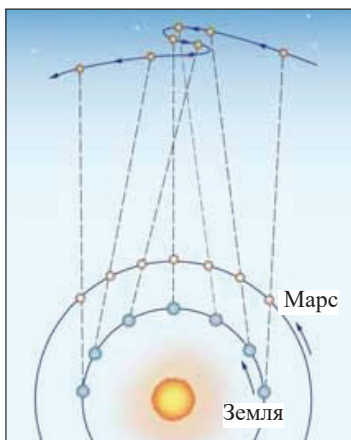


Рис. 51. Видимое петлеобразное движение Марса

Созданная Коперником гелиоцентрическая система мира со временем вышла далеко за пределы астрономической науки и стала основой современного научного мировоззрения, дав мощный импульс развитию естествознания.

Первоначально расчёты движения планет, производимые по теории Коперника, не превосходили по точности тех расчётов, что делались на основе прежних астрономических теорий.



Иоганн Кеплер (1571–1630).

Выдающийся немецкий математик, астроном, оптик. Один из творцов астрономии нового времени. Изобрёл телескоп, в котором объектив и окуляр являются двояковыпуклыми линзами.

Это было связано с тем, что Коперник, так же как и астрономы древности, предполагал, что небесные тела равномерно движутся по окружностям. Истинные законы движения планет были установлены выдающимся немецким учёным Иоганном Кеплером (1571–1630). Опираясь на результаты наблюдений, выполненные в течение многих лет датским астрономом Тихо Браге (1546–1601), Кеплер смог после беспрестанных семнадцатилетних математических трудов сформулировать законы движения планет, которые ныне носят его имя.

Первый закон Кеплера. *Орбита каждой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце.*

Эллипс – это замкнутая кривая, внешне напоминающая «деформированную» сжатую окружность (рис. 52). Эллипс имеет две точки – фокусы F и F' – и обладает тем свойством, что сумма расстояний от фокусов до любой точки эллипса есть величина постоянная для данного эллипса:

$$FM + MF' = \text{const.}$$

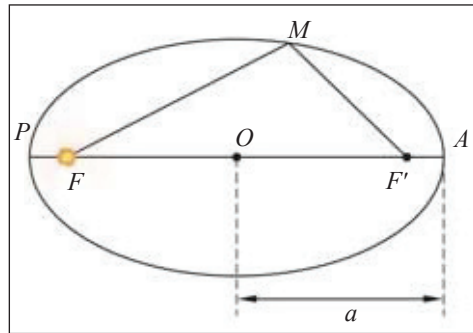


Рис. 52

Размеры эллипса характеризуются его большой осью PA . Обозначим центр эллипса буквой O . Тогда

$$PO = OA = a,$$

где a – большая полуось эллипса.

$$PA = 2a.$$

Большую полуось принимают за среднее расстояние планеты от Солнца. Для Земли это расстояние составляет одну астрономическую единицу.



4.3. Чему равно численное значение астрономической единицы, выраженное в километрах?

Степень эллиптичности («сплюснутости») орбит у планет Солнечной системы различна. Так, Венера и Земля движутся практически по круговым орбитам. Орбита Марса, анализ видимого движения которого и позволил Кеплеру сформулировать законы движения планет, отличается от окружности менее чем на 10%. Наиболее вытянутая орбита у Меркурия.

Другие тела Солнечной системы – спутники планет, астероиды, кометы – также движутся по эллиптическим орбитам.

Второй закон Кеплера. В отличие от движения по окружности движение планеты по эллиптической орбите происходит с переменной скоростью (рис. 53). Как же связаны скорость орбитального движения планеты v и радиус-вектор \vec{r} , соединяющий светило (точка F) и положение планеты на орбите (точка M)? Ответ на этот вопрос и составляет содержание второго закона Кеплера.

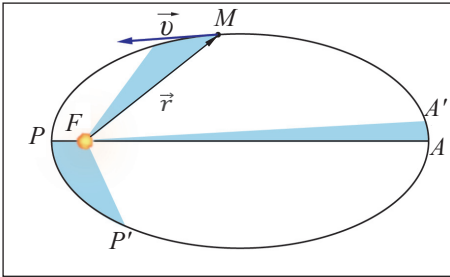


Рис. 53

Если дуги PP' и AA' (рис. 53) пройдены планетой за одно и то же время, то площади фигур PFP' и AFA' , как утверждает второй закон Кеплера, равны.



4.4. В каком случае планета движется с большей скоростью – когда она находится вблизи Солнца или когда она находится вдали от Солнца (соответственно точки P и A на рисунке 53)?

Третий закон Кеплера. Третий закон Кеплера устанавливает связь между продолжительностью оборота планеты вокруг Солнца («года») и средним расстоянием планеты от Солнца (большой полуосью орбиты).

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

Если обозначить периоды обращения планет как T_1 и T_2 , а большие полуоси орбит планет как a_1 и a_2 , то формула третьего закона Кеплера будет иметь вид

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

Изменчивая картина. При взгляде на ночное небо все звёзды, Луна и другие небесные тела воспринимаются нами как одинаково удалённые, как будто бы они все «закреплены» на одном «куполе неба». Воображаемую сферу произвольного радиуса с центром в точке наблюдения, на которой как будто бы находятся небесные светила, называют *небесной сферой*.

Для удобства ориентирования на небесной сфере, как на глобусе, введена система координат, а вся поверхность небесной сферы мысленно разделена на 88 областей – созвездий. Звёзды одного созвездия принято обозначать буквами греческого алфавита в порядке убывания их блеска (α – ярчайшая звезда созвездия, β – вторая по блеску звезда в созвездии и так далее). Самые яркие звёзды имеют собственные имена (таблица 2).

Таблица 2. Наиболее яркие звёзды Северного полушария

Наименование звезды	Видимая звёздная величина	Наименование звезды	Видимая звёздная величина
Альдебаран (α Тельца)	0,85	Капелла (α Возничего)	0,08
Альгаир (α Орла)	0,77	Поллукс (β Близнецов)	1,15
Арктур (α Волопаса)	–0,05	Процион (α Малого Пса)	0,37
Бетельгейзе (α Ориона)	0,7	Ригель (β Ориона)	0,12
Вега (α Лир)	0,03	Сириус (α Большого Пса)	–1,47
Денеб (α Лебедя)	1,25	Спика (α Девы)	0,98

Земля, как вам хорошо известно, вращается вокруг своей оси, делая один оборот за сутки. Это движение мы воспринимаем как наблюдаемый нами поворот небесной сферы вокруг оси, параллельной оси вращения Земли (рис. 54).

Точку, в которой ось вращения пронизывает небесную сферу, называют полюсом мира. В Северном полушарии практически вблизи Северного

полюса мира находится Полярная – α Малой Медведицы. Полярная считается неподвижной в отличие от других звёзд, совершающих поворот вместе с небесной сферой¹. Ещё раз подчеркнём, что кажущееся нам суточное движение светил с востока на запад, изменение вида звёздного неба в течение суток является отражением реального движения – вращения Земли вокруг своей оси с запада на восток.

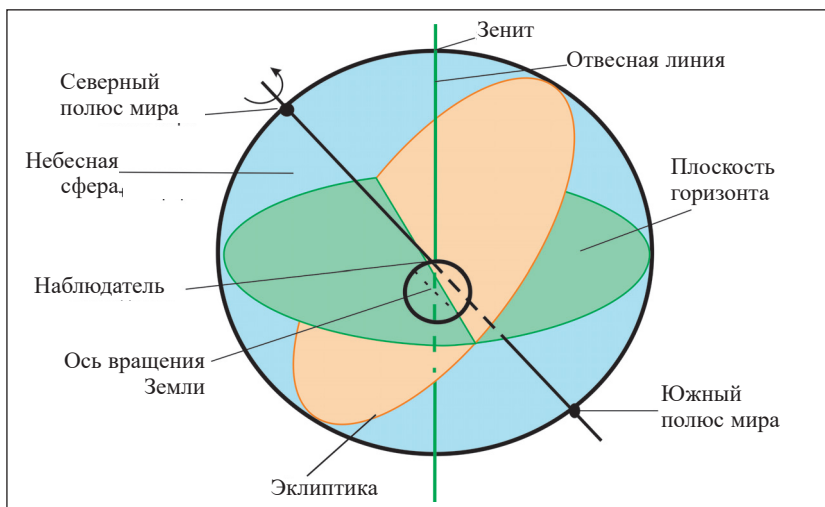


Рис. 54

Так как планеты движутся вокруг Солнца, то они будут перемещаться относительно звёзд, меняя своё местоположение на небесной сфере. Но и наша Земля обращается вокруг Солнца. Следовательно, и Солнце в течение года будет менять место своего расположения на небесной сфере. Каждые новые сутки Солнце занимает новое положение и в итоге за год, перемещаясь по небесной сфере, совершает один оборот. Годичный путь Солнца на небесной сфере называют *эклиптикой* (рис. 54), а созвездия, через которые проходит эклиптика, – *зодиакальными созвездиями*.

«Путешествие» Солнца по эклиптике ведёт к изменению продолжительности светлой (дневной) и тёмной (ночной) частей суток, а значит, в разное время года мы будем иметь возможность наблюдать ночью различные участки небесной сферы. Этим объясняется изменение вида звёздного неба в течение года (рис. 55–58).

¹ Любителям путешествий и туристам следует помнить тот факт, что угловая высота Полярной равна географической широте места её наблюдения.

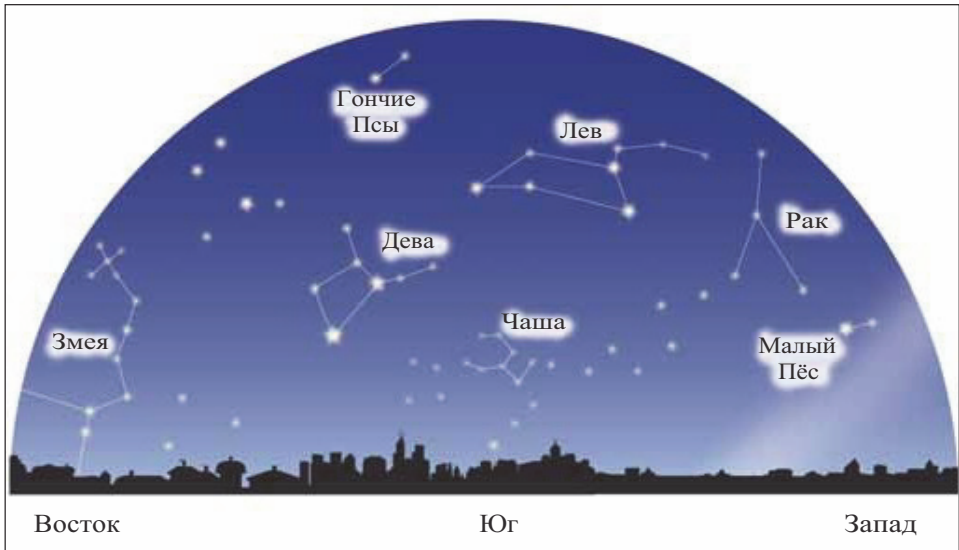
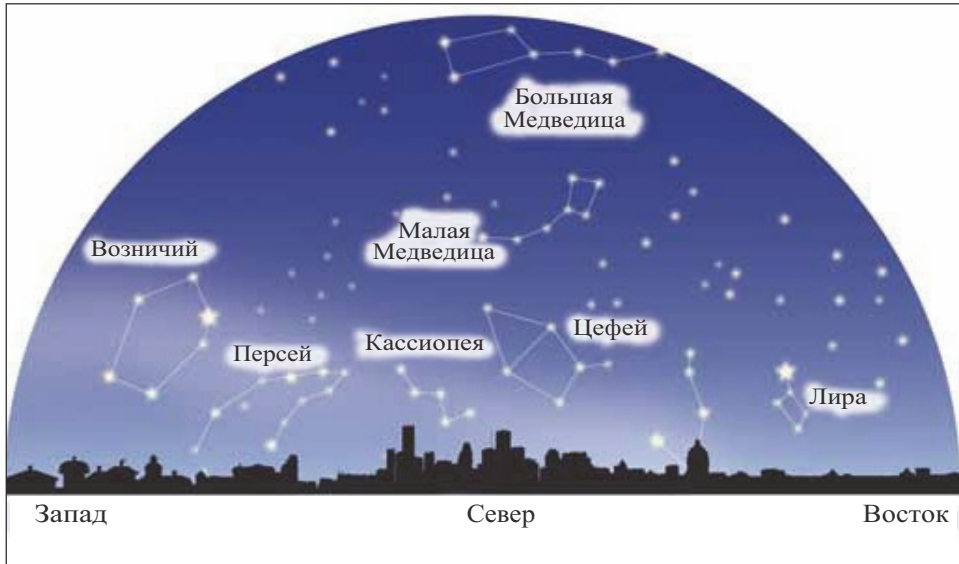


Рис. 55. Вид весеннего неба (в вечерние часы)

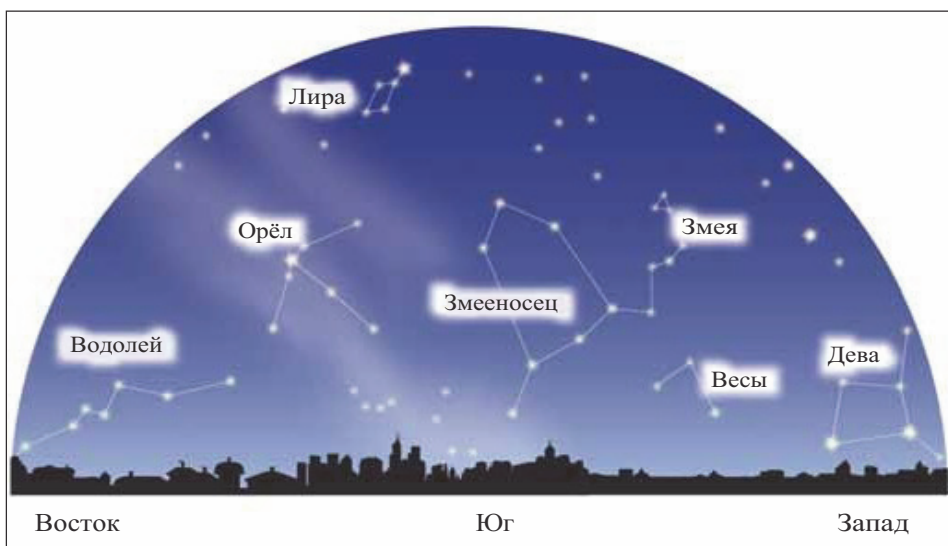
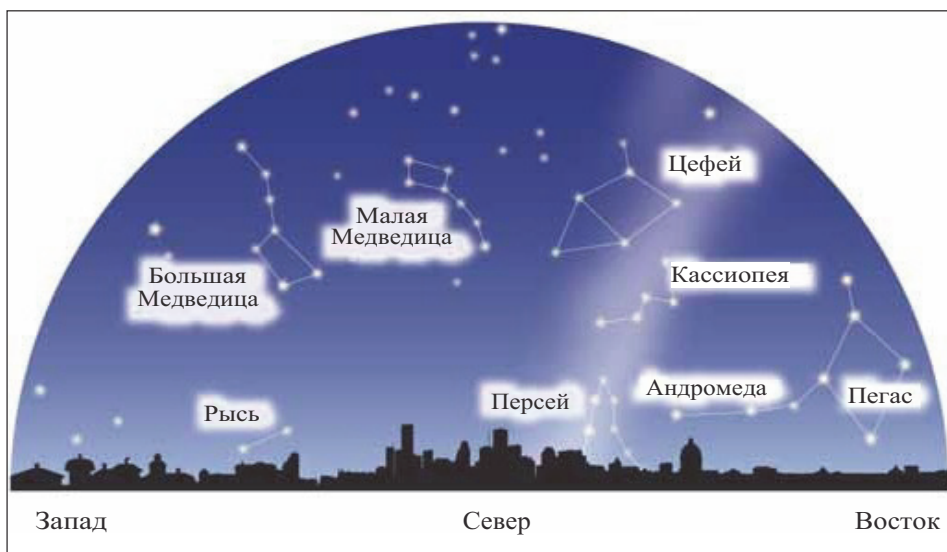


Рис. 56. Вид летнего неба (в вечерние часы)

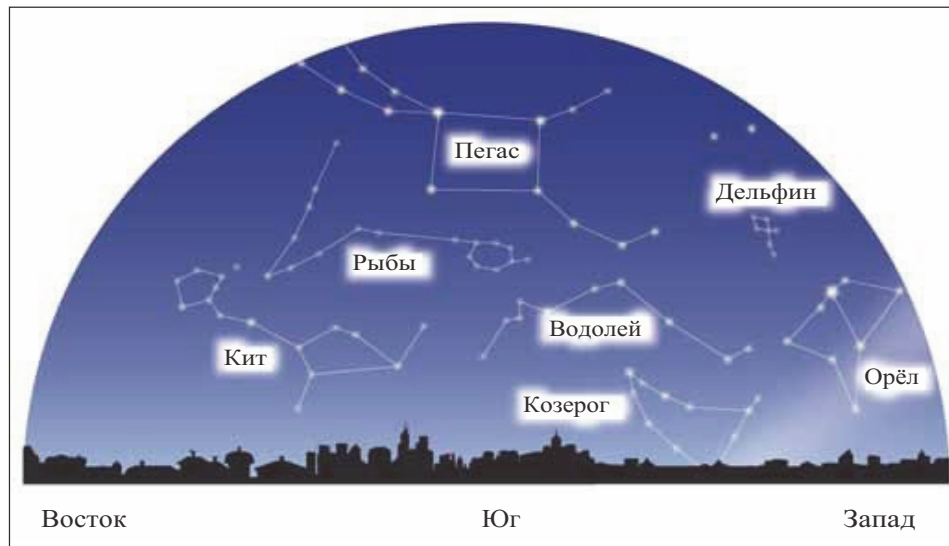
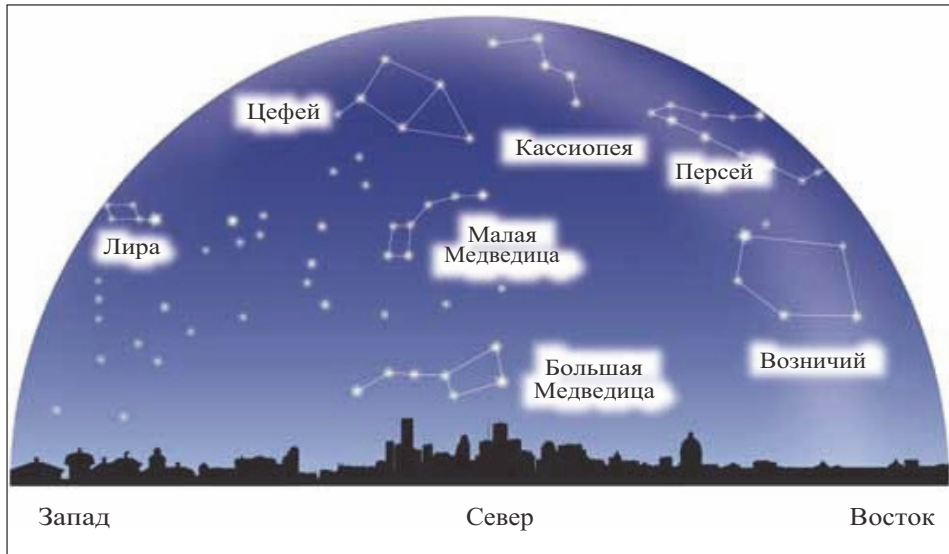


Рис. 57. Вид осеннего неба (в вечерние часы)

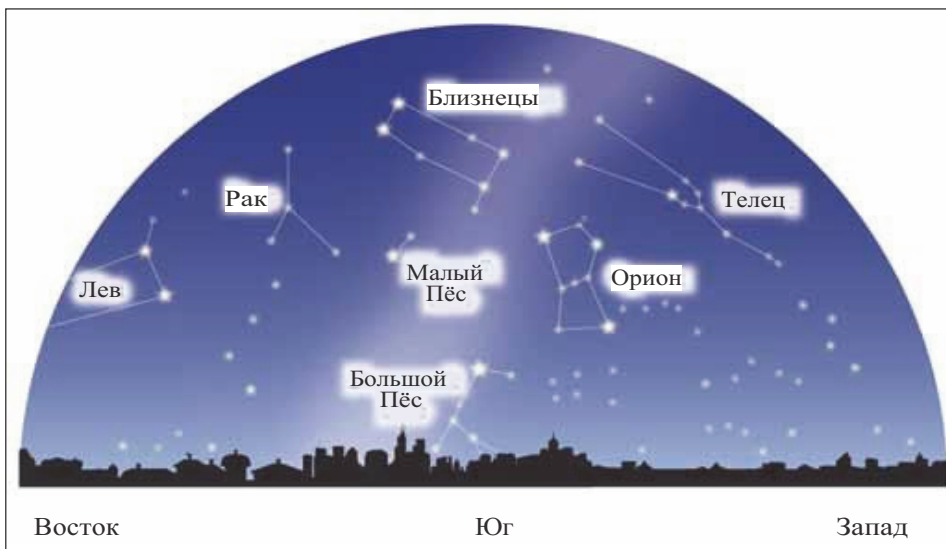
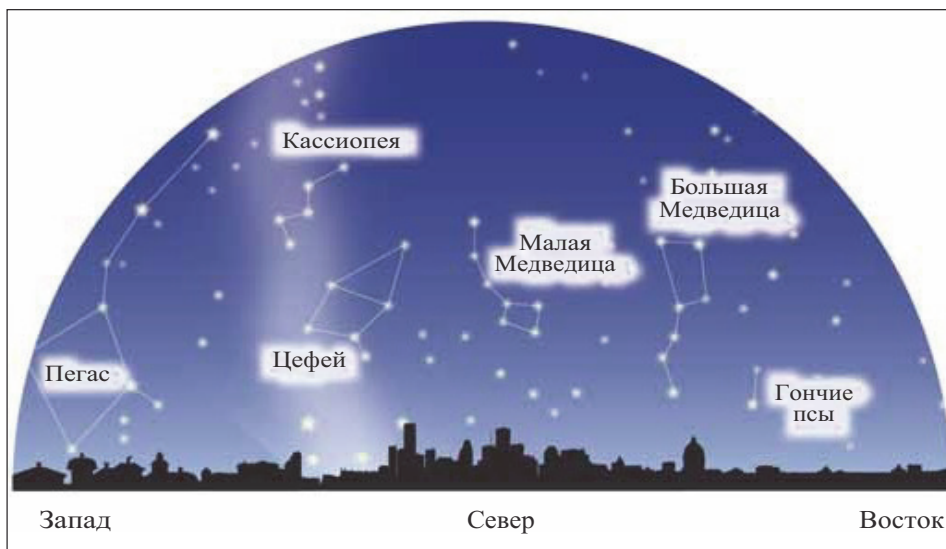


Рис. 58. Вид зимнего неба (в вечерние часы)

Основные особенности строения Солнечной системы, теория образования Солнечной системы, особенности системы «Земля – Луна», планеты Солнечной системы: планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), планеты – газовые гиганты (Юпитер, Сатурн), планеты – ледяные гиганты (Уран, Нептун), геоцентрическая система мира Птолемея, гелиоцентрическая система мира Коперника, законы Кеплера, $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$, причина изменения вида звёздного неба в течение суток, небесная сфера, Полярная, созвездия, причина изменения вида звёздного неба в течение года, эклиптика, зодиакальные созвездия.

4.1 🟡 На рисунках 55–58 найдите следующие яркие звёзды: Вега, Капелла, Поллукс, Спика, а также Млечный Путь.

4.2 🟠 Ближайшую к Солнцу точку орбиты (её называют перигелием) Земля проходит в начале января, и расстояние до Солнца в этот момент составляет 147,1 млн км. Наиболее удалённую от Солнца точку орбиты (её называют афелием) Земля проходит в начале июля, и расстояние до Солнца в этот момент составляет 152,1 млн км. Во сколько раз скорость орбитального движения Земли в перигелии больше скорости её движения в афелии? (Подсказка. Воспользуйтесь II законом Кеплера.)

4.3 🟡 Два искусственных спутника обращаются вокруг Земли – один по круговой орбите, а другой по эллиптической орбите (рис. 59). Каков период обращения спутника по эллиптической орбите, если спутник, движущийся по круговой орбите, делает один оборот за 2 ч 45 мин?

4.4 🟢 Оцените, во сколько раз масса Юпитера должна была бы быть больше, чтобы он имел шансы превратиться в звезду?

4.5 🟢 Вообразите (фантастика), что скорость обращения Земли вокруг Солнца стала равной нулю. Оцените, сколько бы времени Земля падала на Солнце. (Подсказка. Представьте, что падение Земли на Солнце – это движение планеты по очень вытянутому эллипсу.)

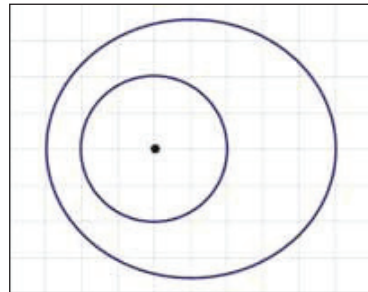


Рис. 59

Самое важное в пособии «Основы астрономии»

1. Наша Вселенная возникла около 14 млрд лет тому назад. В настоящее время *Вселенная расширяется*, и в соответствии с законом Хаббла, чем дальше галактика, тем больше её скорость.

2. В большом масштабе (порядка 300 миллионов св. лет) *Вселенная однородна и изотропна*. В меньших масштабах она имеет ячеистую *сотообразную структуру*, образованную скоплениями галактик.

3. Существуют различные типы звёздных систем – *галактик*: неправильные галактики, эллиптические галактики, линзовидные галактики, спиральные галактики. Наша *Галактика* – Млечный Путь – является *спиральной галактикой*.

4. Источник энергии звёзд – *реакции термоядерного синтеза*. После перехода звезды в стадию красного гиганта в зависимости от массы звезды на финальном этапе она эволюционирует в *белого карлика, нейтронную звезду или чёрную дыру*.

5. Существуют различные типы *переменных звёзд* – *цефеиды* (пульсирующие звёзды), затменно-переменные двойные звёзды, *новые звёзды, сверхновые звёзды*.

6. *Солнечная система образовалась около 4,6 млрд лет* тому назад из вращающегося газопылевого облака.

Все тела Солнечной системы (планеты и их спутники, астероиды, кометы) движутся под действием *силы всемирного тяготения* вокруг Солнца. *Гелиоцентрическая система мира* была сформулирована Коперником. Движение планет описывается *законами Кеплера*. Изменение видимой картины звёздного неба обусловлено *суточным вращением Земли* вокруг своей оси и её *годовым орбитальным движением* вокруг Солнца.

I. ● Оцените численное значение постоянной Хаббла, используя график, приведённый на рисунке 7.

II. ● Сравните различные типы галактик.

III. ● Астрономами наблюдаются звёзды постоянной светимости, спектры которых периодически в течение нескольких дней изменяются. Линии спектра такой звезды смещаются то в красную сторону, то в фиолетовую сторону. Объясните возможную причину такого явления.

IV. ● Оцените, каким должен бы быть радиус Земли, чтобы она превратилась в чёрную дыру.

V. ● Орбита знаменитой кометы Галлея характеризуется следующими параметрами: афелий – 35,1 а. е., перигелий – 0,586 а. е. Каков период обращения кометы вокруг Солнца?

P. S.

В пособии «Основы астрономии» мы рассмотрели только основные ключевые понятия, касающиеся таких воистину безграничных по содержанию вопросов, как строение и эволюция Вселенной, типы галактик, физика звёзд, природа тел Солнечной системы и характер их движения.

Перечислим только некоторые из вопросов, которым мы не уделили внимание.

Рассматривая происхождение и эволюцию Вселенной, мы не обсуждали вопрос, *когда и при каких условиях во Вселенной возможно возникновение жизни.*

Рассматривая строение и типы галактик, виды звёзд и пути их эволюции, мы не изучали *астрофизические методы исследования*, которые позволили определить массу небесных тел, их размеры, удалённость, скорость их движения, химический состав, температуру, величину магнитного поля и другие параметры.

При изучении физики звёзд отдельным вопросом не была изучена ближайшая к нам звезда Солнце. Не рассматривалось, как явления, протекающие в атмосфере Солнца (её активность), влияют на процессы, происходящие на Земле (*солнечно-земные связи*).

Были сформулированы законы, которым подчиняется движение планет Солнечной системы, было выяснено, почему меняется вид звёздного неба в течение суток и в течение года. Однако *карта звёздного неба* и приёмы работы с ней не изучались. Не прозвучали рекомендации по организации и проведению самостоятельных астрономических наблюдений.

Ответы к заданиям

- 1.3. 610 км/с. 1.4. 4000 Мпк.
2.2. 17500 св. лет. 2.4. 13 млн км. 2.5. 100 млрд масс Солнца.
3.1. В 100 раз. 3.2. В 100 раз. 3.4. 100 млн лет. 3.5. Порядка десятка
суток.
4.2. В 1,03 раза. 4.3. 7 ч 47 мин. 4.5. 130 суток.
IV. 9 мм. V. 75,4 года.

Предметно-именной указатель

А

- Анализ спектральный 19, 35
- Астероид 45, 62, 70
- Астрономическая единица 6, 22
- Афелий 69

В

- Величина звёздная
- абсолютная 34, 43
- видимая 34, 43

Г

- Галактика 25, 26
- линзовая 27
- неправильная 27
- спиральная 27
- эллиптическая 27

З

- Закон
- Кеплера
- - второй 62
- - первый 61
- - третий 62
- Хаббла 12, 16
- Звезда
- белый карлик 38, 42
- двойная 36, 47
- - затменно-переменная 42
- красный гигант 37–40
- нейтронная 38–41
- новая 43
- переменная 41
- пульсар 39–40
- сверхновая 40–41
- цефеида 41–42

И

- Излучение
- реликтовое 19, 22
- Изотропность Вселенной 6, 8, 12, 23

К

- Кеплер И. 61
- Кометные тела 46
- Коперник Н. 60–61
- Космология 6, 8, 12, 20

М

- Метеорит 45
- Млечный Путь 28
- Модель
- горячей Вселенной 19–20

Н

- Нуклеосинтез 19

П

- Парсек 7
- Перигелий 69
- Планеты
- гиганты 47, 55, 57
- земной группы 50
- Принцип
- космологический 12, 23
- Птолемей К. 59–60

Р

- Расширение Вселенной 16, 18–21, 24
- Релятивистская теория тяготения 8

С

Светимость 7, 8, 26, 34–38

Система

- мира

- - гелиоцентрическая 60

- - геоцентрическая 59–60

Скопления звёздные 15, 20, 21, 23, 30

- рассеянные 30

- шаровые 30

Созвездия 63

- зодиакальные 64

Солнечная система 4, 28, 30–31,

36, 44, 46–47, 50, 59

Спектральный класс 35, 37, 41

Сфера небесная 60, 63, 64

Т

Теория

- Большого взрыва 18, 20

Тёмная материя 21

Тёмная энергия 21–22

Ф

Фридман А. А. 19

Х

Хаббл Э. П. 12, 16, 17

Хаббла постоянная 16, 17

Ч

Чёрная дыра 11, 31–33, 38, 40–41

Э

Эйнштейн А. 8–11, 18–33

Эклиптика 64

Эффект

- Доплера 13–16, 21

Я

Ячеистая структура Вселенной 24

Список литературы

1. Гурштейн, А. А. Извечные тайны неба. – Москва : Наука, 1991.
2. Засов, А. В., Сурдин, В. Г. Астрономия. 10–11 классы : учебник. – Москва : БИНОМ. Лаб. знаний, 2020.
3. Сурдин, В. Г. Астрономия: популярные лекции. – Москва : МЦМНО : НЭБ Свет, 2021.
4. Хокинг, С. Краткая история времени: от Большого взрыва до чёрных дыр. – Москва : АСТ, ОГИЗ, 2019.
5. Энциклопедия для детей. Том 8. Астрономия. – 2-е изд., испр. / Гл. ред. М. Аксёнова, метод. ред. В. Володин, А. Элевич. – Москва : Аванта+, 2003.

Андрюшечкин Сергей Михайлович

ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ

Общероссийский классификатор продукции ОК-005-932,
том 2; 953005 – литература учебная

Издатель С. М. Андрюшечкин. E-mail: asm57@mail.ru

Электронный аналог печатного издания