

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Брянский государственный аграрный университет»
Кафедра автоматике, физики и математики

Комогорцев В.Ф.

АСТРОНОМИЯ

Учебное пособие
для учащихся СПО
Брянского государственного аграрного университета

УДК 52 (076)
ББК 22.6
К 63

Комогорцев, В. Ф. *Астрономия: учебное пособие для учащихся СПО Брянского государственного аграрного университета* / В. Ф. Комогорцев. - Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – 71 с.

Данное учебное пособие по дисциплине «Астрономия» предназначено для учащихся СПО Брянского государственного аграрного университета, обучающихся по направлениям подготовки:

35.02.05 Агрономия;

23.02.03 Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта;

35.02.08 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства;

35.02.06 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции;

35.02.16 Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования

Объем курса: 40 часов. Из них:

лекции – 16; практические занятия – 22; самостоятельная работа – 2.

В пособии кратко, но последовательно, в соответствии с требованиями ФГОС среднего (полного) общего образования и ФГОС среднего общего образования, изложен курс астрономии для учащихся факультета СПО Брянского государственного аграрного университета.

Рецензент: декан факультета СПО, к.т.н., доцент Кожухова Н.Ю.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института энергетики и природопользования протокол №3 от 30 ноября 2020 года.

© Комогорцев В.Ф., 2021

© Брянский ГАУ, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1.

Введение в астрономию

Для чего нужно изучать астрономию?	5
§1. История развития астрономии	6
§2. Наблюдения в астрономии. Телескопы	8
§3. Звезды и созвездия. Вид звездного неба.	10
§4. Яркость звезд	11
§5. Небесная сфера. Важнейшие точки и линии небесной сферы	12
§6. Экваториальная система координат на небесной сфере	13
§7. Движение Солнца по звездному небу. Эклиптика	14
§8. Связь высоты полюса Мира с географической широтой местности	17
§9. Высота светила над горизонтом в кульминации	17
§10. Время и календарь.	18
§11. Поясное и всемирное время	20

ГЛАВА 2

Солнечная система и её строение

§12. Земля, Луна и Солнце. Размеры и расстояния.....	21
§13. Планеты и их видимое движение вокруг Солнца	23
§14. Синодический и сидерический периоды обращения планет.....	25
§15. Движение Луны вокруг Земли	26
§16. Солнечные и лунные затмения	28
§17. Приливы и отливы на Земле	30
§18. Законы движения планет Солнечной системы (законы Кеплера).....	31
§19. Движение искусственных спутников Земли. Космонавтика	34
§20. Образование Солнечной системы	37

ГЛАВА 3

Физическая природа тел Солнечной системы

§21. Земля и Луна	37
§22. Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Марс)	38
§23. Далёкие планеты–гиганты	40
§24. Малые тела Солнечной системы (астероиды, карликовые планеты, кометы, метеоры и метеориты).	41

ГЛАВА 4. Солнце

§25. Энергия излучения и температура Солнца.....	44
§26. Химический состав Солнца	45
§27. Атмосфера Солнца	46
§28. Источники энергии и внутреннее строение Солнца	48

ГЛАВА 5. Звезды

§29. Расстояния до звезд	49
§30. Видимые и абсолютные звездные величины	51
§31. Пространственные скорости звезд. Эффект Доплера	52
§32. Цвет, температура, спектральные классы звезд	54
§33. Светимости звезд	55
§34. Размеры звезд	56
§35. Массы звезд. Диаграмма масса-светимость	58
§36. Диаграмма спектр-светимость (Герцшпрунга-Рессела)	58
§37. Плотности вещества звезд	59
§38. Пульсирующие звезды (цефеиды)	59
§39. Новые и сверхновые звезды	60
§40. Черные дыры	61
§41. Эволюция звезд	62

ГЛАВА 6

Строение и эволюция Вселенной

§42. Наша Галактика (Млечный Путь)	63
§43. Другие галактики	64
§44. Космология (устройство и развитие Вселенной).....	66
§45. Космогония (происхождение Вселенной)	68
§46. Жизнь и разум во Вселенной	69

Литература	70
-------------------------	-----------

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

Для чего нужно изучать астрономию?

Во-первых, это интересно. В самом деле, трудно представить себе человека, которому неинтересно знать, что представляет собой окружающий его мир (Вселенная), как этот мир устроен и как развивается. Какое место занимает в нем Земля, на которой он живет. Что представляют собой Солнце, Луна, звезды. Каково место в этом мире самого человека. Каким был этот мир раньше и чего следует ожидать от него в будущем.

Кроме познавательного интереса, люди давно осознали и пользу от астрономических знаний. Эти знания помогали людям по Солнцу и звездам ориентироваться во времени и в пространстве. Помогали определять сроки сельскохозяйственных и других работ. Помогали вести счет времени, и т.д. А в настоящее время польза от астрономии многократно увеличилась: искусственные спутники Земли обеспечивают нам навигацию, радиосвязь, телевидение. Пилотируемые и беспилотные космические корабли позволяют проводить в космосе технологические и медицинские эксперименты, недоступные на Земле. И недалеко то время, когда люди начнут осваивать Луну и планеты Солнечной системы.

Древняя астрономия была тесно переплетена с фантастическими, далекими от реальности, представлениями людей, с их мифологией. Но постепенно астрономия освобождалась от различного рода сказок, и в настоящее время это строгая и содержательная наука, адекватно отвечающая на многие (но, увы, пока далеко не на все) вопросы по устройству и развитию окружающего нас большого мира – Вселенной.

Во-вторых, знание и понимание хотя бы общих основ астрономии является необходимым элементом общей культуры современного человека. Ведь жить в мире и не представлять себе его устройства и его размеров, быть в наше время в этом невежественным – это просто стыдно.

В-третьих: астрономия входит в число обязательных дисциплин, которые изучаются в рамках среднего и среднего специального образования. Хочешь – не хочешь, а астрономию нужно изучать, иначе не получишь по ней зачет.

Ну, и в-четвертых; вопросы по астрономии входят в список заданий ЕГЭ по физике. И тем, кто будет сдавать экзамен по физике, совсем не лишним будет ответить и на вопрос по астрономии.

§1. История развития астрономии

Астрономия – наука об устройстве и развитии Вселенной, то есть всего окружающего нас мира. Слово «астрономия» происходит от двух греческих слов: «astron» - звезда и «nomos» - закон. Астрономия является одной из древнейших наук (если даже не самой древней), ибо человека изначально интересовал вопрос о том, как устроен окружающий его мир и какое место он в нем занимает. Иметь об этом хотя бы начальные представления ему было крайне важно для самого его выживания.

Но первые представления о мироздании (о здании мира) были у людей очень наивными. Землю они принимали за неподвижный центр мира, поддерживаемый мифическими животными (черепахами, китами). А вокруг Земли равномерно вращается далекая сфера с прикрепленными к ней неподвижными звездами. Внутри звездной сферы, между нею и Землей, вращаются вокруг Земли Солнце, Луна, планеты. Эти представления тесно переплетались с мифологией, с религиозными представлениями людей.

Как наука астрономия начала развиваться в Древней Греции. Выдающийся математик **Пифагор** (VI век до нашей эры) первым высказал мысль о том, что Земля, как и все другие небесные тела, имеет шарообразную форму и находится во Вселенной без всякой опоры.

Основоположник представлений об атомах, греческий ученый **Демокрит** (V век до нашей эры) считал, что Солнце во много раз больше Земли. Что Луна сама не светится, а лишь отражает солнечный свет. Что Млечный Путь состоит из огромного количества звезд.

Выдающийся философ античного мира **Аристотель** (IV век до нашей эры) обобщил все знания, которые были к тому времени накоплены – и о Земле, и о небе. Согласно Аристотелю, вокруг шарообразной Земли на отдельных особых сферах вращаются Луна, Солнце, планеты, а на самой дальней сфере находятся неподвижные звезды. Такая система мира получила название **геоцентрической** (от греческого названия Земли – Гея). Эта система утвердилась на два тысячелетия, ибо постоянно поддерживалась церковью, так как в самом церковном учении Земле отводилось положение центра Вселенной.

Математическую модель геоцентрической системы мира разработал во втором веке нашей эры живший в египетской Александрии **Клавдий Птолемей**. Эта его модель предусматривала систему больших и малых кругов, по которым движутся вокруг Земли небесные тела: сами небесные тела движутся по малым кругам, а центры малых кругов – по большим кругам. Только так, при такой сложной системе, удавалось согласовать более-менее удовлетворительно теорию с наблюдаемой на небе реальностью. В частности, объяснить петлеобразное движение планет. Чтобы улучшить это согласование, в последующем приходилось постоянно дорабатывать модель Птолемея, вводя всё новые и новые малые круги. Эта модель становилась такой сложной, что у самих ученых закрадывались сомнения в её правильности. Но эта система была освящена церковью, и открыто сомневаться в ней было опасно.

Новую систему мира – **гелиоцентрическую** – выдвинул великий польский

астроном **Николай Коперник** (1473-1543). За несколько месяцев до своей смерти он издал книгу «О вращениях небесных сфер», в которой он изложил свою систему. Согласно его учению, в центре мира находится не Земля, а Солнце (по-гречески Гелиос). Поэтому и система его называется гелиоцентрической. Вокруг Земли движется лишь Луна. Сама же Земля – лишь третья по удаленности от Солнца планета (после Меркурия и Венеры). Земля вращается вокруг Солнца и одновременно вокруг своей оси, наклоненной к плоскости её орбиты. А за орбитой Земли расположены орбиты других известных к тому времени планет – Марса, Юпитера и Сатурна. На очень большом расстоянии от Солнца Коперник поместил «сферу неподвижных звезд».

Коперник впервые в астрономии дал правильную схему устройства Солнечной системы. Его система просто и естественно объясняла петлеобразное движение планет тем, что мы наблюдаем обращающиеся вокруг Солнца планеты не с неподвижной Земли, а с Земли, тоже движущейся вокруг Солнца.

Учение Коперника нанесло сокрушительный научный удар по геоцентрической системе мира Аристотеля – Птолемея. Самые первые подтверждения правоты учения Коперника сделал великий итальянский ученый **Галилео Галилей** (1564-1642). В его время в Голландии была изобретена подзорная труба. Галилей с её помощью стал исследовать небо. На Луне он увидел горы. То есть обнаружил, что Луна сходна с Землей, и не существует принципиального различия между «земным» и «небесным». Далее, Галилей открыл четыре спутника Юпитера. Их движение вокруг Юпитера опровергало представление о том, что только Земля может быть центром движения небесных тел. На Солнце, олицетворявшем «небесную чистоту», Галилей открыл пятна. А наблюдая за ними, установил, что Солнце вращается вокруг своей оси. Наконец, он обнаружил, что Млечный путь – это множество слабых звезд, не различимых невооруженным взглядом. Следовательно, Вселенная значительно грандиознее, чем думали раньше. И крайне наивно было предполагать, что вся она за сутки совершает полный оборот вокруг маленькой Земли.

Открытия Галилея умножили число сторонников гелиоцентрической системы мира и одновременно заставили церковь усилить преследование коперниканцев. В 1600 году по приговору католической инквизиции в Риме на площади был сожжен выдающийся итальянский философ, последователь Коперника **Джордано Бруно**. Бруно, развивая учение Коперника, утверждал, что во Вселенной не может быть центра. Что Солнце – только центр Солнечной системы. Он говорил, что звезды – такие же солнца, как и наше. Вокруг них вращаются планеты, на многих из которых существует разумная жизнь. И ни пытки, ни костер не заставили его отречься от своих взглядов. А в 1633 году и сам Галилей предстал перед судом инквизиции. Престарелого ученого заставили подписать «отречение» от своих взглядов и до конца жизни держали под надзором инквизиции. И лишь недавно, в 1992 году, церковь окончательно оправдала Галилея.

Но уже ничто не могло остановить победное шествие нового учения. Австрийский астроном **Иоганн Кеплер** (1571-1630), исходя из учения Коперника, открыл законы движения планет вокруг Солнца. А после открытия **Исааком Ньютоном** (1643-1727) закона всемирного тяготения, который математически

объяснил всю небесную механику Солнечной системы, гелиоцентрическая система в научной среде утвердилась окончательно.

§2. Наблюдения в астрономии. Телескопы

Основным астрономическим прибором является **телескоп**. Это слово происходит от двух греческих слов: «tele» - далеко и «scopeo» - смотрю. Использование телескопа основано на следующих двух важнейших его свойствах.

1) Телескоп собирает несравненно больше света (в десятки и сотни тысяч раз больше), чем собирает зрачок глаза, благодаря чему можно увидеть очень слабые источники света – далекие звезды, невидимые без телескопа. То есть у телескопа гораздо больше **проницающая сила**, чем у невооруженного взгляда.

2) Телескоп увеличивает угол зрения, по которым видны небесные тела (как-бы приближает их). Благодаря этому можно рассматривать детали поверхности ближайших к Земле тел (Луны, планет, Солнца) и рассматривать отдельно друг от друга близко расположенные звезды, которые без телескопа сливаются друг с другом. То есть у телескопа больше, чем у глаза, **разрешающая способность**.

Существует несколько типов оптических телескопов:

а) **телескопы – рефракторы**. В них луч света от небесных светил собирает линза (рис. 1);

б) **телескопы – рефлекторы**. В них свет собирает и фокусирует на глаз **вогнутое зеркало** (рис. 2);

в) **зеркально-линзовые телескопы**. В них используется комбинация линз и зеркал (рис.3).

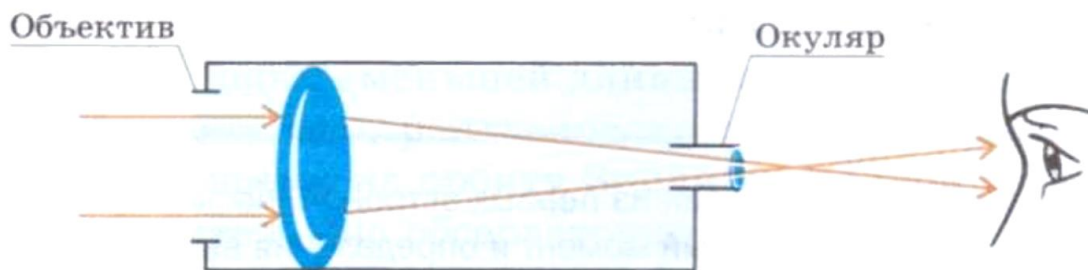


Рис. 1. Схема хода лучей света в телескопе-рефракторе

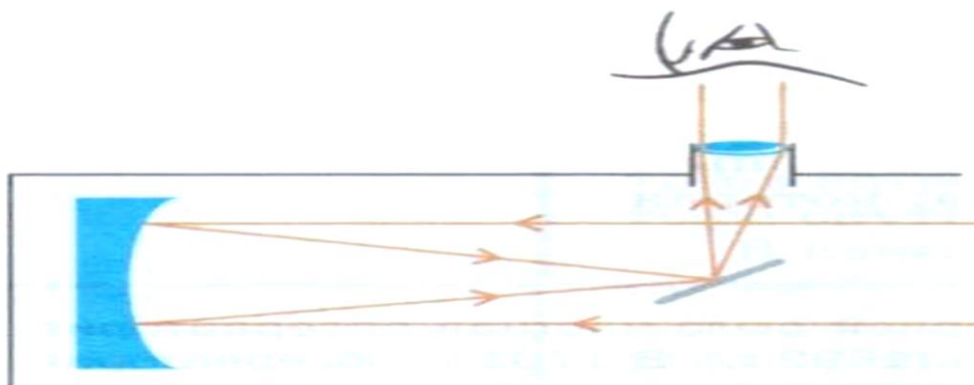


Рис. 2. Схема хода лучей света в телескопе-рефлекторе

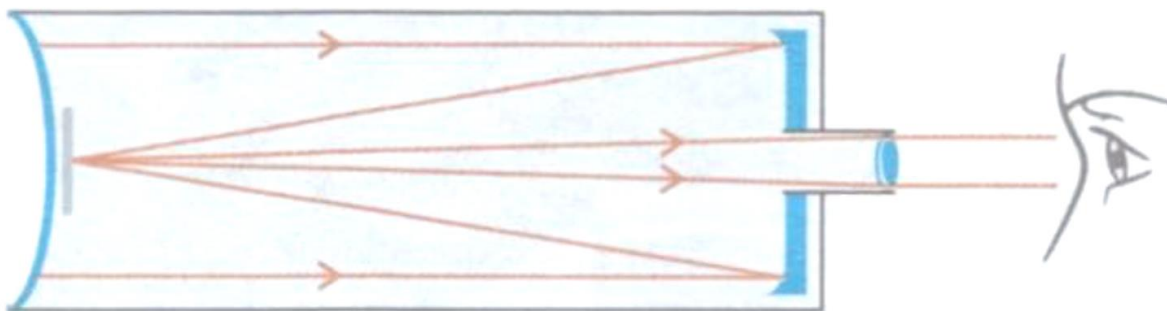


Рис. 3. Схема хода лучей света в зеркально-линзовом телескопе

Все наиболее крупные современные телескопы – это телескопы-рефлекторы. Крупнейший в России телескоп-рефлектор имеет зеркало 6 метров, отшлифованное с точностью до долей микрометра (1 мкм – это миллионная доля метра). Масса зеркала около 40 тонн. Масса всей установки 850 тонн, а высота 42 метра. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительно его удерживать в поле зрения. Телескоп установлен на Северном Кавказе в Кабардино-Балкарии в горах на высоте 2100 метров над уровнем моря. А крупнейший в мире оптический телескоп установлен на Канарских островах у побережья Африки. У него зеркало 10,4 метра в диаметре. В настоящее время изготавливается гигантский рефлектор с зеркалом 39,3 метра для Европейской Южной обсерватории в Чили. Зеркало делают составным из 798 фрагментов. Открытие телескопа запланировано на конец 2024 года.

Заметим, что астрономы уже давно не ведут визуальных наблюдений. На смену им ещё в 19 веке пришла фотография, а в настоящее время её повсеместно заменяют электронные приемники света, основанные на фотоэффекте (типа тех, что находятся в наших мобильных телефонах и цифровых фотоаппаратах). Запись полученных изображений ведется с помощью компьютера, а затем передается специалистам по интернету. Такие приемники работают в автоматическом режиме без участия человека. Например, так работает запущенный на околоземную орбиту на высоту 600 км космический телескоп «Хаббл» с диаметром зеркала 2,4 м.

В настоящее время астрономия стала **всеволновой**, поскольку наблюдения за объектами ведутся не только в оптическом диапазоне, но и в диапазоне радиоволн, в ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма-диапазонах. И если радиоволны можно улавливать на поверхности земли (как и видимый свет), то более коротковолновое излучение, задерживаемое земной атмосферой, принимается на искусственных спутниках Земли и других космических аппаратах, находящихся за пределами атмосферы. Полученная там информация по радиосвязи затем передается на землю.

В астрономии расстояние между объектами на небе измеряют углом, образованным лучами, идущими из точки наблюдения к объектам. Такое расстояние измеряется в градусах или в долях градуса – угловых минутах и угловых секундах:

$$1^\circ = 60' = 3600'' \quad (1)$$

Используется также и радианная мера углов. Как известно, угол в один радиан – это центральный угол окружности, опирающийся на дугу этой окружности, по длине равной радиусу R окружности. Так длина всей окружности равна $2\pi R$, то полный угол $360^\circ = 2\pi$ радиан. Отсюда следует:

$$1 \text{ рад} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx 57,3^\circ = 206265'' \quad (2)$$

Невооруженным глазом две звезды видны отдельно, если они отстоят друг от друга не менее, чем на $2'$. В крупные телескопы удастся отдельно наблюдать звезды, отстоящие друг от друга на десятые и даже сотые доли угловой секунды. Например, космический телескоп «Хаббл» обеспечивает разрешающую способность в $0,1''$, что недостижимо даже для более крупных наземных телескопов, ибо последним мешают атмосферные помехи. Под таким углом футбольный мяч виден с расстояния 450 км.

§3. Звезды и созвездия. Вид звездного неба

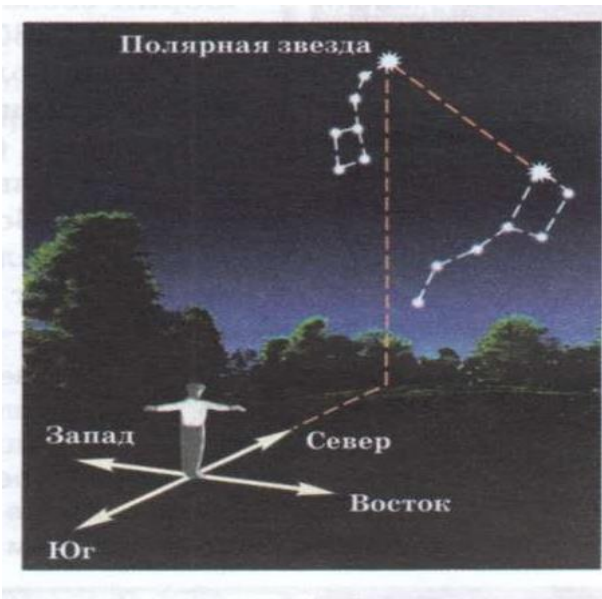


Рис. 4

Всё звездное небо условно разделено на 88 участков, имеющих строго определенные границы. Эти участки называются **созвездиями**. У созвездий есть собственные имена. Например, Большая Медведица (большой ковш на рис.4); Малая Медведица (малый ковш); Кассиопея; Андромеда, и т.д. Звезды каждого созвездия обозначены буквами греческого алфавита: α , β , γ , δ , ϵ , и т.д. (по убыванию яркости). Самые яркие звезды имеют и собственные имена: Сириус (α Большого Пса), Вега (α Лиры), Арктур (α Волопаса), Капелла (α Возничего), и т.д.

Особой звездой северного неба является **Полярная звезда** (α Малой Медведицы) – рис. 4. Примерно на неё направлена ось вращения Земли. Поэтому видимое суточное вращение звездного неба видится как его вращение вокруг Полярной звезды. Точнее, вокруг точки, вблизи которой, на угловом расстоянии примерно в 1° , находится Полярная звезда. Эта точка обозначается на небе буквой P и называется **Северный полюс мира**. Точка P_1 , диаметрально противоположная Северному полюсу мира, представляет собой **Южный полюс мира** (эта точка находится под

горизонтом и нам не видна). Прямая PP_1 называется **осью мира**. Вокруг неё в направлении с востока на запад, делая полный оборот за сутки (звездные сутки), вращается звездное небо со всеми своими светилами. Вращается, конечно, не небо. Его вращение является видимым следствием вращения Земли вокруг своей оси, которое, наоборот, происходит с запада на восток. Если смотреть на север, то небо вращается против часовой стрелки, а если смотреть на юг – то по часовой. На рис. 5 показаны наиболее яркие звезды и созвездия вблизи Полярной звезды.



Рис. 5

§4. Яркость звезд

Во втором веке до нашей эры греческий астроном Гиппарх разделил все видимые на небе звезды на 6 величин. Самые яркие (их на всем небе менее 20) – это звезды первой величины. А самые слабые – шестой величины. С физической точки зрения в основе видимой яркости звезд лежит количество света, приходящее от них. Им и определяется яркость (блеск) звезд. В результате

современных измерений оказалось, что от звезд первой величины к нам приходит примерно в 100 раз больше света, чем от звезд шестой величины. Если отношение блеска звезд соседних звездных величин обозначить буквой x , то отношение блеска звезд первой и второй величин будет x , первой и третьей x^2 , первой и четвертой x^3 , первой и шестой x^5 . Следовательно,

$$x^5 = 100 \Rightarrow \lg x^5 = \lg 100 \Rightarrow 5 \lg x = 2 \Rightarrow \lg x = 0,4 \Rightarrow x = 10^{0,4} = 0,512 \quad (3)$$

То есть от звезд второй величины (обозначение их блеска 2^m) к нам приходит в 2,512 раз меньше света, чем от звезд первой величины (их блеск 1^m), и т.д.

Есть несколько небесных светил, блеск которых превосходит 1^m . Они имеют нулевые и даже отрицательные звездные величины (0^m , -1^m , и т.д.). К ним относятся несколько наиболее ярких звезд и планет, а также, конечно, Солнце и Луна. Для более точной оценки блеска звезд используются и дробные значения. Например, $2,3^m$, $7,1^m$, $-1,5^m$, и т.д. В таблице 1 приведены звездные величины Солнца, Луны и наиболее ярких звезд северного неба.

Таблица 1

Светило	Солнце	Луна (полная)	Сириус	Вега	Капелла	Арктур
Звездная величина	$-26,8^m$	$-12,7^m$	$-1,6^m$	$+0,1^m$	$+0,1^m$	$+0,1^m$

Очевидно, что яркость (блеск) звезды J связан с её видимой звездной величиной m формулой

$$J = \frac{J_0}{2,512^m} \quad (4)$$

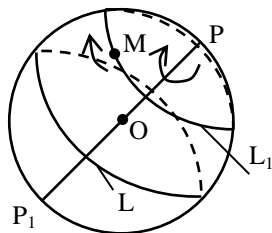


Рис. 6. Здесь PP_1 – ось мира; O – наблюдатель в центре небесной сферы; M – светило; L – небесный экватор; L_1 – суточная параллель небесного светила M .

где J_0 – блеск звезд, у которых $m=0$ ($m \approx 0$ у Веги, Капеллы и Арктура). Поэтому если m_1 и m_2 – звездные величины некоторых двух звезд, а J_1 и J_2 – соответственно их блеск, то

$$\frac{J_2}{J_1} = 2,512^{m_1 - m_2} \quad (5)$$

Пример. Во сколько раз блеск Сириуса больше блеска Веги? То есть во сколько раз Сириус ярче Веги?

Решение.

$$\frac{J_{\text{Сириуса}}}{J_{\text{Веги}}} = 2,512^{(0,1-1,6)} = 2,512^{1,7} \approx 4,8$$

То есть Сириус ярче Веги в 4,8 раз.

§5. Небесная сфера. Важнейшие точки и линии небесной сферы

Небесные светила (звезды, планеты, Луну, Солнце) мы видим как-бы на некоторой сфере очень большого радиуса, в центре которой находимся мы сами. Эта сфера называется **небесной сферой**. На неё проектируются наблюдаемые нами небесные светила. И представление о такой сфере является очень полезным для описания взаимного расположения небесных светил, хотя никакой реальной небесной сферы, разумеется, нет.

Ось видимого вращения PP_1 небесной сферы, совпадающая с осью вращения Земли, называется, как мы уже знаем из §3, осью мира. Прямая линия, проходящая через наш глаз и параллельная оси вращения Земли, тоже упирается в полюсы мира P и P_1 и поэтому тоже может считаться осью мира. И таковой она и считается. А глаз наблюдателя – это **центр небесной сферы**. Причем каждый наблюдатель может считать себя находящимся в центре небесной сферы.

Плоскость, проходящая через центр небесной сферы (через глаз наблюдателя) перпендикулярно оси мира, пересечет небесную сферу по большой окружности, которая называется **небесным экватором** (это линия L на рис.6). По небесному экватору пересечет небесную сферу и плоскость земного экватора, проходящая через центр Земли.

Небесный экватор делит небесную сферу на два полушария: **Северное полушарие** и **Южное полушарие**.

Светило, находящееся на небесном экваторе, всё время на нем и остается, совершая вдоль него за сутки полный оборот. А другие светила описывают на небесной сфере малые окружности – так называемые **суточные параллели** (рис. 6). Чем ближе светило находится к полюсам мира, тем меньше у него суточная параллель. У Полярной звезды, находящейся вблизи Северного полюса мира P ,

суточная параллель очень маленькая. Полярная звезда на небе практически неподвижна, в чем и состоит её главная ценность для астрономии.

Кроме оси мира PP_1 , важной линией для каждого наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, является **отвесная линия** ZZ_1 . Это прямая, проходящая через глаз наблюдателя и центр Земли перпендикулярно поверхности Земли. Вдоль этой прямой располагается нить подвешенного на ней груза (нить отвеса). Отвесная линия пересекает небесную сферу в **зените** Z (над головой наблюдателя) и в **надире** Z_1 (в противоположной зениту точке небесной сферы, которая находится под ногами наблюдателя и ему не видна).

Плоскость, проходящая через центр небесной сферы (через наблюдателя) и перпендикулярная отвесной линии, называется **плоскостью горизонта** (на рис.7 она закрашена). Фактически это горизонтальная плоскость, на которой стоит наблюдатель. Эта плоскость пересекает небесную сферу по окружности большого круга, называемой **математическим горизонтом**. Не следует, кстати, путать линию **математического** горизонта, находящуюся на небесной сфере, и земную линию **видимого** горизонта, которая находится на поверхности земли.

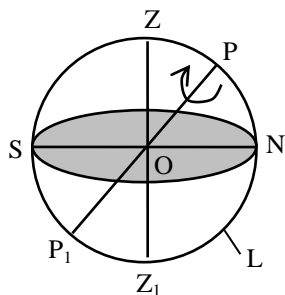


Рис. 7

Плоскость, проходящая через полюсы мира P и P_1 и через зенит Z и надир Z_1 , называется **плоскостью небесного меридиана**. Эта плоскость пересечет небесную сферу по линии большого круга, которая называется **небесным меридианом** (линия L). Плоскость небесного меридиана пересечет плоскость математического горизонта по прямой линии $N - S$, которая представляет собой **полуденную линию север-юг**. Такую линию легко представить себе на поверхности земли. Она своими концами упирается в **точку севера** N и в **точку юга** S на небесной

сфере. В направлении полуденной линии $S - N$ отбрасывают тень предметы, освещаемые Солнцем в полдень, когда оно находится в своей верхней точке над горизонтом (в своей **верхней кульминации**).

Восходящие и заходящие светила (например, Солнце) восходят утром на востоке над математическим горизонтом, в полдень над полуденной линией (над точкой юга) достигают своего самого высокого положения над горизонтом (достигают верхней кульминации), и затем на западе заходят за линию горизонта. Есть светила не заходящие, они на небе присутствуют всегда. И есть светила не восходящие, их мы никогда не видим – это звезды, расположенные вблизи Южного полюса мира. Их видят только жители Южного полушария Земли.

§6. Экваториальная система координат на небесной сфере

Для указания положения светил на небесной сфере используют систему координат, аналогичную той, которая используется в географии для точек земной поверхности – **систему экваториальных координат**.

Вспомним: на земном шаре положение любого географического пункта указывается с помощью двух её координат: широты и долготы. Географическая

широта φ отсчитывается в градусах от линии экватора по меридиану в сторону полюсов Земли (северная и южная широта, обе в пределах от 0° до 90°). А географическая долгота λ отсчитывается вдоль экватора в градусах от нулевого (Гринвичского) меридиана, который проходит через Гринвичскую астрономическую обсерваторию, расположенную вблизи Лондона. При этом географические пункты восточнее Лондона имеют восточную долготу от 0° до 180° , а у пунктов западнее Лондона долгота западная, и тоже от 0° до 180° . Например, наше Кокино имеет следующие географические координаты: $\varphi = 53^\circ 09'$ северной широты и $\lambda = 34^\circ 07'$ восточной долготы (эти данные выдает приложение Компас в мобильных телефонах).

Аналогично вводятся и координаты светил на небесной сфере. Их тоже две: **склонение δ** и **прямое восхождение α** .

Склонение δ – это **угловое расстояние светила от небесного экватора**. При этом $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ – для светил северного полушария, и $-90^\circ \leq \delta \leq 0^\circ$ – для южного. В частности, у Полярной звезды $\delta = +89^\circ 09'$.

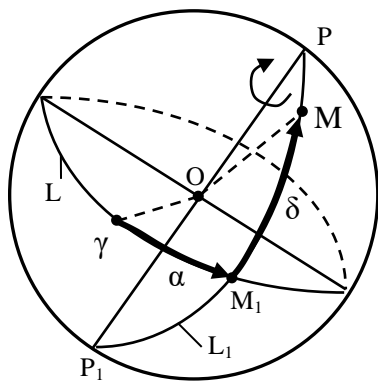


Рис. 8

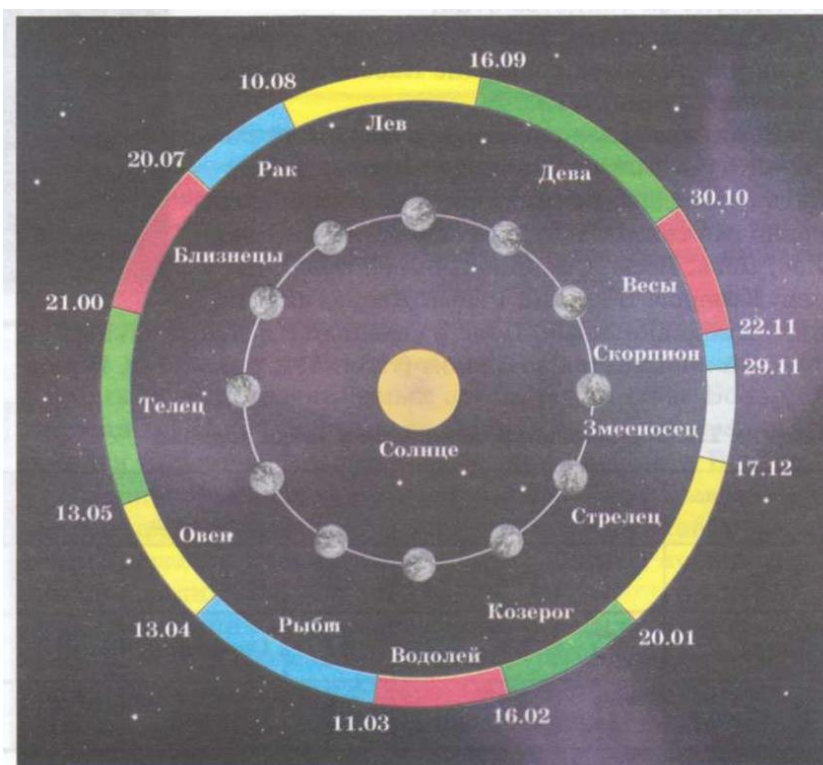
Прямое восхождение α . Оно отсчитывается по небесному экватору от точки весеннего равноденствия Υ , в которой Солнце бывает ежегодно 21 марта (в день **весеннего равноденствия** – в этот день долгота дня равна долготе ночи). Отсчет прямого восхождения ведется в направлении, противоположном видимому вращению небесной сферы. Поэтому светила восходят (и заходят) в порядке возрастания их прямых восхождений.

В отличие от склонения, прямое восхождение светил выражают не в градусной мере, а в часовой. Так как полный оборот (на 360°) Земля делает за 24 часа, то 1 час (1^h) соответствует 15° ; 1 минута (1^m) соответствует $15'$; 1 секунда (1^s) соответствует $15''$. И обратно: $1^\circ = 4^m$; $1' = 4^s$; $1'' = 1/15^s$. Прямое восхождение светил α имеет возможные значения от 0^h до 24^h .

Прямое восхождение α и склонение δ светила М показаны на рис. 8. При суточном вращении небесной сферы положение звезд по отношению к небесному экватору не изменяется. Поэтому экваториальные координаты (α , δ) звезд тоже не меняются (точнее, меняются, но очень медленно). А это позволяет, подобно географическим картам, создавать карты звездного неба, каталоги звезд и других небесных объектов.

§7. Движение Солнца по звездному небу. Эклиптика

В отличие от звезд, экваториальные координаты которых не меняются, координаты других тел солнечной системы (планет, комет и самого Солнца) меняются. В частности, для Солнца это обстоятельство связано с орбитальным вращением Земли вокруг Солнца. В течение года, пока Земля совершает полный оборот



вокруг Солнца, Солнце видно с Земли на фоне разных созвездий. То есть оно движется среди звезд, завершая в течение года большой круг небесной сферы. Этот круг называется **эклиптикой**. Фактически эклиптика – это линия пересечения плоскости земной орбиты с небесной сферой. Созвездия, по которым проходит эклиптика, называются **зодиакальными**. Этих созвездий 12 – по числу месяцев в году – см. рис. 9.

Рис. 9

Примерно в плоскости эклиптики находятся и орбиты всех других планет Солнечной системы: Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна. Поэтому они тоже движутся по зодиакальным созвездиям.

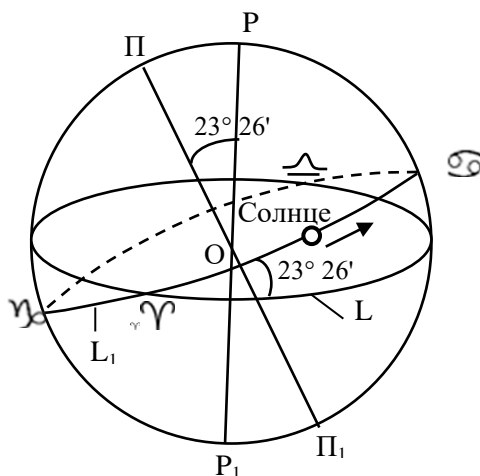


Рис. 10. Здесь: PP_1 – ось мира; $ПП_1$ – ось эклиптики; L – небесный экватор; L_1 – эклиптика

И орбита Луны, вращающейся вокруг Земли, тоже расположена в зодиакальных созвездиях, ибо она лишь на немного (на 5°) наклонена к плоскости орбиты Земли, то есть к плоскости эклиптики.

Ось вращения Земли наклонена к плоскости её орбиты под углом $66^\circ 34'$. Следовательно, плоскость небесного экватора, перпендикулярная оси вращения Земли (оси мира), составляет с плоскостью эклиптики угол $90^\circ - 66^\circ 34' = 23^\circ 26'$. То есть плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора под углом $23^\circ 26'$ (см. рис. 10).

Рис. 10

Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках: точке Υ - точке весеннего равноденствия, в которой Солнце оказывается 21 марта, и в точке Ω – точке осеннего равноденствия, в которой Солнце оказывается 23 сентября. 21 марта Солнце переходит из Южного полушария в Северное, и в этот день в Се-

верном полушарии Земли начинается весна, а длительность дня сравнивается с длительностью ночи (день и ночь делятся по 12 часов). А ровно через полгода, 23 сентября, Солнце попадает в точку $\underline{\Omega}$ – точку осеннего равноденствия: в Северном полушарии начинается астрономическая осень. Солнце переходит в Южное полушарие, и для жителей южного полушария Земли начинается весна.

Есть еще две важные точки эклиптики: точка \odot – точка летнего солнцестояния, и точка Υ – точка зимнего солнцестояния. В точке летнего солнцестояния Солнце оказывается 22 июня (тогда самый длинный день и самая короткая ночь). А в точке зимнего солнцестояния Солнце бывает 22 декабря, когда самый короткий день и самая длинная ночь. Экваториальные координаты (α , δ) этих четырех точек таковы:

- Υ ($\alpha=0^h$; $\delta=0^\circ$) – находится в созвездии Рыбы;
- \odot ($\alpha=6^h$; $\delta=23^\circ 26'$) – находится в созвездии Телец;
- $\underline{\Omega}$ ($\alpha=12^h$; $\delta=0^\circ$) – находится в созвездии Дева;
- Υ ($\alpha=18^h$; $\delta = - 23^\circ 26'$) – находится в созвездии Стрелец.

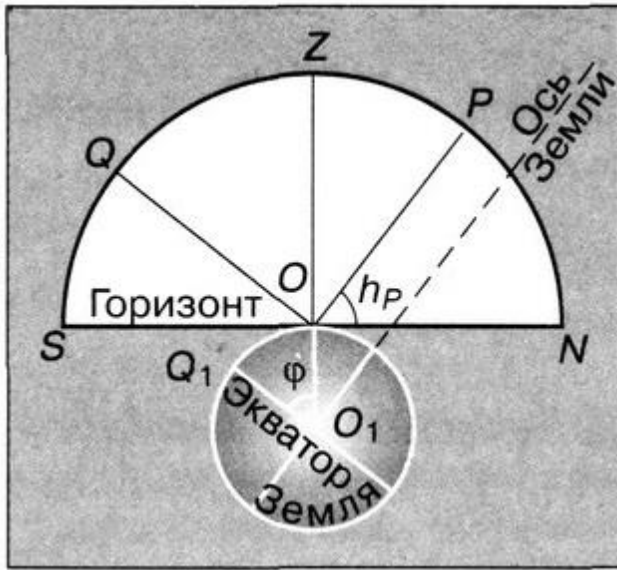
Примечание. Точка весеннего равноденствия Υ , находящаяся в наше время в созвездии Рыбы, ранее (2000 лет назад) была в созвездии Овна, и поэтому с тех пор имеет его знак Υ . Перемещение этой точки произошло из-за **прецессии**. Суть прецессии состоит в том, что ось вращения Земли медленно поворачивается вокруг оси эклиптики, описывая вокруг неё конус за 26 тысяч лет. Поэтому точка Υ (а месте с ней – и остальные три важнейшие точки эклиптики) перемещаются по эклиптике. В частности, за последние 2000 лет это перемещение произошло примерно на 20° . Поэтому теперь Υ - не в созвездии Овна, а в созвездии Рыб.

В заключение этого параграфа приведем интересующую многих таблицу дат пребывания Солнца в различных зодиакальных созвездиях. По ней определяется соответствие дней рождения зодиакальным созвездиям:

Таблица 2

Зодиакальное созвездие	Примерное время пребывания Солнца в зодиакальном созвездии	Зодиакальное созвездие	Примерное время пребывания Солнца в зодиакальном созвездии
Козерог	23 декабря – 20 января	Рак	22 июня – 22 июля
Водолей	21 января – 19 февраля	Лев	23 июля – 23 августа
Рыбы	20 февраля – 20 марта	Дева	24 августа – 23 сентября
Овен	21 марта – 20 апреля	Весы	24 сентября – 23 октября
Телец	21 апреля – 21 мая	Скорпион	24 октября – 22 ноября
Близнецы	22 мая – 21 июня	Стрелец	23 ноября – 22 декабря

§8. Связь высоты полюса Мира h_p с географической широтой местности φ



Эта связь следует из рис. 11:

Рис. 11

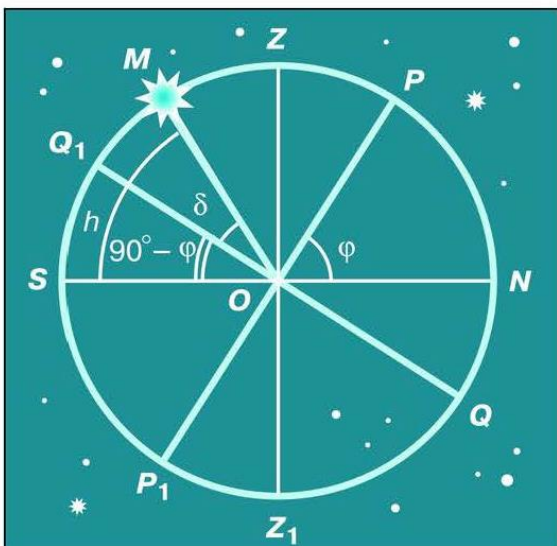
$$h_p = \varphi \quad (6)$$

И следует равенство (6) из того, что h_p и φ – углы со взаимно перпендикулярными сторонами)

§9. Высота светила над горизонтом в кульминации

При своем суточном движении светила дважды пересекают небесный меридиан, который проходит через северный полюс мира P, зенит Z, точки N и S севера и юга на горизонте (см. рис. 7). Момент пересечения светилом небесного меридиана называется **кульминацией светила**. Различают **верхнюю** и **нижнюю** кульминации. В момент верхней кульминации светило пересекает небесный меридиан, достигая наибольшей высоты над горизонтом. В частности, Солнце достигает наибольшей высоты над горизонтом (совершает верхнюю кульминацию) в полдень над точкой юга. Нижняя кульминация Солнца нам не видна – она происходит под точкой севера в полночь под горизонтом. Другие светила кульминируют в другие моменты времени – каждое в своё.

Остановимся подробнее на кульминациях Солнца как наиболее важного для нас небесного светила. Рассмотрим рис. 12.



Из рисунка непосредственно следует:

Рис. 12

На этом рисунке изображена верхняя кульминация светила M, проходящая к югу от зенита (например, верхняя кульминация Солнца). Из рисунка непосредственно следует:

$$h = h_{\text{верх}} = 90^\circ - \varphi + \delta \quad (7)$$

Здесь $h = h_{\text{верх}}$ - высота светила М над горизонтом в его верхней кульминации; δ – склонение светила; φ – широта места наблюдения. А высота $h = h_{\text{ниж}}$ светила М над горизонтом в его нижней кульминации найдется по формуле

$$h = h_{\text{ниж}} = \varphi + \delta - 90^\circ \quad (8)$$

(выведете эту формулу самостоятельно). Если окажется, что $h_{\text{ниж}} > 0$, то нижняя кульминация светила М проходит над точкой севера N (на дуге P-N). А если $h_{\text{ниж}} < 0$, то нижняя кульминация светила проходит под точкой севера N (под горизонтом на дуге N-Z₁).

Пример. Полуденная высота Солнца 22 июня (в день летнего солнцестояния) равна 30°. Какова широта места наблюдения?

Решение. В день летнего солнцестояния Солнце имеет склонение $\delta=23^\circ 26'$ (см. §7). Поэтому из формулы (7) получаем:

$$\varphi = 90^\circ + \delta - h = 90^\circ + 23^\circ 26' - 30^\circ = 83^\circ 26'$$

Место наблюдения находится близко к Северному полюсу Земли.

§10. Время и календарь

Основные единицы измерения времени и в астрономии, и в нашей практической жизни – это **сутки** и **год**. Обе эти единицы связаны с движением Солнца по небесной сфере.

Основной из этих двух единиц времени является **год** (тропический год). Это время, за которое Земля, вращаясь вокруг Солнца по своей орбите, сделает полный оборот вокруг Солнца и начнется новый цикл времен года. Одновременно это и время полного оборота Солнца по эклиптике. То есть год – это время между двумя последовательными прохождению Солнцем одной и той же точки эклиптики (например, точки весеннего равноденствия Υ).

Промежуток времени, в течение которого Земля делает полный оборот вокруг своей оси, называется **звездными сутками**. Звездные сутки являются временем между любыми двумя последовательными одноименными (например, верхними) кульминациями каждой из звезд.

Но вот что важно. Звездные сутки, а также звездные часы, минуты и секунды используют в основном специалисты – астрономы. Мы же в своей обычной жизни в качестве суток используем не звездные, а **солнечные сутки**. А солнечные сутки – это время между двумя одноименными (например, верхними) последовательными кульминациями Солнца. То есть солнечные сутки – это время между двумя последовательными полуднями, когда Солнце поднимается над горизонтом максимально высоко. И эти сутки немного длиннее звездных. Это связано с тем, что Солнце, в отличие взаимно неподвижных звезд, движется среди звезд по эклиптике. И движется в направлении, **обратном** суточному вращению звездного неба, то есть с запада на восток (в направлении вращения Земли вокруг своей оси).

Поэтому, пройдя верхнюю кульминацию одновременно с некоторой звездой, к моменту своей следующей верхней кульминации Солнце окажется немного позади звезды. Звезда, таким образом, пройдет свою верхнюю кульминацию раньше. То есть звездные сутки окажутся короче солнечных (примерно на 4 минуты).

Как установили еще в древности, солнечных суток в году оказалось 365 с четвертью (точнее, немного меньше). А также давно было замечено, что длительность солнечных суток не строго одинакова. И связана эта неодинаковость, как мы теперь знаем, с двумя обстоятельствами): 1) с неравномерностью движения Земли по своей орбите вокруг Солнца, которая является эллиптической, а не круговой; 2) с наклоном эклиптики к плоскости небесного меридиана. Чтобы устранить это неудобство с неодинаковостью различных солнечных суток, были введено понятие **среднего Солнца**, равномерно вращающегося по небесному экватору и синхронно с реальным Солнцем проходящего через точку весеннего равноденствия. А вместе с этим понятием было введено понятие **средних солнечных суток**. Это одинаковые по длительности сутки, число которых в году совпадает с числом реальных солнечных суток. Средние солнечные сутки делятся на 24 часа, которые, в свою очередь, делятся на всем нам знакомые минуты и секунды. Именно их мы и используем для измерения времени.

Средние солнечные сутки содержат 84600 секунд. То есть 1 секунда – это 1/84600 доля средних солнечных суток. Но в настоящее время принято другое, более точное, определение секунды – **атомная секунда**. Атомная секунда – это время, равное длительности 9 192 631 770 колебаний излучения атомов цезия-133. Она подобрана таким образом, чтобы атомная секунда как можно меньше отличалась от прежней «астрономической» секунды.

Как сейчас точно установлено,

$$1 \text{ год} = 365 \text{ суток } 5 \text{ часов } 48 \text{ минут } 46,1 \text{ секунд (атомных)} \quad (9)$$

Теперь поговорим о календаре. **Календарь** - то непрерывная система счисления больших промежутков времени. До 46 года до нашей эры у каждой страны был свой календарь, и длительность года принималась по-разному. Но в 46 году до нашей эры римский император Юлий Цезарь ввел затем почти повсеместно принятый **юлианский календарь**, в котором продолжительность года составляла 365 суток 6 часов, то есть 365,25 суток (солнечных). Это достигалось тем, что три года подряд год содержал 365 суток, а четвертый год (високосный) содержал 366 суток. Год юлианского календаря на 11 минут 14 секунд длиннее истинного года (см. (9)). За каждые 400 лет различие достигает 3 суток – на столько суток юлианский календарь каждые 400 лет отставал от истинного астрономического календаря. Ко второй половине 16 века это отставание достигло уже 10 суток и стало для всех заметным.

Для того, чтобы исправить такое расхождение, папа римский Григорий XIII в 1582 году ввел новый, **григорианский календарь**. 5 октября 1582 года объявили 15 октября. Високосные годы, по 366 суток каждые 4 года, введенные в юлианском календаре, сохранили, но годы типа 1770, 1800, 1900, 2100 и т.д. (у них число сотен не делится на 4) решили считать простыми, а не високосными.

ми. Ошибка накапливается в григорианском календаре очень медленно (одни сутки за 3300 лет).

В нашей стране григорианский календарь был введен лишь в 1918 году, когда расхождение между действующим в России юлианским и григорианским календарем, по которому жила Европа, достигло уже 13 дней. Расхождение ликвидировали: 1 февраля 1918 года постановили считать 14 февраля. И мы этот сдвиг ощущаем до сих пор. Например, Новый год отмечаем дважды: и по старому (юлианскому) стилю (13 января), и по новому, григорианскому – 31 декабря.

Кстати, православная церковь так и не перешла на григорианский календарь. Она, например, отмечает рождество 7 января, тогда как вся Европа отмечает его 25 декабря.

§11. Поясное и всемирное время

Полдень (12 часов по местному времени) в разных пунктах Земли наступает в разное время. Например, если в Москве полдень, то в странах Европы еще утро, а на Дальнем востоке уже ночь. Ясно, что полдень наступает в данном пункте Земли позже, чем в другом, ровно на столько времени, сколько его нужно, чтобы нашей Земле повернуться на угол, соответствующий разности их географических долгот. Например, в Брянске, который по долготе находится западнее Москвы примерно на $3,5^\circ$, полдень наступает позднее примерно на 14 минут.

Если бы в своей повседневной жизни мы пользовались местным временем, то по мере продвижения на запад или восток нам приходилось бы непрерывно передвигать стрелки часов. Возникающие при этом неудобства столь очевидны, что всё население Земли пользуется не местным, а **поясным временем**.

Поясное время устроено следующим образом. Вся поверхность Земли разбита по долготе на 24 часовых пояса (по числу часов в сутках). И жители каждого из этих поясов живут по местному времени центрального меридиана их пояса. Это и есть их поясное время. Поясное время соседних часовых поясов различается на один час – оно тем больше, чем восточнее расположен часовой пояс. Местное время часового пояса, в котором центральным меридианом является Гринвичский меридиан (он проходит через Гринвичскую астрономическую обсерваторию вблизи Лондона), условились считать **всемирным временем** – Universal Time (UT). От Гринвичского меридиана, как известно, отсчитываются и долготы географических пунктов Земли – восточная и западная.

Часовые пояса пронумерованы: Гринвичский часовой пояс имеет номер 0, следующий за ним к востоку – номер 1, далее – номер 2, и т.д. до 23 часового пояса, который примыкает к нулевому поясу с запада. Мы, жители Брянской области, живем во втором часовом поясе, в котором находится и Москва. То есть поясное время нашего часового пояса на 2 часа больше времени всемирного (гринвичского).

Но у нас в стране декретом правительства к местному времени каждого часового пояса добавлен 1 час. И это время называется **поясным декретным временем**. Оно, таким образом, в нашем часовом поясе отличается от всемирного

времени на 3 часа. Например, когда в Москве полдень (12 часов), то в Гринвиче (всемирное время) 9 часов утра.

Всемирное время – основное время в астрономии. А у нас в стране основное время – московское. Сигналы точного московского времени транслируют и по радио, и по телевидению **службы точного времени**. А они отслеживают это время по очень точным атомным часам.

ГЛАВА 2. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА И ЕЁ СТРОЕНИЕ

§12. Земля, Луна и Солнце. Размеры и расстояния

Земля

То, что Земля шарообразна, люди знали уже во времена Аристотеля (4 век до нашей эры) по круглой тени, которую отбрасывала Земля на Луну во время лунных затмений. А первое определение размера Земли провел греческий ученый **Эратосфен**, живший на рубеже 2-3 веков до нашей эры в Египте. Он измерил высоту Полярной звезды в двух точках одного меридиана: в Александрии и в нынешнем Асуане, лежащем на 800 км южнее. Разница высот оказалась $7,2^\circ$. Значит, $7,2^\circ$ дуги этого меридиана составляют 800 км. Тогда весь меридиан составляет

$$\frac{800}{7,2} \cdot 360 \approx 40\,000 \text{ км}$$

Этот результат практически не отличается от современных данных. При этом радиус Земли

$$R = \frac{40000}{2\pi} \approx 6400 \text{ км} \quad (\text{по современным данным } R \approx 6380 \text{ км})$$

Расстояние до Луны

Его первым измерил древнегреческий астроном **Аристарх Самосский** (3 век до нашей эры) по изменению угла, под которым на фоне звезд видна Луна (её центр) из двух разных точек поверхности Земли. Обработав эти измерения, Аристарх сумел определить **горизонтальный параллакс** центра Луны. То есть тот угол p , под которым с Луны был бы виден радиус Земли R , перпендикулярный лучу зрения (рис. 13).

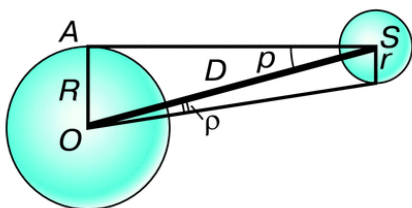


Рис. 13

Согласно этому рисунку,

$$\frac{R}{D} = \sin p \approx p \quad (p - \text{угол в радианах}). \quad \text{Отсюда} \quad D = \frac{R}{p} \quad (10)$$

- расстояние от Земли до Луны. Горизонтальный параллакс p Луны оказался равным $\approx 57'$. Так как

$$1 \text{ рад.} = \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{180 \cdot 60'}{3,1416} = 3438'$$

то

$$1' = \frac{1}{3438} \text{ (рад)}, \text{ а } p = 57' = \frac{57}{3438} \text{ (рад)}.$$

Поэтому

$$D = \frac{R}{p} = \frac{3438}{57} \cdot R \approx 60 R \quad (11)$$

То есть расстояние до Луны оказалось примерно в 60 раз больше, чем радиус Земли.

Размеры Луны

Вычислив расстояние D до Луны, Аристарх Самосский нашел и радиус r Луны, измерив угол ρ , под которым с Земли виден этот радиус (рис. 13). Так как диаметр Луны виден с Земли под углом $30'$, то

$$\rho = 15' = \frac{15}{3438} \text{ (рад)}.$$

Из рис. 13 следует:

$$\frac{R}{D} = \sin \rho \approx \rho \text{ (}\rho \text{ – в рад.)}.$$

Отсюда $r = D \cdot \rho$. Но так как $D = \frac{R}{p}$, то

$$r = R \frac{\rho}{p} = \frac{15}{57} R \approx \frac{1}{4} R$$

То есть радиус Луны примерно в 4 раза меньше радиуса Земли.

Расстояние до Солнца и размеры Солнца

Их тоже впервые определил Аристарх Самосский. Расстояние до Солнца он вычислил, рассматривая прямоугольный треугольник Земля – Луна – Солнце, когда Луна освещена Солнцем ровно на четверть (рис. 14):



Рис. 14

Из этого рисунка следует:

$$\frac{l}{L} \approx \cos 89^\circ 50' \approx \frac{1}{400} \Rightarrow L = 400l$$

То есть расстояние от Земли до Солнца оказалось примерно в 400 раз больше, чем расстояние от Земли до Луны. А так как угловые размер Луны и Солнца примерно одинаковы, то и линейные размеры Солнца в 400 раз больше размеров Луны и более, чем в 100 раз больше размеров Земли.

Оказалось, что Земля – совсем маленькая по сравнению с Солнцем. И Аристарх сразу поставил под сомнение всеобщее представление о том, что весь космос, включая огромное Солнце, вращается вокруг маленькой Земли. Но его сомнения тогда никто не разделил – слишком они были революционными. Аристарх Самосский очень намного (почти на 2000 лет) опередил свое время. И только Коперник в 16 веке уже нашей эры возвратился к выводу Аристарха, что, наоборот, Земля вращается вокруг Солнца. Но даже во времена Коперника эта мысль встретила жесткое противодействие церкви.

Аристарх Самосский был тем же Коперником, только древнего мира. Признанным лишь через 2000 лет.

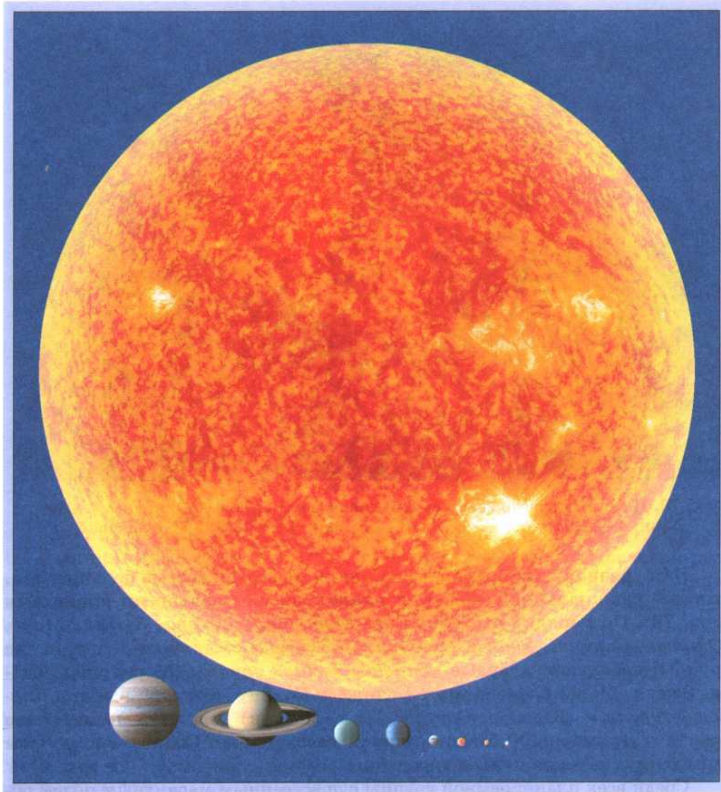
§13. Планеты и их видимое движение вокруг Солнца

По своим орбитам, лежащим примерно в той же плоскости, в которой лежит орбита Земли, вращаются в одну и ту же сторону вокруг Солнца все её 8 планет:

Меркурий; Венера; Земля; Марс; Юпитер; Сатурн; Уран; Нептун

Планеты перечислены в порядке удаленности их от Солнца. А если выстроить их по возрастанию размеров, то порядок здесь будет другой:

Меркурий; Марс; Венера; Земля; Нептун; Уран; Сатурн; Юпитер



Кроме планет, вокруг Солнца движется и много других, меньших по размерам, космических тел – астероидов, комет, да и просто бесформенных камней и пылинок. Все вместе они составляют **Солнечную систему**. Движением больших и малых тел Солнечной системы управляет Солнце. И по размерам, и по массе Солнце намного больше любого из этих тел. Рисунок 15 позволяет сравнить их размеры (планеты на этом рисунке выстроены справа налево по возрастанию их размеров). Четвертая справа – Земля.

Рис. 15

Отличает на небе планеты от звезд то, что они не только участвуют в суточном вращении небесной сферы (как все звезды и другие небесные тела), но и, подобно Солнцу, перемещаются среди звезд. Их в древности потому и называли планетами (блуждающими звездами). И это «блуждание» планет обусловлено двумя причинами:

- 1) Обращением планет вокруг Солнца;
- 2) Обращением Земли, с которой мы наблюдаем планеты, вокруг Солнца.

В итоге результирующее движение планет по небесной сфере имеет сложный петлеобразный характер, которое трудно объяснить в геоцентрической системе мира Аристотеля – Птолемея, и которое нашло простое и естественное объяснение в гелиоцентрической системе мира Коперника.

Конфигурации планет

Планеты, орбиты которых расположены внутри земной орбиты (это Меркурий и Венера) называют **нижними**. А планеты, орбиты которых расположены вне земной орбиты – **верхними** (это Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Характерные взаимные расположения планет относительно Солнца называются **конфигурациями планет**. У нижних планет характерные конфигурации – это **соединения** (верхнее и нижнее) и **элонгации** (восточная и западная). У верхних планет – **соединение**; **противостояние**; **квадраты** (восточная и западная) - см. рис. 16.



Рис. 16. Конфигурации планет

Наилучшие условия видимости нижних планет – это их восточная и западная элонгации, когда их угловое расстояние от Солнца максимально. Для Меркурия оно равно 28° , а для Венеры 47° . При восточной элонгации нижняя планета видна на западе вскоре после захода Солнца. При западной – на востоке незадолго перед восходом Солнца. А верхние планеты лучше всего видны вблизи противостояний, когда к Земле обращено всё освещенное Солнцем полушарие планеты.

§14. Синодический и сидерический периоды обращения планет

Конфигурации планет периодически повторяются.

Определение 1. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными конфигурациями планеты (например, соединениями) называется её **синодическим периодом**. Еще в глубокой древности, когда считалось, что планеты обращаются вокруг Земли, для каждой из них на основе многолетних наблюдений был определен синодический период обращения.

Определение 2. Период обращения планеты вокруг Солнца по отношению к звездам называется **звездным**, или **сидерическим**, периодом.

Рассмотрим, как связан синодический период обращения планеты с сидерическим её периодом. Найдем эту связь сначала для верхней (внешней по отношению к Земле) планеты.

Внешние планеты, движущиеся по орбитам, большими по размерам, чем

орбита Земли, обращаются вокруг Солнца за большее время, чем это делает Земля. Следовательно, их угловая скорость обращения вокруг Солнца меньше, чем у Земли.

Пусть T – время обращения внешней планеты вокруг Солнца (T – её сидерический период); $T_3 = 1$ год – сидерический период обращения Земли вокруг Солнца; S – синодический период внешней планеты. Угловая скорость движения планеты $\omega_{\text{п}} = \frac{360^\circ}{T}$; угловая скорость Земли $\omega_3 = \frac{360^\circ}{T_3}$, причем $\omega_3 > \omega_{\text{п}}$. От момента какой-либо конфигурации (например, противостояния) до следующей такой конфигурации планета повернется на угол $\varphi_{\text{п}} = \omega_{\text{п}} \cdot S = \frac{360^\circ}{T} \cdot S$. А Земля за этот же период времени S повернется на угол $\varphi_3 = \omega_3 \cdot S = \frac{360^\circ}{T_3} \cdot S$. Но угол $\varphi_3 > \varphi_{\text{п}}$ на 360° , ибо Земля сделает дополнительный оборот (аналогично тому, как более быстрый бегун должен сделать лишний круг, чтобы догнать более медленного, если они стартовали на стадионе одновременно). Поэтому

$$\varphi_3 - \varphi_{\text{п}} = 360^\circ \Rightarrow \frac{360^\circ}{T_3} \cdot S - \frac{360^\circ}{T} \cdot S = 360^\circ \Rightarrow \frac{1}{T_3} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S} \quad (12)$$

Это – для верхней планеты. А если планета нижняя (внутренняя по отношению к Земле), то для неё Земля – планета внешняя. И тогда получаем следующую связь между периодами T и S для нижней планеты:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_3} = \frac{1}{S} \quad (13)$$

Зная S – синодический период планеты (он определяется из наблюдений за планетой), из формул (12) и (13) определяется её сидерический (звездный) период T . Если полагать $T_3 = 1$ год, то и S , и T будут выражаться в земных годах. Ниже в таблице 3 приведен сидерический период всех планет Солнечной системы в земных годах, а также Луны.

Таблица 3

Планеты	Луна	Мерк	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Сидерический Период T	27,3 суток	0,24	0,62	1,00	1,88	11,87	29,67	84,05	165,49

§15. Движение Луны вокруг Земли

Луна – единственный естественный спутник Земли и ближайшее к Земле небесное тело. Основные сведения о Луне приведены в таблице 4.

Среднее расстояние от Земли до Луны	384 400 км
Сидерический период обращения вокруг Земли	27,3 суток (земных)
Период обращения вокруг своей оси	27,3 суток
Синодический период обращения вокруг Земли (промежуток времени между одинаковыми фазами Луны)	29,5 суток
Наклонение орбиты Луны к плоскости орбиты Земли	5,1°
Радиус	1740 км (0,27 радиуса Земли)
Масса	0,012 массы Земли

На рисунке 17 показана связь между синодическим и сидерическим периодами обращения Луны вокруг Земли.

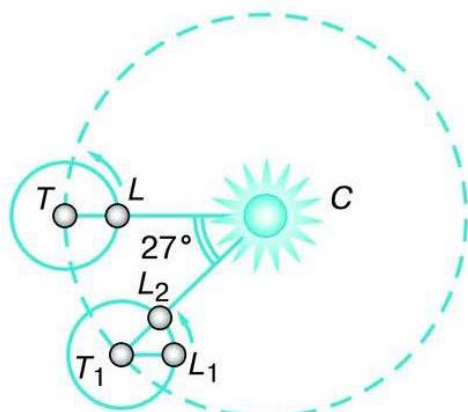


Рис. 17

Здесь L – положение Луны в новолунии (Луна с Земли T не видна); L_1 – положение Луны через её сидерический месяц 27,3 дня (за это время она делает полный оборот относительно звезд). За этот период (27,3 дня) Земля, перемещаясь по своей орбите примерно на 1° в сутки, пройдет примерно 27° и займет положение T_1 . Для того, чтобы снова оказаться в новолунии (в положении L_2), Луне нужно пройти по своей

орбите еще 27° . Так как Луна перемещается примерно на 13° в сутки, то ей понадобится еще около двух суток (чуть больше). В итоге и получается 29,5 суток.

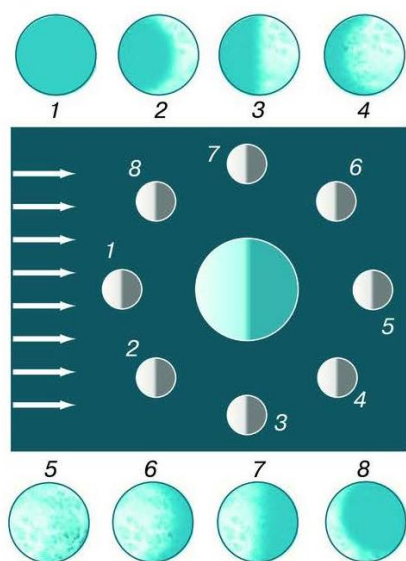


Рис. 18. Фазы Луны

Фазы Луны

Луна светит отраженным от Солнца светом. Она быстро перемещается на фоне звездного неба (примерно на 13° в сутки) с запада на восток, то есть в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы (как и Солнце).

В зависимости от положения, которое Луна занимает по отношению к Земле и Солнцу, мы видим то полную Луну (полнолуние), то часть её диска, то совсем её не видим (новолуние). Наблюдаемая с Земли освещенная Солнцем часть лунного диска называется **фазой Луны**. Проследить смену лунных фаз можно по рис. 18.

В положении (1) Луна находится на фоне Солнца и потому не видна (это новолуние). Положение (2) – это недавно «народившаяся» Луна. В таком виде, в виде узкого серпа, рожки которого направлены влево, она предстает перед нами на западе недалеко от заходящего Солнца, и тоже быстро заходит, идя вслед за ним. С каждым последующим днем Луна все больше отстает от Солнца и в наших глазах одновременно растет. Через две недели Луна оказывается в противоположной Солнцу части небесной сферы, и наступает полнолуние (5). В дальнейшем Луна начинает убывать. В положении (8) она, двигаясь уже впереди Солнца, появляется утром перед восходом Солнца, и опять в виде узкого серпа, только направленного своими рожками вправо. И затем, через 2-3 дня, Луна наезжает на Солнце и пропадает в его лучах – наступает новое новолуние. Полный цикл смены лунных фаз составляет её синодический месяц – 29, 5 земных суток.

Луна повернута к Земле все время одной и той же стороной, так что обратную сторону Луны люди никогда не видели вплоть до 7 октября 1959 года. А в этот день наша отечественная ракета Луна-3 облетела вокруг Луны и сфотографировала её обратную сторону. И люди впервые эту сторону увидели. А в июле 1969 года на Луну впервые ступила нога человека. Это сделали американские астронавты Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин. А всего на Луне в период с 1969 по 1972 год по программе «Аполлон» было выполнено 6 полётов с посадкой на Луне. И к настоящему времени там побывали уже 12 человек.

§16. Солнечные и лунные затмения

Когда Луна полностью или частично заслоняет Солнце (а это возможно, естественно, только в новолунии), происходят **солнечные затмения** (полные или частичные) – см. рис. 19.

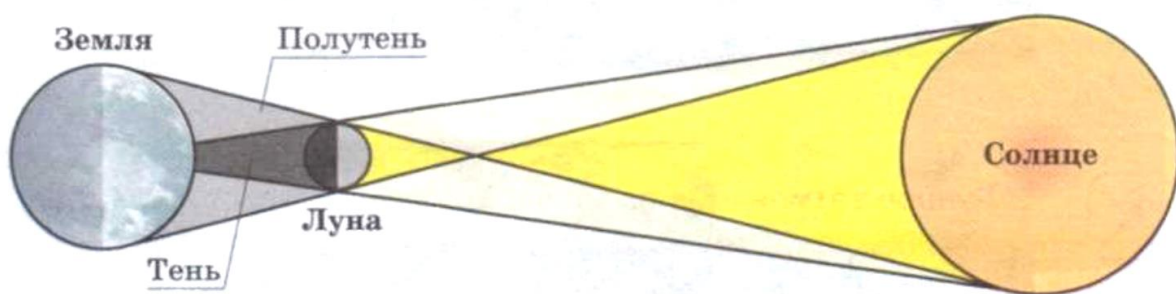


Рис. 19

В том пятне поверхности Земли, на которое падает полная тень от Луны, наблюдается **полное солнечное затмение** – Луна полностью закрывает Солнце. Размеры этого пятна, а также продолжительность полного солнечного затмения зависят от видимых угловых размеров Луны и Солнца. Угловые диаметры Луны и Солнца приблизительно одинаковы и составляют примерно по 30 угловых минут.

Но с течением времени периодически они слегка меняются, ибо расстояния от Луны и Солнца до Земли меняются. Если к моменту солнечного затмения Луна окажется чуть больше Солнца, она закроет Солнце полностью, на Земле появится круглое пятно полной тени, в котором будет наблюдаться полное солнечное затмение. Размеры этого пятна небольшие (оно диаметром не более 270 км). Вследствие орбитального движения Луны оно быстро (со скоростью около 1 километра в секунду) бежит с запада на восток по поверхности Земли. Так что максимальное время наблюдения полного солнечного затмения ни в одной точке Земли не превосходит 5-7 минут. Если угловые размеры Луны и Солнца окажутся одинаковыми, пятно полной тени на поверхности Земли представит собой точку, и в этой точке, бегущей по поверхности Земли, полное солнечное затмение будет наблюдаться лишь мгновение. А если Луна будет меньше Солнца, то конус полной тени до поверхности Земли не дойдет, Луна целиком Солнце закрыть не сможет, и на Земле можно будет наблюдать лишь **кольцевое солнечное затмение**.

А в тех областях поверхности Земли, которые попадают в область полутени от Луны, наблюдаются **частичные солнечные затмения** – там Луна лишь частично закрывает Солнце. Размеры полутени гораздо больше полной тени, поэтому частичные солнечные затмения больше доступны наблюдению, чем полные.

Когда же Луна попадает в тень Солнца, то на Земле наблюдается **лунное затмение**. Схема лунного затмения показана на рис. 20.

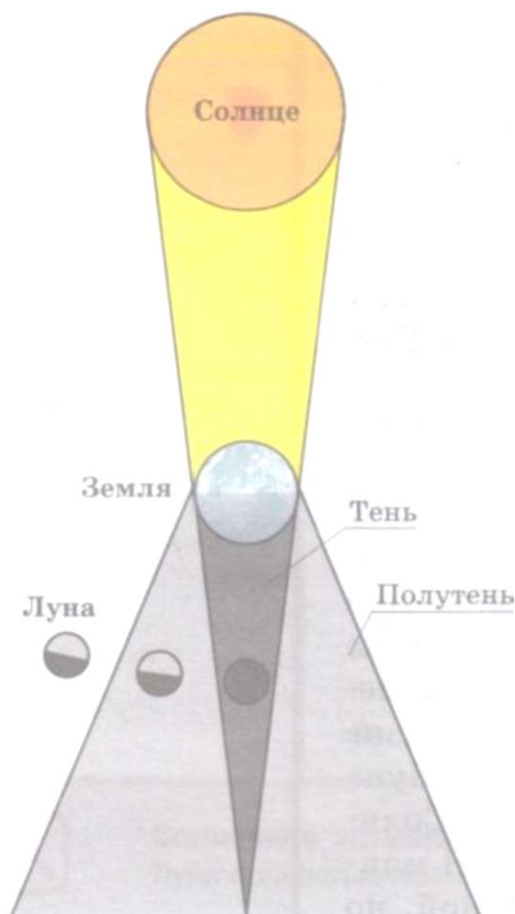


Рис. 20

Лунное затмение длится 1,5 – 2 часа. Его можно наблюдать со всего ночного полушария Земли. Поэтому в каждой местности лунные затмения удастся наблюдать значительно чаще солнечных.

Если бы орбита Луны вокруг Земли лежала строго в плоскости орбиты Земли вокруг Солнца, то мы бы в течение каждого лунного месяца видели одно солнечное затмение (в новолуние) и одно лунное (в полнолуние). Но орбита Луны не лежит в плоскости орбиты Земли – она наклонена к этой плоскости под углом примерно в 5° . Поэтому для того, чтобы произошло солнечное затмение, необходимо соблюдение двух факторов:

- 1) Луна должна пересечь плоскость орбиты Земли;
- 2) В этот момент Луна должна быть в новолунии – между Землей и Солнцем.

Аналогично, чтобы произошло лунное затмение, должны совпасть два фактора: Луна должна пересекать плоскость орбиты Земли и оказаться при этом за Землей – тогда она попадет в тень Земли. Так как тень Земли гораздо шире, чем тень Луны, то лунные затмения наблюдаются гораздо чаще, чем солнечные (2-4 раза в году). А полные солнечные затмения в одной и той же местности видны не чаще одного раза в 200-300 лет.

В настоящее время разработаны очень точные методы вычисления дат и солнечных, и лунных затмений для любых точек Земли. Например, очередное полное солнечное затмение в Москве будет наблюдаться 16 октября 2126 года.

§17. Приливы и отливы на Земле

Между Землей и Луной есть взаимное притяжение. Притяжение Луны создает на поверхности земных океанов **приливные горбы** – один на стороне, обращенной к Луне, а другой на противоположной стороне – рис. 21.

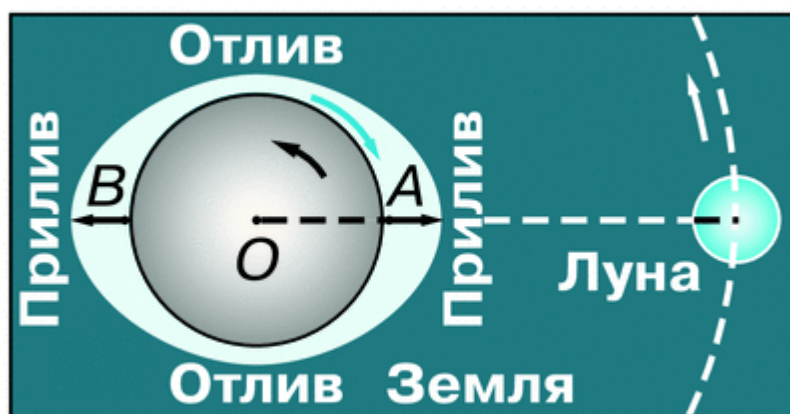


Рис. 21

При суточном вращении Земли на прибрежной границе океанов каждые 12 часов наблюдается прилив, и каждые 12 часов отлив. Высочайшие на Земле приливы (15,6—18 м) наблюдаются в бухте Фанди, которая находится

на восточном побережье Канады – см. рис. 22.

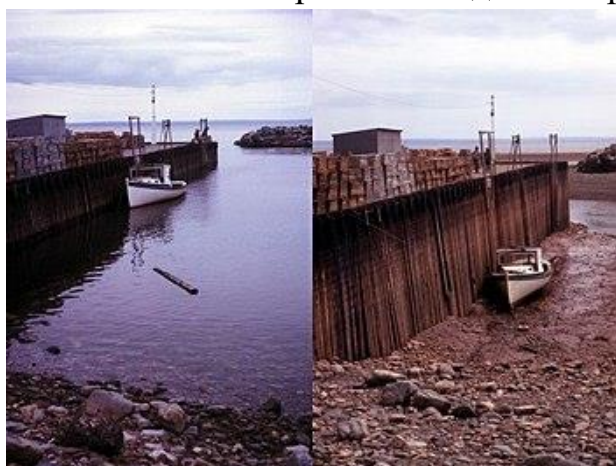


Рис. 22. Залив Фанди во время прилива и отлива

В России самые высокие приливы случаются в Пенжинской губе Охотского моря — до 12,9 м. Это точка самых высоких приливов на всём Тихом океане. Они сменяют друг друга каждые 6 часов. В других водоемах (реках, озерах, внутренних морях) приливные горбы

столь незначительны, что они незаметны. Приливные явления потихоньку тормозят вращение Земли. Но этот эффект очень незначителен, хотя миллиарды лет назад Земля вращалась вокруг своей оси значительно быстрее. А вот приливные явления на самой Луне, вызванные её притяжением Землей, за миллиарды лет остановили Луну. И теперь она всё время повернута к Земле одной и той же стороной.

§18. Законы движения планет Солнечной системы (законы Кеплера)

С древнейших времен считалось, что все небесные тела движутся по «идеальным кривым» - окружностям. В теории Коперника круговое движение тоже не подвергалось сомнению. Однако последователь Коперника немецкий астроном Иоганн Кеплер (1561 – 1630), исследуя орбиту Марса, показал, что это не так. Что планеты движутся вокруг Солнца не по окружностям, а по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце. Причем движутся по своим орбитам неравномерно. Свои исследования он выразил в трех законах.

Законы Кеплера

Первый закон. *Орбита каждой планеты есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце – рис. 23.*

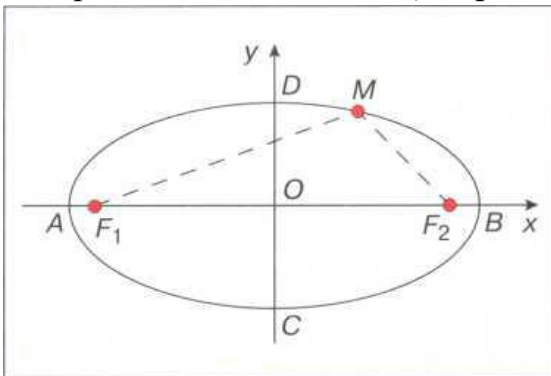


Рис. 23

Эллипс — плоская замкнутая кривая, у которой неизменна сумма расстояний от любой её точки (M) до двух особых внутренних точек, называемых фокусами (F1 и F2). Отрезок прямой, соединяющий наиболее удалённые друг от друга точки эллипса (A и B), называется его большой осью. Перпендикулярный отрезок CD называется малой осью. Отрезки AO и CO — полуоси (большая и малая). Фокусы лежат на большой оси симметрично относительно центра эллипса (O).

Схема расположения Солнца и обращающейся вокруг него по эллиптической орбите планеты показана на рис. 24.

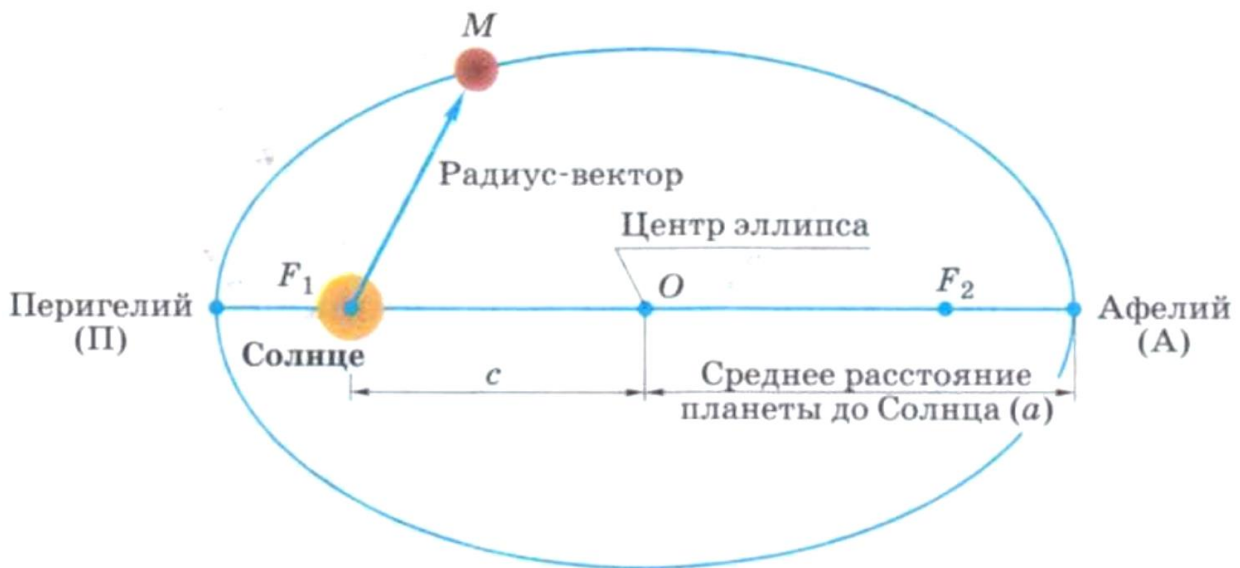


Рис. 24

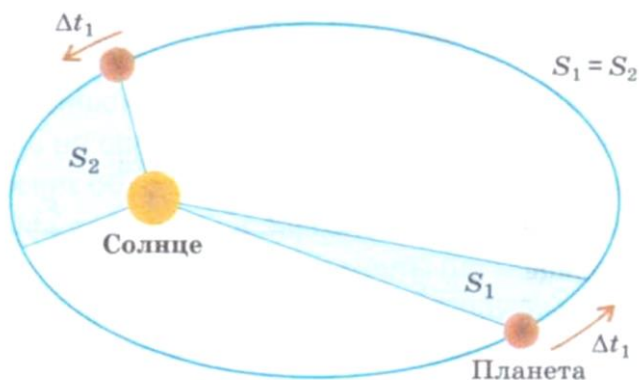
Здесь M – планета; $a = OA$ – большая полуось её орбиты (большая полуось эллипса); c - расстояние от Солнца до центра O орбиты планеты; $c/a = \varepsilon$ – эксцентриситет.

тет эллипса ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). Если $\varepsilon = 0$, то эллипс является окружностью. Чем больше эксцентриситет, тем более вытянутым будет эллипс. П (перигелий) – ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты. А (афелий) – наиболее удаленная от Солнца точка орбиты планеты.

В частности, орбита Земли является эллипсом, у которого большая полуось $a = 149\,600\,000$ км, а эксцентриситет $\varepsilon = 0,017$. Большая полуось орбиты Земли называется **астрономической единицей**:

$$1 \text{ а.е.} = 149\,600\,000 \text{ км} \approx 150 \text{ млн. км.} \quad (14)$$

В астрономических единицах принято измерять расстояния от Солнца до других планет солнечной системы.



Второй закон Кеплера. Радиус – вектор планеты в равные промежутки времени описывает равные площади – рис. 25.

Рис. 25

Третий закон Кеплера. Квадраты сидерических (звездных) периодов обращения вокруг Солнца любых двух планет относятся между собой как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \Rightarrow \frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = Const \quad (15)$$

Обобщение и уточнение Ньютоном законов Кеплера

Исаак Ньютон (1643 – 1727) математически вывел законы Кеплера из открытого им закона всемирного тяготения

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \text{ – гравитационная постоянная}) \quad (16)$$

Закон всемирного тяготения определяет силу F , с которой притягиваются друг к другу две точечные массы m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии r одна от другой. Кстати, с такой же силой притягиваются друг к другу и два материальных шара массами m_1 и m_2 , где r – расстояние между их центрами.

Ньютон обобщил и уточнил законы Кеплера. В формулировке Ньютона законы Кеплера звучат так:

Первый закон Кеплера. Под действием центральной силы тяготения тело может двигаться лишь по одной из следующих кривых: окружности, эллипсу, параболе, гиперболу, в фокусе которых находится центральное тело (Солнце).

Второй закон Кеплера. Он у Ньютона изменений не получил. Лишь получил свое объяснение: он выражает закон сохранения момента количества движения вращающегося вокруг неподвижного тела другого тела.

Третий закон Кеплера. Он непосредственно следует из закона всемирного тяготения. Выведем его для самого простого случая: тело (планета) массы m движется вокруг неподвижного другого тела массы M (Солнца) по окружности радиуса r – рис. 26.

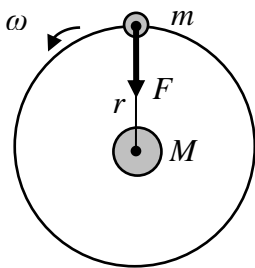


Рис. 26

$F = G \frac{Mm}{r^2}$ - центральная сила тяготения, действующая на тело массы m . Тогда $a_{ц} = \frac{F}{m} = \frac{GM}{r^2}$ - центростремительное ускорение массы m .

С другой стороны, $a_{ц} = \omega^2 r$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – угловая скорость вращения массы m (T – период вращения). То есть $a_{ц} = \frac{4\pi^2}{T^2} r$. Следовательно,

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} r \Rightarrow \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = const \text{ - третий закон Кеплера} \quad (17)$$

Примечание. Мы считали, что центральное тело, масса которого M , неподвижна, и движется по круговой орбите только масса m . Но в действительности это не так: движутся обе массы вокруг их общего центра масс. Если учесть это обстоятельство, то в равенстве (17) появится уточнение:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2} \Rightarrow \frac{r^3}{T^2(M+m)} = \frac{G}{4\pi^2} = const \quad (18)$$

Как показал Ньютон, формула (18) остается справедливой и в случае, когда траектория массы m (планеты) не окружность, а эллипс. Тогда в формуле (18) вместо r будет стоять a – большая полуось эллипса:

$$\frac{a^3}{T^2(M+m)} = \frac{G}{4\pi^2} = const \quad (19)$$

Формула (19) и представляет собой третий закон Кеплера в уточненной Ньютоном формулировке. Эта формула играет исключительную роль в небесной механике. Её можно применять не только к паре планета – Солнце, но и к паре планета – её спутник, двойным звездам, соседним галактикам, и т.д. Определив параметры (a ; T) одного из этих тел, по формуле (19) можно определять суммарную массу $M+m$ тел. То есть формула (19) позволяет «взвешивать» космические тела.

Пример. Определить, во сколько раз масса Солнца больше массы Земли.

Решение. Используем формулу (19) для M – массы Солнца и m – массы Земли. Пренебрегая в сумме $M+m$ величиной m (это оправдано, так как масса Земли m много меньше массы Солнца M), получим из (19) массу Солнца M :

$$M = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a_3^3}{T_3^2}$$

Здесь $a_3 = 1 \text{ а. е.} = 150\,000\,000 \text{ км}$ – большая полуось орбиты Земли, а $T_3 = 1 \text{ год} = 365,25 \text{ суток}$ – период обращения Земли вокруг Солнца.

Теперь определим массу m Земли. Для этого применим формулу (19) к системе Земля – Луна. Пренебрегая массой Луны по сравнению с массой Земли, получим формулу, аналогичную предыдущей:

$$m = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a_{\text{л}}^3}{T_{\text{л}}^2}$$

Здесь $a_{\text{л}} = 384\,000 \text{ км}$ – радиус орбиты Луны, а $T_{\text{л}} = 27,3 \text{ суток}$ – период обращения Луны вокруг Земли (звездный период). Тогда

$$\frac{M}{m} = \left(\frac{T_{\text{л}}}{T_3}\right)^2 \cdot \left(\frac{a_3}{a_{\text{л}}}\right)^3 \approx 333\,000$$

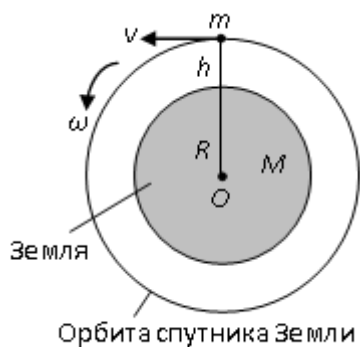
То есть масса Солнца больше массы Земли примерно в 333 000 раз.

Кстати, зная величину гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, можно найти массы M и m Солнца и Земли в килограммах. И эти массы таковы:

$$M = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} \text{ – масса Солнца; } m = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг} \text{ – масса Земли} \quad (20)$$

§19. Движение искусственных спутников Земли. Космонавтика

Возможность создания искусственных спутников Земли обосновал еще Ньютон. Его рассуждение: бросая с возвышенности (с горы) горизонтально (параллельно поверхности Земли) камень всё с большей скоростью, он будет падать всё дальше и дальше, пока не обогнет всю Землю, вернувшись в начальную точку. После этого он будет повторять свой облет вокруг Земли, превратившись в её искусственный спутник, вращающийся вокруг неё по круговой орбите.



Найдем скорость v , с которой должен быть брошен этот камень. Рассмотрим рис. 26.

Рис. 26

Искусственный спутник Земли массы m , вращающийся вокруг Земли по круговой орбите радиуса $R+h$, где R – радиус Земли, h – высота спутника над поверхностью Земли, притя-

гивается к центру Земли с силой $F = G \frac{mM}{(R+h)^2}$. Следовательно, он имеет центростремительное ускорение $a_{ц} = \frac{F}{m} = \frac{GM}{(R+h)^2}$. С другой стороны,

$a_{ц} = \frac{v^2}{R+h}$, где v – орбитальная скорость спутника. Поэтому

$$\frac{v^2}{R+h} = \frac{GM}{(R+h)^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} \quad (21)$$

Чем больше h , тем меньшей будет скорость v . Если $h = 0$, то соответствующая этому случаю скорость v_1 называется **первой космической скоростью**:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \left| \begin{array}{l} G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}; R = 6400\,000 \text{ м} - \text{радиус Земли}; \\ M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг} - \text{масса Земли} \end{array} \right| \approx$$

$$\approx 7900 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{сек}} \quad (22)$$

Кстати, значение первой космической скорости v_1 можно найти и проще. Так как на поверхности Земли (при $h = 0$) $a_{ц} = g \approx 9,8 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$, и $a_{ц} = \frac{v_1^2}{R}$, то

$$\frac{v_1^2}{R} = g \Rightarrow v_1 = \sqrt{gR} = 7900 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = 7,9 \frac{\text{км}}{\text{сек}} \quad (23)$$

Сравнивая выражения (22) и (23), получим полезную формулу:

$$GM = gR^2 \quad (24)$$

Вторая космическая скорость

Тело массы m , находящееся на высоте h над поверхностью Земли и летящее со скоростью v , обладает кинетической и потенциальной энергией:

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}; \quad E_{\text{пот}} = -\frac{Gmm}{R+h} = |\text{учтем(24)}| = -\frac{gmR^2}{R+h} \quad (25)$$

(это известные из физики формулы). Кинетическая энергия тела связана с его движением. А потенциальная энергия тела, по определению, равна работе, взятой с противоположным знаком, которую нужно совершить, чтобы переместить тело из данной точки, находящейся на высоте h , в бесконечность, где у него станет скорость $v = 0$. По закону сохранения энергии $E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = C$ – константа. Поэтому

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{gmR^2}{R+h} = c$$

При $h = \infty$ скорость $v = 0$. Поэтому $C = 0$. Следовательно

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{gmR^2}{R+h} = 0 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2gR^2}{R+h}} \quad (26)$$

Такую скорость v на высоте h должно иметь свободно летящее тело, чтобы оно было способно улететь на ∞ , то есть навсегда покинуть Землю. Для тела, стартующего с поверхности Земли (где $h = 0$), эта скорость должна быть равной

$$v = v_2 = \sqrt{2gR} \approx 11,2 \frac{\text{км}}{\text{сек}} \quad (27)$$

Эта скорость называется **второй космической скоростью**.

Если скорость v искусственного спутника Земли у её поверхности находится между первой и второй космическими скоростями, то есть в пределах $v_1 < v < v_2$, то траекторией спутника будет эллипс; если $v = v_2$, то этой траекторией будет парабола; если $v > v_2$ – гипербола. Впрочем, в последних двух случаях тело искусственным спутником Земли уже не будет, так как навсегда от неё улетит (рис. 27).

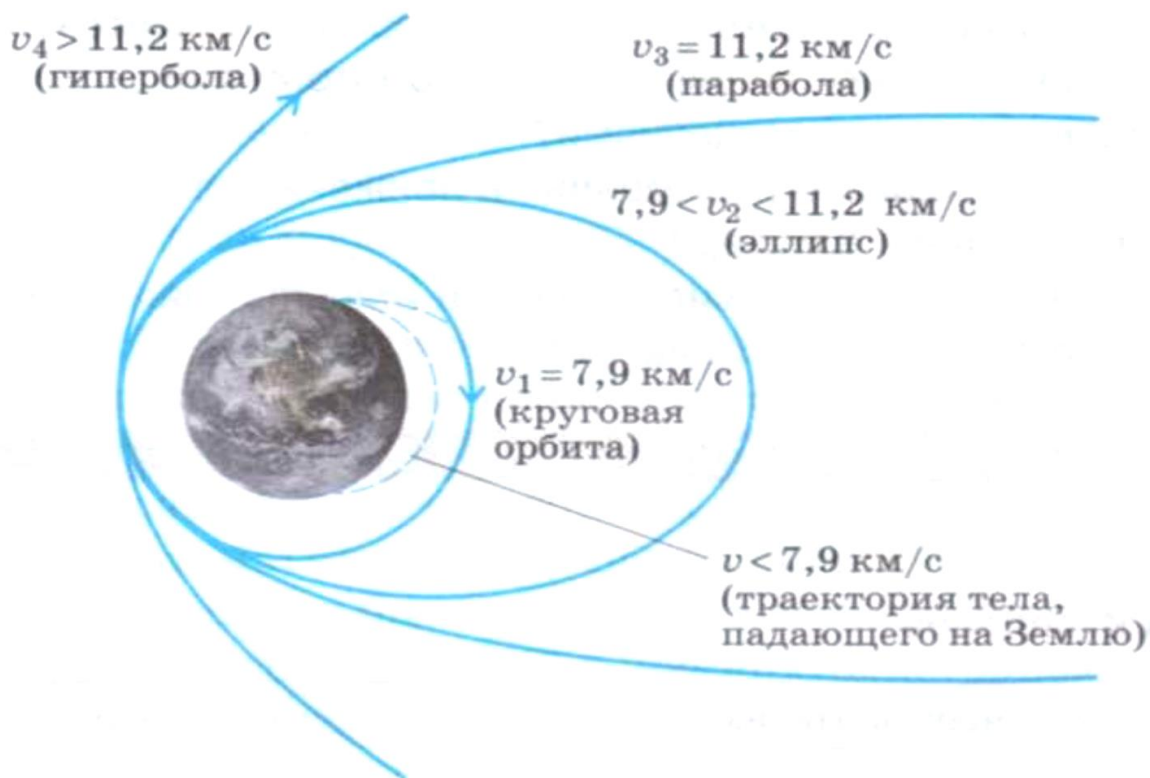


Рис. 27

Первый искусственный спутник Земли, вышедший на круговую орбиту, был запущен 4 октября 1957 года. С этой даты началась **космическая эра**. А 12 апреля 1961 года был совершен первый орбитальный полет космического корабля с человеком на борту. Им был всем теперь известный Юрий Гагарин. С тех пор и

другие страны занялись космическими исследованиями. В России ими занимается государственная корпорация «Роскосмос». В США – «НАСА». В Европе – «ЕСА».

§20. Образование Солнечной системы

Все тела Солнечной системы (планеты и их спутники, кометы, астероиды и т.д.) образовались вместе с Солнцем из медленно вращающегося пыле-газового облака около 4,5 – 5 миллиардов лет назад. Такую модель выдвигали и рассматривали, начиная с конца 18 века, французский математик Лаплас, немецкий философ Кант, и другие ученые. В нашей стране наибольший вклад в разработку теории происхождения и развития Солнечной системы внес Отто Шмидт (1891 – 1956).

Согласно этим теориям, вначале сжатие облака привело к образованию центрального горячего ядра – будущего Солнца. Оно захватило основную часть массы облака – примерно 90%. Тяготение образовавшегося солнца воздействовало на форму оставшейся части облака: оно становилось все более и более плоским диском. А дальнейшая эволюция газопылевых уплотнений этого диска привела к образованию планет. Под воздействием возникшего на Солнце излучения из окрестностей Солнца улетучивались газы (водород и гелий) и остались лишь твердые тугоплавкие частицы. Из этого вещества образовались ближние к Солнцу планеты – Меркурий, Венера, Земля, Марс. А вдали от Солнца образовались газовые планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун.

Не всё вещество протопланетного облака вошло в состав Солнца, планет и их спутников. Оставшаяся его часть – это астероиды, кометы, остатки межпланетной пыли и газа.

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§21. Земля и Луна

Земля – наиболее изученная планета Солнечной системы. И это понятно – мы на ней живем. Радиус Земли составляет 6380 км, длина экватора около 40 000 км, масса $6 \cdot 10^{24}$ кг. Вращение Земли вокруг своей оси обеспечивает на ней смену дня и ночи. А наклон оси вращения Земли к плоскости её орбиты приводит к смене времен года. Вследствие вращения вокруг своей оси Земля немного сплюснута со стороны своих полюсов. Основными оболочками земного шара являются: атмосфера; гидросфера (вода морей и океанов); литосфера (твердая кора); жидкая мантия (источник землетрясений и извержения вулканов); твердое ядро. Земля обладает собственным магнитным полем. Это магнитное поле тормозит поток заряженных частиц, испускаемых Солнцем – электронов, протонов, ионов (так называемый солнечный ветер) и направляет их по своим силовым линиям к северному и южному полюсам Земли, где они на большой высоте заставляют светиться атомы воздуха (азота и кислорода), вызывая полярные сияния. Магнитное поле защищает жизнь на Земле от смертельных потоков космических частиц.

В настоящее время у многих жителей Земли вызывают большую и постоянно увеличивающуюся озабоченность вопросы экологии. Идет интенсивное загрязнение окружающей среды отходами бурной человеческой деятельности – загрязнение и твердой поверхности, и морей, и океанов. А сжигание большого количества органического топлива приводит к уменьшению кислорода в атмосфере и увеличению углекислого газа, создающего избыточный парниковый эффект. Человечество сможет избежать экологической катастрофы, если будет больше использовать альтернативные источники энергии, не загрязняющие окружающую среду — энергию земных недр, ветровую и солнечную энергию, и т.д. Это требует согласованных действий и правительств, и бизнеса, и народов разных стран. А с этим, увы, сейчас большие, но, будем надеяться, решаемые проблемы.

Луна

Второе по изученности космическое тело - это спутник Земли Луна. По своей физической природе она похожа на Землю, хотя и значительно меньше Земли. Её радиус 1740 км (0,27 радиуса Земли), а масса составляет 0,012 массы Земли. Лунные сутки составляют 27,3 земных суток – это время обращения Луны вокруг Земли (сидерический период Луны). Луна постоянно повернута к Земле одной и той же стороной, поэтому в каждой точке поверхности Луны две земных недели продолжается лунный день, и две земных недели - лунная ночь. Во время лунного дня поверхность Луны нагревается до $+130^{\circ}$, а в течение лунной ночи остывает до -170° . На Луне нет атмосферы, так как слабое поле тяготения Луны не смогло бы её удержать. Из-за отсутствия атмосферы лунная поверхность подвержена беспрепятственному воздействию всех видов космического излучения, а также постоянной бомбардировке метеоритами – как крупными, так и самыми мелкими. В результате вся Луна покрыта слоем мелкораздробленного вещества – **реголита**. Кроме того, вся Луна покрыта кратерами, которые являются как следами былой вулканической деятельности, так и следами от ударов о лунную поверхность крупных космических тел – метеоритов. Магнитным полем Луна не обладает. У полюсов Луны под слоем реголита обнаружены запасы воды (водяного льда).

В настоящее время несколько стран мира (США, Россия, Китай, Индия) разрабатывают планы создания на Луне своих стационарных обитаемых баз. Жилые помещения планируется строить под лунной поверхностью. А на поверхности будут находиться приборы для наблюдения за космосом, площадки для принятия с Земли и отправки на Землю ракет, и т.д. Кислород, необходимый для дыхания, можно будет добывать, разлагая лунный водяной лед на кислород и водород. А водород использовать как отличное топливо. В качестве сроков реализации этих проектов называют 30 – 40 годы текущего столетия.

§22. Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Марс).

Все эти планеты, как и Земля, имеют твердую оболочку (литосферу). Гидросферы (океана) не имеет никто. Атмосфера отсутствует лишь у Меркурия – у Ве-

неры и Марса она есть. Причем у Венеры она гораздо более мощная, чем у Земли, а у Марса, наоборот, гораздо слабее (разреженнее), чем у Земли. И если у Земли атмосфера состоит примерно на $\frac{3}{4}$ из азота и на $\frac{1}{4}$ из кислорода, то и у Венеры, и у Марса она в основном (более, чем на 95%) состоит из углекислого газа CO_2 . Атмосферы Венеры и Марса в основном сохранили тот первичный химический состав, который когда-то имела и Земля. Но на Земле, в отличие от Меркурия, Венеры и Марса, было то, чего не было у этих планет. У неё были: 1) гидросфера (водная оболочка), в которой растворялся углекислый газ; 2) был кислород, который выделяла появившаяся на Земле растительность, развившаяся из появившейся в океане жизни.

Меркурий

Эта самая близкая к Солнцу планета во многом похожа на Луну, которую Меркурий лишь немного превосходит по размерам. Атмосферы на Меркурии нет. Вся его поверхность, подобно лунной, покрыта кратерами вулканического и метеоритного происхождения. Период обращения Меркурия вокруг Солнца (меркурианский год) составляет 0,24 земных года, то есть 88 дней. А меркурианские сутки (период обращения Меркурия вокруг своей оси) делятся 59 земных дней. То есть Меркурий очень медленно вращается вокруг своей оси. Вследствие близости к Солнцу на дневной стороне Меркурия очень жарко (до $+400^\circ$). А на ночной стороне, как и на Луне, очень холодно (до -170°).

Венера

Эта планета по размерам и массе почти одинакова с Землей (чуть меньше Земли). У неё мощная атмосфера, состоящая почти целиком из углекислого газа. Эта атмосфера создает сильный парниковый эффект, благодаря которому, а также благодаря близости к Солнцу, на поверхности Венеры постоянно стоит жара до $+500^\circ$. Венера чрезвычайно медленно вращается вокруг своей оси: полный оборот она совершает за 240 земных суток. А венерианский год (время обращения Венеры вокруг Солнца) составляет 226 земных суток. То есть венерианские сутки делятся дольше венерианского года.

Поверхность Венеры с Земли не видна из-за постоянных облаков, которые её покрывают. Облака состоят из сернистого газа и капелек концентрированной соляной кислоты. В атмосфере Венеры зарегистрированы грозные разряды.

На Венеру неоднократно спускались космические аппараты, которые передавали на Землю изображения её поверхности, результаты анализа её грунта, атмосферы, и т.д. Большую часть поверхности Венеры занимают холмистые равнины и горные массивы вулканического происхождения. На Венере немало метеоритных кратеров. На основе радиолокационных данных составлена подробная карта поверхности Венеры.

Марс

Марс – четвертая от Солнца планета (первые три – Меркурий, Венера, Земля). Среднее расстояние Марса от Солнца составляет 1,5 а.е. Марс обращается вокруг Солнца за 1,88 земных лет. А вокруг своей оси он вращается примерно с той же скоростью, что и Земля: сутки на Марсе составляют примерно 22 земных часа. Марс существенно меньше Земли: его радиус примерно вдвое меньше радиуса Земли, а масса составляет около 0,1 массы Земли. Марс имеет два небольших спутника: Фобос (страх) и Деймос (ужас), представляющие собой бесформенные глыбы вещества размером в несколько десятков километров.

Атмосфера Марса, как и атмосфера Венеры, более чем на 95° состоит из углекислого газа CO₂. Но она очень разреженная: атмосферное давление на поверхности Марса примерно в 100 раз меньше, чем на поверхности Земли. На Марсе холодно: средняя температура на его поверхности составляет -60°. А на полюсах (полярных шапках) температура падает до -150°. При этом там замерзает не только вода (она там обнаружена), но и углекислый газ, превращаясь в «сухой лед». Поверхность Марса похожа на поверхность Луны и Меркурия: вся покрыта кратерами вулканического и метеоритного происхождения. Никаких признаков жизни на Марсе не обнаружено, хотя надежды на это были.

§23. Далекие планеты – гиганты

Это **Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун**. Каждая из этих планет намного больше Земли и по размерам, и по массе – см. таблицу 5.

Таблица 5

Планета	Среднее расстояние до Солнца, а.е.	Сидерический период обращения вокруг Солнца, годы	Период вращения вокруг оси	Радиус в радиусах Земли	Масса в массах Земли	Средняя плотность, кг/м ³	Число известных спутников
Юпитер	5,2	11,87	9 ч. 56 мин.	11,2	318	1326	69
Сатурн	9,6	29,67	10 ч. 33 мин.	9,4	95,2	687	62
Уран	19,2	84,05	17 ч. 14 мин.	4,0	14,5	1270	27
Нептун	30,0	164,49	15 ч. 58 мин.	3,9	17,2	1638	23

Все планеты-гиганты имеют мощные протяженные атмосферы, состоящие в основном из молекулярного водорода и содержащие также гелий (от 6% до 15% по объему), метан, аммиак, воду и некоторые другие соединения.

Важнейшая особенность строения планет – гигантов заключается в том, что они не имеют твердых поверхностей. Они состоят в основном из водорода и гелия. С глубиной, по мере увеличения внутреннего давления, газообразный водо-

род планет – гигантов переходит в жидкую фазу. А потом, вблизи центра, и в твердую (металлическую) фазу. И это несмотря на то, что температура с глубиной у планет – гигантов повышается (как и у других планет, в том числе и у Земли). Металлический водород хорошо проводит электричество. А так как все планеты – гиганты быстро вращаются вокруг своих осей, то внутренние вихревые токи создают мощные магнитные поля у этих планет. Например, на Юпитере (он ближе всего к нам, а потому лучше всего исследован) в его атмосфере наблюдаются полярные сияния, а также грозы.

У планет – гигантов много спутников. В условиях, когда водород и гелий на периферии протопланетного облака почти полностью вошли в состав планет – гигантов, их спутники оказались похожими на Луну и планеты земной группы. Все они состоят из тех же веществ, что и планеты земной группы – из силикатов, оксидов и сульфатов металлов и т.д., а также из водяного (или водно-аммиачного) льда. Наиболее крупные из этих спутников имеют собственную атмосферу и вулканическую деятельность. В частности, на крупнейшем спутнике Сатурна **Титане** (его диаметр 5150 км) и **Тритоне** (крупнейшем спутнике Нептуна, его диаметр 2700 км) обнаружена атмосфера, состоящая в основном из азота N_2 . На Титан в 2005 году спускался посадочный модуль автоматической межпланетной станции. Он обнаружил на нем озера и моря из жидкого метана (CH_4). А на одном из крупнейших спутников Юпитера, **Ио**, имеется множество действующих вулканов. На спутнике Сатурна **Энцелад** под ледяной коркой в несколько километров обнаружен океан жидкой воды. Подледный океан воды обнаружен и на спутнике Юпитера **Европе**. Всё это обнаружили американские автоматические межпланетные станции «Пионер», «Вояджер» и «Галилей».

Все планеты – гиганты имеют кольца. Особенно красочным является кольцо Сатурна. Кольца состоят из множества камней и каменных глыб, вращающихся вокруг планет. Кольца широкие, в телескопы видны и с Земли, но очень тонкие. Сквозь кольца просвечивают поверхности планет. Очевидно, что кольца состоят из вещества, не вошедшего в состав планет и их больших спутников.

§24. Малые тела Солнечной системы

(астероиды, карликовые планеты, кометы, метеоры и метеориты)

Астероиды

Между орбитами Марса и Юпитера находится **пояс астероидов** (звездopodobных). Он состоит из множества малых планет и просто каменных глыб, вращающихся вокруг Солнца. Общее их число более 800 тысяч. Самый большой из астероидов – малая планета **Церера** диаметром около 1000 км. У всех астероидов разные, и очень вытянутые, орбиты. Некоторые из них в афелии уходят за орбиту Сатурна, а в перигелии доходят до орбиты Меркурия. Несколько таких астероидов показаны на рис. 28. И так как орбиты таких астероидов пересекаются с орбитой Земли, то они с Землей могут столкнуться. Случись такое, это было бы катастрофой для жизни на Земле. Не исключено, что динозавры вымерли 65 миллионов лет назад потому, что Земля столкнулась с крупным астероидом. Ученые думают,

как в случае опасного сближения Земли с астероидом отклонить его от Земли. Например, направить на него ракету с атомной бомбой, чтобы она своим направленным взрывом разрушила его или увела от Земли.

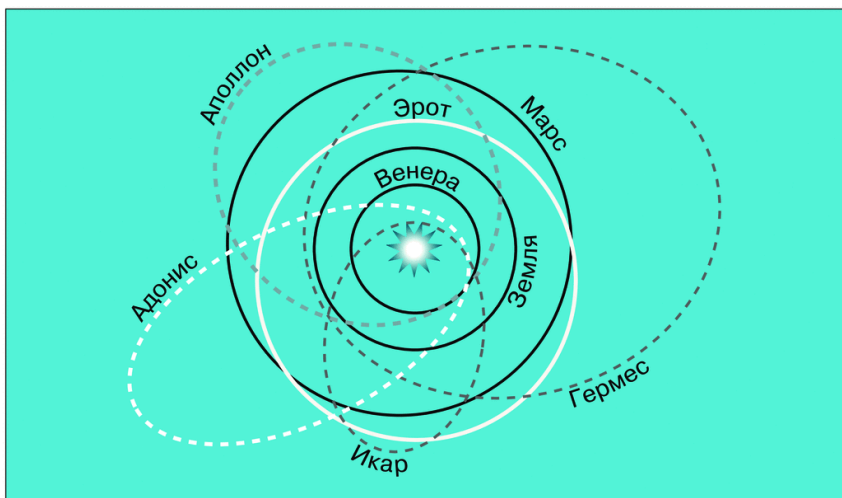


Рис. 28

В конце 20 века был открыт еще один пояс астероидов за орбитой Нептуна - **пояс Койпера**. Он в десятки раз больше пояса астероидов – и по общей массе, и по размерам. Там обнаружены астероиды и крупнее Цереры.

Но эти астероиды находятся слишком далеко и нам не опасны.

Карликовые планеты

Самые крупные астероиды, имеющие сферическую форму из-за своих размеров и не являющиеся спутниками планет, выделены в отдельную категорию – **карликовые планеты**. В первую очередь это **Плутон** (радиус 1140 км), находящийся в поясе Койпера, **Эрида** из пояса Койпера (на 25% массивнее Плутона), **Хаумея** и **Макемаки** из пояса Койпера, а также **Церера**.

Кометы

Кометы (хвостатые звезды) издавна привлекали внимание людей своим необычным видом – рис. 29.



Рис. 29

Вдали от Солнца кометы имеют вид очень слабых туманных пятнышек. По мере приближения к Солнцу у кометы появляется и постепенно увеличивается хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. При удалении от Солнца яркость кометы уменьшается, и она снова превращается в слабое туманное пятнышко. А потом и вообще становится недоступной для наблюдений.

Кометы представляют собой глыбы льда с примесью замерзших газов (аммиака, углекислого газа) и вкраплением мелких твердых частиц (пылинок). Когда комета приближается к Солнцу, эта глыба (**ядро кометы**) постепенно прогревается, из него выделяются газы и пыль, которые окутывают ядро и образуют **голову** и **хвост** ко-

меты. Хвост, растягивающийся на миллионы километров, образуется из-за светового давления на пылинки, вылетающие из ядра кометы.

На поверхность ядра одной из комет в 2014 году совершил посадку спускаемый модуль космического аппарата. Этот спуск подтвердил, что ядро кометы представляет собой глыбу грязного льда и снега.

Кометы, как и планеты, движутся вокруг Солнца. Одна из самых известных комет – **комета Галлея**. В афелии она уходит далеко за орбиту Нептуна, а в перигелии приходит в окрестности Солнца, имея период обращения около 76 лет. Среди комет есть и такие, которые наблюдались всего один раз и могут вернуться к Солнцу только через несколько столетий (или не вернуться вообще). Но есть и короткопериодические кометы. Например, это комета Энке, у которой период обращения вокруг Солнца составляет 3,3 года, и которую регулярно наблюдают уже в течение нескольких веков.

Тысячелетиями человечество наблюдало за прибытием комет и пыталось понять, откуда они берутся. Со временем ученые пришли к выводу, что короткопериодические кометы прилетают из пояса Койпера. А долгопериодические – из гораздо более далеких окрестностей Солнца, из так называемого **облака Оорта**, заполненного многими миллионами каменных и ледяных тел. Эти тела представляют собой периферийные остатки того протопланетного облака, из которого образовалась Солнечная система.

Согласно одной из гипотез, знаменитый **Тунгусский метеорит**, упавший в Сибири в 1908 году, являлся ядром небольшой кометы. Комета при ударе о Землю полностью испарилась – никаких её остатков не нашли. Нашли лишь лес, вываленный на десятки километров вокруг места падения метеорита.

Метеоры и метеориты

Так называемые «падающие звезды» - это **метеоры**. Они представляют собой небольшие камешки (размером с горошину и меньше), влетающие в земную атмосферу с очень большой скоростью (от 11 до 73 километров в секунду) и сгорающие в атмосфере на высоте 80 – 120 км. Наиболее яркие метеоры – это **болиды**. Они выглядят как огненные яркие шары, прочерчивающие небо и тоже сгорающие в атмосфере. Если болид полностью не сгорел в атмосфере и его остатки упали на землю, то эти остатки называются **метеоритами**. Огромные метеориты, ударившись о Землю, могут образовать на ней кратеры – как на Луне, Меркурии, Марсе, и т.д.

Одним из наиболее известных и крупных кратеров является Аризонский метеоритный кратер (США), имеющий диаметр около 1200 метров и глубину 200 метров. Образовался этот кратер примерно 50 000 лет назад. Расчеты показывают, что для образования такого кратера метеорит должен был иметь массу более 300 тысяч тонн.

К числу крупнейших метеоритов относится упавший летом 1908 года в тайге в районе реки Тунгуски **Тунгусский метеорит**. А совсем недавно, в феврале 2013 года, огромный метеорит (около 10 тысяч тонн) взорвался при входе в атмосферу над Челябинской областью, осколки которого посыпались на землю. Воз-

душная волна от взрыва повредила конструкции зданий, выбила стекла, более тысячи человек обратились за медицинской помощью.

По химическому составу различают каменные, железные и железокатенные метеориты. Вполне вероятно, что из найденных железных метеоритов наши предки изготовили первые железные орудия. И только потом они научились выплавлять железо из руды.

ГЛАВА 4. СОЛНЦЕ

§25. Энергия излучения и температура Солнца

Солнце – ближайшая к нам звезда. Причем это типичная звезда, таких большинство во Вселенной. Её масса составляет 333 000 масс Земли. А радиус Солнца равен 700 000 км, что составляет 109 радиусов Земли. Солнце представляет собой огромный газовый шар, состоящий из водородно – гелиевой плазмы (смеси ядер водорода, гелия и электронов).

Излучение, которое доходит к нам от Солнца, является источником жизни на Земле. Характеристикой количества солнечной энергии, получаемой Землей от Солнца, является **солнечная постоянная λ** . Это количество всей энергии, которую от Солнца получает Земля на 1 кв. метр своей поверхности за 1 секунду, если этот квадратный метр находится за пределами земной атмосферы и расположен перпендикулярно солнечным лучам. Как показали измерения,

$$\lambda = 1370 \frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} = 1370 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2} \quad (28)$$

Умножив эту величину на площадь поверхности шара $4\pi R^2$, радиус которого $R=1 \text{ а.е.} = 150 \text{ млн. км} = 150 \cdot 10^9 \text{ м}$, получим энергию, которую излучает Солнце за 1 сек. То есть получим **мощность излучения Солнца L_{\odot}** (\odot - значок Солнца):

$$L_{\odot} = 1370 \cdot 4\pi \cdot (150 \cdot 10^9)^2 \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ вт} \quad (29)$$

То есть каждую секунду Солнце излучает $4 \cdot 10^{26}$ джоулей световой энергии.

Величина L_{\odot} называется **светимостью Солнца**. Светимость – это одна из важнейших характеристик любой звезды.

Зная светимость Солнца, можно определить абсолютную (по Кельвину) температуру T его излучающей поверхности. Для этого вычислим энергию ε , излучаемую единицей поверхности Солнца (одним метром квадратным) за единицу времени (за секунду). Так как радиус Солнца $R_{\odot} \approx 700 \text{ 000 км} = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$, то

$$\varepsilon = \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2} = \frac{4 \cdot 10^{26} \text{ вт}}{4 \cdot 3,14 \cdot (7 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2} = 6,5 \cdot 10^7 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2} \quad (30)$$

По **закону Стефана – Больцмана** для излучающих тел энергия, излучаемая в единицу времени с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры излучающей поверхности:

$$\varepsilon = \sigma T^4, \text{ где } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} - \text{постоянная Больцмана} \quad (31)$$

Отсюда

$$T = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{6,5 \cdot 10^7}{5,67 \cdot 10^{-8}}} \approx 6000^\circ\text{К} \quad (32)$$

Примечание. Закон Стефана – Больцмана справедлив для излучения абсолютно черных тел. То есть для тел, которые сами (как сажа) поглощают всё падающее на них излучение, чтобы потом его переизлучить (абсолютно черное тело излучает в диапазоне всех длин волн). Как показало исследование наружных слоев Солнца, солнечное излучение хорошо вписывается в картину излучения абсолютно черных тел. Солнце действительно излучает примерно так, как излучает абсолютно черное тело с температурой $T=6000^\circ\text{К}$. А так как, согласно **закону Вина**, $\lambda_{\text{max}} = \frac{0,029}{T}$ – длина волны в метрах, на которую приходится максимум интенсивности излучения, то

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{0,029}{6000} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

– длина волны желтого света. Поэтому Солнце выглядит желтым.

§26. Химический состав Солнца

Даже в прошлом веке некоторыми учеными высказывалось мнение, что мы никогда не узнаем, из чего состоят звезды (и Солнце в частности). Но потом оказалось, что это не так. Информацию о солнечном веществе и веществе других звезд несет свет, приходящий от них. А именно, эту информацию даёт **спектральный анализ** этого света.

Спектр Солнца – это непрерывный свет, пересеченный множеством узких темных линий, называемых **фраунгоферовыми линиями** (впервые их наблюдал немецкий оптик Фраунгофер в начале 19 века).

Фраунгоферовы линии объяснила квантовая физика, появившаяся в начале 20 века. Согласно этой физике, нагретые твердые, жидкие и сильно сжатые газы имеют **сплошной спектр излучения**, то есть излучают волны всех длин, но разной интенсивности. А вот разреженные газы, состоящие из отдельных атомов, не взаимодействующих друг с другом, излучают только строго определенные длины волн. Их спектр – **линейчатый**. Причем вид линейчатого спектра у каждого химического элемента свой, индивидуальный (как отпечатки пальцев у разных людей). По таким линейчатым спектрам излучения смеси атомарных газов можно безошибочно определить, из каких веществ состоит излучающий газ. И это –

очень чувствительный метод. В настоящее время определены линейчатые спектры атомов всех элементов таблицы Менделеева и составлены их таблицы спектров.

Как оказалось, что если пропускать свет сильно нагретого сплошного тела через холодный атомарный газ, то атомы этого газа будут поглощать свет именно тех длин волн, которые он сам испускает в нагретом состоянии. В сплошном спектре света появляются темные линии поглощения – фраунгоферовы линии. По виду этих линий можно установить, атомы какого вещества содержатся в поглощающем атомарном газе. Ярко светящаяся поверхность Солнца (фотосфера) дает непрерывный спектр излучения. А разреженная солнечная атмосфера избирательно поглощает свет, излучаемый фотосферой, и в спектре фотосферы появляются линии поглощения (фраунгоферовы линии) атомов тех элементов, из которых состоит солнечная атмосфера. По этим линиям в солнечной атмосфере были обнаружены водород, гелий и другие вещества - рис. 30.

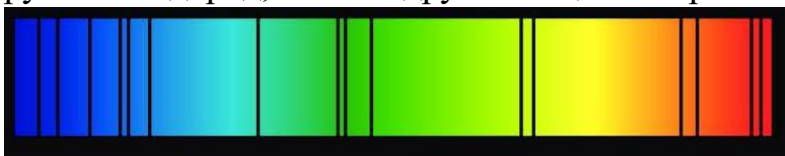


Рис. 30. Спектр Солнца

Но и сама атмосфера Солнца излучает свет. Во время солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной, происходит «обращение» линий спектра. На месте линий поглощения в солнечном спектре вспыхивают линии излучения.

Спектральный анализ приходящего к нам излучения Солнца и других небесных светил позволяет не только определять их химический состав, но также и многие другие их характеристики: температуру, давление, скорость движения, магнитную индукцию, и т.д.

§27. Атмосфера Солнца

В атмосфере Солнца выделяют три основных слоя: фотосферу, хромосферу, корону.

Фотосфера. Это самый нижний слой, его толщина 300 – 400 км. Именно она излучает практически всю приходящую к нам солнечную энергию. В среднем температура фотосферы составляет 6000°К.

Вещество фотосферы постоянно «кипит», то есть в фотосфере осуществляется процесс конвекции вещества. Фотосферу сравнивают с кипящей рисовой кашей. Верхушки конвективных потоков, проникающих в фотосферу изнутри Солнца - «рисовые зерна» этой каши (**гранулы**). Гранулы ярче и, следовательно, горячее, чем окружающие его участки фотосферы. Их размеры составляют несколько сот километров. Время существования отдельных гранул около 8 минут.

Другая интересная деталь фотосферы – **солнечные пятна**. Пятна – это более холодные области фотосферы, в которых замедлена конвекция её вещества. Связано это замедление с действием сильных магнитных полей в области пятен. Солнечные пятна значительно крупнее гранул. Размеры наиболее крупных из пятен достигают нескольких десятков тысяч километров. И держатся на поверхности фотосферы они дольше гранул – до нескольких месяцев. Иногда на Солнце пятен не бывает совсем, а иногда одновременно наблюдаются десятки крупных пятен. Имеются циклические колебания числа пятен. Средняя продолжительность

цикла составляет 11 лет. По наблюдению за пятнами можно наглядно видеть, что Солнце вращается вокруг своей оси с периодом примерно 25 земных суток.

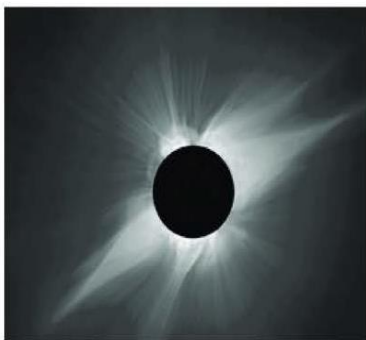
Хромосфера. Это следующий за фотосферой слой атмосферы. Её толщина 10 – 14 тысяч километров. Температура хромосферы в 2-3 раза выше, чем в фотосфере. Хромосфера видна при полных солнечных затмениях как оболочка розового цвета. В хромосфере наблюдаются мощные и быстро развивающиеся процессы – **хромосферные вспышки**. Обычно вспышки появляются над пятнами. Они представляют собой взрывные процессы, при которых высвобождается энергия магнитного поля солнечных пятен. В результате вспышек во внешнюю часть атмосферы Солнца поднимаются огромные и протяженные (до 100 000 км) массивы газа – **протуберанцы** (рис. 31).



Рис. 31. Протуберанцы на Солнце.

Вспышки сопровождаются мощным ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоизлучением. Эти излучения частично ионизуют верхние слои земной атмосферы, образуя на высотах 200 – 500 километров **ионосферу**. Ионосфера играет важную роль в осуществлении дальней радиосвязи: длинные и средние радиоволны, идущие от радиопередатчика, прежде чем достигнуть антенны приемника, многократно отражаются от ионосферы и поверхности Земли. После наиболее мощных вспышек на Солнце число ионизованных атомов в ионосфере возрастает и радиоволны частично или полностью поглощаются ею. Это приводит к ухудшению и даже к временному прекращению дальней радиосвязи. А на коротковолновую связь и телевидение, осуществляемые в пределах прямой видимости, состояние ионосферы практически не влияет.

Кроме указанного выше электромагнитного излучения, магнитным полем вспышек в межпланетное пространство выбрасываются электрически заряженные частицы (протоны, электроны, ионы). Это – **солнечный ветер**. Достигнув через сутки – двое Земли, частицы солнечного ветра вызывают возмущение её магнитного поля – **магнитную бурю**. Такая буря тоже вызывает ухудшение радиосвязи, а в полярных областях Земли – полярные сияния. От магнитных бурь страдают метеозависимые люди – у них обостряются любые заболевания, включая и психические. Во время бурь даже здоровые люди нередко ощущают повышенную утомляемость, слабость, упадок сил, раздражительность или, напротив, апатию.



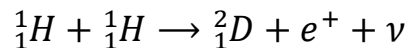
Корона. Это – самая внешняя и обширная (до нескольких радиусов Солнца) часть атмосферы Солнца. Она сильно разрежена и сильно нагрета (до 1 миллиона градусов). Эту температуру в короне создают волны сжатия и разрежения её вещества, создаваемые Солнцем. Разреженный газ хромосферы и короны излучает мало и, получая большой приток энергии снизу, сильно нагревается. Во время солнечных затмений корона видна как серебристо – жемчужное обрамление Солнца – рис. 32.

Рис. 32. Корона Солнца во время полного солнечного затмения.

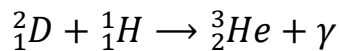
§28. Источники энергии и внутреннее строение Солнца

Источником энергии Солнца являются постоянно идущие в его ядре **термо-ядерные реакции**.

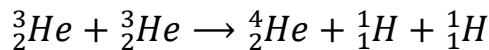
Самый распространенный на Солнце (и вообще во Вселенной) элемент – это водород. В недрах Солнца он находится в виде ядер атомов водорода – протонов. Скорость движения этих протонов в условиях огромных температур (в центре Солнца температура около 15 миллионов градусов) настолько велика, что они сближаются, преодолевая силы электрического отталкивания, и попадают в область действия мощных ядерных сил. В результате происходит следующая ядерная реакция:



(${}^2_1\text{D}$ – ядро дейтерия, состоящее из протона и нейтрона; e^+ – позитрон; ν – нейтрино). Далее:



(${}^3_2\text{He}$ – ядро легкого изотопа гелия, содержащее 2 протона и один нейтрон; γ – гамма-квант (фотон)). В дальнейшем слияние двух ядер ${}^3_2\text{He}$ приводит к образованию ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ и двух ядер водорода (протонов):



Рассмотренная цепочка из трех реакций называется **протон-протонным циклом**. В результате этого цикла из четырех ядер водорода образуется одно ядро гелия. И, кроме того, образуются легкие частицы – позитрон e^+ , фотон γ и нейтрино ν .

Подсчитаем энергию, которая при этом выделится. Масса одного протона в атомных единицах составляет 1,008, четырех 4,032. Поскольку масса одного ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ равна 4,004, то $4,032 - 4,004 = 0,028$ – дефект массы. Так как $\frac{0,028}{4,032} \approx 0,007$, то при сгорании 1 кг водорода образуется лишь 993 граммов гелия. А оставшиеся 7 граммов вещества водорода превратятся в энергию легких частиц, которые в этом процессе образуются. Зная это и используя формулу Эйнштейна $E = mc^2$, связывающую массу и энергию, подсчитаем, сколько джоулей энергии выделится при сгорании 1 кг водорода:

$$E = mc^2 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)^2 \approx 6,3 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Это примерно в 20 миллионов раз больше, чем выделяет 1 кг каменного угля при его сгорании.

Энергию, образующуюся при образовании гелия из водорода, уносят позитрон e^+ , фотон γ и нейтрино ν , к которой добавляется кинетическая энергия ядер

гелия и ядер водорода. Эта энергия поддерживает высокую температуру водородно-гелиевой плазмы, тем самым создавая условия для продолжения термоядерного синтеза. Частицы нейтрино, обладающие огромной проникающей способностью, беспрепятственно покидают Солнце. А энергия γ – квантов обеспечивает излучение Солнца.

В центральной части Солнца, где особенно высокие температура и давление, ядерные реакции идут особенно интенсивно, и там рождаются наиболее коротковолновые, то есть наиболее энергичные γ - кванты. Но на расстоянии от центра больше $1/3$ радиуса Солнца температура и давление существенно понижаются, и ядерные реакции уже не идут. Эти слои лишь передают излучение, родившееся в центральной части, выше, до $2/3$ радиуса Солнца. Причем здесь происходит переизлучение γ – квантов: атом, получивший γ – квант, возбуждается и начинает излучать сам. Существенно, что вместо одного поглощенного γ – кванта большей энергии атомы излучают, как правило, несколько γ – квантов меньшей энергии. В результате такого переизлучения происходит как-бы дробление жестких квантов на менее энергичные. Поэтому вместо γ – лучей излучаются рентгеновские, вместо рентгеновских – ультрафиолетовые, которые, в свою очередь, уже у поверхности Солнца дробятся на кванты видимых и тепловых лучей, окончательно излучаемых Солнцем. Вблизи поверхности Солнца (в фотосфере) этот процесс дополняется конвекцией (кипением вещества), в результате которой более горячие слои поднимаются вверх и уже тут свою энергию излучают.

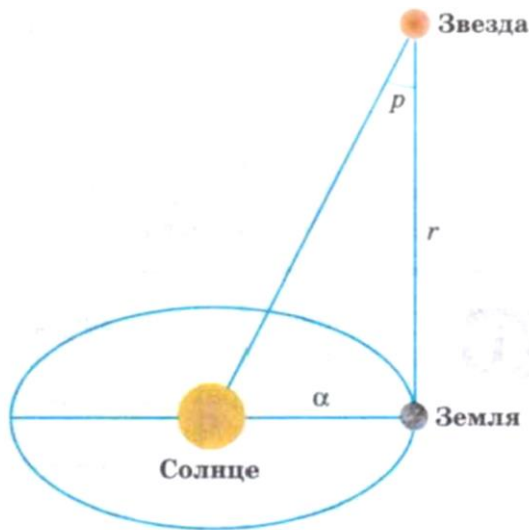
Так Солнце излучает уже миллиарды лет и еще миллиарды лет будет излучать.

ГЛАВА 5. ЗВЕЗДЫ

Мысли, что звезды – это далекие светила, подобные нашему Солнцу, высказывались еще в глубокой древности. Но эти высказывания противоречили религии, и поэтому за такие убеждения можно было пострадать. Например, за такие утверждения Джордано Бруно в 1600 году был сожжен на костре по приговору инквизиции. Судили и Галилея (правда, не сожгли, ибо он покаялся). Сейчас же то, что звезды – это далекие Солнца, ни у кого не вызывает сомнений.

§29. Расстояния до звезд

Расстояние до Луны, а через него и до Солнца оценил еще в 3-ем веке до нашей эры Аристарх Самосский (см. §12). При этом существенную роль сыграло определение горизонтального параллакса Луны – угла, под которым с Луны будет виден радиус Земли. А расстояния до планет определили, используя третий закон Кеплера (см. §18). В настоящее время все эти расстояния уточнили с помощью радиолокации соответствующих небесных тел. А для Луны провели даже лазерную локацию. В результате расстояние до Луны получили с точностью до сантиметра!



Расстояния до ближайших звезд тоже определили по их параллаксу. Только в качестве базы параллакса взяли не ее радиус Земли (он для этого слишком мал), а радиус орбиты Земли вокруг Солнца, то есть астрономическую единицу a (рис. 33).

Рис. 33

Здесь угол p – годичный параллакс звезды. Под этим углом со звезды виден радиус a орбиты Земли, если этот радиус перпендикулярен направлению на звезду. Параллакс

звезды вычисляют по наблюдениям, проведенным в двух различных точках орбиты Земли приблизительно через полгода одно после другого. Согласно рис. 33,

$$\frac{a}{r} = \sin p \approx p \quad (\text{так как угол } p \text{ очень мал; } p - \text{ угол в радианах}).$$

Отсюда $r = \frac{a}{p}$. Угол p измеряют в угловых секундах, так как для всех звезд он меньше $1''$. И так как

$$1 \text{ рад} = 206265'', \text{ то } 1'' = \frac{1}{206265} \text{ (рад)}, \text{ а } p'' = \left(\frac{p''}{206265} \right) \text{ рад.}$$

Поэтому

$$r = \frac{206265}{p''} \cdot a \quad (33)$$

Расстояние до звезд, которое соответствует годичному параллаксу в $1''$, называется **парсек** (параллакс-секунда) и обозначается пк:

$$1 \text{ пк} = \frac{206265}{1} \cdot a = 206265 \text{ а. е.} = 206265 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ км} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ км} \quad (34)$$

Сравним 1 пк со световым годом, то есть с расстоянием, которое проходит свет за один год. Так как скорость света $\approx 300\,000$ км/сек, а 1 год = $365,25 \cdot 24 \cdot 3600$ сек, то

$$1 \text{ св. год} = 3 \cdot 10^5 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ км} \quad (35)$$

Следовательно,

$$1 \text{ пк} = \frac{3,08 \cdot 10^{13} \text{ км}}{9,46 \cdot 10^{12} \text{ км}} = 3,26 \text{ св. лет} \quad (36)$$

Кстати:

$$10^3 \text{ пк} = 1 \text{ кпк (килопарсек)}; 10^6 \text{ пк} = 1 \text{ Мпк (мегапарсек)}. \quad (37)$$

В настоящее время измерены годовые параллаксы, а через них по формуле (33) вычислены расстояния от Земли нескольких тысяч ближайших к Земле звезд. Ближайшей к нам оказалась **Проксима Центавра**: её годичный параллакс составляет $0,76''$, а расстояние до неё составляет $1,3$ парсека ($\approx 4,2$ световых года). Обнаружено, что вокруг неё обращается планета с массой $\approx 1,3$ массы Земли.

§30. Видимые и абсолютные звездные величины

Понятие «звездная величина» используется со времен древнегреческого астронома Гиппарха (см. § 4). Но так как звезды находятся от нас на различных расстояниях, то их видимые звездные величины ничего не говорят о их светимостях (мощностях излучения). Поэтому в астрономии, кроме понятия «видимая звездная величина m » используется понятие «абсолютная звездная величина M ». Под абсолютными звездными величинами понимаются те видимые звездные величины, которые были бы у звезд, если бы все они находились на одинаковом расстоянии от Земли. Условились в качестве такого расстояния брать расстояние $r_0 = 10$ пк.

Пусть m и M - видимая и абсолютная звездные величины некоторой звезды. Тогда (см. формулу (5))

$$\frac{I}{I_0} = 2,512^{M-m}, \quad (38)$$

где I – реальный (видимый) блеск звезды, рассматриваемой на реальном расстоянии r от Земли, а I_0 – блеск звезды на расстоянии $r_0 = 10$ пк. Так как блеск звезды – это освещенность, создаваемая звездой на Земле, а освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния до звезды, то

$$\frac{I}{I_0} = \frac{r_0^2}{r^2} = \frac{10^2}{r^2} \quad (r - \text{в парсеках}) \quad (39)$$

Значит,

$$2,512^{M-m} = \frac{100}{r^2} \Rightarrow \lg(2,512^{M-m}) = \lg \frac{100}{r^2};$$

$$(M - m) \lg 2,512 = \lg 100 - \lg r^2; \quad (M - m) \cdot 0,4 = 2 - 2 \lg r;$$

$$M = m + 5 - 5 \lg r \quad (r - \text{в парсеках}) \quad (40)$$

В частности, для нашего Солнца

$$M_{\odot} = m_{\odot} + 5 - 5 \lg r = \left| \begin{array}{l} m_{\odot} = -26,8 - \text{см. §4} \\ r = 1 \text{ а. е.} = \frac{1}{206265} \text{ пк} - \text{см. (34)} \end{array} \right| = -26,8 + 5 - 5 \lg \frac{1}{206265} = -21,8 - 5(\lg 1 - \lg 206265) = -21,8 - 5(0 - 5,314) = 4,8$$

Итак,

$$M_{\odot} = +4,8^m \quad (41)$$

То есть с расстояния в 10 парсек Солнце выглядело бы как звезда примерно пятой звездной величины.

Если абсолютная звездная величина M определена другим способом (например, по спектру звезды – см. об этом далее, §38), то из формулы (41) можно найти расстояние r до звезды:

$$\lg r = \frac{m - M + 5}{5} \quad (42)$$

Звезды очень сильно отличаются друг от друга по своей абсолютной звездной величине. Некоторые из них (гиганты и сверхгиганты) излучают энергии в сотни тысяч раз больше, чем Солнце. Другие (звезды-карлики) – в десятки тысяч раз меньше. В соответствии с этим меняется и их абсолютная звездная величина: от $M = -9^m$ до $M = +17^m$.

§31. Пространственные скорости звезд. Эффект Доплера

Уже в 18 веке было замечено, что экваториальные координаты (α ; δ) некоторых звезд (их прямое восхождение и склонение – см. §6) в течение длительных промежутков времени меняются. То есть эти звезды движутся среди других звезд звездного неба (имеют собственное движение). Наибольшим собственным движением обладает звезда Бернарда в созвездии Змееносца, у которой собственное движение составляет 10,3 угловых секунды в год. Зная это собственное движение и расстояние до звезды, можно, очевидно, вычислить ту составляющую пространственной скорости движения звезды, которая перпендикулярна лучу зрения на неё (так называемую **тангенциальную скорость**). А для полного определения пространственной скорости звезды нужно знать ещё и её **радиальную (лучевую) скорость**. То есть ту составляющую скорости, которая направлена по лучу зрения. Лучевые скорости небесных светил определяются с помощью **эффекта Доплера**.

Эффект Доплера состоит в том, что линии в спектре источника, приближающегося к наблюдателю, смещены к фиолетовому концу спектра, а линии в спектре удаляющегося источника – к красному концу спектра (по отношению к положению линий в спектре неподвижного источника). То есть при движении источника света к наблюдателю длина волн излучаемого источником света уменьшается, а при удалении – увеличивается – рис. 34.

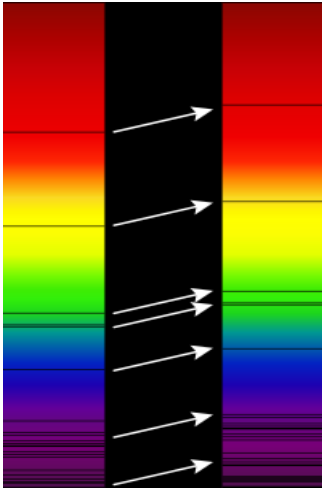


Рис. 34. Смещение линий спектра удаляющегося от наблюдателя источника света (смещение в красную сторону спектра).

Причина эффекта Доплера заключается в том, что когда источник волн движется в направлении наблюдателя, каждый последующий гребень волны выходит из положения, более близкого к наблюдателю, чем гребень предыдущей волны. Таким образом, каждой последующей волне необходимо немного меньше времени, чтобы добраться до наблюдателя, чем предыдущей волне. Следовательно, время между приходом последовательных гребней волн к наблюдателю сокращается, вызывая тем самым увеличение частоты излучения. И наоборот, воспринимаемая наблюдателем длина волны удаляющегося от него источника излучения увеличивается, а частота излучения уменьшается. При этом

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \Leftrightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \quad (\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0) \quad (43)$$

Здесь λ_0 – длина волны света, излучаемого неподвижным по отношению к наблюдателю источником; λ – движущимся; c – скорость света; v_r – радиальная скорость источника света (она берется со знаком (+), если источник света удаляется от наблюдателя, и со знаком (-), если источник к наблюдателю приближается). Использование формулы (43) позволяет путем сравнения спектров излучения неподвижных по отношению к наблюдателю источников света и спектров движущихся (удаляющихся или приближающихся) источников (звезд) находить лучевые скорости v_r этих звезд.

Пример. В спектре звезды линия, соответствующая длине волны $5,5 \cdot 10^{-4}$ мм (видимая часть спектра) смещена к фиолетовому концу спектра на $5,5 \cdot 10^{-8}$ мм. Определить лучевую скорость v_r звезды.

Решение. Используем формулу (43):

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм}}{5,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}} \cdot 3 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{сек}} = 30 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$$

Эффект Доплера находит свое применение не только в астрономии. Например, работа полицейских радаров, отслеживающих скорости движения автомобилей, тоже основана на эффекте Доплера. Радар измеряет изменение частоты радиосигнала, отражённого от движущегося объекта. По изменению частоты автоматически вычисляется радиальная составляющая скорости объекта (проекция скорости на прямую, проходящую через объект и радар). Превышения разрешенной скорости фиксируются, а нарушители затем штрафуются.

§32. Цвет, температура, спектральные классы звезд

Цвет и температура звезд

Цвет различных звезд различен: от красного до голубовато-белого. Это различие связано с температурой поверхности звезд. Согласно **закону Вина**, каждой абсолютной температуре T нагретого тела соответствует длина волны λ_{max} излучаемого телом света, на которую приходится максимум излучаемой энергии:

$$\lambda_{max} = \frac{0,029}{T} \quad (\lambda - \text{в метрах, } T - \text{в кельвинах)} \quad (44)$$

В частности, максимум излучения Солнца, у которого $T=6000^\circ\text{K}$, приходится на длину волны $\lambda_{max} = 4,7 \cdot 10^{-7}\text{ м}$ (желтый свет). Поэтому и цвет Солнца желтый (см. также §25). Такой же цвет и такую же температуру поверхности имеет Капелла (α Возничего). А звезды, имеющие $3000^\circ - 4000^\circ\text{ K}$ – красного цвета (например, Альдебаран, α Тельца). Белые звезды (Спика, Сириус, Вега) имеют температуру $10\,000^\circ - 20\,000^\circ\text{ K}$. У голубовато – белых $T = 30\,000^\circ - 50\,000^\circ\text{ K}$. А в недрах всех звезд температура не менее 10 миллионов кельвинов.

Спектры и химический состав звезд

Важнейшие сведения о звездах астрономы получают, расшифровывая их спектры. Спектры большинства звезд, как и спектр Солнца, представляют собой спектры поглощения: на фоне непрерывного спектра видны темные (фраунгоферовы) линии.

По температуре фотосферы сходные между собой спектры сгруппированы в семь основных спектральных классов. Они обозначаются прописными буквами латинского алфавита:

Таблица 6

Цвет, температура, спектральный класс звезд

Цвет	Температура фотосферы, К	Спектральный класс	Типичные представители
Голубой	30 000 – 60 000	O	Минтака
Бело-голубой	10 000 – 30 000	B	Спика, Ригель
Белый	7 500 – 10 000	A	Сириус, Вега
Желто-белый	6 000 – 7 500	F	Процион, Канопус
Желтый	5 000 – 6 000	G	Солнце, Капелла
Оранжевый	3 500 – 5 000	K	Арктур, Альдебаран
Красный	2 000 – 3 500	M	Антарес, Бетельгейзе

Таким образом, звезды спектрального класса O – самые горячие, а класса M – самые холодные. Внутри каждого класса существует деление еще на 10 подклассов. Например, класс G (желтые звезды) имеет подклассы G0 – G1 – G2 - ... - G9. Солнце относится к классу G2.

Атмосферы звезд в основном имеют сходный химический состав: самыми распространенными элементами в них, как и на Солнце, оказались водород и гелий. А разнообразие звездных спектров объясняется, прежде всего, тем, что звезды имеют разную температуру. В атмосферах очень горячих звезд преобладают ионизованные атомы. А в атмосферах красных (холодных) звезд могут существовать нейтральные атомы и даже простейшие молекулы. Кроме температуры, на вид спектра звезды влияют плотность газа в её фотосфере, наличие и отсутствие в ней магнитного поля, вращение звезды вокруг своей оси, и т.д.

§33. Светимости звезд

В §25 обсуждался вопрос о светимости Солнца L_{\odot} , то есть о мощности излучения Солнца (о количестве всей излучаемой Солнцем энергии в единицу времени). Естественно, что у каждой звезды тоже есть своя светимость. Чтобы сравнивать между собой светимости различных звезд, представим себе каждую звезду на стандартном расстоянии в 10 пк. То есть на том расстоянии, на котором подсчитывается её абсолютная звездная величина $M = m + 5 - 5 \lg r$ (r – в парсеках – см. (40)). Очевидно, что чем больше L – светимость звезды, тем меньше M – её абсолютная звездная величина (то есть тем ярче выглядела бы эта звезда на расстоянии с 10 пк). Но зависимость между M и L не обратно пропорциональная. Действительно, если разница в абсолютных звездных величинах M_1 и M_2 двух звезд равна единице, то это значит, что от более яркой из этих двух звезд на Землю приходит в 2,512 раз больше световой энергии, чем от более слабой. Следовательно,

$$\frac{L_2}{L_1} = 2,512, \quad \text{где } L_2 \text{ – бóльшая светимость.}$$

Если разница между M_1 и M_2 составляет 2, то

$$\frac{L_2}{L_1} = (2,512)^2$$

То есть для любых двух звезд приходим к формуле

$$\frac{L_2}{L_1} = (2,512)^{M_1 - M_2}, \quad (45)$$

аналогичной формуле (5) из §4. Если в качестве одной из звезд выбрать Солнце, то

$$\frac{L}{L_{\odot}} = (2,512)^{M_{\odot} - M}$$

Принимая светимость Солнца за единицу ($L_{\odot} = 1$), получим светимость L звезды в светимостях Солнца:

$$L = (2,512)^{M_{\odot} - M} \Rightarrow \lg L = 0,4(M_{\odot} - M) \quad (46)$$

Учтем, что $M_{\odot} = +4,8$ (формула (41)), а $M = m + 5 - 5 \lg r$ (формула (40)), где m – видимая звездная величина звезды, а r – расстояние до неё (r – в парсеках). Тогда получим:

$$\lg L = 0,4(5 \lg r - m - 0,2) \quad (\text{здесь } r \text{ – в парсеках, а } L \text{ – в } L_{\odot}). \quad (47)$$

Пример. Вычислить светимость Сириуса. Его видимая звездная величина $-1,6^m$ ($m = -1,6$), а $r = 8,7$ световых лет.

Решение. Выразим r в парсеках. Так как $1 \text{ пк} = 3,26$ световых лет (см. (36)), то

$$8,7 \text{ свет. лет} = \frac{8,7}{3,26} = 2,67 \text{ пк.}$$

Тогда по формуле (47) получаем:

$$\lg L = 0,4(5 \lg 2,67 + 1,6 - 0,2) \approx 1,4 \Rightarrow L = 10^{1,4} \approx 25; \quad L \approx 25L_{\odot}$$

§34. Размеры звезд

Используя самую современную технику астрономических наблюдений, удалось в настоящее время непосредственно определить угловые размеры дисков лишь нескольких звезд. А по ним, зная расстояния до них, и линейные размеры (диаметры и радиусы) этих звезд. Но в основном астрономы определяют радиусы звезд другими методами.

В частности, определяют их через светимости L звезд. Действительно, зная расстояние r до звезды и её видимую звездную величину m , по формуле (46) можно найти L – светимость звезды, выраженную в светимостях Солнца L_{\odot} . А зная, что $L_{\odot} \approx 4 \cdot 10^{26}$ Вт (см. (29)), можно найти в ваттах и L . Далее:

$$\frac{L}{4\pi R^2} = \varepsilon \quad (48)$$

- мощность излучения с единицы площади (с 1 м^2) поверхности звезды, где R – радиус звезды в метрах. Но $\varepsilon = \sigma T^4$ - закон Стефана Больцмана, см. (31). Поэтому

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4; \quad L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \cdot \sigma T_{\odot}^4;$$

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 \Rightarrow \left| \begin{matrix} L_{\odot} = 1 \\ R_{\odot} = 1 \end{matrix} \right| \Rightarrow R = \sqrt{L} \cdot \left(\frac{T_{\odot}}{T}\right)^2 \quad (49)$$

Если известна светимость L звезды и температура T её излучающей поверхности (а температура поверхности звезды определяется цветом звезды, точнее, её спектральным классом), то из формулы (49) можно найти радиус звезды R , выраженный в радиусах Солнца. При этом её светимость L должна быть выражена в L_{\odot} - в светимостях Солнца.

Определив радиусы многих звезд, астрономы обнаружили, что существуют звезды, размеры которых резко отличаются от размеров Солнца – рис. 35.



Рис. 35. Сравнительные размеры звезд

Наибольшие размеры – у **сверхгигантов**. Их размеры в сотни раз превосходят радиус Солнца. Например, радиус Антареса в 500 раз превосходит солнечный.

Звезды, радиусы которых в десятки раз превосходят радиус Солнца, называются **гигантами**. А звезды, по размерам близкие к Солнцу или меньшие, относятся к **карликам** (Солнце - это **желтый карлик**). Среди карликов есть звезды, которые меньше Земли (например, нейтронные звезды). О них подробнее будет сказано ниже.

§35. Массы звезд. Диаграмма масса-светимость

Основной метод определения масс звезд дает исследование двойных звезд (двух близко расположенных друг к другу звезд, вращающихся вокруг их общего центра масс) на основе третьего закона Кеплера в формулировке Ньютона (см. формулу (19)). Но есть и другой способ, использующий зависимость между массами звезд и их светимостями. Рассчитано теоретически и подтверждено экспериментально, что светимость L звезд пропорциональна примерно четвертой степени их масс. Зная светимость L звезды (или её абсолютную звездную величину M , связанную с L формулой (46)), по диаграмме масса – светимость (рис. 36) можно найти массу m звезды.

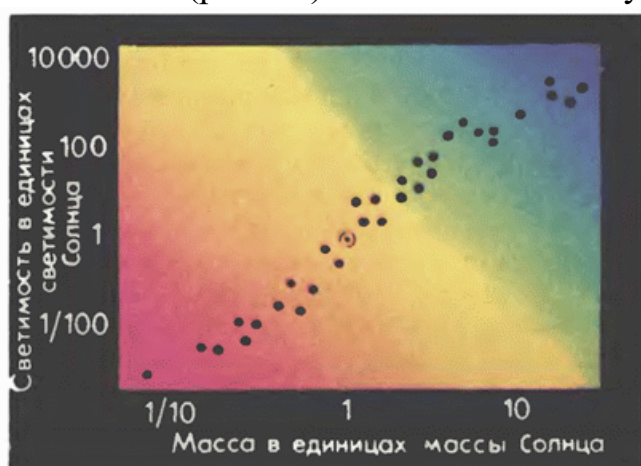


Рис. 36 Диаграмма масса светимость

Массы звезд не различаются так сильно, как их размеры или светимости: самые массивные звезды лишь в десятки раз превосходят Солнце. А наименьшие массы звезд – порядка $0,06 M_{\odot}$.

§36. Диаграмма спектр – светимость (диаграмма Герцшпрунга – Рессела)

В начале 20 века астрономы Герцшпрунг и Рессел независимо друг от друга обнаружили, что существует связь между спектральными классами звезд и их светимостями. Эту связь демонстрирует диаграмма Герцшпрунга – Рессела, изображенная на рис. 37. Как показывает эта диаграмма, звезды (точки диаграммы) группируются на ней в несколько областей, названных **последовательностями**. Подавляющее большинство звезд принадлежат **главной последовательности**. К этой последовательности принадлежит и наше Солнце. Эта последовательность простирается от горячих сверхгигантов до красных карликов. Чем горячее звезды главной последовательности, тем бóльшую светимость они имеют.

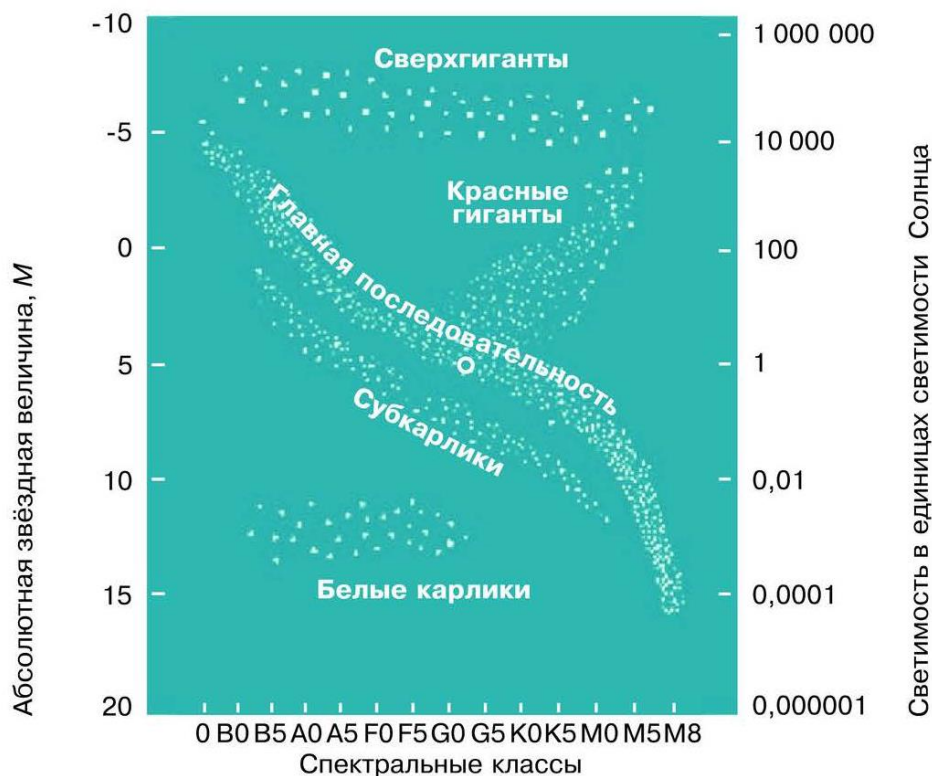


Рис. 37. Диаграмма спектр – светимость (диаграмма Герцшпрунга – Рессела)

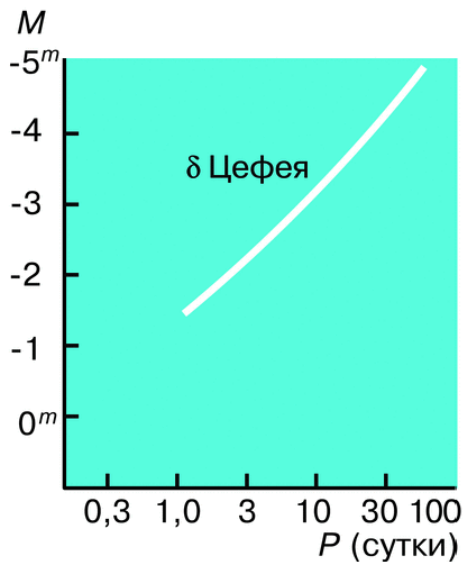
Обособленно от звезд главной последовательности в разных частях диаграммы сосредоточены сверхгиганты, красные гиганты и белые карлики. В процессе своей эволюции звезды переходят с одной последовательности на другую. Но об этом – несколько позже.

§37. Плотности вещества звезд

Найдя массу m и радиус R звезды, можно найти среднюю плотность $\rho = \frac{m}{V}$ вещества звезды, где $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ – объем звезды. У гигантов и сверхгигантов она оказывается очень маленькой: $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и меньше. То есть в тысячу раз меньше, чем плотность воздуха. А у белых карликов плотность вещества достигает $10^{10} - 10^{11} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. То есть 1 см^3 вещества белых карликов имеет массу в десятки тонн (в миллионы и десятки миллионов бóльшую, чем у воды). О причинах такого различия в плотностях вещества звезд мы будем говорить далее, когда будем рассматривать эволюцию (жизненный путь) звезд.

§38. Пульсирующие звезды (цефеиды)

Цефеиды – это пульсирующие звезды, которые периодически раздуваются и сжимаются. Типичным примером такой звезды является δ Цефея. Она меняет свой блеск с периодом 5,37 суток и амплитудой 1^m (одна звездная величина). Существуют цефеиды с меньшими периодами (до нескольких часов) и бóльшими (до нескольких десятков суток).



Еще в начале XX века было замечено: чем ярче цефеида, тем продолжительнее период изменения её светимости. Зависимость «период – светимость», существующая у цефеид, позволяет на основе связи (46), светимости L с абсолютной звездной величиной M построить зависимость между периодом цефеиды P и её абсолютной звездной величиной M – рис. 38.

Рис. 38. Зависимость «период – светимость» у цефеид.

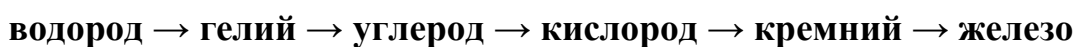
А определив по периоду P изменения блеска цефеиды её абсолютную звездную величину M , затем, используя формулу (42), можно найти и расстояние r до цефеиды.

Цефеиды – это звезды-сверхгиганты, они обладают высокой светимостью. Они заметны даже в других галактиках. Поэтому их можно использовать для определения больших расстояний (до других галактик). В связи с этим их называют «маяками Вселенной».

§39. Новые и сверхновые звезды

Новые – это двойные близко расположенные друг к другу звезды, у которых вещество одной звезды перетекает к другой. У другой возрастает температура и может начаться в её атмосфере термоядерная реакция. Происходит взрыв, и внешние слои звезды выбрасываются в космическое пространство. При вспышках новых звезд их блеск возрастает в тысячи и даже в миллионы раз за время от нескольких суток до нескольких месяцев. Такое явление может происходить с двойными звездами неоднократно – через десятки (сотни, тысячи лет).

Но в некоторых случаях такой взрыв может разрушить звезду. Тогда происходит вспышка **сверхновой** звезды. При этом в течение нескольких суток светимость звезды возрастает в сотни миллионов раз. Это – **сверхновые I типа**. Другие **сверхновые (II типа)** – это массивные звезды на поздней стадии своего развития (умирающие большие звезды). К моменту вспышки в них полностью исчерпаны возможности протекания термоядерных реакций:



Дальше термоядерная реакция идти не может, поскольку при этом энергия должна была бы не выделяться, а поглощаться. Лишенные источников энергии ядро звезды не может противостоять гравитационным силам и **коллапсирует** (катастрофически сжимается). Центральная часть ядра звезды сжимается до

плотности ядерного вещества. Наружные части звезды падают на ядро, их температура и плотность при ударе о ядро резко возрастают. Это порождает мощную ударную волну, которая движется наружу и срывает со звезды большую часть её массы. При этом блеск звезды возрастает в сотни миллионов раз. В некоторых случаях вещество звезды полностью рассеивается в космическом пространстве. А иногда на месте звезды остается плотный остаток её ядра, состоящий из нейтронов, образовавшихся при тесном соединении протонов с электронами (**нейтронная звезда**). Диаметры нейтронных звезд всего 20–30 километров, а плотность вещества в них близка к ядерной и может превышать $10^{18} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ (миллиард тонн на кубический сантиметр!).

Нейтронная звезда может быстро вращаться. Тогда она импульсами посылает в космос излучение (от радио до рентгеновских волн), выходящее из её магнитных полюсов в виде своеобразных прожекторов, описывающих в космосе огромные конусы. И если в свет такого вращающегося прожектора попадает Земля, то мы наблюдаем пульсирующий свет звезды. Такие нейтронные звезды называются **пульсарами**. Импульсы пульсаров повторяются через несколько секунд с очень высокой точностью (до 10^{-10} сек). Сейчас открыто около 2000 пульсаров, хотя их наверняка намного больше, так как не все их «прожекторы» направлены на Землю. Пульсары видны на расстоянии в пределах сотни парсек.

Вспышки новых и сверхновых звезд – редкие явления. Первая из описанных сверхновых звезд наблюдалась в 1054 году в созвездии Тельца и описана в японских и китайских хрониках. В течение 3 недель она была видна даже днем, а через год совершенно исчезла. В 1572 году учитель Кеплера датский астроном Тихо Браге наблюдал в созвездии Кассиопеи новую звезду, которая была ярче Венеры. В 1604 году уже сам Кеплер наблюдал новую звезду в созвездии Змееносца. Однако после этого в нашей Галактике не было замечено ни одной новой звезды. Их обнаруживали только в других галактиках.

§40. Черные дыры

Это – наиболее уникальные космические объекты, возникающие, согласно теории, на конечной стадии эволюции массивных звезд. Когда такая звезда сжимается до такой степени (до размеров в несколько километров), что её поле тяготения не выпускает даже свет, она становится невидимой. Возможность обнаружить такой объект появляется, когда черная дыра оказывается одним из компонентов тесной двойной звездной системы. Мощное гравитационное поле черной дыры способно вызвать падение на неё газа из атмосферы другой звезды. Газ при падении нагревается и дает рентгеновское излучение. Именно оно и позволяет обнаружить существование черной дыры. В настоящее время известно несколько десятков рентгеновских источников, в состав которых входят черные дыры.

Пример. До каких размеров нужно сжать Солнце, чтобы оно превратилось в черную дыру?

Решение. При таком сжатии вторая космическая скорость v_2 на поверхности сжатого Солнца должна быть равна скорости света. Согласно (27) и (24),

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_{\odot}}{R}} \quad (50)$$

Если $v_2 = c$, то $R = R_*$ - радиус черной дыры. То есть

$$R_* = \frac{2GM_{\odot}}{c^2} \approx 3 \text{ км} \quad (51)$$

Найдем ρ_* - плотность вещества этой черной дыры:

$$(\rho_*)_{\odot} = \frac{M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi R_*^3} \approx 1,8 \cdot 10^{19} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (52)$$

Но эта плотность выше плотности ядерного вещества ($\sim 10^{18} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$). Поэтому Солнце превратиться в черную дыру не сможет – ему не хватает массы. Тем более не может превратиться в черную дыру Земля. Для этого её нужно сжать до размера ореха ($R_* = 0,9 \text{ см}$). А плотность ρ_* этого ореха составит $2 \cdot 10^{30} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – невозможная плотность.

§41. Эволюция звезд

Звезды образуются из холодных газовой-пылевых облаков. При гравитационном сжатии облака образуется **протозвезда**. Когда по мере сжатия протозвезды температура в её центре повышается до 10 миллионов градусов, там вспыхивает термоядерная реакция преобразования водорода в гелий (см. §28). Сжатие звезды прекращается, ибо давление её внешних слоев уравнивается внутренним давлением газа звезды. Чем больше масса звезды, тем при большей температуре достигается равновесие звезды. И тем большей оказывается светимость звезды.

Далее идет **стационарная стадия** выгорания водорода. В стационарной стадии она проводит большую часть своей жизни, располагаясь при этом на главной последовательности диаграммы спектр – светимость (рис. 37). Там сейчас располагается и наше Солнце. И оно там будет находиться еще несколько миллиардов лет – пока не выгорит в его ядре водород.

По мере выгорания водорода гелиевое ядро звезды сжимается и разогревается. Когда температура в нем достигнет 15 миллионов градусов, гелий начнет превращаться в углерод с последующим образованием других химических элементов, вплоть до железа. Светимость и размеры звезд будут возрастать, а внешняя температура уменьшаться. Звезда сойдет с главной последовательности и начнет превращаться в красного гиганта или сверхгиганта. При этом многие из них проходят стадию пульсирования, то есть стадию цефеид (см. §38).

Заключительный этап жизни звезды решающим образом зависит от её массы. Звезды, подобные по массе Солнцу (не более $1,2 M_{\odot}$) постепенно рас-

ширяются, и их внешние слои покидают ядро звезды. На месте звезды остается маленький и горячий **белый карлик**, который постепенно остывает и становится **потухшей звездой**. Такова, в перспективе, судьба нашего Солнца.

Иная судьба у более массивных звезд. Если масса звезды примерно вдвое превышает массу Солнца, то такие звезды на последних этапах своей эволюции теряют устойчивость. В частности, могут взорваться как сверхновые. На месте такой звезды остается плотный сгусток тесно прижатых друг к другу нейтронов – **нейтронная звезда**. Нейтронная звезда имеет массу порядка массы Солнца, а диаметр порядка 20-30 км.

Наконец, если масса звезды в разы или в десятки раз превышает солнечную, то по мере выгорания топлива в её ядре она сжимается необратимо, превращаясь в черную дыру.

Белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры являются конечными стадиями эволюции звезд различной массы. Из вещества, потерянного ими, в последующем могут образовываться звезды следующих поколений.

ГЛАВА 6. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

§42. Наша Галактика (Млечный Путь)

Наша Галактика представляет собой огромное скопление звезд, содержащее порядка 10^{12} (триллиона) звезд, и имеет вид диска, вращающегося вокруг своего центра (ядра) – рис. 39.

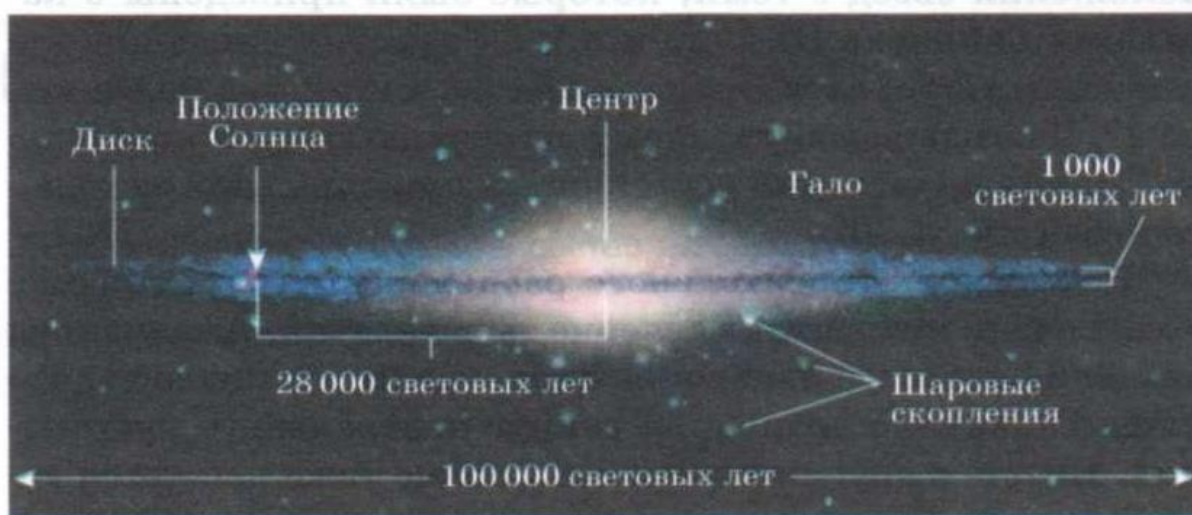


Рис. 39. Наша Галактика

Древнее название нашей Галактики – «Млечный Путь». Это название она получила в связи с тем, что если с Земли смотреть на небо в направлении плоскости диска, то есть в том направлении, в котором находится большинство звезд

Галактики, то эти звезды образуют узкую сплошную полосу молочного цвета, опоясывающую все небо (млечный путь). И эта полоса хорошо видна в ясную безлунную ночь.

Диаметр диска Галактики ≈ 100 тысяч световых лет, а его толщина ≈ 1000 световых лет. Период вращения диска Галактики ≈ 200 миллионов лет. Солнце находится ближе к краю диска на расстоянии от центра ≈ 28 тысяч световых лет. Солнце вращается вокруг центра Галактики с линейной скоростью ≈ 250 км/сек. Ядро находится в созвездии Стрельца, оно скрыто от нас облаками межзвездной пыли. Масса ядра составляет ≈ 4 миллиона масс Солнца и представляет собой, видимо, сверхмассивную черную дыру. Галактический диск несплошной, он состоит из **спиральных ветвей** (наша Галактика принадлежит к спиральному типу). Самые многочисленные звезды нашей Галактики – это белые карлики с массами примерно в 10 раз меньшими массы Солнца. Кроме одиночных звезд, в нашей Галактике много двойных и кратных звезд. Многие звезды в Галактике объединены в **скопления** (шаровые и рассеянные). В галактике между звездами содержатся облака газа и пыли – **туманности**. Они сильно поглощают свет звезд. Но даже там, где нет звезд и туманностей, космическое пространство не пусто: оно заполнено **космическими лучами** (электрически заряженными частицами, которые при движении в магнитных полях разогнались до скоростей, близких к скорости света), **световыми квантами** (фотонами), **гравитационным полем**.

В межзвездном пространстве много нейтрального (не ионизованного) водорода, излучающего радиоволны длиной 21 см. На этой волне астрономы пытаются связаться с возможными внеземными цивилизациями.

§43. Другие галактики

Крупнейшим современным телескопам доступна область Вселенной, в которой находятся миллиарды галактик. Ближайшими и самыми яркими оказались две галактики: **Большое Магелланово Облако** и **Малое Магелланово Облако**. Они видны лишь в южных полушариях Земли. Названы они именем Магеллана, ибо он первым из европейцев наблюдал их во время своего кругосветного путешествия. Магеллановы Облака являются спутниками нашей Галактики, они значительно меньше нашей Галактики и по массе, и по размерам. А из крупных галактик ближайшей к нам является Туманность Андромеды. Она, как и Облака, тоже видна невооруженным глазом, но в северном полушарии Земли. Туманность Андромеды очень похожа на нашу Галактику и по форме, и по размерам – рис. 40:



Рис. 40. Туманность Андромеды

Расстояния до Облаков $\approx 200\,000$ световых лет, а до Туманности Андромеды $\approx 2,5$ миллиона световых лет. Эти расстояния определены по наиболее ярким их звездам-цефеидам.

Расстояние между нашей Галактикой и Туманностью Андромеды сокращается со скоростью примерно $100 \dots 140$ км/сек, но встретятся они лишь через 4 миллиарда лет.

По своей форме все галактики разделены на три основных типа: **эллиптические, спиральные и неправильные**. Магеллановы Облака – неправильные (бесформенные). Наша Галактика и Туманность Андромеды – спиральные. А эллиптические галактики выглядят в виде правильных ярких эллипсоидов. В спиральных и неправильных галактиках идет активное звездообразование. А в эллиптических (сформировавшихся) галактиках звездообразование в основном завершилось, и они состоят преимущественно из старых звезд.

Галактики редко бывают одиночными. Как правило, они располагаются группами или образуют **скопления**, насчитывающие много тысяч членов. Плотность галактик в скоплениях бывает так велика, что что галактики взаимодействуют друг с другом – их связывают мосты светящейся материи. Наша Галактика входит в состав группы примерно из 90 объектов, которая называется **Местной группой**. Большая часть галактик в ней — маленькие (карликовые) звёздные системы, и только две можно отнести к гигантским по размеру и массе: нашу (Млечный Путь) и Туманность Андромеды.

Между галактиками в их скоплениях находится **межгалактический газ** и некая неизлучающая **темная материя**, обнаруживающая себя лишь по своей гравитации. Из чего она состоит – пока неясно.

Некоторые галактики обладают исключительно мощным радиоизлучением. Это **радиогалактики**. Их радиоизлучение связано с процессами, происходящими в их ядрах.

Среди галактик есть такие, у которых ядра являются особо активными. А именно, галактики, в ядрах которых содержатся колоссальные черные дыры массой в десятки и сотни миллионов масс Солнца. В результате падения вещества на такую дыру должно выделяться огромное количество энергии, преобразуемой в электромагнитное излучение видимой и инфракрасной части спектра. Источники этого излучения называются **квазарами**. Один квазар излучает больше световой энергии, чем самые яркие галактики. Квазары видны в телескопы на расстоянии большем, чем 10 миллиардов световых лет. В настоящее время известно более 300 тысяч квазаров.

Вся доступная нашему наблюдению и изучению часть Вселенной называется **Метагалактикой**. По существу, вся Вселенная – это Метагалактика, ибо ничего другого за её пределами мы не знаем.

Метагалактика включает в себя примерно 100 миллиардов окружающих нас галактик. В их пространственном распределении наблюдается **ячеистосотовая структура**. Скопления и сверхскопления галактик располагаются так, что они не заполняют всё пространство, а образуют лишь стенки неких ячеек, внутри которых находятся гигантские пустоты. Размер этих ячеек около 100 Мпк (мегапарсек), а стенки имеют толщину всего 3-4 Мпк. Такая структура возникла в результате длительной эволюции всех объектов, наблюдаемых во Вселенной.

§44. Космология (устройство и развитие Вселенной)

Теоретическим фундаментом представлений об устройстве, происхождении и развитии Вселенной является **общая теория относительности**, созданная великим немецким физиком **Альбертом Эйнштейном**. Эйнштейн вывел уравнения, которые описывают общее строение и эволюцию Вселенной (**космологию Вселенной**). Из этих уравнений следует, что наша Вселенная не может быть в целом стационарной (неизменной). Она должна либо расширяться, либо сжиматься. То есть галактики должны либо разбегаться друг от друга, либо, наоборот, в любом месте Вселенной приближаться друг к другу. Этот вывод на основе анализа уравнений теории относительности сделал в 1925 году российский математик **Александр Фридман**.

Теоретические выводы Фридмана получили подтверждение в открытом американским астрономом Эдвином Хабблом факте: **галактики разбегаются друг от друга** подобно тому, как разбегаются друг от друга точки, нанесённые на поверхность надуваемого воздушного шарика. Скорость удаления друг от друга точек этого шарика, очевидно, тем больше, чем дальше они отстоят друг

от друга. И в любой точке шарика создается представление, что именно от неё разбегаются во все стороны другие точки шарика.

Аналогично раздувается и наше трехмерное пространство, хотя представить себе это наглядно труднее, чем раздувание двумерной поверхности воздушного шарика. Как и в случае с шариком, во Вселенной нет особой точки, являющейся центром её расширения. Вселенная расширяется из любой своей точки, каждую из них можно считать центром расширения. То есть галактики разбегаются во все стороны от любой из своих точек. Скорость этого разбегания от нас описывается **законом Хаббла**:

$$v = HR \quad (H \approx 70 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{Мпк}} - \text{постоянная Хаббла}) \quad (53)$$

Согласно закону Хаббла (53), чем дальше от нас находится галактика (чем больше расстояние R до неё), тем больше её скорость удаления (полная аналогия с точками надуваемого шарика!). Скорость v удаления от нас галактик определяют по красному смещению в спектрах света, приходящего от этих галактик (то есть с помощью эффекта Доплера – см. §31). А определив v , из (53) находится и расстояние R до галактик:

$$R = \frac{v}{H} \text{ Мпк} \quad (54)$$

Именно по этой формуле определяют расстояния до квазаров и до тех дальних галактик, в которых отдельные звезды уже не видны.

Разбегание галактик тормозится гравитационным притяжением галактик друг к другу. И притяжение это тем сильнее, чем больше плотность материи во Вселенной. Поэтому наблюдаемое сейчас расширение Вселенной в будущем может остановиться, а потом начнется её сжатие. А, может, это торможение окажется недостаточным, и расширение Вселенной окажется неостановимым. Расчеты показывают, что если нынешняя средняя плотность материи во Вселенной меньше, чем

$$\rho_{\text{крит}} = 10^{-26} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad (55)$$

то Вселенная будет расширяться неостановимо (это будет **открытая Вселенная**). А если эта плотность больше $\rho_{\text{крит}}$, то со временем расширение Вселенной сменится её сжатием, и она сожмется в точку (это – **закрытая Вселенная**).

По сегодняшним оценкам, средняя плотность материи во Вселенной $\rho \approx 10^{-28} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то есть примерно в 100 раз меньше критической плотности. И это указывает на перспективу того, что **наша Вселенная открытая**.

Этот вывод подтверждается еще одним фактом, недавно открытым учеными: Вселенная расширяется быстрее, чем по закону Хаббла. То есть она **расширяется с ускорением**. Ускорение создает неизвестный прежде вид материи, который обладает свойством **антигравитации**. Он получил название **темной энергии**. В отличие от обычной и «темной» материи, которые распре-

делены в космическом пространстве неоднородно, образуя звезды, галактики и т.д., темная энергия является практически однородной. Видимо, темная энергия – это свойство самого пространства (вакуума). Её свойства только начинают изучать.

§45. Космогония (происхождение Вселенной)

Так как Вселенная расширяется, то был момент времени, когда это расширение началось из одной точки. Если бы тяготение не замедляло расширение, то галактики разбежались бы друг от друга с постоянной скоростью (тем большей, чем дальше они отстоят друг от друга – согласно закону Хаббла (53)). Галактики, находящиеся сейчас от нас на расстоянии R , прошли бы от нас этот путь за время

$$t = \frac{R}{v} = \frac{R}{HR} = \frac{1}{H} \approx 13,7 \text{ млрд. лет} \quad (56)$$

И это время не зависит от R . Как показывают расчеты, наличие гравитационного тяготения несколько уменьшает это значение.

То есть не раньше, чем 13,7 млрд. лет, **все галактики были сосредоточены в одной точке**. Иначе говоря, в этой точке находилась вся Вселенная. В этом её состоянии не существовало ни пространства, ни времени. А материя имела бесконечную плотность. А затем, по непонятным пока причинам, произошел так называемый «**Большой взрыв**», и началось расширение Вселенной.

На начальных стадиях расширения вещество во Вселенной имело не только огромную плотность, но и огромную температуру. По теории американского физика российского происхождения **Георгия Гамова** спустя 0,1 секунды после начала расширения температура вещества Вселенной была $3 \cdot 10^{10}$ К. При такой высокой температуре атомные ядра существовать не могут – только отдельные элементарные частицы: фотоны, электроны-позитроны, нейтрино-антинейтрино, и т.д., сталкивавшиеся между собой и превращающиеся друг в друга. Фотоны, сталкиваясь друг с другом, рождали пары частица-античастица, а те, сталкиваясь между собой, аннигилировали (самоуничтожались), опять рождая фотоны.

По мере расширения плотность вещества народившейся в результате Большого взрыва Вселенной и его температура уменьшались. Спустя 5 минут из протонов и нейтронов начинают образовываться ядра простейших элементов – водорода и гелия. А из их сгустков образуются зародыши будущих звезд и галактик. Но последнее происходит лишь спустя миллион лет после начала расширения, когда температура снижается до 4000°K , и когда ядра атомов водорода и гелия, захватив электроны, превращаются в нейтральные атомы.

Звезды и галактики первого поколения состояли большей частью из водорода. В ходе термоядерных реакций внутри этих звезд рождались более тяжелые атомы – вплоть до железа. А во время взрывов сверхновых звезд рождались и остальные, более тяжелые, элементы Периодической системы элементов – вплоть до трансурановых. Эти тяжелые элементы после разрушения звезд первого поколения попадали в межзвездную среду и являлись материалом для образующихся

звезд второго поколения. Наше Солнце – звезда второго поколения (а может, даже и третьего), так как в составе её вещества, как и в составе вещества образовавшихся вместе с ним других тел Солнечной системы, есть тяжелые элементы. Таким образом, атомы, из которых мы все состоим, были рождены в недрах давно умерших звезд.

С понижением общей температуры Вселенной пронизывавшее всю Вселенную электромагнитное излучение, которое тоже остывало, перестало превращаться в наборы частица-античастица и продолжает до сих пор во всех направлениях пронизывать Вселенную. Это излучение, оставшееся от далекого прошлого (**реликтовое излучение**) было обнаружено американскими учеными в виде радиоизлучения на волне 7,35 см, приходящего к нам с одинаковой интенсивностью со всех направлений окружающего нас космического пространства. Его существование является важнейшим экспериментальным подтверждением теории Большого взрыва.

§46. Жизнь и разум во Вселенной

Вселенная предстает перед нами как бесконечно разветвляющийся во времени и пространстве процесс эволюции материи. На определенном этапе во Вселенной возникает жизнь.

Пока жизнь обнаружена только на Земле. Но, несомненно, жизнь является распространенным явлением во Вселенной. И существуют множество планет, на которых обитают цивилизации. В пользу этого говорит то, что молекулярные соединения, необходимые для начальной стадии возникновения живых структур (например, аминокислоты) достаточно распространены во Вселенной и даже открыты в межзвездной среде. При благоприятных условиях (температура, водная среда, космическое излучение, электрические и магнитные поля) из них могли образоваться белки, молекулы ДНК – основа жизни. Но не исключается существование и небелковых форм жизни.

Идут поиски признаков и разумной жизни в космосе. Человечество уже неоднократно подавало в Космос сигналы о своем существовании. Например, в 1974 году в направлении шарового скопления звезд в созвездии Геркулеса было послано радиосообщение, в котором содержатся сведения о Земле и её обитателях. Космические аппараты «Пионер», «Вояджер», запущенные в 70–ых годах 20 века, уносят в межзвездное пространство металлические пластины и видеодиски с изображением на них видов Солнечной системы, Земли, живых существ, людей, образцы человеческой речи. Возможно, когда-нибудь эти аппараты какими-то разумными цивилизациями будут обнаружены (если только эти аппараты до того не сгорят в атмосфере какой-либо звезды или планеты), и эти цивилизации узнают о нашем существовании. Остается ждать ответных посланий.

Литература

1. Воронцов-Вельяминов Б.А., Страут Е.К. Астрономия: учебник для 11 кл., М.: Дрофа, 2019. 238 с.
2. Засов А.В., Сурдин В.Г. Астрономия: учебник для 10-11 кл. М.: Бином, 2019. 304 с.
3. Левитан Е.П. Астрономия. Базовый уровень: учебник для 11 кл. М.: Просвещение, 2018. 224 с.
4. Чаругин В.М. Астрономия: учебник для 10-11 кл. М.: Просвещение, 2018. 144 с.
5. Астрономия: учебник для СПО / под ред. Т.С. Фещенко. М.: Академия, 2018. 252 с.

Интернет- ресурсы

1. www.astronet.ru – российская астрономическая сеть. Многостраничный портал.
2. www.астрономия.рф - общероссийский астрономический портал. Поиск по всем вопросам. Новости астрономии.
3. www.college.ru/astronomy - Открытая астрономия. Сборник коротких статей по всему курсу астрономии с иллюстрациями.

Учебное издание

Комогорцев В.Ф.

АСТРОНОМИЯ

Учебное пособие
для учащихся СПО

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 11.01.2021 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 4,12. Тираж 25 экз. Изд. № 6833.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ