

В.Н.Глазков

АСТРОНОМИЯ

Москва -2015

Оглавление

От автора и об авторе.....	5
Лицензионная информация.....	5
Введение.....	6
Лекция 1. Наблюдательные методы астрономии: основные понятия, история, развитие и современные достижения.....	7
Предмет и задачи астрономии.....	7
Определение координат небесных тел на небесной сфере.....	9
Определение расстояния до небесных тел методом параллакса.....	11
Яркость небесных тел. Шкала звездных величин.....	13
Наблюдения невооруженным глазом.....	15
Оптические телескопы.....	18
Телескопы-рефракторы.....	18
Телескопы-рефлекторы.....	22
Адаптивная оптика в современных рефлекторах.....	24
Дифракционный предел телескопа.....	28
Наблюдения в неоптическом диапазоне.....	30
Прозрачность атмосферы.....	30
Радиотелескопы.....	31
Рентгеновские и гамма-телескопы.....	36
Нейтронные обсерватории.....	38
Лекция 2. Основы классической небесной механики. Возникновение звёзд и планетных систем.....	41
Гравитация в классической механике.....	41
Задача двух тел. Законы Кеплера.....	42
Экспериментальные факты, позволяющие понять процесс формирования звёзд, планетарных систем и планет.....	46
Наблюдения в пределах Солнечной системы.....	46
Планеты и планетные системы других звёзд. Методы обнаружения экзопланет.....	50
Планеты и планетные системы других звёзд. Сводка данных по планетным системам.....	54
Современная модель формирования планетной системы.....	58
Лекция 3. Солнечная система. Сравнительный анализ.....	64
Солнце — ближайшая к нам звезда.....	64
Основные наблюдаемые параметры.....	66
Ядро Солнца.....	68
Проблема солнечных нейтрино.....	70
Земля и Луна.....	71
Земля.....	71
Луна.....	72
Другие объекты систем Земля-Солнце и Земля-Луна.....	75
Другие планеты земного типа (Меркурий, Венера, Марс). Сравнительный анализ планет земного типа.....	76
Меркурий.....	78
Венера.....	80
Марс.....	83
Газовые гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Сравнительный анализ и интересные особенности.....	88
Системы колец газовых гигантов.....	90

Спутники газовых гигантов.....	94
Пояс астероидов, пояс Койпера, облако Оорта.....	95
Пояс астероидов.....	96
Пояс Койпера.....	99
Облако Оорта.....	103
Лекция 4. Некоторые задачи небесной механики.....	105
К определению масс планет и Солнца.....	105
Оценка эксцентриситета земной орбиты.....	106
Удержание атмосферы.....	109
Приливные силы.....	109
Приливное торможение и синхронизация собственного и орбитального вращений.....	113
Предел Роша.....	115
Прецессия оси вращения Земли.....	116
Точки Лагранжа в системе двух тел.....	120
Орбитальные резонансы.....	122
«Космическая праща».....	124
Затраты энергии на межпланетные перелёты.....	124
Фазы Луны, затмения и приливы.....	126
Лекция 5. «Активное» изучение человеком космоса: автоматические и пилотируемые космические программы.....	128
Пилотируемая космическая программа СССР и России.....	128
Космические корабли.....	128
Орбитальные станции.....	131
Лунная программа СССР.....	132
Пилотируемая космическая программа США.....	133
Космические корабли.....	133
Орбитальные станции США.....	136
Лунная программа США.....	137
Пилотируемые космические программы других стран.....	140
Международная космическая станция.....	141
Пилотируемые проекты частных корпораций.....	141
Космические державы, имеющие средства запуска космических аппаратов.....	145
Искусственные спутники Земли.....	146
Космические обсерватории.....	148
Гамма-обсерватория «Комптон» (CGRO, Compton Gamma Ray Observatory).....	149
Космический телескоп «Хаббл» (HST, Hubble Space Telescope).....	151
Обсерватория «Кобе» (COBE, Cosmic Background Explorer).....	154
Исследование Луны при помощи космических аппаратов.....	155
Полёты к Венере.....	158
Полеты к Меркурию.....	158
Марсианская программа.....	159
Исследование внешних планет Солнечной системы.....	160
Исследование малых тел Солнечной системы.....	161
Лекция 6. Звёзды, эволюция звёзд.....	162
Некоторые сведения из других разделов физики и ранее пройденного.....	162
Определение параметров звёзд: приборы и методы.....	163
Классификация звёзд. Спектральный тип звезды, диаграмма Герцшпрунга—Рассела, главная последовательность.....	164

Рождение звёзд. Туманности, кластеры.....	169
Туманности.....	169
Формирование протозвезд.....	171
Эволюция протозвезд, рождение звёзд.....	173
Жизнь звезды на главной последовательности.....	176
Уход с главной последовательности. Умирание звёзд. Сверхновые.....	177
Некоторые выделенные виды звёзд.....	182
Переменные звёзды.....	182
Новая звезда.....	185
Нейтронные звезды, пульсары.....	186
Чёрные дыры.....	188
Чёрные дыры с некоторыми подробностями.....	188
Гравитация и общая теория относительности.....	188
Некоторые предсказания и экспериментальные проверки общей теории относительности.....	190
Возможность существования не излучающих массивных объектов — чёрных дыр.....	191
Классификация черных дыр и их наблюдение.....	192
Лекция 7. Галактики и Вселенная. Современные представления об устройстве и эволюции Вселенной.....	197
Наша Галактика — Млечный Путь.....	197
Другие Галактики.	202
Классификация Галактик.....	202
Определение расстояний до далеких галактик.....	204
Формирование эллиптических, линзовидных и спиральных галактик.....	205
Кластеры и суперкластеры галактик.....	206
Тёмное вещество.....	209
Закон Хаббла. Связь скорости движения галактик с расстоянием до них.....	210
Большой Взрыв и ранние этапы развития Вселенной.....	213
Космология.....	213
Расширение Вселенной.....	213
Оценка возраста Вселенной.....	214
Большой Взрыв.....	214
Соотношение между веществом и излучением во Вселенной.....	215
Момент формирования атомов. Эра рекомбинации.....	216
Определение кривизны пространства.....	218
Тёмная энергия.....	219
От горячей плазмы к современной Вселенной.....	222
От горячей плазмы к Большому Взрыву.....	224
Заключение.....	227
Задачи к курсу лекций «Астрономия».....	228
Решение задач.....	229
Задача 1.....	229
Задача 2.....	230
Задача 3.....	231

От автора и об авторе.

Материалы этого пособия были в основном подготовлены автором в 2009-2010 году во время подготовки к чтению курса лекций по астрономии на двухгодичных курсах повышения квалификации для учителей физики в Московском институте открытого образования (МИОО). Представленная версия этих материалов была вычитана в 2015 году с некоторыми исправлениями и обновлениями содержательной части. Однако некоторые сведения могли с момента подготовки первых материалов устареть, а некоторые новые яркие открытия не включены сюда.

Автор является физиком-экспериментатором, специализирующимся в физике твёрдого тела, старшим научным сотрудником Института физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, доцентом МФТИ. Не являясь профессиональным астрономом или астрофизиком, автор надеется, что эти материалы могут оказаться кому-то полезным именно как взгляд «немного со стороны».

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить всех слушателей курсов, вместе с которыми и был создан этот курс: без их внимания и интереса ничего бы не получилось.

Москва, 2015

Лицензионная информация.

Данные материалы подготовлены в образовательных некоммерческих целях. В качестве иллюстративного материала использованы данные и фотографии из открытых источников, ссылки на источники указаны рядом с соответствующими данными. Разрешается свободное распространение этих материалов в некоммерческих целях без изменения содержания на условиях лицензии Creative Commons: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International.

Москва, 2015

Введение.

В данный момент отдельный предмет «Астрономия» исключен из стандарта среднего общего образования. Однако ряд вопросов, входящих в стандарт, относится именно к темам астрономии и астрофизики: это и «астрономически глобальные» вопросы строения Вселенной, и «астрономически местные» вопросы об устройстве Солнечной системы. Кроме того, наблюдение за астрономическими процессами позволяет иногда проверять фундаментальные физические теории (в недавнем прошлом — теорию относительности, а ранее — закон всемирного тяготения), а разнообразие применяемых приборов и методов позволяет иллюстрировать различные физические законы и явления, изучаемые в других разделах физики (линейчатые спектры, излучение черного тела, небесная механика). Богатая история астрономических наблюдений открывает возможности к развитию проектной и внеклассной деятельности, к развитию межпредметных связей. Наконец, большой прогресс в развитии методов наблюдения и обработки информации привел в последнее время к ряду интересных новых открытий в астрофизике, о которых учителю физики необходимо иметь хотя бы качественное представление.

По этим причинам оказалось необходимо ввести отдельный курс лекций по астрономии и астрофизике в программе кафедры физики ФППК МИОО. Данный курс был рассчитан примерно на 6-7 сдвоенных лекций, разбиение на разделы и их нумерация идёт именно в связи с такой формой представления материала. Курс в основном опирается на учебник Р.Фридмана «Вселенная» (Roger A.Freedman, “Universe”, 8-th Edition) и на материалы, доступные в сети Интернет (в частности, с сайта Википедия¹, сайта astronnet.ru, сайта НАСА nasa.gov).

Целью курса является знакомство слушателей с современными представлениями о строении Вселенной. При этом, по возможности, изложение фокусируется не столько на изложение этих представлений (с которыми слушатели, в принципе, знакомы), сколько на обсуждение и демонстрацию реальных фактов, лежащих в основе современных моделей, демонстрация соответствия наблюдаемых на астрономических масштабах явлений известным нам законам физики, а также иллюстрация различных применений физических законов в технических и теоретических задачах астрономии. Уровень сложности курса ориентируется на уровень несколько выше требований школьной программы. Предполагается знакомство слушателей с курсом физики в рамках школьной программы и владение математическим аппаратом в рамках школьной программы. Курс не является в полной мере систематическим изложением «с нуля» - предполагается наличие у слушателей базового (хотя бы качественного) представления об астрономических явлениях и терминах.

¹ Необходимо, однако, всегда с осторожностью подходить к информации из сети Интернет и, в частности, к информации с сайта Википедия. По принципу формирования, Википедия пополняется статьями неизвестных авторов, в некоторых случаях недостоверными. Поэтому такую информацию желательно перепроверять с другими источниками. Отобранные автором данные такую проверку прошли.

Лекция 1. Наблюдательные методы астрономии: основные понятия, история, развитие и современные достижения.

Предмет и задачи астрономии.

Как все мы знаем, слово астрономия происходит от двух древнегреческих слов: звезда и знание. И это полностью соответствует содержанию данной науки — астрономия изучает расположение, движение и устройство небесных тел, начиная от ближайшего к нам небесного тела — Луны и заканчивая масштабами Вселенной.

В астрономии можно выделить два основных подраздела:

- классическая астрономия, предметом которой является в основном наблюдение за видимыми светилами и описание их движений.
- астрофизика, предметом которой является определение физических и химических свойств различных объектов во Вселенной, описание происходящих во Вселенной процессов на основании известных нам законов физики.

Вклад классической астрономии в культурный и технологический прогресс огромен: в частности, задачи навигации, решались и решаются именно методами классической астрономии. Однако научные результаты классической астрономии можно считать сформировавшимися к моменту окончательного принятия гелиоцентрической модели Солнечной системы. Дальнейший прогресс в изучении Космоса стал возможен с применением различных физических приборов (от спектрометров до радиотелескопов), что привело к возникновению и развитию астрофизики. Как мы увидим в дальнейшем, это привело к формированию стройной и последовательной картины устройства Вселенной, к возникновению по крайней мере общего понимания того, какие процессы приводят к возникновению звёзд и планет. Таким образом, астрономия вносит большой вклад в формирование научной картины мира.

Астрономия имеет одно важное отличие от большинства других разделов физики, о котором необходимо всегда помнить. Это отличие связано с тем, что в астрономии нет возможности поставить и повторить контролируемый физический эксперимент, как это делается, например, в физике твердого тела или в ядерной физике. Большинство изучаемых объектов оказываются вне нашей возможности осуществить «непосредственный» контроль их свойств — даже посылка автоматического зонда к близким по астрономическим меркам планетам Солнечной системы является достаточно сложной задачей и таких исследований не так уж и много. Когда же речь заходит о космологических задачах — о вопросах эволюции Вселенной, ученые оказываются в еще более сложной ситуации, так как Вселенная у нас всего одна и невозможно в принципе пронаблюдать «что было бы, если бы у Вселенной были другие свойства». Таким образом, в отличие от многих других разделов физики, где важную роль играет «активный» физический эксперимент, большинство знаний астрономии получено «пассивным» наблюдением, накоплением информации и тщательным ее анализом. Но и это не все сложности! Необходимо также осознавать, что эти наблюдения производятся человеком ничтожное по астрономическим меркам время: возраст Вселенной оценивается примерно в 14 миллиардов лет, в то время как сколь-либо систематические наблюдения за звездным небом ведутся 3-4 тысячи лет, наблюдения вооруженным глазом ведутся чуть более 400 лет, и лишь в последние 100 лет происходил огромный прорыв в разработке средств и

методов наблюдения. Таким образом, на первый взгляд может показаться, что задача астрономии безнадежна и похожа на попытку описать историю морской навигации в Тихом океане по одной фотографии вчерашней пробки на Садовом кольце. В ходе нашего курса мы будем стараться показать, что на самом деле это не так и выводы астрофизики действительно подкреплены достаточным массивом наблюдаемых фактов.

Признанием вклада астрономии в нашу копилку знаний являются несколько Нобелевских премий:

- 2015, Такааки Каджита и Артур Макдональд «за открытие нейтринных осцилляций, доказавших, что нейтрино имеет массу»¹
- 2011, Саул Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Рисс, «за открытие ускоряющегося расширения Вселенной посредством наблюдения далёких сверхновых»
- 2006, Джон Маттер и Георг Смут, «за открытие анизотропии реликтового излучения»
- 2002, Рэймонд Дэвис, Масатоши Кошиба, «за достижения в области астрофизики и, в частности, за обнаружение космических нейтрино»; Риккардо Джиакони «за вклад в астрофизику, приведший к открытию космических источников рентгеновского излучения»
- 1993, Рассел Хулс и Джозеф Тайлор, «за открытие нового типа пульсаров, открывшее новые возможности к изучению гравитации»
- 1983, Субраманьян Шандрасехар, «за теоретические исследования физических процессов, важных для понимания структуры и эволюции звёзд»; Вильям Фоулер «за теоретические и экспериментальные исследования ядерных реакций, важных для формирования химических элементов во Вселенной»
- 1978 (в этом году 1/3 премии получил П.Л.Капица за работы в области физики низких температур), Арно Пенциас и Роберт Вудро Вильсон, «за открытие реликтового излучения»
- 1974, сэр Мартин Райл и Антони Хевиш, «за их прорывные работы в радиоастрофизике: М.Райл за его наблюдения и технические изобретения, в частности за методику синтеза апертуры, А.Хевиш за его ключевую роль в открытии пульсаров».
- 1967, Ханс Бете, «за вклад в теорию ядерных реакций, в особенности за его открытия, связанные с производством энергии в звездах»

Интересно еще раз заметить, что эти Нобелевские премии относительно недавние, особенно для такой почтенной науки как астрономия. Это связано именно с развитием астрофизики и с огромным прогрессом в развитии методов наблюдения во второй половине 20 века.

¹ Формулировка темы Нобелевской премии 2015 года не содержит упоминания об астрономии, однако оба лауреата являются сотрудниками нейтринных обсерваторий Супер-Камиоканде (Т.Каджита) и Судбери (Макдональд) и их открытие непосредственно связано с проблемой солнечных нейтрино. О нейтринных обсерваториях говорится в лекции 1, о проблеме солнечных нейтрино в лекции 3.

Определение координат небесных тел на небесной сфере.

Наблюдение небесных тел и фиксация происходящих с ними процессов требует установления какого-то соглашения об описании положения этих тел относительно наблюдателя. Так как расстояния до небесных тел настолько велики, что невооруженный глаз не может определить, какой из объектов ближе, а какой дальше, то используется концепция *небесной сферы* — воображаемой сферы фиксированного радиуса, на которую проецируются небесные тела. Для описания положения точки на сфере естественно использовать два угла сферических координат: если зафиксировать (произвольным, удобным для данной задачи образом) ось, проходящую через центр сферы, и выбрать вторую ось в плоскости, перпендикулярной первой (также называемой основной плоскостью), (также произвольным, удобным для конкретной задачи образом), то положение любой точки на сфере можно задать углами Θ и ϕ , как показано на рисунке.

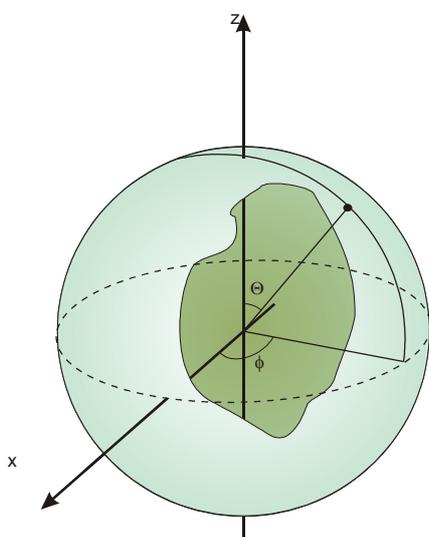


Рисунок 1: Сферическая система координат.

Есть несколько основных способов выбора осей отсчета углов. Перечислим их, так как с ними связаны некоторые исторически сложившиеся обозначения точек на небесной сфере (хотя, подчеркнём еще раз, по сути всякая сферическая система координат сводится к двум углам, определенным выше):

- *Горизонтальная топоцентрическая система координат.* Центром этой системы координат является наблюдатель на поверхности Земли, в качестве оси Z выбирается отвесная линия (прямая, проходящая через наблюдателя и центр Земли), основную плоскость также называют плоскостью математического горизонта, ось X выбирается на пересечении меридиональной плоскости, проходящей через наблюдателя, и плоскости математического горизонта. Точки пересечения оси X с небесной сферой называют точками севера и юга (точкой севера называют более близкую к северному полюсу точку). Точки

пересечения оси Z с небесной сферой называют зенитом (над наблюдателем) и надиром (под наблюдателем). Плоскости, проходящие через ось Z , называют плоскостями вертикального круга. Пересечения всех плоскостей с поверхностью небесной сферы дают соответствующие линии на сфере: математический горизонт, вертикальный круг. Как видно из этого описания, данная система координат не полностью определена на полюсах и экваторе. Положение точки на небесной сфере в этих координатах описывается высотой h или зенитным расстоянием z и азимутом A . Зенитное расстояние z — это угол дуги небесной сферы от точки зенита до заданной точки (совпадает с углом Θ сферических координат на рисунке 1), оно принимает значение от 0° до 180° . Высота h — это угол дуги вертикального круга, проходящего через заданную точку, отсчитываемый от математического горизонта, высота принимает значения от $+90^\circ$ к зениту до -90° к надиру. Очевидно, что $z = 90^\circ - h$. Азимутом A называется дуга математического горизонта от точки юга до пересечения вертикального круга и математического горизонта, отсчитываемая в направлении суточного вращения небесной сферы (то есть к западу от точки юга).

- *Экваториальная система координат.* В этой системе координат начало координат совпадает с центром Земли, в качестве оси Z выбирается ось вращения Земли, основная плоскость совпадает с плоскостью экватора. Пересечение экваториальной плоскости с небесной сферой называют небесным экватором, плоскость проходящую через выбранную точку и ось вращения Земли, называют плоскостью склонения, ее пересечение с небесной сферой — кругом склонения. Одной из координат этой системы координат являются склонение δ или полярное расстояние p , другой координатой — часовой угол t или прямое восхождение α . Склонение δ — это угол дуги от небесного экватора до заданной точки небесной сферы, склонение принимает значения от $+90^\circ$ в северном полушарии до -90° в южном. Полярное расстояние p — это угол дуги от северного полюса мира (пересечения оси Z с небесной сферой в северном полушарии) до заданной точки, полярное расстояние принимает значения от 0° до 180° . Часовой угол t — это длина дуги небесного экватора до круга склонения выбранного объекта, отсчитываемая от видимой наблюдателю точки пересечения небесного экватора плоскостью, проходящей через ось вращения земли и отвесную линию в точке нахождения наблюдателя (пересечение этой плоскости с небесной сферой называют небесным меридианом), отсчитываемая в сторону суточного вращения небесной сферы (то есть к западу). Прямым восхождением α называют длину дуги небесного экватора, отсчитываемую от точки весеннего равноденствия (которая с необходимостью лежит на небесном экваторе, как мы покажем чуть позже) к плоскости склонения выбранного объекта в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы.

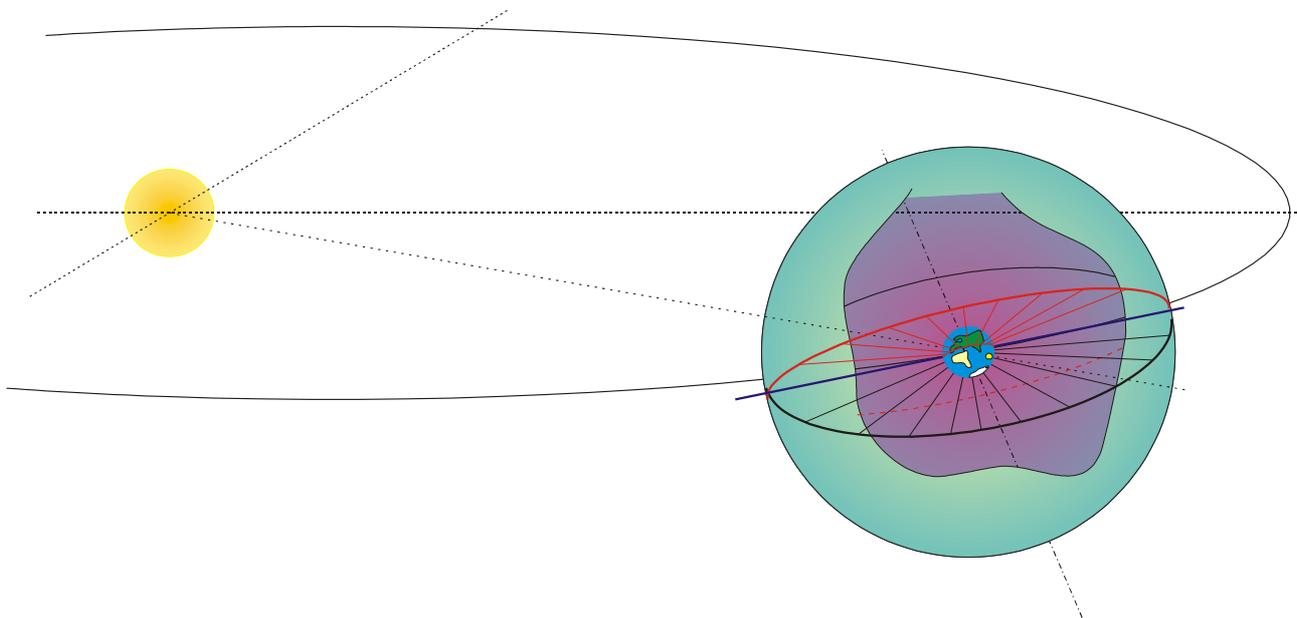


Рисунок 2: Плоскость эклиптики, эклиптика и небесный экватор на небесной сфере.

- *Эклиптическая система координат.* Основной плоскостью этой системы координат является плоскость эклиптики — плоскость в которой лежит земная орбита. С точки зрения земного наблюдателя пересечение этой плоскости с видимой с Земли небесной сферой является видимой траекторией Солнца (также называемой эклипстикой). Интересно отметить, что название «эклиптика» связано с греческим словом *ékliēpsis* — затмение. Это объясняется тем, что уже давно было замечено, что солнечные затмения происходят только тогда, когда видимое движение Луны пересекает

эклиптику. Земная ось наклонена к плоскости эклиптики на угол $23^{\circ}26'$. Этот наклон, как мы знаем, ответственен за смену сезонов и изменение продолжительности дня и ночи в течение года. Из за него же плоскость эклиптики и плоскость небесного экватора не совпадают (см. рисунок 2). Пересечение эклиптики с небесным экватором дает положения точек весеннего и осеннего равноденствия — как легко видеть из определения соответствующих плоскостей, Солнце находящееся в такой точке, одинаково освещает оба полушария Земли, соответственно, в день прохождения этой точки продолжительности дня и ночи максимально близки.

- *Галактическая система координат.* Основной плоскостью этой системы координат является плоскость нашей Галактики.

Как видно, хотя все эти системы координат по сути являются обычными сферическими координатами, их конкретная реализация обусловлена историческими причинами и порой не имеет общего стандарта (так например часовой угол и склонение отсчитываются в разные стороны). Поэтому, если вы не занимаетесь астрономическими наблюдениями постоянно, лучшим советом будет посмотреть описание соответствующей системы координат, прежде чем искать объект на небесной сфере.

Определение расстояния до небесных тел методом параллакса.

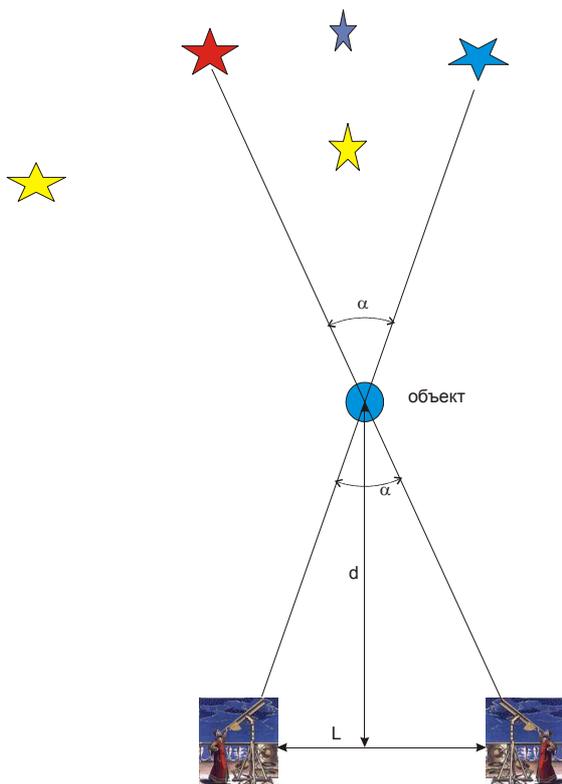


Рисунок 3: Определение расстояния до удалённого объекта методом параллакса.

Одним из первичных способов определения расстояния до далеких объектов является метод параллакса (от греческого «смена», «чередование»). Метод основан на том, что видимое положение удаленного объекта относительно еще более удаленного фона изменяется при смене положения наблюдателя (см. рисунок 3). Так как обычно в астрономии расстояние до объекта d много больше, чем база измерения L , а также всегда можно найти объекты, которые можно считать неподвижным фоном, то математически задача упрощается:

- угол α , под которым с объекта видна база измерения, можно считать совпадающим с угловым смещением объекта относительно фона;
- так как угол α обычно мал, можно воспользоваться

формулами приближенного вычисления и становится не важной точная геометрия треугольника «объект-положение наблюдателя 1 — положение наблюдателя 2» (например, если этот треугольник прямоугольный, то $d = \frac{L}{\operatorname{tg} \alpha} \approx L/\alpha$; если

треугольник равнобедренный, то $d = \frac{L/2}{\operatorname{tg} \alpha/2} \approx L/\alpha$).

Таким образом, определив параллакс (то есть угловое смещение) объекта и зная базу измерения, можно вычислить расстояние до объекта:

$$d = \frac{L}{\alpha [\text{радиан}]} = \frac{57.30 L}{\alpha [\text{градусы}]} = \frac{3437 L}{\alpha [\text{угл.минуты}]} = \frac{206270 L}{\alpha [\text{угл.секунды}]}$$

Приведем для сравнения характерные величины параллакса различных небесных тел:

- суточный параллакс Луны достигает 2°
- суточный параллакс Марса достигает $48''$
- годичный параллакс ближайшей к нам звезды Проксима Центавра составляет $0.7687'' \pm 0.0003''$ (по данным космического телескопа Хабл)

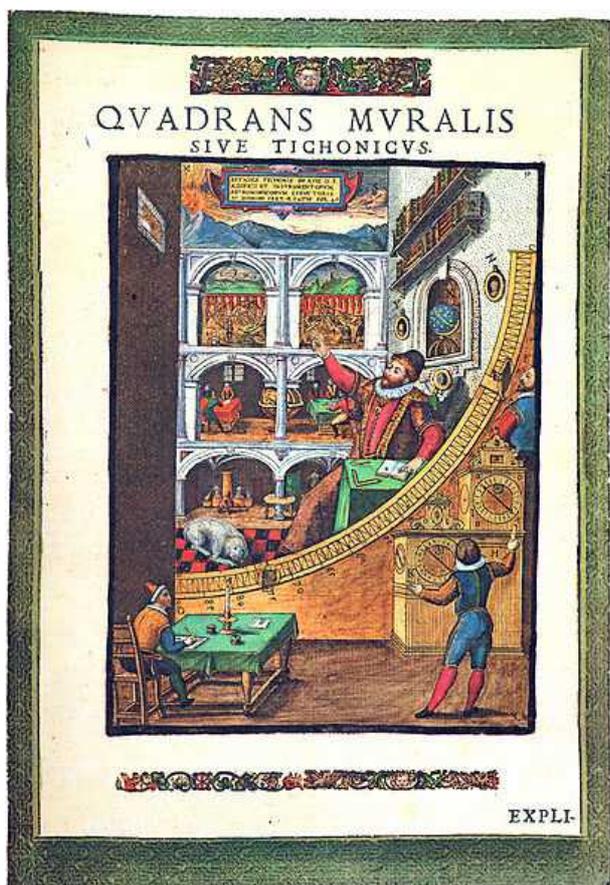


Рисунок 4: Квадрант Тихо Брагге (с сайта wikipedia.org)

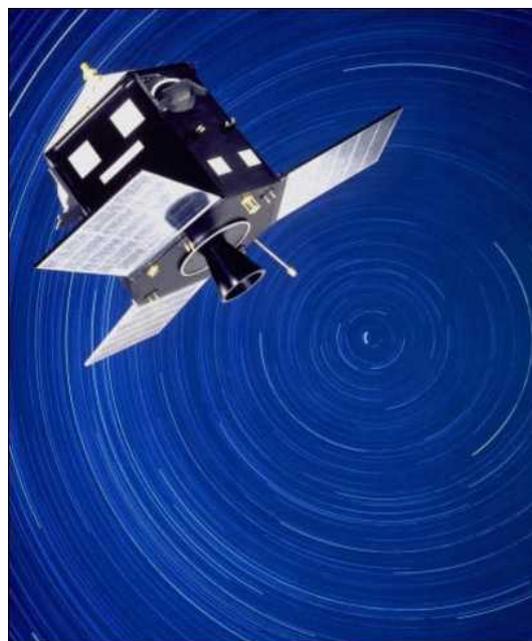


Рисунок 5: Астрометрический спутник Hipparcos (рисунок художника, с сайта Европейского космического агентства <http://sci.esa.int/>)

Определение расстояния методом параллакса требует, как видно из этого равенства, большой точности определения координат небесных тел (так, параллакс звёзд был впервые достоверно наблюден только в 1837 (В.Я.Струве) — 1838 (Ф.Бессель) годах), а также по возможности увеличения базы измерений. Первое из этих требований ограничивается техническими возможностями наблюдательных приборов, второе — ограниченностью наших возможностей к перемещению в пространстве: хотя, с одной стороны, база измерений равная диаметру Земли создается «бесплатно» благодаря суточному вращению, с другой стороны,

максимальная база пока ограничивается размером орбиты Земли. Таким образом, неизбежно оказывается ограниченным максимальное расстояние, до которого можно пользоваться методом параллакса. Для более далеких объектов приходится пользоваться косвенными методами, о которых мы поговорим позже. Но метод параллакса позволяет создать достаточно точную шкалу расстояний для «калибровки» этих косвенных методов. Поэтому постоянно ведется работа по уточнению координат небесных тел, и по мере развития технических средств наблюдения уточняются и расстояния до этих тел.

Предельная точность измерения параллакса с поверхности Земли составляет около 0.01" и ограничивается неоднородностью атмосферы. Современные технические средства позволяют осуществлять наблюдения с искусственных спутников — специально для этой цели в 1989 году был запущен астрометрический спутник Hipparcos (High Precision Parallax Collection Satellite), точность измерений которого была на порядок больше (0.001"). За четыре года работы этого спутника были определены параллаксы примерно 118000 звёзд, а также большой объем других наблюдений.

С понятием параллакса связана одна из распространенных астрономических единиц измерения: парсек. Парсек это расстояние, с которого большая полуось земной орбиты видна под углом в одну угловую секунду, или, что то же самое, годичный параллакс небесного тела на расстоянии один парсек равен одной угловой секунде. При измерении расстояния в парсеках формула для связи расстояния и параллакса упрощается:

$d [\text{парсек}] = \frac{1}{\alpha [\text{угл.секунд}]}$, где α - годичный параллакс. Выраженный в других единицах измерения длины 1 парсек = 206265 а.е. = $3.08568 \cdot 10^{13}$ км = 3.2616 св.лет.

Яркость небесных тел. Шкала звездных величин.

Помимо координат небесных тел и расстояния до них важной для наблюдения характеристикой является яркость небесного тела. Существует несколько характеристик яркости, как и в случае с различными системами координат следует быть аккуратным и во избежание путаницы в случае сомнения консультироваться со справочником.

Абсолютной характеристикой яркости звезды является ее светимость L — полная мощность, излучаемая с поверхности звезды. Это определение в астрономии отличается от определения в «лабораторной» фотометрии, где светимостью называют световой поток, излучаемый единичной площадью. Иногда используется определение светимости звезды, как мощности, излучаемой в единичный телесный угол (т.е. $L' = \frac{L}{4\pi}$). В некоторых задачах выделяют

светимость в определенной части спектра электромагнитных волн (например, в видимой или рентгеновской части спектра). Светимость измеряется в единицах мощности (Ватт) либо в относительных единицах (например, в единицах светимости Солнца). Солнечная светимость

$L_{\odot} = 3.827 \times 10^{26}$ Вт. Светимость ближайшей к нам звезды — Проксима Центавра составляет $5 - 12 \times 10^{-5} L_{\odot}$, светимость яркой компоненты Сириуса (Сириус — ярчайшая звезда нашего звездного неба, является двойной звездой) $25.4 L_{\odot}$.

Видимая яркость небесного светила b — это мощность излучения объекта, приходящаяся на единичную площадь в месте расположения наблюдателя. Видимая яркость связана со светимостью очевидным соотношением $b = \frac{L}{4\pi d^2}$ (d — расстояние до звезды). Видимая

яркость Солнца, выраженная в абсолютных величинах, составляет 1387 Вт/м^2 .

По историческим причинам, для характеристики яркости звёзд пользуются понятием

видимой звездной величины. Введение этой шкалы приписывают древнегреческому астроному Гиппарху, который объединил самые яркие звезды в группу «звезд первой величины», менее яркие — в звезды второй, третьей и так далее величины. Таким образом, в шкале видимых звездных величин большая звездная величина соответствует более тусклой звезде. С развитием методов наблюдения появилась возможность действительно измерять видимую яркость звёзд в абсолютных величинах и эти измерения в 19 веке показали, что по сложившейся шкале видимая яркость звезды первой величины примерно в 100 раз больше чем видимая яркость звезды шестой величины. В связи с этим, для сохранения привычной шкалы было принято решение принять отличие на 1 звездную величину соответствующим различию интенсивности в $\sqrt[5]{100} \approx 2.512$ раз. Кроме этого, конечно необходимо было зафиксировать видимую яркость, соответствующую звезде нулевой величины 0^m . В практических целях, опорной яркостью может служить яркость Веги (точное значение — 0.03^m). Видимая звездная величина объекта определяется таким образом как

$$m = -2.512 \lg \frac{b}{b_0} \quad (\text{здесь } b \text{ и } b_0 \text{ — видимая яркость объекта и видимая яркость,}$$

соответствующая нулевой звездной величине).

Приведем для примера видимые звездные величины различных объектов (данные с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apparent_magnitude):

Ригель с расстояния 1 а.е.	-38.00 ^m
Сириус с расстояния 1 а.е.	-30.30 ^m
Солнце с Меркурия в перигелии (ближайшая точка орбиты)	-29.30 ^m
Солнце с Земли	-26.74 ^m
Солнце с Нептуна	-19.30 ^m
средняя яркость Луны в полнолуние	-12.74 ^m
вспышка сверхновой SN1006, зарегистрированная в 1006 году н.э.	-7.50 ^m
Яркость дневного неба, на квадратную минуту дуги	-5 ^m
Максимальная яркость Венеры, максимальная яркость отраженного света от международной космической станции МКС	-4.67 ^m
предел наблюдения невооруженным глазом светящихся объектов в условиях нормальной солнечной освещенности	-4.00 ^m
минимальная яркость Венеры	-3.82 ^m
максимальная яркость Юпитера	-2.94 ^m
максимальная яркость Марса	-2.91 ^m
минимальная яркость Луны (новолуние)	-2.50 ^m
максимальная яркость Меркурия	-2.45 ^m
минимальная яркость Юпитера	-1.61 ^m

Сириус (α Большого Пса) (самая яркая звезда на нашем небе)	-1.47 ^m
Канопус (α Киля)	-0.72 ^m
Полная яркость двойной звезды α -Центавра	-0.27 ^m
Арктур (α Волопаса)	-0.04 ^m
Вега (α Лиры)	0.03 ^m
Солнце с α -Центавра	0.5 ^m
Полярная звезда (α Малой Медведицы)	1.97 ^m
туманность Андромеды	3.44 ^m
Предел наблюдения невооруженным глазом ночью в городе	3...4 ^m
Максимальная яркость крупнейшего спутника Юпитера — Ганимеда.	4.38 ^m
Предел наблюдения средним невооруженным глазом	6.5 ^m
Максимальная яркость Урана	5.32 ^m
Звезда HD 85828 (самая слабая наблюдаемая невооруженным глазом звезда)	7.72 ^m
Абсолютный предел наблюдения невооруженным глазом	7...8 ^m
Максимальная яркость Нептуна	7.78 ^m
предел наблюдения на телескопе Хаббл и больших наземных телескопах	30 ^m

Различие в видимой звездной величине самого яркого и самого тусклого небесных тел наблюдаемых с Земли составляет примерно 55^m, что соответствует отличию видимой яркости в 10²² раз.

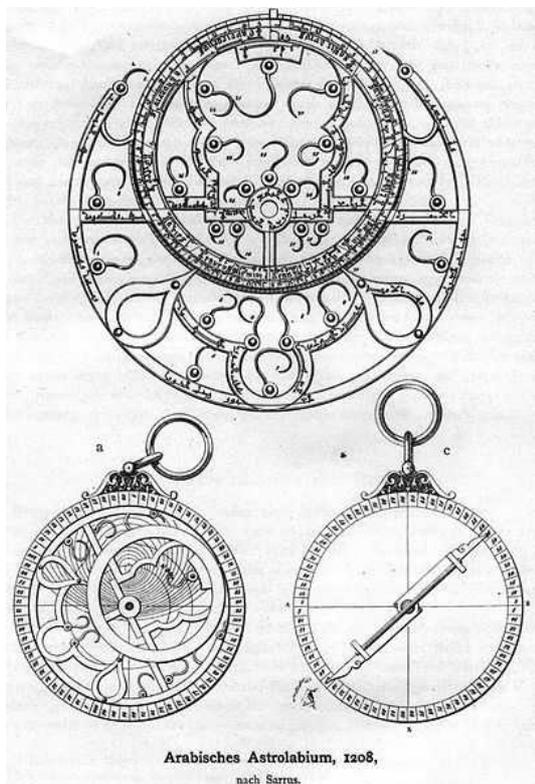
Помимо видимой звездной величины используется также понятие абсолютной звездной величины M . Абсолютная звездная величина небесного тела по определению равна его видимой звездной величине для наблюдателя, находящегося на расстоянии 10 парсек. Эта величина, очевидно, прямо связана со светимостью объекта. Зная расстояние до объекта d (в парсеках) и его видимую звездную величину m , можно легко вычислить абсолютную

звездную величину:
$$M = -2.512 \lg \left(\left(\frac{d}{10} \right)^2 \frac{b}{b_0} \right) = -5.024 \lg \frac{d}{10} + m .$$

Наблюдения невооруженным глазом.

Невооруженный глаз — то есть обычный, здоровый глаз (точнее, два глаза) человека являются древнейшим наблюдательным прибором. Никакой альтернативы этому прибору не было до начала 17 века, когда появились первые оптические телескопы. Единственным подспорьем на протяжении предыдущих нескольких тысячелетий астрономических наблюдений были различные приспособления для фиксации положения небесных тел (от

переносных астрольбии или секстанта до стационарных сооружений типа Стоунхенджа). С точки зрения преподавания физики интересно оценить физические ограничения, накладываемые на наблюдения невооруженным глазом.



Arabisches Astrolabium, 1208,
nach Sarrus.

Рисунок 6: Персидская астрольбия, рисунок с сайта <http://ru.wikipedia.org/>



Рисунок 7: Стоунхэндж, фотография с сайта <http://ru.wikipedia.org/>

Первое из ограничений — спектральная чувствительность прибора. Глаз регистрирует только электромагнитное излучение в видимой части спектра с длиной волны примерно от 400нм до 700нм с максимумом чувствительности близким к максимуму спектральной интенсивности солнечного света около 550нм (что является показателем высокой степени оптимизации наших органов зрения, выработанной в ходе эволюции).

Второе ограничение — угловое разрешение прибора. Каково минимальное угловое расстояние между небесными объектами, которое может различить глаз? Есть два ограничения: одно физическое — это дифракционный предел на зрачке, и одно биологическое — это густота расположения чувствительных клеток (палочек и колбочек) на сетчатке глаза. Оценить дифракционный предел проще всего: диаметр зрачка составляет от 1 до 8 миллиметров, так как наблюдения обычно происходят в темноте возьмем в качестве оценки $D=5\text{мм}$. На длине волны 550нм, соответствующей максимуму чувствительности глаза дифракционный угол отклонения лучей от прямолинейного будет составлять

$$\frac{\lambda}{D} = 10^{-4} \text{ рад} = 0.28' \approx 20'' .$$

Для оценки биологического ограничения необходимо знать некоторую информацию об устройстве глаза: характерный диаметр глазного яблока составляет около 23-24мм, сетчатка покрывает примерно 72% внутренней площади глазного яблока, сетчатка содержит около 6-7 миллионов колбочек (менее чувствительные, но «быстрые», рецепторы) и 110-125 миллионов палочек (высокочувствительные рецепторы, способные к регистрации единичных фотонов). Простой расчет показывает, что средняя

плотность палочек $\frac{N}{S} = \frac{N}{0.72 \times \pi d_{\text{глаблока}}^2} \approx 92000 \frac{1}{\text{мм}^2}$, в действительности распределение палочек неоднородно и плотность меняется от 20000 до 200000 палочек на квадратный миллиметр. Соответственно, характерное расстояние между палочками $\sqrt{\frac{S}{N}} = 2...3 \text{ мкм}$.

Вспоминая, что диаметр глазного яблока 23-24 миллиметра, получаем, что лучи, приходящие на соседние палочки должны расходиться на угол примерно $\sqrt{S/N} / d_{\text{глаблока}} \approx 10^{-4} \text{ рад} = 20''$. Физическое и биологическое ограничения практически совпали, что еще раз говорит о высокой степени оптимизации глаза. Отметим здесь, что Тихо Браге (1546-1601), вероятно последний из великих астрономов эры «невооруженного глаза», составил свои таблицы с точностью до одной угловой минуты, то есть практически приблизился к пределу угловой чувствительности глаза.

Наконец, важным для астрономии ограничением является чувствительность по интенсивности регистрируемого излучения. Оценим, какова минимальная интенсивность регистрируемого глазом излучения по сравнению с привычным нам солнечным светом. Видимая яркость Солнца составляет примерно 1400 Вт/м². Считая для оценки, что вся эта энергия сосредоточена в районе максимума спектральной интенсивности 550нм, и принимая площадь зрачка в 10мм² получаем, что поток фотонов, попадающих в глаз равен

$$n = \frac{WS}{h\nu} = \frac{WS\lambda}{hc} = 4 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{сек}}$$

(эта оценка завышена, так как не учитывает поглощения в атмосфере и не учитывает, что часть спектра невидима глазу).

Как мы уже отметили, чувствительные рецепторы (палочки) способны регистрировать единичные фотоны. Глаз воспринимает как стационарную картинку с частотой смены в 25-50Гц (вспоминаем частоту кадров в кино). Таким образом, хорошей оценкой для минимального числа фотонов, дающих стационарную картинку, будет 100 фотонов в секунду. То есть глаз в состоянии регистрировать источники света в $4 \cdot 10^{14}$ раз слабее Солнца. Легко определить, какому отличию в видимой звездной величине соответствует это отличие видимых интенсивностей (считая площадь зрачка по прежнему равной 10 мм²):

$$\Delta m = -2.512 \lg \frac{b_1}{b_2} = -2.512 \lg \frac{n_1/S_1}{n_2/S_2} \approx -36.6^m$$

. Видимая звездная величина Солнца с Земли

-26.6^m, что дает оценку для звездной величины самой слабой звезды, наблюдаемой с Земли в 10^m. Реально, как мы уже говорили предел лежит на несколько звездных величин выше (до 8^m для особо чувствительных глаз, около 6^m для среднего глаза и около 4^m в условиях фоновой городской засветки), что в основном связано с необходимостью различать тусклые небесные тела на фоне более ярких.

На чистом ночном небе невооруженным глазом можно различить до 2500 звёзд при идеальных атмосферных условиях, в центре крупного города из за загрязненности воздуха и фоновой засветки это число уменьшается до 200-500. Невооруженным глазом видны Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, по некоторым данным в ряде древних культур (Китай и цивилизации Центральной Америки) фиксировались наблюдения Урана и спутников Юпитера. Также некоторые искусственные спутники Земли заметны невооруженным глазом.

Оптические телескопы.

Телескопы-рефракторы.

Как мы уже отметили, с измерениями Тихо Браге в конце 16 века наблюдательная астрономия достигла предела точности измерений, доступного невооруженному глазу. Дальнейший прогресс наблюдательной астрономии был связан с изобретением телескопа. Вопрос о изобретателе телескопа является для нас не принципиальным, несколько человек считаются вероятными изобретателями: по некоторым данным описание простейшего двухлинзового телескопа было обнаружено в записках Леонардо да Винчи (но тут необходимо иметь в виду общую «мифологизацию» фигуры Леонардо, по мнению других исследователей такая трактовка записок Леонардо, посвященных оптике, является попыткой выдать желаемое за действительное); более достоверным считается авторство голландского очкового мастера Ханса Липперсгея (1570-1619), его изобретение датируется 1608 годом (по легенде, его дети играя с выпуклой и вогнутой линзами случайно обнаружили увеличительный эффект этой системы линз). Что важнее для астрономии — это то, что уже в 1609 году Галилео Галилей (1564-1642) конструирует по примеру голландского свой телескоп и направляет его на небо.

Рассмотрим оптическую схему простейшего двухлинзового телескопа-рефрактора.

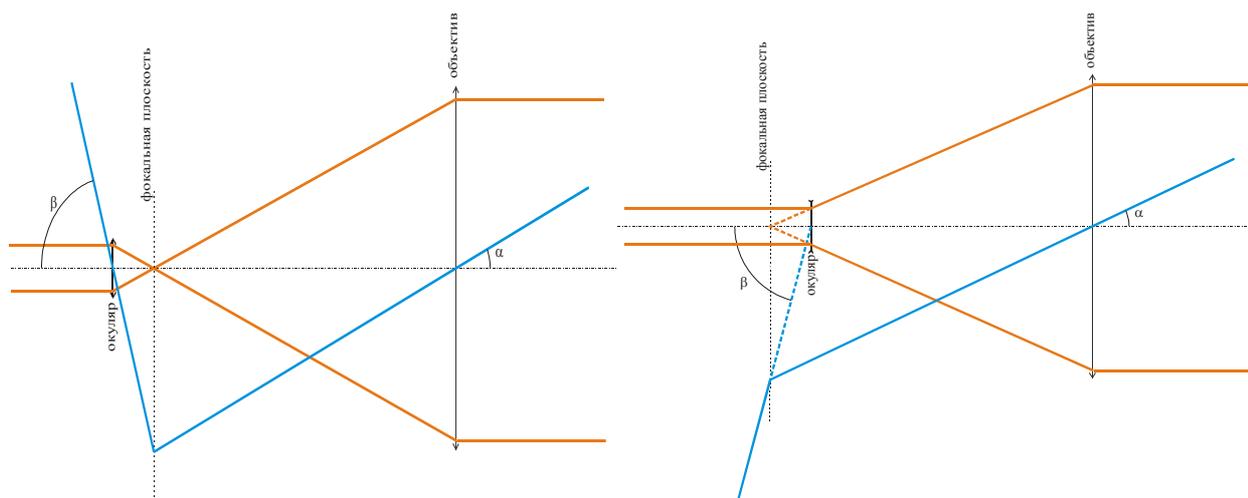


Рисунок 8: Оптическая схема простейшего телескопа. Слева: схема Кеплера, справа: схема Галилея. Красным цветом показано преобразование параллельного пучка, синим — отклонение пучка, проходящего через оптические центры линз.

Телескоп состоит из двух линз (объектива и окуляра), установленных так, что их главные оптические оси и фокусы совпадают. Есть две разновидности такого телескопа: одна из них состоит из двух собирающих линз и называется схемой Кеплера (эта схема предложена И.Кеплером в 1611 году как усовершенствование первых телескопов Галилея), вторая — схема Галилея содержит рассеивающую линзу в качестве объектива (рисунок 8). В обеих схемах фокусы объектива и окуляра совпадают, поэтому телескоп преобразует параллельный пучок лучей, падающий на объектив, в параллельный пучок, выходящий из окуляра. Схема Кеплера дает перевернутое изображение, схема Галилея (будучи прямым наследником «земной» подзорной трубы) — прямое. Преимуществом схемы Кеплера является более широкое поле зрения при той же длине (падающему под углом пучку не обязательно попадать на линзу окуляра до пересечения оптической оси прибора).

Усиливающее действие оптического телескопа заключено в двух эффектах: концентрации светового потока и угловом увеличении.

Концентрация светового потока позволяет собрать (потерями пренебрегаем) все излучение с площади объектива и сконцентрировать его на площади окуляра, равной в оптимальных условиях размеру сенсора (например, размеру зрачка). Таким образом, даже довольно скромный телескоп с диаметром объектива 10 см усиливает интенсивность светового пучка

в $\left(\frac{D_{\text{объектива}}}{d_{\text{зрачка}}}\right)^2 \approx 400$ раз, что позволяет наблюдать объекты видимая звездная величина которых на $2.512 \lg(400) = 6.5^m$ больше, чем предел наблюдения невооруженным глазом.

Возникновение углового увеличения понятно из рисунка 8— преломленный «синий» луч имеет больший наклон к оси системы, чем падающий. В приближении малых углов легко заметить (рассмотрев прямоугольные треугольники, гипотенузой которых является «синий»

луч, а общий катет лежит в фокальной плоскости), что $\frac{\beta}{\alpha} = \frac{F}{f}$ (F и f – фокусные расстояния

объектива и окуляра, соответственно). Соответственно, подбором длиннофокусной линзы объектива и короткофокусной линзы окуляра можно достичь улучшения угловой разрешающей способности в десятки и сотни раз. Заметим также, что отношение диаметров объектива и окуляра, определяющее светосилу, в оптимальном случае из подобия треугольников равно отношению фокусных расстояний.

Интересно отметить, что при фотографировании изображения в телескопе окуляр не нужен — фотопластинка (или светочувствительная матрица) помещается в фокальную плоскость объектива. Объектив по прежнему играет роль концентратора светового потока, а вот углового увеличения при этом нет — разрешение достигается просто за счет геометрического размера системы: при фокусном расстоянии 1м углу в 1" соответствует смещение точки фокуса на 5мкм. Для сравнения, коммерческие матрицы для фотоаппаратов имеют линейный размер порядка 20мм на который приходится несколько тысяч точек, что соответствует расстоянию между чувствительными элементами в примерно 10мкм.

Как и у всякой системы линз у телескопов рефракторов есть врожденная проблема, связанная с дисперсией показателя преломления стекла. С этим можно бороться, создавая сложные линзы из нескольких слоев с разной дисперсией. Кроме этого есть технический предел увеличения диаметра объектива: линза большого диаметра становится слишком тяжелой и страдает от внутренних деформаций и тепловых расширений, связанных с суточным перепадом температур. Увеличение фокусного расстояния объектива также налагает жесткие требования к обеспечению сохранности главной оптической оси (напомним, что для нас важны и секунды углового отклонения), что не позволяет увеличивать общую длину телескопа (в основном определяемую фокусным расстоянием объектива) больше примерно десятка метров.

Первые телескопы Галилея имели апертуру (диаметр объектива) около 4 сантиметров, фокусное расстояние объектива 50-100 сантиметров и угловое увеличение 3х-34х. И уже эти простые приборы позволили ему обнаружить спутники Юпитера, фазы Венеры, пятна на Солнце и заметить кольца Сатурна (точнее, Галилей заметил некоторые «придатки» у Сатурна, рассмотреть сами кольца его приборы не позволили).

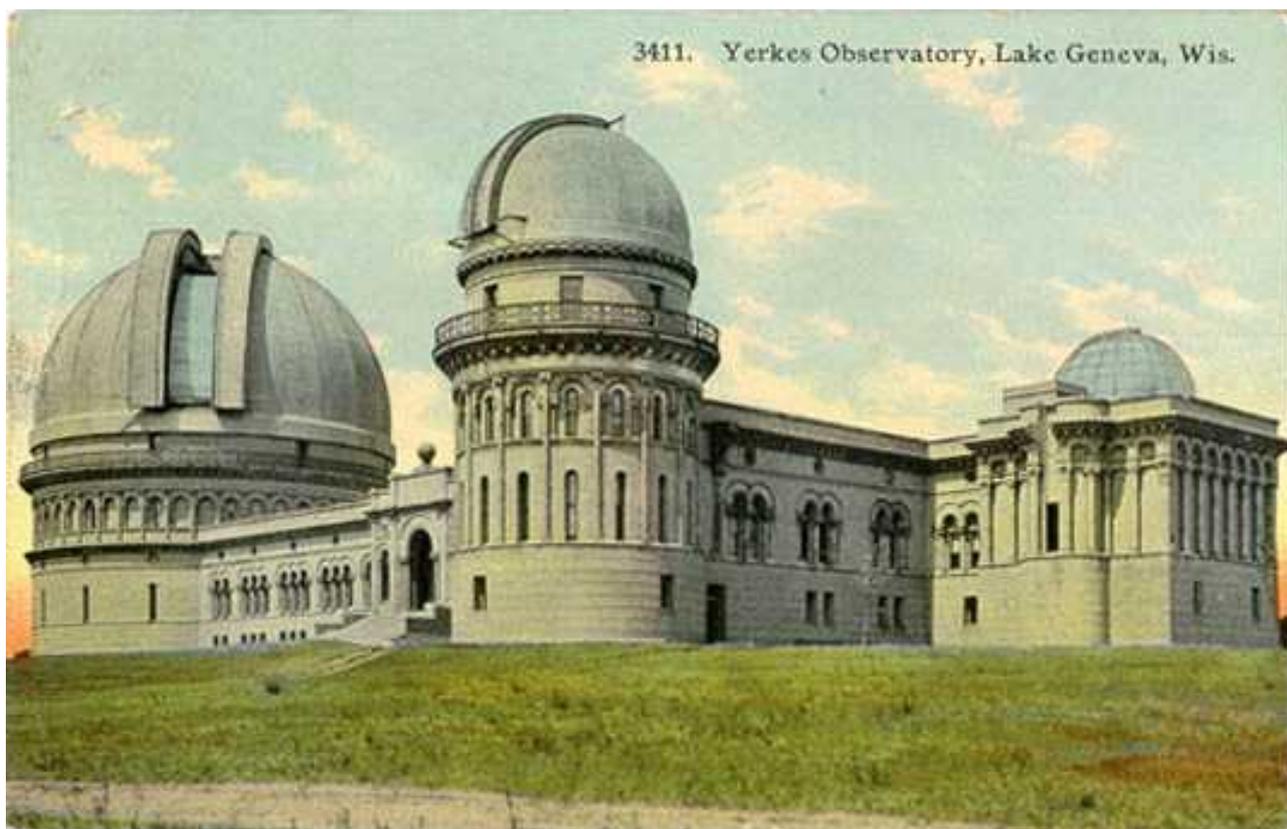


Рисунок 9: Комплекс зданий обсерватории Йерка (с сайта <http://www.aip.org/history/cosmology/tools/pic-refractors-yerkes.htm>)

Крупнейший из современных рефракторов расположен Обсерватории Йерка Университета Чикаго (обсерватория названа в честь американского финансиста Чарльза Йерка, финансировавшего её строительство). Этот телескоп был сконструирован в конце 19 века, он демонстрировался на Чикагской выставке 1893 года. Диаметр объектива этого телескопа 102 сантиметра (40 дюймов). Составная линза объектива этого телескопа весит около 500 фунтов (примерно 200 килограмм) ее фокусное расстояние 62 фута (примерно 18 метров). Общий вес телескопа (с противовесом) около 20 тонн (рисунки 9, 10, 11, 12).

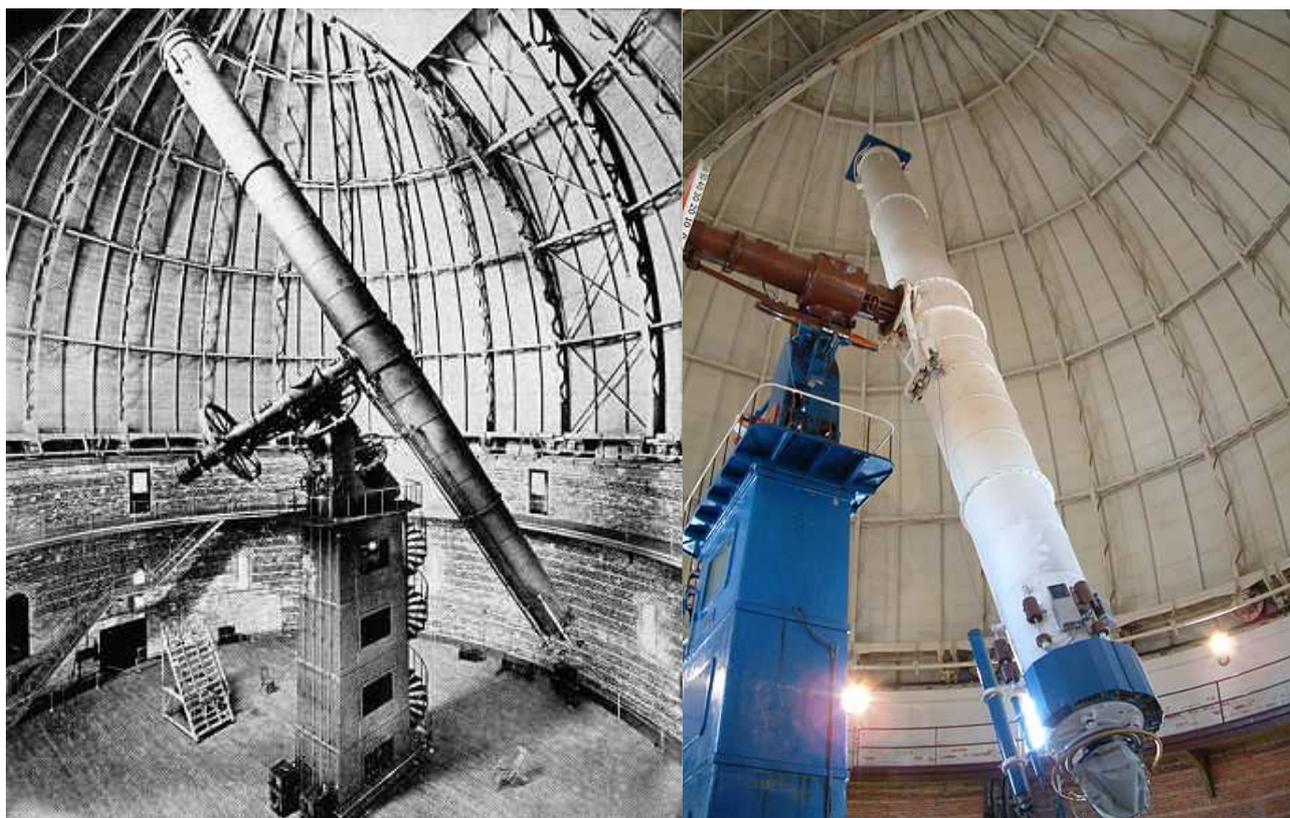


Рисунок 10: Телескоп обсерватории Йерка, фотография 1897 года (с сайта <http://en.wikipedia.org/>)

Рисунок 11: Телескоп обсерватории Йерка, фотография 2006 года (с сайта <http://en.wikipedia.org/>)



Рисунок 12: Фотография Луны, полученная в 1901 году в Обсерватории Йерка (с сайта <http://astro.uchicago.edu/yerkes/research.html>)

Телескопы-рефлекторы

Другой оптической схемой телескопа является схема телескопа-рефлектора, впервые предложенная И.Ньютоном примерно в 1670 году. В этом телескопе в качестве объектива используется зеркало сферической или параболической формы (рисунки 13, 14). Выигрышем по сравнению с линзовой оптикой рефлектора является принципиальное отсутствие хроматических aberrаций, а также возможность изготовления зеркал большого диаметра, так как для решения механических задач обеспечения прочности появляется пространство за зеркалом. Диаметр зеркала телескопа Ньютона составлял всего 3 сантиметра, угловое увеличение 40х. Диаметр составного зеркала современного рефлектора (для примера использован Большой Канарский Телескоп - *The Gran Telescopio CANARIAS*, введённый в строй в 2007 году) составляет 10.4 метра.



Рисунок 13: Современная копия телескопа-рефлектора, представленного И.Ньютоном Королевскому научному сообществу в 1672 году. (фото с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Newtonian_telescope)

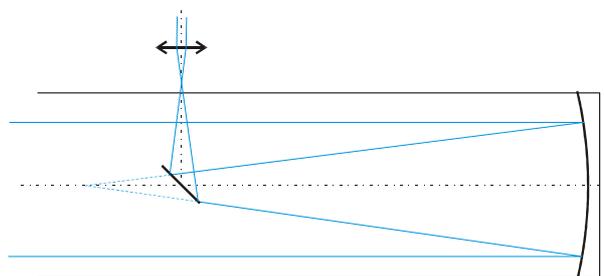


Рисунок 14: Оптическая схема рефлектора Ньютона.

Технической проблемой является расположение наблюдателя — если в схеме рефрактора наблюдатель находится за телескопом, то линза рефлектора отражает свет перед телескопом, то есть наблюдатель затеняет собой объектив. Строго говоря, в некоторых случаях это не является проблемой: при диаметре зеркала в несколько метров иногда оказывается проще поместить детектор изображения в фокус зеркала и смириться с небольшим затенением, чем бороться с искажениями, возникающими при отклонении светового пучка (так называемая схема прямого фокуса). В небольших же телескопах обычно используют вторичное зеркало, выводящее сфокусированный пучок за поле зрения главного зеркала. В схеме Ньютона (на рисунке 14) для этого используется плоское зеркало, установленное под углом 45° . Существуют и другие схемы рефракторов, отличающиеся деталями оптической схемы отклонения пучка. В схеме Кассегрена, например, вторичное зеркало имеет выпуклую форму и отражает пучок в отверстие в главном зеркале.

Интересно отметить, что наличие вторичного зеркала на пути падающего света, наличие наблюдателя на пути падающего света в схеме прямого фокуса или наличие отверстия в главном зеркале в схеме Кассегрена приводит только к уменьшению интенсивности

изображения, но не к искажению или «закрытию» части изображения. Для проверки этого утверждения достаточно вспомнить известный в оптике факт, что часть линзы или часть зеркала создает такое же изображение, что и целая линза или зеркало.



Рисунок 15: Зеркало Большого канарского телескопа во время чистки. Видны шестиугольные сегменты зеркала. (с сайта <http://www.gtc.iac.es/en/pages/observing-with-gtc/data-commissioning.php>)

Оптической проблемой рефлекторов являются геометрические аберрации и кома. Идеальным для фокусировки пучка является параболическое зеркало, однако его существенно труднее изготовить, чем сферическое. (А точность изготовления поверхности должна быть меньше чем длина волны фокусируемого излучения! Так, точность изготовления поверхности зеркала диаметром 8.2 метра для Южной европейской обсерватории в Чили составила 8.5 нанометров.) У сферического же зеркала фокусное расстояние изменяется по мере удаления от оптической оси. Этот разброс фокусных расстояний приводит к размытию (абберации) изображения. С другой стороны, у параболического зеркала возникают сильные искажения изображения при построении изображения предмета, не находящегося на оптической оси, так называемая кома. В небольших телескопах для коррекции этих искажений используются

дополнительные корректирующие линзы.

Тот факт, что пространство за главным зеркалом рефлектора оказывается доступным для техники, позволяет также применить технологии контроля за формой зеркала. Большие зеркала делаются составными (зеркало Большого Канарского Телескопа, упомянутого выше, состоит из 36 сегментов), положение каждой части можно немного изменять. Эти сегменты видны на фотографии на рисунке 15. Изменение геометрии зеркала телескопа может преследовать две цели. Первая, так называемая активная оптика, производит статические перемещения сегментов зеркала, призванные компенсировать, например, деформацию конструкции под действием силы тяжести при изменении положения зеркала (напомним, что при диаметре 10 метров точность положения поверхности в больших телескопах определяется масштабом в 10 нанометров!). Вторая цель изменения геометрии зеркал — это так называемая адаптивная оптика. Это динамическая схема коррекции светового пучка, призванная компенсировать размытие изображения из-за атмосферных флуктуаций. При этом в больших телескопах обычно изменяется не форма большого зеркала, а форма дополнительного зеркала, стоящего на пути пучка после главного зеркала. Рассмотрим работу системы адаптивной оптики подробнее.

Адаптивная оптика в современных рефлекторах.

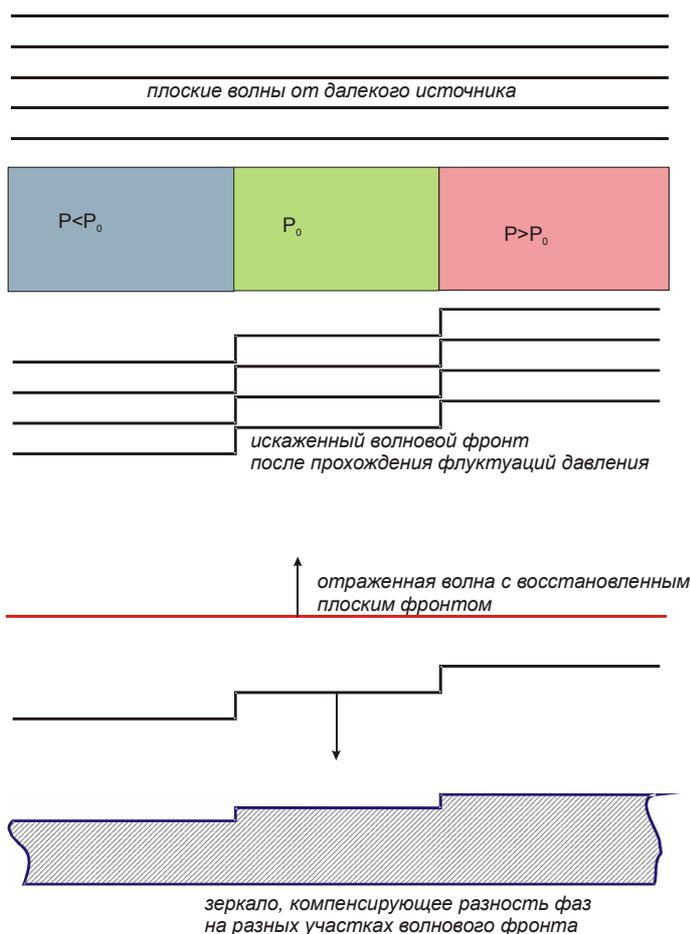


Рисунок 16: Схема восстановления плоского фронта адаптивной оптикой.

Одной из причин, ограничивающих разрешающую способность телескопов на Земле, являются атмосферные флуктуации. Флуктуации приводят к тому, что случайным образом возникают неоднородности атмосферного давления и плотности воздуха. Из-за небольшого различия показателя преломления в областях с разным давлением плоский фронт волны, исходящей от далекого источника (звезды) при прохождении флуктуаций перестает быть плоским (рисунок 16).

Соответственно, и фокусировка такой волны зеркалом, рассчитанным на падение плоской волны невозможна и возникнет размытие изображения. Это размытие может быть оценено по видимому угловому диаметру точечного источника света (далекой звезды). Типичное значение размытия в условиях высокогорных обсерваторий — около 1 угловой секунды. В условиях обсерватории Мауна Кеа на Гавайях (<http://www.ifa.hawaii.edu/mko>),

считающейся одним из лучших мест для наблюдения за звездным небом (высота над уровнем моря 4205 метров и особенно стабильные атмосферные условия благодаря окружающему океану) наблюдается рекордно малое размытие видимого диска в 0.5 угловой секунды. Эти искажения существенно меньше предела наблюдения невооруженным глазом (примерно 30"), но для вооруженного телескопом глаза они очень существенны.



Рисунок 17: Очень Большой Телескоп (VLT, Very Large Telescope) Европейской южной обсерватории в Чили использует лазерный луч для настройки системы адаптивной оптики (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_optics)



Рисунок 18: Вид из купола телескопа Кек2 (Обсерватория Мауна Кеа, Гавайи) во время работы адаптивной оптики. (с сайта http://cosmicmatters.keckobservatory.org/2007/dec/07dec_2.htm)

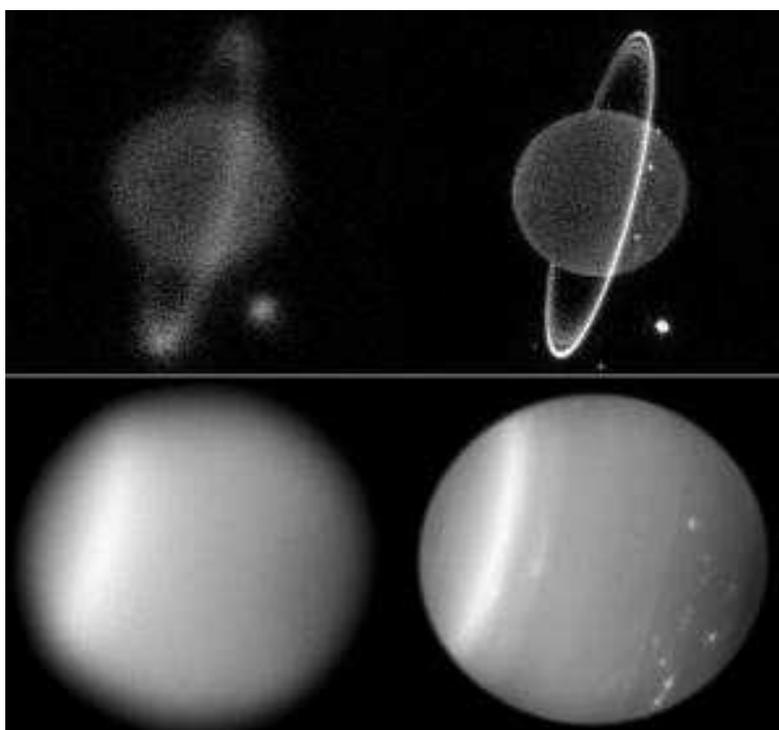


Рисунок 19: ИК изображения Урана до и после использования адаптивной оптики на телескопе Кек2 (Обсерватория Мауна Кеа, Гавайи). (С сайта <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/11/041114234904.htm>)

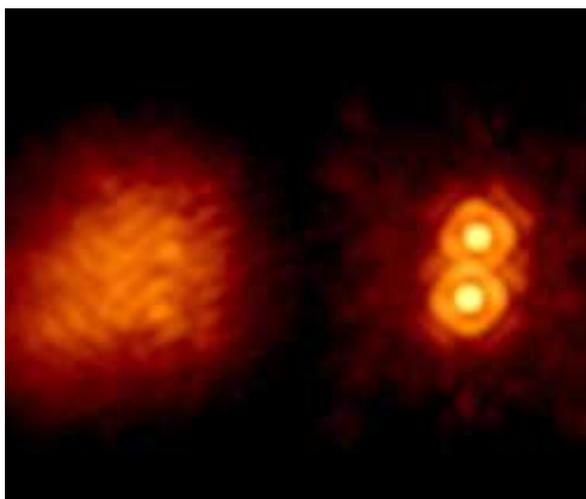


Рисунок 20: Двойная звезда в созвездии Тельца (IW Tau). Слева - изображение без адаптивной оптики, справа - с использованием системы адаптивной оптики. Угловое расстояние между звездами 0.3". (С сайта <http://instrumentsystems.jpl.nasa.gov/active/wavefrontsen/index.cfm>)

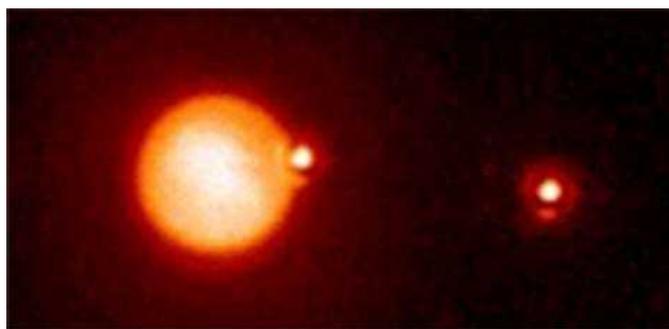


Рисунок 21: Полученное с помощью адаптивной оптики изображение прохождения Титана (одна из лун Сатурна, большой диск на рисунке) перед двойной звездной системой NV0435215+200905. Угловое расстояние между звездами (маленькие диски) около 1.5". Видно искажение изображения большой звезды из-за наличия у Титана атмосферы. Изображение в инфракрасном спектре получено на 200-дюймовом (5.1 метра) телескопе Хэйл в обсерватории Паломар (Калифорния). Цвет передает интенсивность. Изображение с сайта

<http://palomarskies.blogspot.com/2010/08/astrophoto-friday-saturns-moon-titan.html>

Для борьбы с эффектом атмосферных флуктуаций большие обсерватории стараются разместить высоко в горах, где воздух уже разрежен. К счастью, эти флуктуации оказываются достаточно медленными, и оказывается возможным изменять «в реальном времени» форму зеркала так, что перемещения сегментов корректирующего зеркала частично компенсируют расфазировку разных частей падающего пучка на атмосферных флуктуациях (рисунок 16). Для контроля изображения используется либо одна из звезд в поле зрения телескопа, либо используется луч лазера, светящийся в атмосферу от телескопа по его оптической оси (рисунки 17, 18).

При использовании лазера пользуются тем, что на высоте около 90 км в атмосфере земли существует большая концентрация ионов натрия, приносимых метеоритами. Поэтому луч лазера, настроенный по длине волны излучения на частоте на одну из спектральных линий натрия, вызывает активное свечение в этих слоях — для наблюдателя возникает «искусственная звезда» за пределами плотных слоев атмосферы. Прошедший через флуктуации в плотных слоях атмосферы луч лазера размывается или даже разделяется на несколько лучей. Система обратной связи старается так подобрать положения сегментов корректирующего зеркала, чтобы изображение контрольной звезды или пятно рассеянного света от лазера имело наименьший размер. Таким образом удается улучшить угловое разрешение на порядок (до примерно 0.05"). Системы активной оптики обычно используются в телескопах, работающих в инфракрасном диапазоне (длина волн больше длины волны видимого света). Примеры изображений, полученных при помощи систем адаптивной оптики показаны на рисунках 19, 20, 21.

Дифракционный предел телескопа.

Независимо от оптической схемы телескопа (рефлектор или рефрактор) есть одна общая физическая причина, ограничивающая угловое разрешение телескопа — это дифракция на входной апертуре телескопа. Из-за дифракции возникает расходимость волны на угол $\Theta \sim \frac{\lambda}{D}$. Соответственно, оказывается невозможно различить объекты на небесной сфере, угловое расстояние между которыми меньше этого угла. Таким образом, увеличение диаметра объектива помимо увеличения светочувствительности телескопа улучшает и предельное угловое разрешение телескопа, уменьшая дифракционный предел.

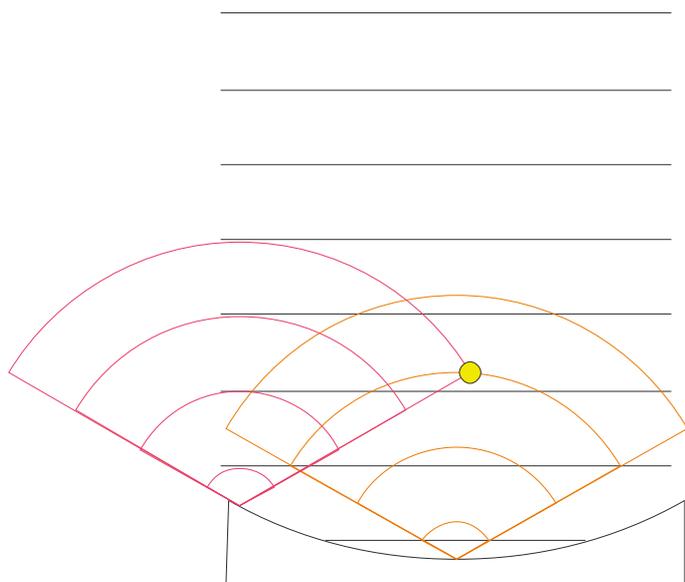


Рисунок 22: Дифракция вторичных волн на кривой поверхности зеркала. Вторичные волны собираются в фазе в точке, совпадающей с фокусом зеркала.

Напомним происхождение этого предела. Рассмотрим более наглядный случай рефлектора. При объяснении принципа фокусировки зеркала с точки зрения геометрической оптики мы пользуемся законом отражения и учитываем форму зеркала. Однако, как известно, аналогичный результат можно получить и с волновой точки зрения, пользуясь принципом Гюйгенса. Вторичные волны в фокусе сходятся в фазе. Из-за того, что до «дна» вогнутого зеркала первичная волна идет чуть дольше, точка, в которой вторичные волны от «дна» и края зеркала сходятся в фазе оказывается ближе к «дну» (рисунок 22) (действительно, для сферического зеркала фокусное расстояние равно $R/2$).

Если падающая волна распространяется вдоль оси зеркала, то на симметричные точки на поверхности зеркала волновой фронт приходит одновременно. Если пучок света падает наклонно, то на краях зеркала возникает разность фаз $\Delta \phi = (D \sin \Theta) / \lambda$, где Θ — угол наклона пучка к оси. Из-за этого у вторичных волн возникнет дополнительная разность фаз и точка максимума интенсивности также сместится с оси зеркала. Но для того, чтобы заметить это смещение разность фаз должна быть заметной, откуда и возникает оценка $\Delta \phi \sim 1$, т.е.

$\Theta \sim \frac{\lambda}{D}$. Если форма зеркала не круглая, то дифракционный предел в разных направлениях различен — он является наилучшим (минимальным) в направлении большого размера зеркала.

Интересно отметить, что в оптимально сконструированном телескопе для оценки дифракционного предела не важен размер окуляра. Хотя окуляр и меньше по диаметру, большие углы дифракционного отклонения в нем в точности компенсируются угловым увеличением телескопа, что приводит к той же по величине неопределенности в определении углового расстояния между объектами на небесной сфере.

Дифракционный предел большого рефрактора обсерватории Йерка (диаметр объектива 102 сантиметра) составляет 0.1". Для 10-метрового рефлектора Большого Канарского Телескопа

— 0.01".

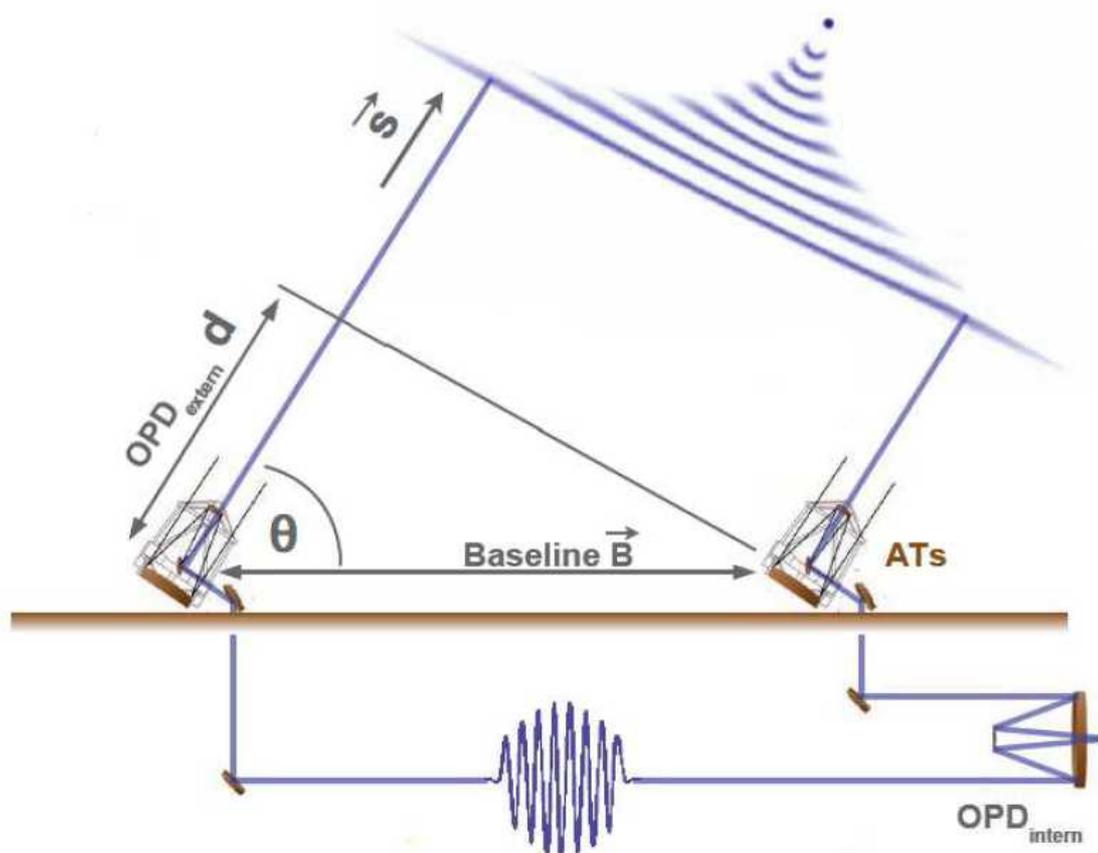


Рисунок 23: Схема использования двух одинаковых телескопов в интерферометрической схеме (из "Astrometric Measurement Techniques", Sabine Reffert). Подбор задержки, необходимой для получения интерференционной картины при заданной базе интерферометра позволяет точно определить разность хода лучей и, соответственно, точно определить направление на звезду.

Дополнительный выигрыш может дать использование интерферометрической схемы, объединяющей несколько телескопов. Не вдаваясь в технические подробности реализации, это можно себе представить как то, что световые пучки из двух телескопов сводятся вместе и интерферируют (рисунок 23). При этом оба телескопа играют роль крайних точек воображаемого «большого зеркала» в наших предыдущих рассуждениях. Характерным размером, определяющим дифракционный предел оказывается при этом не диаметр объектива индивидуального телескопа, а расстояние между телескопами (конечно этот предел реализуется в направлении прямой, соединяющей два телескопа, в поперечном направлении он остается связанным с диаметром зеркала). Так, телескопы Кек1 и Кек2 обсерватории Мауна Кеа на Гавайях (каждый из которых сам по себе является внушительным 10-метровым рефлектором) могут быть объединены в интерферометр с базой 85 метров, что позволяет еще на порядок увеличить угловое разрешение.

Также необходимо отметить, что дифракционный предел ограничивает принципиальную возможность различить два близких объекта, но не ограничивает возможность определения угла между двумя разрешимыми объектами с точностью, превышающей дифракционный

предел. Действительно, из-за дифракции на апертуре телескопа точечный источник света превращается в пятно на чувствительной матрице или фотопластинке (причем форма этого пятна близка к кругу для обычно круглой апертуры). Но угловое расстояние между различными звездами соответствует расстоянию между центрами этих пятен, а это расстояние может быть определено с точностью большей, чем размер пятна. По этой причине размер астрометрических телескопов достаточно скромны, например уже упоминавшийся телескоп спутника Гиппаркос (Hipparcos) является рефрактором с зеркалом диаметром 29 сантиметров, при этом достигнутая им точность в определении угловых расстояний составляет около 0.001".

Наблюдения в неоптическом диапазоне.

Как показал И.Ньютон, даже видимый свет содержит в себе целый спектр излучения разных цветов. Поэтому с появлением и развитием спектроскопии в 19 веке появились и астрономические применения спектрографов. Одним из известных примеров является наблюдение в спектре Солнца линий неизвестного тогда на Земле химического элемента гелия (Локьер и Жансен, ок. 1870). Но, как мы с вами знаем, спектр электромагнитного излучения гораздо богаче видимого диапазона — он включает и радиочастоты с длинами волн, измеряемыми метрами и километрами, и инфракрасное излучение (микрометры), и ультрафиолетовое излучение (100 нм) и рентгеновское (10 нм). И, конечно, интересно расширить инструментарий астрономического наблюдения на весь спектр.

Почему это интересно? Излучение поверхности нагретых тел описывается законом излучения абсолютно черного тела. Описание закона излучения черного тела было одним из первых важных результатов квантовой физики, и за введенную для этого описания концепцию кванта излучения Макс Планк был позднее удостоен Нобелевской премии. Одним из следствий закона излучения черного тела является (эмпирически установленный до работ Планка) закон смещения Вина, согласно которому частота, соответствующая максимальной интенсивности излучения, пропорциональна температуре тела. Для нашего глаза частота излучения воспринимается как цвет, красному свечению соответствуют температуры около 1000К, голубому — около 10000К. Излучение же более холодных или более горячих тел глазу не доступно. Но доступно приборам. Есть и другие, нетепловые источники излучения в неоптическом диапазоне, наблюдение за которыми позволяет распознать интересные физические явления происходящие во Вселенной. Таким образом, расширение астрономического инструментария в неоптическую область спектра позволяет, в конечном итоге, лучше и полнее понимать суть происходящих во Вселенной процессов.

Прозрачность атмосферы.

Одной из главных проблем для наблюдений в неоптическом диапазоне является прозрачность (а точнее, непрозрачность) земной атмосферы: атмосфера прозрачна в оптическом диапазоне для излучения с длинами волн от примерно 300 нм (ближний ультрафиолет) до 2000 нм (ближнее инфракрасное излучение) и в радиодиапазоне для излучения с длинами волн от 1мм до 15-30 метров. Эта непрозрачность важна для биологической жизни на Земле (например, поглощение озоновым слоем части ультрафиолетового излучения), но принципиально ограничивает наземного наблюдателя оптическим и радиодиапазонами. Для наблюдения в остальной части спектра необходимо как минимум подниматься на десятки километров над поверхностью земли, что приводит к необходимости использования ракет для кратковременного подъема наблюдательных приборов или спутников для

долговременного наблюдения.

Техника наблюдения в инфракрасном или ультрафиолетовом диапазоне достаточно близка к техникам, используемым при наблюдениях в видимой части спектра, поэтому на этом мы останавливаться не будем.

Радиотелескопы.



Рисунок 24: "Карусель" Карла Янски, современная реплика в Национальной радиоастрономической обсерватории США. Фото с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_telescope



Рисунок 25: Радиотелескоп Ребера, фото с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_telescope

Осуществление астрономических наблюдений в радиодиапазоне стало возможным к середине 20 века с развитием радиотехники. Обнаружение радиоисточников на звездном небе связывается с исследованиями по выяснению источников помех для трансатлантической радиотелефонии, проводимых инженером Лаборатории Белла Карлом Янским в 1931 году. Для локации источника помех он собрал систему антенн-диполей примерно 30 метров в

длину и 6 метров в высоту. Для локации источника помех конструкция была сделана поворотной, за что её прозвали «каруселью» (рисунок 24). Антенны были настроены на частоту около 20 МГц (длина волны около 15 метров). Измерения показали, что часть помех возникает из-за грозных разрядов, но кроме этого существует источник интенсивность которого меняется с периодом 23 часа 56 минут — то есть с периодичностью вращения Земли. Сравнение с картой звездного неба позволило определить, что источником на небесной сфере является Млечный путь, а максимум интенсивности приходится на созвездие Стрельца (в котором находится центр нашей Галактики). Первый специально сконструированный радиотелескоп был сконструирован радиолюбителем из Витона (Иллинойс, США) Гротом Ребером в 1937 году. Это была привычная нашему современному взгляду «тарелка» с диаметром зеркала 9 метров (рисунок 25).



Рисунок 26: Крупнейший одиночный радиотелескоп с цельным зеркалом в обсерватории Арекибо, Пуэрто-Рико. Фотография с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_telescope.

Принцип работы такого радиотелескопа совпадает с принципом работы рефлектора — параболическое металлическое (или «сетчатое», но с размером ячейки меньшим длины волны) зеркало фокусирует радиоизлучение в точку, в которой находится детектор излучения. При этом, как и для оптического телескопа, оказывается важным увеличение размера зеркала для увеличения «светосилы» и уменьшения дифракционного предела телескопа.



Рисунок 27: Радиотелескоп РАТАН-600. Слева - общий вид кольца отражателей (с сайта <http://heritage.sai.msu.ru/>), справа - два отражателя (с сайта <http://www.varkhyz.ru/>).

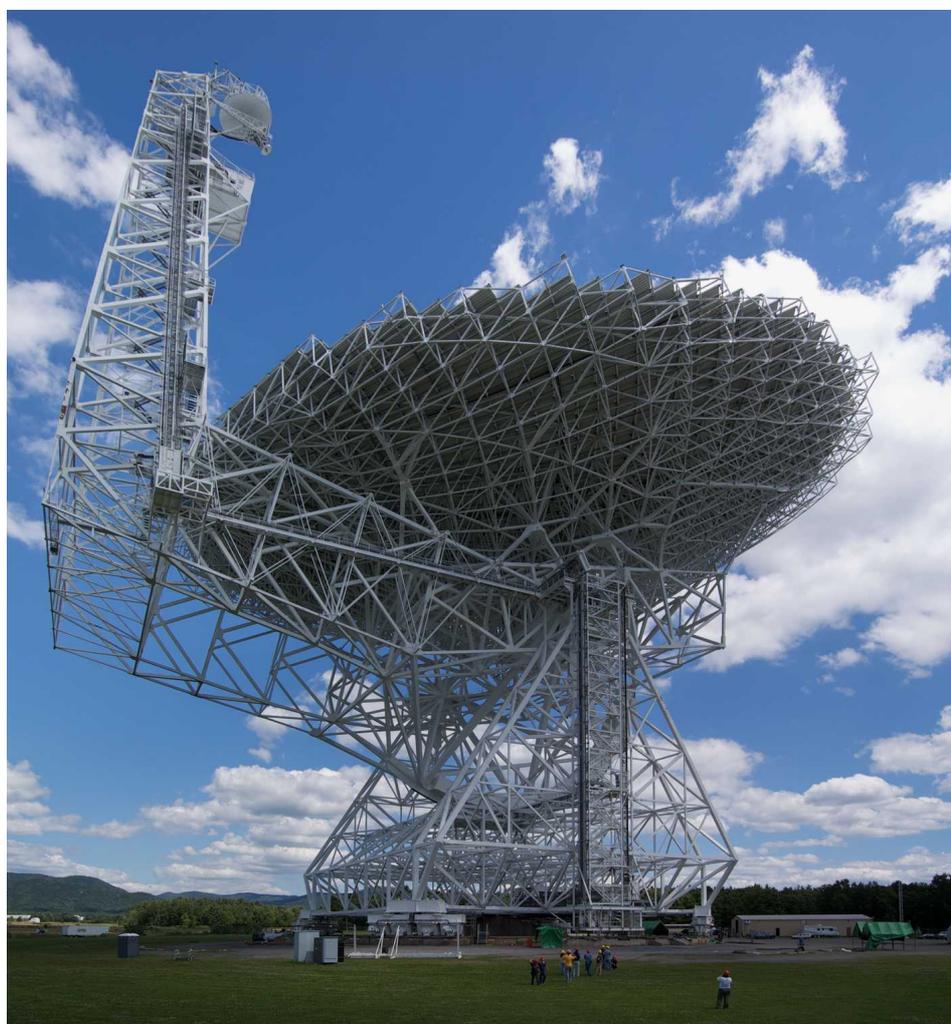


Рисунок 28: Грин Бэнк Телескоп Национальной радиоастрономической обсерватории США (фото с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Green_Bank_Telescope)

Быстрый прогресс радиотехники, связанный с развитием технологии радиолокации, привел к появлению больших и чувствительных радиотелескопов. Крупнейшим радиотелескопом с цельным зеркалом является радиотелескоп обсерватории Арекибо в Пуэрто-Рико, диаметр его зеркала составляет 305 метров (рисунок 26). «Тарелка»-отражатель этого телескопа жестко закреплена на земле и некоторая настройка направления возможна за счет перемещения приемника. Крупнейшим одиночным радиотелескопом является российский (советской постройки 1974 года) радиотелескоп РАТАН-600 (РАдио Телескоп Академии Наук) входящий в состав оборудования Специальной астрофизической обсерватории РАН (<http://www.sao.ru/>), находящейся в Карачаево-Черкесии (Нижний Архыз). Зеркало этого радиотелескопа представляет из себя кольцо диаметром 576 метров, состоящее из 895 плоских отражателей размером 2x7.5 метров (рисунок 27). Дифракционный предел радиотелескопа РАТАН-600 соответствует «тарелке» диаметром 600 метров. Крупнейшим радиотелескопом с полностью поворотным зеркалом является в данный момент Грин Бэнк Телескоп Национальной радиоастрономической обсерватории США, диаметр его зеркала 100 метров (рисунок 28). Характерные рабочие частоты этих радиотелескопов соответствуют метровому и сантиметровому диапазонам: РАТАН-600 — от 610 МГц до 30 ГГц, Грин Бэнк Телескоп — от 290 МГц до 90 ГГц, Арекибо — от 300 МГц до 10 ГГц.



Рисунок 29: Часть Большого Ансамбля радиотелескопов (Very Large Array), с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_telescope. На вставке: спутниковая фотография (Google-карта, 2015).

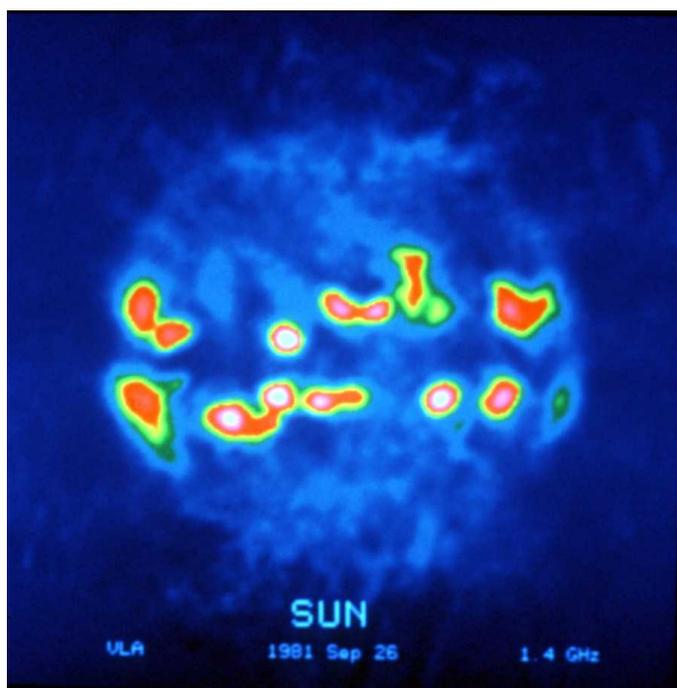


Рисунок 30: Солнце в радиодиапазоне (частота 1.4 ГГц, длина волны 20 см). Цвет показывает интенсивность излучения (красный соответствует максимальной интенсивности). Изображение получено с помощью Большого ансамбля радиотелескопов Национальной радиоастрономической обсерватории США. Изображение с сайта <http://images.nrao.edu/8>.

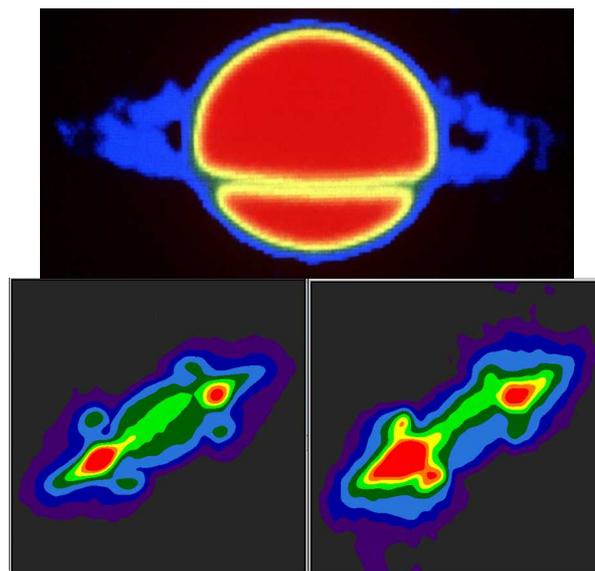


Рисунок 31: Сверху: Сатурн в радиодиапазоне (длина волны 2см, частота 15 ГГц). Внизу: Юпитер в радиодиапазоне (длина волны 20см, частота 1.4ГГц) до (слева) и после (справа) падения кометы Шумахер-Леви. Изображения получены с помощью Большого ансамбля радиотелескопов Национальной радиоастрономической обсерватории США. Изображения с сайта http://images.nrao.edu/Solar_System/Planets.

Как мы уже говорили применительно к оптическим телескопам, интерферометрические техники, объединяющие несколько телескопов, позволяют существенно улучшить дифракционный предел телескопа. Отметим, что так как длина волны в радиодиапазоне примерно в 100000 раз больше, чем в оптическом диапазоне (сравните 500нм и 5см), то для 100 метрового радиотелескопа дифракционный предел углового разрешения составляет примерно 2' (две угловые минуты), что даже хуже, чем дифракционный предел для невооруженного глаза! Однако именно большая длина волны существенно облегчает задачу объединения нескольких телескопов в интерферометрическую схему, позволяя использовать хорошо отработанные радиотехнические решения. Основоположник интерферометрической радиоастрономии сэр Мартин Райл получил в 1974 году Нобелевскую премию по физике в знак признания его заслуг в астрономических исследованиях.

Среди таких ансамблей радиотелескопов, работающих в интерферометрическом режиме, можно отметить Большой Ансамбль (Very Large Array) в штате Нью-Мексико, США. Он состоит из двадцати семи 25-метровых антенн, расположение которых на виде с воздуха напоминает латинскую букву Y с длиной каждого луча 21 километр (рисунок 29). Соответственно, дифракционный предел соответствует антенне диаметром примерно 40 километров. На длине волны 7 мм этим радиотелескопом было достигнуто угловое разрешение в 0.05" (примеры изображений показаны на рисунках 30, 31). В данный момент в Европе создается низкочастотный радиотелескоп Лофар (LOW Frequency ARray), который будет состоять из связанных антенн, расположенных от Великобритании до Германии и

иметь интерферометрическую базу примерно в 1000 километров.

Наконец, из-за большой длины волны в радиодиапазоне возможно точно записать информацию о фазе и амплитуде принятого сигнала, что позволяет (при условии точной синхронизации приёмников по времени) осуществить «интерференцию» сигналов двух удаленных радиотелескопов численно, без необходимости их физического объединения в интерферометрическую систему. Это позволяет практически увеличить базу интерферометрических измерений в радиодиапазоне до диаметра Земли (эта техника интерферометрии известна как «Интерферометрия с очень большой базой» - VLBI, Very Long Baseline Interferometry). Также эта методика позволяет вынести одно из плеч интерферометра в космос, что было реализовано на спутнике Халка (HALCA, Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy), сконструированным японским космическим агентством. Этот спутник с радиотелескопом диаметром 8 метров двигался (1997-2005) по эллиптической орбите с апогеем 21400 км и перигеем 560 км. Таким образом, в апогее база интерферометра превышала диаметр Земли примерно в 3 раза.

В связи с важной ролью для общей картины эволюции Вселенной, необходимо также упомянуть о открытии реликтового излучения в радиодиапазоне — почти изотропного излучения со спектром, соответствующим спектру черного тела с температурой примерно 3К (частота в максимуме интенсивности около 60 ГГц, длина волны в максимуме интенсивности 5мм). Реликтовое излучение является одним из доказательств Большого Взрыва, за его обнаружение была присуждена Нобелевская премия 1974 года (Пенциас и Вильсон), а за открытие анизотропии реликтового излучения — Нобелевская премия 2006 года (Смут и Матер). О связанной с этим физике мы поговорим позднее.

Рентгеновские и гамма-телескопы.

Атмосфера Земли непрозрачна для коротковолновой части спектра. Поэтому наблюдения за звездным небом в рентгеновском диапазоне стали возможны только с развитием ракетной техники. Первые эксперименты конца 40-х начала 60-х годов позволили обнаружить рентгеновское излучение от короны Солнца, а также обнаружить рентгеновские источники вне Солнечной системы. Как и в случае с рождением радиоастрономии, эти первые результаты были в чем-то случайны — основной целью разработки и запуска первых детекторов рентгеновского излучения была военная задача обнаружения атмосферных ядерных взрывов.

В отличие от систем наблюдения на более длинных волнах, в рентгеновском и гамма-диапазонах в принципе невозможно использовать традиционные фокусирующие схемы из-за того, что при падении, близком к нормальному, электромагнитное излучение этого диапазона просто пронизывает материал «зеркала» или поглощается в нем. Эта большая проникающая способность используется в медицинских и дефектоскопических приложениях, однако здесь она является препятствием на пути создания чувствительных приборов для астрономического наблюдения. Одним из способов создания узконаправленного детектора является простое коллимирование падающего излучения поглощающими диафрагмами. Для рентгеновского излучения возможно добиться фокусировки при почти касательном, скользящем падении излучения на поверхность металлического зеркала: на частотах рентгеновского излучения фазовая скорость электромагнитных волн в металле больше скорости света в вакууме (групповая скорость меньше, так что нарушения теории относительности нет!), поэтому для рентгеновского излучения при скользящем падении имеет место «полное внешнее отражение».

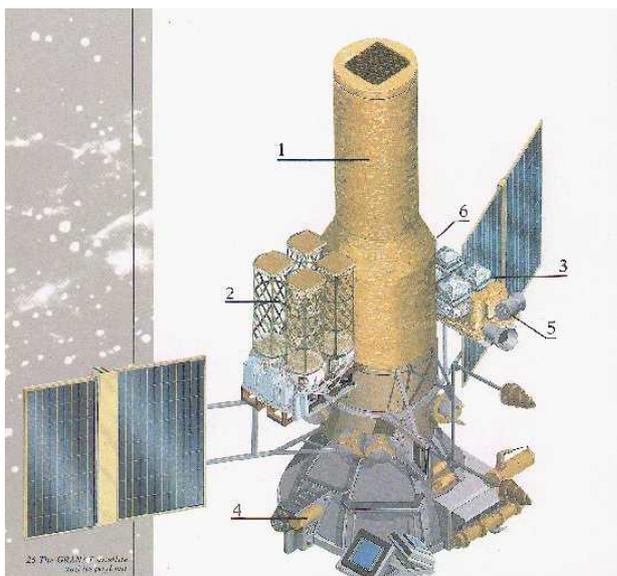


Рисунок 32: Международная астрофизическая обсерватория "Гранат" (СССР, Франция, Дания, Болгария; 1989-1999). Рентгеновские телескопы: 1 - телескоп жесткого рентгеновского излучения SIGMA (40-1300кэВ), 2-рентгеновский телескоп АРТ-II (4-60кэВ). Также на обсерватории были установлены детекторы гамма-вспышек. Рисунок с сайта [http://ru.wikipedia.org/wiki/Гранат_\(обсерватория\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гранат_(обсерватория)).



Рисунок 33: Рентгеновский телескоп Чандра (США) в грузовом люке шаттла "Колумбия". Фотография с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Chandra_X-ray_Observatory.

Рентгеновские телескопы строились и выводились на орбиту многими странами. В частности, в СССР была запущена (разработанная совместно с Францией, Данией и Болгарией) Международная астрофизическая обсерватория «Гранат» (рисунок 32, годы работы: 1989-1999), рентгеновские телескопы устанавливались на орбитальных станциях серии Салют (Салют-4, рентгеновские телескопы «Филин» (0.2-10 кэВ) и РТ-4 (0.15-0.3 кэВ)), в модуле «Квант» орбитальной станции «Мир» (ТТМ (2-30 кэВ), HEXE (15-200 кэВ), «Пульсар X-1» (20-800 кэВ)). Относительно недавно НАСА была запущена рентгеновская обсерватория Чандра (рисунок 33, 1999 год). Это, самый тяжелый из выведенных на орбиту в рамках программы «Шаттл» спутников (23 тонны, включая 10 тонн массы самого телескопа и ракету для вывода телескопа на высокую орбиту). Рентгеновские инструменты обсерватории Чандра работают в диапазоне энергий 0.1-10 кэВ. В 1999 году также была запущена рентгеновская обсерватория Ньютон (XMM-Newton) Европейского космического сообщества с характеристиками, близкими к характеристикам обсерватории Чандра (0.2 -12 кэВ).

В качестве примера обсерватории гамма-диапазона можно привести пример спутника CGRO (Compton Gamma Ray Observatory - Комптоновская гамма-обсерватория) НАСА,

действовавшего с 1991 по 2000 год и проводившего наблюдения на энергиях 30кэВ — 30ГэВ. (Ввиду условности деления между жестким рентгеновским и гамма диапазонами, часть этого диапазона пересекается с областями чувствительности некоторых из описанных выше рентгеновских телескопов.)

Нейтринные обсерватории.



Рисунок 34: Нейтринный детектор Судбури (Канада). Фотография с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Sudbury_Neutrino_Observatory

В завершение перечисления различных телескопов отметим самые необычные из них: «телескопы», предназначенные для обнаружения потоков нейтрино.¹ Нейтрино образуются в результате термоядерных реакций в звездах (первый шаг протонной цепочки реакций

¹ За создание этих нейтринных телескопов в 2002 году была присуждена Нобелевская премия (Дэвис (Брукхэвенская национальная лаборатория) и Кошиба (Супер-Камиоканде)). За открытое при помощи обсерваторий Судбури и Супер-Камиоканде явление нейтринных осцилляций была присуждена Нобелевская премия 2015 года.

образует электронное нейтрино: ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ МэВ}$), предполагается что часть нейтрино должна была возникнуть в первые моменты образования Вселенной. Нейтрино могут составлять часть загадочной «тёмной материи», так как они не взаимодействуют с веществом электромагнитным образом, а проявляют себя только через так называемое «слабое взаимодействие» или гравитационное взаимодействие.

Огромная проникающая способность нейтрино и чрезвычайная слабость взаимодействия с веществом вынуждают прятать нейтринные обсерватории под землю, чтобы надежно экранироваться от других энергичных частиц космического излучения. Существует три вида нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино, причем нейтрино могут превращаться из одного вида в другой (эффект известный как «нейтринные осцилляции»).

Один из методов обнаружения нейтрино заключается в том, что если нейтрино непосредственно столкнется с электроном, то выбитый электрон получает колоссальную энергию и начинает двигаться быстрее скорости света в среде. Такой электрон излучает характерное черенковское излучение¹, которое может быть зафиксировано фотоумножителями. Направление движения электрона примерно совпадает с направлением движения нейтрино, что позволяет определить направление на источник нейтрино. Данный метод (упругое рассеяние нейтрино) обнаруживает в основном электронные нейтрино (это связано с особенностями слабого взаимодействия). Такой детектор нейтрино установлен в лаборатории Супер-Камиоканде в Японии. Он содержит 50000 тонн сверхчистой воды, характерный размер детектора составляет около 40 метров. Детектор окружен примерно 11000 фотоумножителей, детектирующих вспышки черенковского излучения.

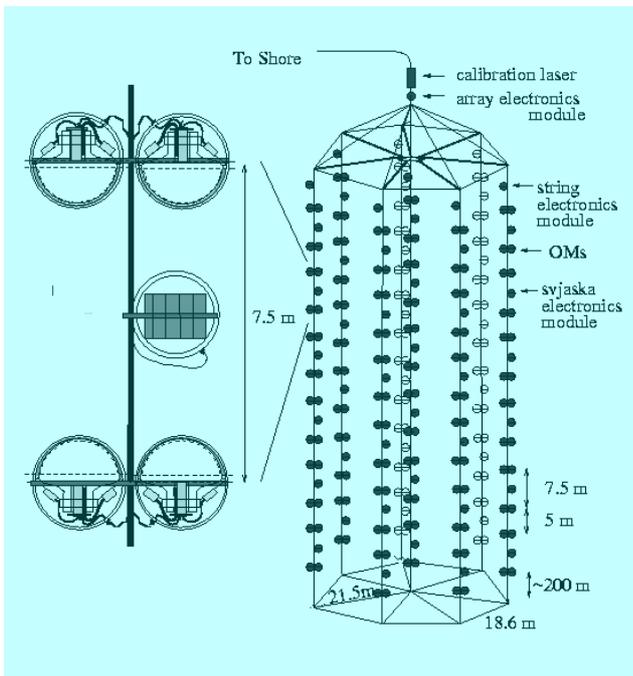


Рисунок 35: Схема нейтринного телескопа "Байкал". Гирлянды оптических датчиков и электронных модулей находятся на глубине примерно 1 километр. (с сайта <http://baikalweb.jinr.ru/>)

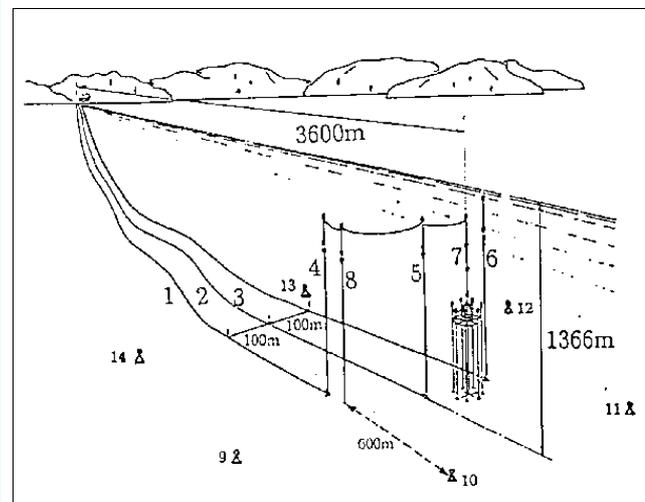


Рисунок 36: Расположение нейтринного телескопа "Байкал" (с сайта <http://baikalweb.jinr.ru/>)

Черенковское излучение (или эффект Вавилова-Черенкова, эффект Вавилова-Черенкова) — это характерное излучение, возникающее при движении заряженной частицы, скорость которой превышает фазовую скорость света в среде. Это явление было открыто советским физиком Павлом Алексеевичем Черенковым (1904-1990, на момент открытия ему было 30 лет), объяснено советскими физиками Таммом и Франком в 1937 году. Черенков, Тамм и Франк были удостоены за это открытие нобелевской премии по физике 1958 года.

Второй способ обнаружения нейтрино основан на реакции, обратной первой реакции протонной цепочки — нейтрино может разбить ядро дейтерия, которое распадается на протон и нейтрон. Нейтрон может быть захвачен ядром дейтерия (с образованием ядра трития), при этом испускается гамма-квант с энергией около 6 МэВ, детектируемый датчиками. Направление излучения гамма-кванта не связано с направлением движения нейтрино. Этот метод одинаково чувствителен ко всем трем типам нейтрино. Детектор такого типа установлен в нейтринной обсерватории Судбери в Канаде (запущен в 1999, рисунок 34). Детектор состоит из 1000 тонн тяжелой воды, находящихся внутри 6-метровой акриловой сферы, и окружен 9600 фотоумножителями. Весь детектор находится в искусственной пещере в конце полуторакилометровой шахты. Эта пещера считается крупнейшей искусственной пещерой, в ней поддерживается уровень чистоты воздуха на уровне стандартов используемых в «чистых комнатах» микроэлектронных производств: в самой шахте на уровне не более 3000 частиц размером более 1мкм на 1м³, в пещере детектора на уровне не более 1000 частиц размером более 1мкм на 1м³ (обычный комнатный воздух содержит около 8000000 частиц размером более 1мкм на 1м³).

Третьим способом обнаружения нейтрино является использование реакции захвата нейтрино нейтроном, приводящей к образованию протона и электрона. В потоке солнечных нейтрино только электронные нейтрино способны на инициацию такой реакции из-за относительно малой энергии солнечных нейтрино. При этом детектируется либо появление электронов, либо возникновение ядер элементов с более высоким атомным числом. По этому принципу работал первый детектор солнечных нейтрино, собранный в конце 60-х годов в Брукхэвенской национальной лаборатории США. Детектор состоял из примерно 450 м³ тетрахлорэтилена C₂Cl₄, жидкого реагента обычно применяемого в химчистке, погруженных в шахту на глубину примерно 1400 метров. При превращении одного нейтрона в протон из ядра ³⁷Cl образуется ядро радиоактивного изотопа аргона ³⁷Ar. Танк с реагентом продувался несколько раз в неделю гелием, после чего полученный после продувки газ анализировался на наличие изотопа аргона.

Нейтринные телескопы есть и в России. Телескоп «Байкал» (начало работ в 1993 году; 1993-1996 первые 36 оптических датчиков; 1996-1997 — 96 датчиков, 1997-1998 — 144 датчика; с 1998 — 200 датчиков, в будущем планируется дальнейшее увеличение количества датчиков) - является одним из крупнейших нейтринных телескопов с датчиком «водяного» типа (как японский телескоп Камиоканде). Он использует в качестве резервуара с чистой водой природную воду озера Байкал (напомним, что Камиоканде использует резервуар, содержащий «всего» 50000 тонн воды). Телескоп состоит из гирлянд с оптическими датчиками, погруженных на глубину 1 километр (рисунки 35, 36). Эффективный объем датчика составляет не менее 80000 м³, что больше объема детектора Камиоканде. Другой отечественный нейтринный телескоп находится в Баксанской нейтринной обсерватории, расположенной в Баксанском ущелье в Кабардино-Балкарии. Его детектор (SAGE, Soviet-American Gallium Experiment; запущен в 1989 году, продолжает работу в настоящее время, хотя по некоторым сведениям работа детектора пострадала в 90-х от экономической и политической неопределённости) состоит из примерно 50 тонн металлического галлия и определяет превращения в ходе обратного бета-распада атомов галлия в атомы германия: $\nu_e + {}_{31}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}_{32}^{71}\text{Ge} + e^-$. В Баксанской обсерватории, в частности, были зарегистрированы нейтринные вспышки от сверхновой 1987 года.

Лекция 2. Основы классической небесной механики. Возникновение звёзд и планетных систем.

Гравитация в классической механике.

Основной силой, определяющей взаимное движение небесных тел (на масштабах от движения спутника вокруг планеты до движения и вращения Галактик) является сила взаимного притяжения — гравитация. При введении нового понятия в курсе физики обычно пытаются объяснить его какими-то аналогиями или более простыми понятиями. Однако с гравитацией (как и с электромагнитным полем) это невозможно сделать корректно, оставаясь вблизи рамок школьной программы. Точнее говоря, даже за рамками школьной программы невозможно объяснить это, не уходя в весьма специфические области теоретической физики (типа теории струн), а объяснение, возникающее в таких теориях не специалисту совершенно непонятно. Имеющиеся популярные штампы: «гравитация — мера/причина/свойство кривизны пространства-времени» также на самом деле не говорят ничего не специалисту, а для специалиста будут в лучшем случае наивной интерпретацией, а в худшем — ошибочной точкой зрения дилетанта. В то же время, тот факт, что слово «гравитация» знакомо нам со школы, порой приводит к тому, что каждый видит в себе силы «просто и популярно» объяснить природу этого явления, что приводит к появлению различных лженаучных теорий. Получается своеобразная дилемма: и объяснить нельзя, и не объяснять нельзя.

Одним из способов вырваться из этого замкнутого круга, является подход к описанию фундаментальных взаимодействий с точки зрения наблюдателя в современной нам Вселенной. А этот наблюдатель может определить, что всего проявляется 4 вида взаимодействий¹, не сводящихся друг к другу: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. И, соответственно, есть поля, описывающие это взаимодействие, а на квантовом языке описания взаимодействия есть частицы, обмен которыми приводит к возникновению взаимодействия. Гравитационное поле, как и электромагнитное поле, есть объективно существующая в нашей Вселенной форма материи — его можно измерить, определить его напряженность. Еще раз подчеркнем: все теории объединения взаимодействий предполагают связь различных взаимодействий друг с другом только на очень ранних этапах развития Вселенной, сразу после Большого Взрыва. В современной Вселенной эти взаимодействия независимы и не упрощаемы, то есть не сводятся ни к каким «более понятным» вещам. В наших лекциях мы будем (за исключением некоторых специальных вопросов) придерживаться именно такого подхода.

Огромный объем экспериментальных наблюдений (как лабораторных, так и астрономических), позволяет сформулировать закон всемирного тяготения в классической механике (предполагая медленность движений по сравнению со скоростью света и достаточную удаленность от объектов с очень сильными гравитационными полями):

$$\vec{F}_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \vec{n}_{12}, \text{ где } G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2) \text{ — гравитационная постоянная, } \vec{n}_{12} \text{ —}$$

единичный вектор из точки нахождения 1-ого тела в точку нахождения 2-ого тела.

Закон всемирного тяготения утверждает, таким образом, что существует характеристика

¹ Мы намеренно не рассматриваем вопросы, связанные с открытием бозона Хиггса: считать хиггсовское взаимодействие пятым фундаментальным взаимодействием или нет. Это отдельный сложный вопрос, не существенный для данного курса.

материи, называемая гравитационной массой, которая является единственным источником гравитационного поля, и что гравитационное поле точечной массы сферически симметрично. Закон обратных квадратов возникает при этом естественным образом, как требование сохранения числа силовых линий, пронизывающих поверхность, окружающую нашу массу. С этой ситуацией мы встречаемся также и в электростатике при рассмотрении закона Кулона. Поэтому, по тем же математическим причинам, как и для электростатического поля, для гравитационного поля верна теорема Гаусса (поток вектора напряжённости гравитационного поля через любую замкнутую поверхность определяется только заключённой внутри поверхности массой $\Phi_G = \int \vec{E}_G \cdot d\vec{S} = 4\pi G m$), а само гравитационное поле потенциально, то есть работа по перемещению массы не зависит от траектории. Потенциал гравитационного поля, как легко заметить, равен $\phi = -G \frac{m}{r}$.

В законах классической динамики, как мы помним, фигурирует инерциальная масса — мера инерции тела. Тождественность этих двух масс является одним из постулатов общей теории относительности Эйнштейна. Современные эксперименты показывают, что отличие инерционной и гравитационной масс не может превышать $\delta m/m \sim 10^{-13}$.

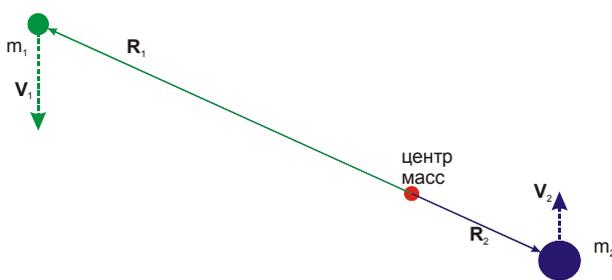
Таким образом, законы классической механики в принципе позволяют описать движение системы тел, связанных гравитационным взаимодействием (с упомянутой оговоркой про нерелятивистские скорости движения и не слишком сильные гравитационные поля). Для каждого из тел рассматриваемой системы мы можем написать $m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i$, где

$$\vec{F}_i = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij} = \sum_{i \neq j} G \frac{m_i m_j}{r_{ij}^2} \vec{n}_{ij}$$

Математическая трудность заключается в том, что эту задачу для трех и более тел в общем виде можно решить только численно. Аналитически же разрешима только задача двух тел.

Задача двух тел. Законы Кеплера.

Рассмотрим два точечных тела, гравитационно взаимодействующих друг с другом. Пусть нам известны массы тел m_1, m_2 , их начальные координаты \vec{R}_1, \vec{R}_2 и скорости \vec{V}_1, \vec{V}_2 .



Так как никаких сил, помимо взаимного притяжения (а сила взаимного притяжения является внутренней силой для системы двух тел) нет, то центр масс системы должен покоиться либо двигаться равномерно.

Координаты центра масс $\vec{R}_{ц.м.} = \frac{\vec{R}_1 m_1 + \vec{R}_2 m_2}{m_1 + m_2}$,

Рисунок 37: Описание движения двух тел в системе покоя центра масс.

скорость движения центра масс $\vec{V}_{ц.м.} = \frac{\vec{P}}{m_1 + m_2} = \frac{\vec{V}_1 m_1 + \vec{V}_2 m_2}{m_1 + m_2}$ (рисунок 37).

Для дальнейшего рассмотрения задачи удобнее перейти в систему координат, в которой центр масс покоится и находится в начале координат. В дальнейшем мы будем предполагать именно такой выбор начала координат (пересчёт в «систему покоя центра масс» из исходной системы является тривиальным: $\vec{R}' = \vec{R} - \vec{R}_{ц.м.}$, $\vec{V}' = \vec{V} - \vec{V}_{ц.м.}$).

Отметим, что в системе покоя центра масс скорости наших двух тел всегда антипараллельны

(так как полный импульс равен нулю). Более того, легко видеть, что $\vec{R}_2 = -\frac{m_1}{m_2} \vec{R}_1$ и

$$\vec{V}_2 = -\frac{m_1}{m_2} \vec{V}_1 .$$

Так как сила взаимного притяжения направлена вдоль прямой, соединяющей тела, то движение тел будет всегда происходить в плоскости, содержащей в себе вектора скорости тел в данный момент и вектор $\vec{r}_{12} = \vec{R}_2 - \vec{R}_1$, соединяющий положения тел в данный момент.

В дальнейшем нам понадобится для упрощения некоторых вычислений математическое понятие векторного произведения, которое довольно часто используется в физике. По определению, векторным произведением векторов \vec{a} и \vec{b} называется вектор $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$, модуль которого $c = ab \sin(\phi)$ (где ϕ — угол между \vec{a} и \vec{b}), а направление определяется по правилу буравчика при повороте от первого вектора ко второму. Векторное произведение по модулю равно площади параллелограмма, образуемого векторами-сомножителями, и вдвое больше по модулю площади треугольника, построенного на этих векторах. Векторное произведение линейно по своим компонентам: $\vec{a} \times (\vec{b}_1 + \vec{b}_2) = \vec{a} \times \vec{b}_1 + \vec{a} \times \vec{b}_2$. При перемене мест сомножителей векторное произведение меняет знак: $\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$. В декартовых координатах компоненты векторного произведения выражаются через компоненты сомножителей следующим образом: $[\vec{a} \times \vec{b}]_x = a_y b_z - a_z b_y$, $[\vec{a} \times \vec{b}]_y = -a_x b_z + a_z b_x$, $[\vec{a} \times \vec{b}]_z = a_x b_y - a_y b_x$. В физике понятие векторного произведения позволяет однозначно оперировать такими понятиями как момент силы ($\vec{M} = \vec{F} \times \vec{R}$), момент импульса ($\vec{L} = \vec{p} \times \vec{R}$), наглядно связать угловую и линейную скорости ($\vec{V} = \vec{\Omega} \times \vec{R}$), а также в удобной векторной форме записывать некоторые уравнения электродинамики.

В нашей задаче есть две сохраняющиеся величины: энергия (так как гравитационное поле потенциально) и момент импульса (так как нет сторонних сил). Выпишем соответствующие законы сохранения:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} - G \frac{m_1 m_2}{r_{12}} = E_0 = const$$

(Как можно непосредственно убедиться, вычислив работу по перемещению тел относительно друг друга, в потенциальной энергии двух тел не должно быть никаких множителей «2».)

$$m_1 \vec{V}_1 \times \vec{R}_1 + m_2 \vec{V}_2 \times \vec{R}_2 = \overrightarrow{const} = \vec{L}_0 .$$

Закон сохранения энергии позволяет сразу сказать, будут ли наши два тела двигаться финитно (по орбитам в ограниченном пространстве), или же они могут разойтись на бесконечно большое расстояние. Первому случаю соответствует $E_0 < 0$, второму $E_0 \geq 0$.

Воспользуемся теперь тем, что мы находимся в системе покоя центра масс, в которой, как мы показали выше, координаты и скорости тел однозначно связаны друг с другом. Тогда можно легко показать, что можно записать сохраняющиеся величины для каждого из тел. Из закона сохранения момента импульса:

$$\vec{V}_1 \times \vec{R}_1 = \overrightarrow{const}$$

$$\vec{V}_2 \times \vec{R}_2 = \overrightarrow{const}$$

Из закона сохранения энергии:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} - G \left(\frac{m_2}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2} \right) \frac{m_1}{R_1} = const$$

$$\frac{m_2 V_2^2}{2} - G \left(\frac{m_1}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)^2} \right) \frac{m_2}{R_2} = const$$

То есть, каждое тело движется так, как если бы второго тела не было, а в точке центра масс находилось бы неподвижное тело с эффективной массой $m'_2 = \frac{m_2}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2}$ для первого тела и

$$m'_1 = \frac{m_1}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)^2} \text{ для второго.}$$

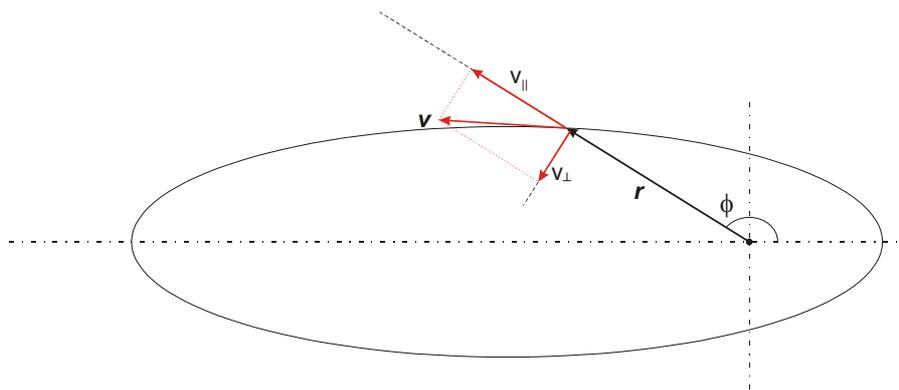


Рисунок 38: К определению орбиты: полярные координаты для эллипса, разложение скорости на компоненты.

Покажем теперь, что при финитном движении траектория движения каждого из тел будет эллипсом, в фокусе которого находится центр масс системы (то есть докажем первый закон Кеплера). Эллипс можно описать в полярных координатах следующим уравнением:

$r = \frac{p}{1 - \epsilon \cos(\phi)}$. Параметр p называется фокальным параметром эллипса, параметр ϵ — эксцентриситетом эллипса ($\epsilon = 0$ соответствует окружности, $\epsilon = 1$ — параболе, $\epsilon > 1$ — гиперболе). Полуоси эллипса могут быть выражены через эти параметры, большая полуось равна $a = \frac{p}{1 - \epsilon^2}$, а малая полуось $b = \frac{p}{\sqrt{1 - \epsilon^2}}$.

Для дальнейшего доказательства вычислим производную $\frac{dr}{d\phi}$:

$$\frac{dr}{d\phi} = -\frac{p}{(1 + \epsilon \cos(\phi))^2} \epsilon (-\sin(\phi)) = r^2 \frac{\epsilon}{p} \sin(\phi) = \pm r \sqrt{\frac{\epsilon^2 - 1}{p^2} r^2 + 2 \frac{r}{p} - 1}$$

из-за неопределенности выражения синуса через косинус, знак «+» соответствует верхней половине эллипса, «-» нижней половине.

Перейдем теперь к нашей физической задаче. Разложим скорость движущегося тела на компоненты параллельную и перпендикулярную радиус-вектору. Из закона сохранения момента импульса (с учетом специфики системы центра масс и по определению векторного произведения): $V_{\perp} r = \text{const} = A$. Из закона сохранения энергии (с учетом специфики системы центра масс и обозначив через M эффективную массу «расположенную» в точке центра масс): $V_{\parallel}^2 + V_{\perp}^2 - 2G \frac{M}{r} = \text{const} = B$. Константы A и B задаются начальными

условиями задачи. Заметим что, по определению, $V_{\perp} = r \frac{d\phi}{dt}$ и $V_{\parallel} = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{dt}$.

Откуда $\frac{dr}{d\phi} = \frac{r V_{\parallel}}{V_{\perp}} = \frac{1}{A} r^2 V_{\parallel} = \pm r \sqrt{\frac{B}{A^2} r^2 + \frac{2GM}{A^2} r - 1}$. Это выражение имеет тот же вид, что и выписанное нами выше выражение для эллипса, следовательно траекторией движения будет эллипс. Что и требовалось доказать.

Фокальный параметр этого эллипса равен $p = \frac{A^2}{GM}$, эксцентриситет: $\varepsilon^2 = 1 + \frac{A^2 B}{(GM)^2}$.

Финитному движению соответствует $B < 0$, при этом большая полуось эллипса $a = -\frac{GM}{B}$, малая полуось $b = \frac{A}{\sqrt{-B}}$.

Второй закон Кеплера (или закон площадей) непосредственно следует из выписанных выше уравнений, полученных из закона сохранения момента импульса. За время dt перемещение тела есть $\vec{V} dt$, а площадь, заметаемая при этом радиус вектором равна

$$d\vec{S} = \frac{1}{2} (\vec{V} dt) \times \vec{r} \quad (\text{направление вектора площади, как обычно, определяется по правилу}$$

буравчика по направлению движения по траектории). Отсюда $\frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{1}{2} \vec{V} \times \vec{r} = \overrightarrow{\text{const}}$, то есть «площади заметаемые радиус-вектором, проведенным из точки центра масс, за одинаковое время равны».

Знание параметров эллипса и второго закона Кеплера позволяет найти период обращения. Из закона площадей, используя определенные нами константы: $\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2} A$, а полная площадь

эллипса есть $S = \pi a b = -\pi \frac{GMA}{B\sqrt{-B}}$. Откуда период обращения

$$T = \frac{S}{(dS/dt)} = -2\pi \frac{GM}{B\sqrt{-B}}. \quad \text{Отметим теперь, что и период обращения и большая полуось}$$

орбиты выражаются через один и тот же параметр начальных условий B . Этот параметр можно исключить соответствующим подбором степеней, откуда получаем формулировку третьего закона Кеплера:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Это и есть формальное выражение третьего закона Кеплера: «Квадраты периодов обращения двух планет соотносятся как кубы больших полуосей их орбит». Это утверждение, строго говоря, подразумевает, что планеты не влияют друг на друга, и что Солнце гораздо массивнее

планет — тогда отличие эффективной массы от реальной массы Солнца несущественно и можно считать, что именно Солнце находится в фокусе эллипса орбиты.

Для системы тел с произвольными массами это выражение можно переписать в более удобной форме, воспользовавшись тем, что большие оси орбит обоих тел лежат на одной прямой, точки максимального и минимального удаления от центра масс проходятся обоими телами одновременно и периоды орбитального движения совпадают. Тогда, как легко заметить, среднее минимального и максимального расстояний между телами равно

$$P = \frac{r_{12}^{(max)} + r_{12}^{(min)}}{2} = a_1 + a_2 = a_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \quad \text{и} \quad \frac{P^3}{T^2} = \frac{1}{4\pi^2} G (m_1 + m_2) .$$

То есть отношение квадратов периодов тел к кубу максимального удаления определяется только их полной массой. Из этого уравнения следует возможность определения массы каждого из объектов только на основании астрономических наблюдений: если определены период их орбитального движения и максимальное удаление объектов друг от друга, то можно определить полную массу системы, а отношение больших полуосей собственных орбит тел определяет отношение масс.

Экспериментальные факты, позволяющие понять процесс формирования звёзд, планетарных систем и планет.

Закон всемирного тяготения (и являющиеся его следствием законы Кеплера) создают теоретическую базу для описания эволюции планетарных систем. Зная их мы можем (при наличии достаточно точных начальных данных и достаточных для решения задачи многих тел вычислительных мощностей) предсказать дальнейшее поведение любой системы гравитационно взаимодействующих классических тел. О некоторых ярких примерах таких расчетов мы все знаем — это открытия Урана и Нептуна.

Но помимо решения задачи предсказания «из настоящего — в будущее» интерес представляет и задача происхождения звёзд, планетарных систем, планет. Но прежде чем обсуждать современную теорию формирования планет, важно понять, на каком практическом материале проверяется эта теория. Каковы же доступные нам наблюдения, которые могут помочь нам понять, как образуются звезды и планеты?

Наблюдения в пределах Солнечной системы.

Первый блок экспериментальных данных возникает из наблюдения за нашей планетой, другими планетами Солнечной системы и за нашей ближайшей звездой — Солнцем. При этом доступно огромное количество как косвенных, так и прямых методов наблюдения и анализа.

1. Данные о Земле. Геологические данные по нашей планете позволяют сделать достаточно подробные выводы об ее внутреннем строении. Мы знаем, что под поверхностью земной коры находятся горячие и расплавленные породы (магма), а ближе к центру Земли находится ядро, богатое железом и другими тяжелыми элементами. Мы знаем, что у нашей планеты существует собственное магнитное поле. Наша планета окружена атмосферой, состав и свойства которой нам достаточно хорошо известны. Мы знаем, что тектонические и атмосферные процессы приводят к постоянному обновлению земной поверхности (в частности, к сглаживанию следов соударений с другими телами). Конечно этот материал нельзя автоматически

распространить даже на другие планеты Солнечной системы. Однако важность геологического материала заключается в его непосредственной доступности и возможности его разностороннего анализа. И хотя далеко не всякая планета похожа на Землю, любая достаточно общая теория формирования планет должна объяснять, почему Земля образовалась такой, как она есть — и именно эти геофизические данные оказываются, таким образом, одним из важных проверочных пунктов для теории. И таким образом, геофизика неожиданно оказывается тесно связанной с астрономией.



Рисунок 39: Каменный метеорит (хондрит) "Маныч" из метеоритной коллекции РАН. Упал в 1957 году в Ставропольском крае, масса найденных фрагментов 3.56кг. (фотография с сайта <http://geo.web.ru/db/meteorites/>)



Рисунок 40: Крупнейший железный метеорит "Гоба" (Африка). Масса 60т. (фотография с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Hoba_meteorite)

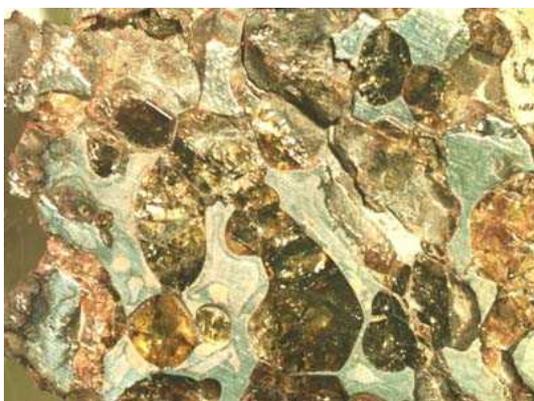


Рисунок 41: Структура среза железно-каменного метеорита "Палласово железо", обнаруженного в районе Красноярска в 1749 году. Масса метеорита 687 кг. (фотография с сайта <http://geo.web.ru/db/meteorites/>)

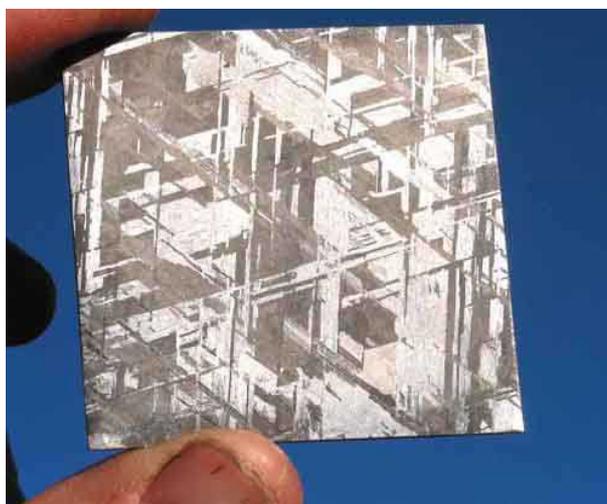


Рисунок 42: Структура Видманитеттена на срезе железного метеорита "Гибсон". (фотография с сайта <http://www.arizonaskiesmeteorites.com/Widmanstatten/>)

2. Метеориты. Даже оставаясь на поверхности Земли можно обнаружить и исследовать в лабораторных условиях объекты, прилетевшие из космоса — это метеориты. Во избежание терминологических проблем, под метеоритами в этом разделе мы будем

подразумевать любой объект из космоса, достигший земной поверхности. Явление это не такое уж и редкое — по некоторым оценкам ежедневно на поверхность Земли попадает около 300 тонн таких объектов внеземной природы. В качестве исторического анекдота, можно заметить, что внеземное происхождение метеоритов было признано в научных кругах только в начале 19 века. Другим историческим фактом является то, что во многих культурах «небесное железо», то есть железо добытое из найденных метеоритов, долгое время было единственным источником этого металла. Размер метеоритов, достигающих земной поверхности может быть весьма значителен — крупнейший железный метеорит Гоба (англ. Noba), найденный в Африке и упавший примерно 80000 лет назад, весит около 60 тонн и имеет размер около 2.7x2.7x0.9 метра. Все метеориты разделяют на несколько классов (см. рисунки 39, 40, 41, 42): каменные метеориты (составляют примерно 95% от всех, фрагменты по составу близкие к «каменным» горным породам), каменно-железные (1%, состоящие в примерно равных пропорциях из каменных пород и железа) и железные (4%, состоящие из железа и сплавов железа и никеля). Выделим здесь один из подклассов каменных метеоритов: карбохондриты (очень редкие, включают в себя углерод и его соединения). Самые распространенные каменные метеориты, по иронии, являются наиболее редко обнаруживаемыми — визуально их трудно отличить от земных пород, за исключением разве что оплавленной поверхности (которая может и отсутствовать, если, к примеру, большой метеорит распался на несколько частей) или присутствия кратера в месте падения. Поэтому, если каменный метеорит не обнаружен сразу после падения, то с большой вероятностью через некоторое время под влиянием атмосферных процессов он станет неотличим от окружающих «земных» камней. Большая часть каменных метеоритов (хондриты) имеет структуру, состоящую из характерных сферических гранул, форма которых свидетельствует об их формировании в условиях невесомости из расплавленных пород. Железные же метеориты, наоборот, имеют очень характерную кристаллическую структуру, которую невозможно воспроизвести в лабораторных условиях — так называемая структура Видманштеттена (рисунок 42). Для формирования этой структуры считается необходимым медленное остывание расплавов в течение миллионов лет. Из наиболее ярких фактов, основанных на анализе метеоритов, надо отметить, во-первых, наличие аминокислот в карбохондритах, что свидетельствует о возможности образования сложных органических соединений в космосе. Во-вторых, совокупность каменных, каменно-железных и железных метеоритов позволяет пролить свет на процессы формирования планетоидов в ранней Солнечной системе. Радиоактивная датировка метеоритов показывает, что все они образовались практически одновременно примерно 4.56 миллиарда лет назад). Наконец, изотопный состав некоторых метеоритов (избыток изотопа ^{26}Mg , являющегося продуктом β -распада ^{26}Al , в остатках «метеорита Алленде») указывает на взрыв сверхновой в нашей ближайшей космической окрестности, произошедший около 4.6 миллиарда лет назад.

3. Наблюдения за планетами. Планеты и планетоиды Солнечной системы (включая спутники планет) также являются объектом пристального изучения. Имеющиеся инструментальные возможности позволяют вести наблюдения в телескопах всевозможных диапазонов, проводить спектроскопический анализ для определения химического состава атмосфер и поверхности, вести радиолокацию планет, изучать тела Солнечной системы при помощи автоматических станций и даже изучать пробы грунта, доставленный с Луны, Марса и некоторых малых тел в земных лабораториях. Из этих наблюдений мы знаем, что движение всех планет и их спутников описывается

при помощи закона всемирного тяготения (законов Кеплера) (с точностью до поправок, связанных с теорией относительности), причем все планеты вращаются вокруг Солнца в одном направлении и их орбиты лежат почти в одной плоскости. Нам известно, что и у планет, и у Солнца есть собственное вращение, при этом у большинства планет направление вращения совпадает с направлением орбитального вращения, а ось вращения как правило лежит близко к нормали к плоскости орбитального движения. Мы знаем, что химический состав планет меняется по мере удаления от Солнца по некоторой закономерности: близко к Солнцу расположены 4 планеты земного типа (Меркурий, Венера, Земля, Марс) в составе которых велико содержание тяжелых элементов (средняя плотность — $4000...5000 \text{ кг/м}^3$), далеко от Солнца находятся газовые гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), состоящие (в молекулярных долях) в основном из водорода и гелия (средняя плотность $1000...1500 \text{ кг/м}^3$). Мы знаем также, что наличие у планет собственного магнитного поля является скорее правилом, чем исключением: только про Венеру не известно есть (или было) ли у неё свое магнитное поле. Земля, Меркурий и газовые гиганты обладают своим магнетизмом, а изучение поверхности Марса показывает наличие реликтовой намагниченности марсианских пород. Кроме планет, в Солнечной системе есть области, в которых находятся малые тела — пояс астероидов между Марсом и Юпитером, транс-нептуновые планеты (включая «разжалованный» Плутон), пояс Куйпера за орбитой Нептуна и облако Оорта на дальней периферии. Изучение этих объектов позволяет понять из каких «кирпичей» складывалась Солнечная система.

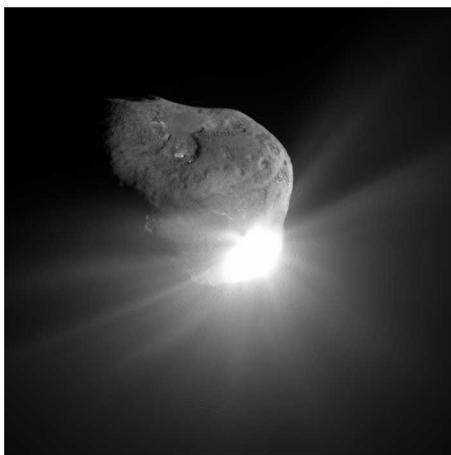


Рисунок 43: Изображение ядра кометы Темпеля 1 с зонда "Дип Импакт" через 67 секунд после столкновения «бомбы» с поверхностью кометы. Яркая засветка - рассеяние света на выброшенном при ударе веществе. (фотография с сайта НАСА <http://sse.jpl.nasa.gov/>)

4. Кометы. Кометы происходят из дальней периферии Солнечной системы (пояс Куйпера и облако Оорта), не затронутой процессами планетоформирования. Поэтому изучение комет (наблюдения с телескопов, спектрометрия, автоматические космические станции) позволяет получить информацию о исходном составе материала, из которого сформировалась Солнечная система. Здесь можно отметить советские космические аппараты «Вега-1» и «Вега-2», с помощью которых в 1986 году изучалась комета Галлея: были впервые получены фотографии ядра кометы, исследована структура кометы, обнаружены органические вещества в составе кометы. Недавней (2005 год) космической миссией, посвященной исследованию кометы Темпеля 1, была миссия зонда НАСА «Дип Импакт» (*Deep Impact* — глубокий удар). Одной из основных задач этого зонда был сброс «бомбы» (медной болванки) на поверхность кометы для

исследования состава выброшенного вещества (рисунок 43). Кроме этого, зонд НАСА «Стардаст» (*Stardust* — звездная пыль) в 2004 году собрал образцы из хвоста кометы Вильда 2 и отправил их на Землю в спускаемом аппарате, что позволяет провести анализ кометного вещества в условиях стационарных земных лабораторий.

5. Луна. Из-за отсутствия атмосферы и очень слабой тектонической активности, поверхность Луны надолго сохраняет следы метеоритных бомбардировок. Однако на ранних стадиях такая активность была, поэтому различные участки лунной поверхности имеют различный возраст (в частности, лунные «моря» моложе лунных «возвышенностей»). Сравнение количества кратеров на различных участках поверхности с возрастом этих участков (определяемым, в том числе, и по анализу доставленных на Землю образцов грунта) позволяет определить, что основная метеоритная бомбардировка лунной поверхности имела место примерно 4-4.5 миллиарда лет назад, а после того количество столкновений резко уменьшилось.
6. Наблюдения за Солнцем. Солнце является наиболее массивным объектом Солнечной системы, существенно превосходящим суммарную массу всех остальных объектов. Поэтому, конечно же, важны данные о составе Солнца и о процессах, идущих на Солнце. В частности, мы знаем, что, как и газовые гиганты, Солнце состоит в основном из водорода и гелия. Мы также знаем (в частности, по обнаружению потока солнечных нейтрино), что источником солнечной энергии являются термоядерные реакции в ядре Солнца.

Планеты и планетные системы других звёзд. Методы обнаружения экзопланет.

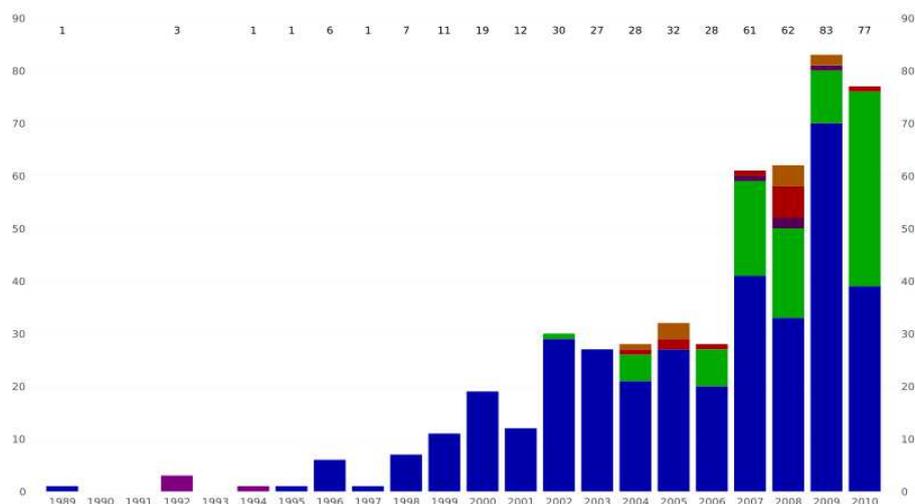


Рисунок 44: Количество открытых экзопланет по годам, по состоянию на август 2010 года. Цветом показан метод обнаружения: синий - по доплеровскому сдвигу, зеленый - по прохождению, желтый - астрометрический метод, красный - непосредственное обнаружение, коричневый - эффект гравитационной микролинзы, фиолетовый - по изменению излучения звезды-пульсара. (Рисунок с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_extrasolar_planets)

Развитие методов астрономического наблюдения позволило обнаружить существование планет и планетарных систем на разных стадиях эволюции у других звёзд. Какими методами возможно такое обнаружение? Непосредственное астрономическое наблюдение планет

сильно затруднено, так как планеты не являются источниками собственного яркого света — они лишь отражают свет своей звезды и лишь немного добавляют к нему тепловое излучение, соответствующее их поверхностной температуре. Поэтому в основном наблюдения носят косвенный характер. С 1995 до 2010 года было открыто более 400 планет у других звёзд (см. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_extrasolar_planets, сводная гистограмма показана на рисунке 44).

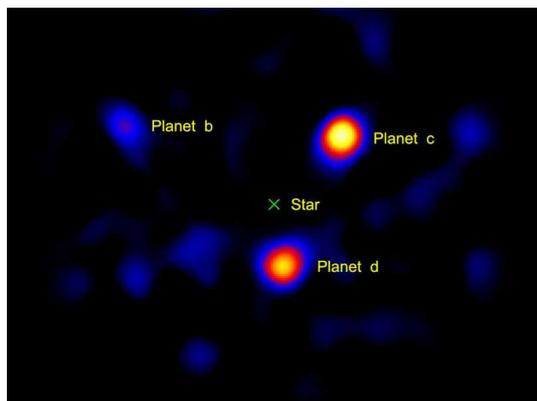


Рисунок 45: Непосредственное наблюдение планетной системы звезды HR 8799 (130 световых лет от Земли, созвездие Пегаса). Изображение в ИК диапазоне, цвет передает интенсивность. Сама звезда закрыта экраном. (изображение с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/HR8799>)

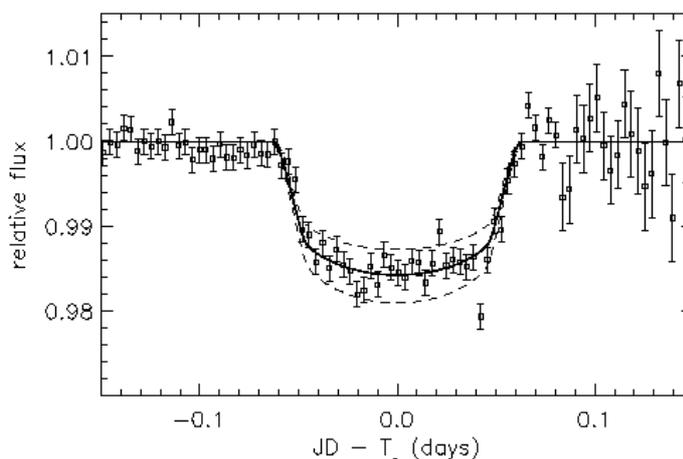


Рисунок 46: Изменение яркости излучения звезды HD 209458 при прохождении по ее диску экзопланеты. (рисунок с сайта <http://www.hao.ucar.edu/research/stare/hd209458.html>)

Как же удаётся обнаружить у далёких звёзд наличие спутников планетного типа? Есть несколько основных способов обнаружить наличие планеты у звезды:

1. Обнаружение колебаний положения звёзд. Как мы отметили при рассмотрении закона всемирного тяготения, при орбитальном движении планет в фокусе орбиты находится общий центр масс звезды и планеты, причем звезда также движется по орбите вокруг этого центра масс. Для легких планет это отличие почти несущественно, но, например, для системы Солнце-Юпитер большая полуось орбиты Солнца составляет примерно 750000 км, что чуть больше радиуса Солнца (примерно 700000 км). Таким образом, для удаленного наблюдателя, который не может разглядеть саму планету остается шанс заметить эти смещения звезды. Они проявляются в небольших колебаниях углового положения звезды а также в возникновении периодического красного или синего смещения в спектре звезды, связанного с периодическим движением звезды от наблюдателя или к наблюдателю. Оба этих эффекта очень малы, но обнаружимы (при этом необходимо подчеркнуть, что вообще говоря для обнаружения периодичности изменения параметров необходимо наблюдать за этими параметрами в течение примерно периода колебаний — что является одной из причин того, что пока обнаружены только *большие* планеты движущиеся по *малым* орбитам с *малыми* периодами обращения), а их совокупность позволяет оценить параметры планеты. В некоторых случаях характер колебаний положения звезды оказывается

более сложным — что говорит о наличии нескольких планет в системе. Отметим, что чисто геометрически совокупность этих двух методов дает полную картину об орбите звезды (и, следовательно, планеты) при любой ориентации плоскости орбитального движения относительно наблюдателя. Существенное увеличение данных о планетах других звёзд ожидается с запуском в 2011 году спутника-обсерватории «Гайя» Европейского космического агентства, специально предназначенного искать такие малые колебания в положении и спектральных характеристиках звёзд.

2. Метод прохождения. В случае если, по счастливой случайности, наблюдатель оказывается в плоскости орбитального движения планеты, то появляется возможность наблюдать прохождения планеты по диску звезды. Это явление примерно похоже на наблюдения прохождения внутренних планет Солнечной системы (Венеры и Меркурия) по диску Солнца, хотя, конечно из-за большого расстояния до звезды разглядеть саму планету невозможно. Но косвенные методы позволяют получить дополнительную информацию о планете. При прохождении перед диском звезды планета экранирует часть излучения звезды, что проявляется при чувствительных измерениях как небольшое уменьшение яркости (рисунок 46). Если L — светимость звезды (полная мощность, излучаемая с поверхности), R и r — радиусы звезды и планеты, соответственно, а d — расстояние до звезды, то изменение видимой яркости при прохождении планеты
- $$\delta b = \left(\frac{L}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad \text{или} \quad \frac{\delta b}{b} = \left(\frac{r}{R} \right)^2,$$

соответственно изменение видимой звездной величины составит:

$$\delta m = -2.512 \lg \frac{b - \delta b}{b} = -2.512 \lg \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) = -2.512 \frac{1}{\ln 10} \ln \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \approx -1.09 \left(\frac{r}{R} \right)^2.$$

Так что появляется возможность определить размер планеты. Если у планеты есть атмосфера, то при прохождении по диску звезды можно обнаружить изменение интенсивности на линиях поглощения, соответствующих газам в составе атмосферы планеты. Наконец, при наблюдениях в инфракрасном диапазоне можно заметить изменение интенсивности собственного теплового излучения планеты при уходе планеты за диск звезды. Изменение интенсивности в ИК диапазоне позволяет определить температуру планеты. Если у звезды есть несколько экзопланет, то наблюдаемые при прохождении изменения светимости будут неперiodичны (точнее, будет наблюдаться несколько наложенных периодических зависимостей).

3. Гравитационные микролинзы. Общая теория относительности предсказывает, что световой луч искривляется при прохождении рядом с гравитирующим телом. Такое отклонение приводит к своеобразному эффекту фокусировки — звезда находящаяся ближе к нам может так искривить ход световых лучей от далекой звезды, что до нас дойдет больше излучения от дальней звезды, чем полагается по закону обратных квадратов. Массивная планета производит аналогичный эффект. Соответственно, при удачном стечении обстоятельств, можно наблюдать увеличение яркости далеких звёзд, мимо которых проходит видимая траектория планеты. Таким образом были обнаружены планеты находящиеся на расстоянии до 21000 световых лет от нас.
4. Непосредственное наблюдение в телескоп. Несколько планет удалось увидеть при помощи телескопа (рисунок 45). Эти наблюдения проводились в инфракрасном диапазоне, чтобы улучшить соотношение интенсивности излучения звезды и теплового излучения планеты. При этом, так как расстояния до звёзд велики, необходимо чтобы планета была достаточно далеко от звезды. Например,

обнаруженная таким образом планета звезды 2M1207 в созвездии Гидры находится на расстоянии 55 астрономических единиц от звезды и ее орбитальный период составляет около 1000 лет. Связанность этих объектов удалось установить не по периодическому движению планеты, а по тому факту, что оба объекта движутся одинаково относительно других звёзд.

5. Звезды с необычным элементным составом. Интересные данные о судьбе «неудачных» планет можно получить из спектрального анализа излучения звёзд. Так в спектре звезды HD82943, у которой кстати обнаружено существование по меньшей мере двух планет, обнаружена спектральная линия изотопа лития ${}^6\text{Li}$. Этот изотоп стабилен в условиях планет, но при температуре атмосферы звезды он оказывается вовлечен в ядерные реакции и должен «выгорать» примерно за 30-100 миллионов лет в цикле реакций «литиевого горения»:
 $p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be}$; ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + e$; $p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be}$; ${}^8\text{Be} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$. Обнаружение этого изотопа свидетельствует, предположительно, о том, что одна из планет системы подошла слишком близко к звезде и была захвачена и поглощена звездой.
6. Ранние стадии образования планетных систем. У молодых звёзд обнаруживаются окружающие их облака и диски из холодного вещества, являющиеся исходным материалом для формирования планет (рисунок 47). Причём это явление является скорее правилом, чем исключением: анализ данных показывает что более половины звёзд возрастом до 2 миллиардов лет¹ окружены такими протопланетными дисками (рисунок 48).



Рисунок 47: Звезды, окружённые протопланетными дисками в Туманности Ориона. Изображение получено телескопом Хаббл. Изображение с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Protoplanetary_disc

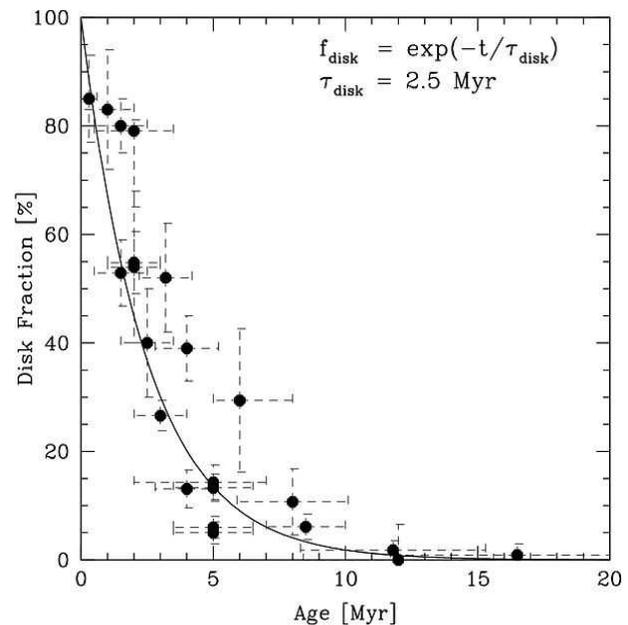


Рисунок 48: Доля звёзд, демонстрирующих наличие протопланетного диска, как функция возраста звезды. Из работы Eric E. Mamajek, "Initial Conditions of Planet Formation: Lifetimes of Primordial Disks". Рисунок с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Protoplanetary_disc

¹ Вопросы определения возраста звёзд будут рассмотрены при рассказе об эволюции звёзд.

Планеты и планетные системы других звёзд. Сводка данных по планетным системам.

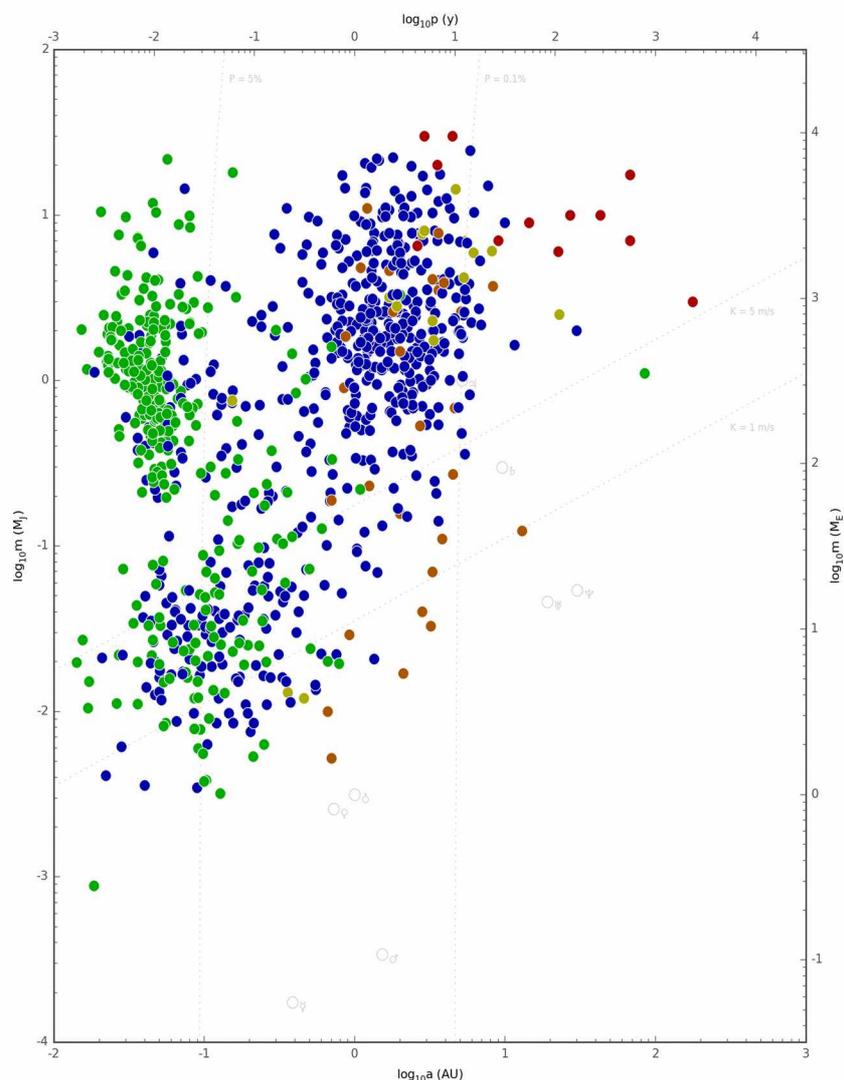


Рисунок 49: Диаграмма, показывающая массы (по вертикальной оси, в массах Юпитера на левой оси и массах Земли на правой), орбитальный период (по верхней горизонтальной оси, в земных годах на верхней) и радиус орбиты (по нижней горизонтальной оси, в астрономических единицах) для экзопланет, открытых на сентябрь 2014 года. Цветом обозначен метод обнаружения планеты: зеленый — метод прохождения, синий — доплеровский сдвиг, оранжевый — эффект гравитационной микролинзы, красный — непосредственное наблюдение, жёлтые — обнаружение нескольких экзопланет в системе звезды по нарушению периодичности изменения светимости при прохождении. Серым показано положение планет Солнечной системы. (рисунок с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar_planet)

Как показывают наблюдения за молодыми звёздами, большинство звёзд, возраст которых меньше 2 миллиардов лет, окружено протопланетными дисками. Таким образом, образование вокруг звезды диска пыли и замерзших газов является нормальным ходом астрофизических процессов.

Обнаружение планет вокруг звёзд, как мы уже отмечали, затруднено большим расстоянием

до этих планет, однако к настоящему времени (август 2010) обнаружено более 400 экзопланет, и очевидно, что количество таких планет будет расти в будущем с развитием техники и методики наблюдения.¹

Как видно из диаграммы «масса-период» (рисунок 49) большинство обнаруженных экзопланет являются планетами с массой 0.1 — 10 масс Юпитера с периодами обращения обычно меньше земного года, а иногда и измеряемыми земными днями. Для сравнения, напомним, что период обращения Юпитера примерно 12 лет, период обращения ближайшей к Солнцу планеты — Меркурия равен 88 дням. Такой перекося в характеристиках экзопланет по сравнению с планетами Солнечной системы должен, однако, рассматриваться с учетом специфики наблюдательных методов и огромности расстояний, отделяющих нас от экзопланет: например, метод прохождения несомненно более чувствителен к обнаружению больших планет (сильно закрывающих излучение звезды при прохождении по диску) с малыми периодами обращения (что позволяет за разумное время накопить статистику за несколько периодов прохождения). И действительно, экзопланеты открытые этим методом (зеленые точки на диаграмме) сосредоточены в верхнем левом углу, соответствующем большим массам и малым периодам. По этим причинам планеты земного типа (с массой и периодом, близкими к земному) очень трудно обнаружить.

Доступный перечень обнаруженных экзопланет с их характеристиками находится, например, на ресурсе Википедия http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_extrasolar_planets. Приведем здесь некоторые данные о экстремальных значениях параметров известных экзопланет (по данным ресурса http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_extrasolar_planet_extremes):

- самая удаленная от Земли в нашей Галактике: OGLE-2005-BLG-390Lb (звезда OGLE-2005-BLG-390L в созвездии Скорпиона, вероятно красный карлик) на удалении 21500 ± 3300 световых лет от Земли. Удаление от звезды 2 — 4 а.е., масса планеты 2 — 11 земных массы. Обнаружена при помощи эффекта гравитационной микролинзы в 2005 году.
- обнаружение планет в других галактиках: в 2009 году группа ученых объявила об обнаружении методом гравитационной микролинзы планеты массой 6-7 масс Юпитера в Галактике Андромеды (ближайшая к нам спиральная галактика) на расстоянии около 2.5 миллионов световых лет; в 1996 году была отмечена аномалия, связываемая с эффектом гравитационной микролинзы, приписываемая наличию планеты с массой в 3 земных на удалении 4 миллиарда световых лет от нас.

¹ Каталог обнаруженных экзопланет доступен на сайте <http://exoplanet.eu/catalog/>. На сентябрь 2015 года в каталоге было 1958 планет в системах 1241 звезды. Несколько планет обнаружено у 488 звезд.

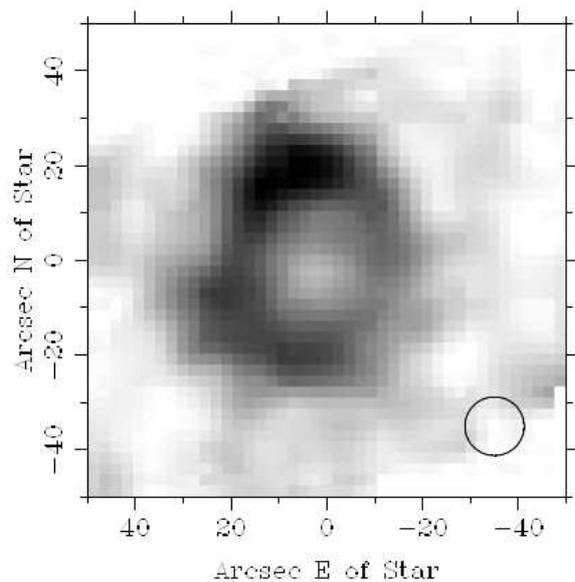


Рисунок 50: Изображение окрестности звезды Эпсилон Эридана на длине волны 350 мкм (из работы D.Backman и др. "Epsilon Eridani's Planetary Debris Disk: Structure and Dynamics based on Spitzer and CSO Observations", arXiv:0810.4564)

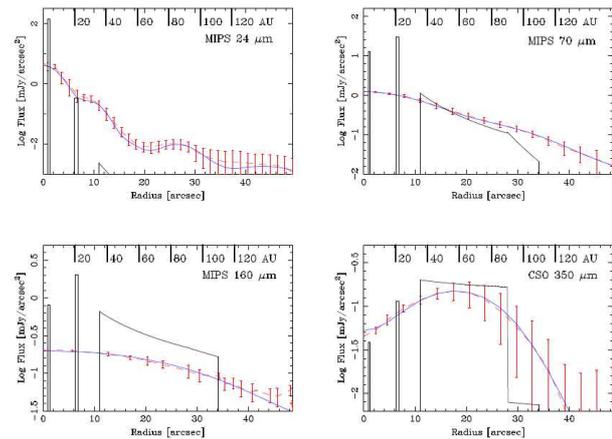


Рисунок 51: Распределение интенсивности излучения на разных длинах волн по мере удаления от звезды Эпсилон Эридана. Красные точки - данные измерения, синяя линия - описание в модели двух астероидных поясов и пылевого облака. (из работы D.Backman и др. "Epsilon Eridani's Planetary Debris Disk: Structure and Dynamics based on Spitzer and CSO Observations", arXiv:0810.4564)

- самая близкая к Земле: система звезды Эпсилон Эридана (созвездие Эридана, звезда спектрального класса K2 (оранжевый карлик), менее массивная и меньшая по размеру по сравнению с Солнцем) содержит одну или две планеты, а также два пояса мелких планетоидов и находится на удалении 10.5 световых лет от Земли. Первая из планет (Эпсилон Эридана *b*), в существовании которой сомнений нет, была обнаружена в 2000 году по доплеровскому сдвигу излучения звезды, позднее это было подтверждено астрометрическими измерениями телескопа Хаббл. Масса планеты Эпсилон Эридана *b* около 1.5 масс Юпитера, большая полуось почти круговой орбиты 3.4 а.е., период обращения около 7 лет. Вторая, предполагаемая, планета (Эпсилон Эридана *c*) имеет массу 0.1 массы Юпитера, движется по орбите с эксцентриситетом 0.3 и большой полуосью около 40 а.е. Существование второй планеты было предположено для объяснения поведения астероидных поясов системы. Наблюдения в инфракрасном диапазоне (орбитальный телескоп НАСА Спитцер (Spitzer)) показали наличие вокруг звезды пылевого диска размером около 60 а.е., и двух астероидных поясов на удалении 20 а.е. и 3 а.е. от звезды. Эти пояса были обнаружены по области теплового излучения размером в 30" вокруг звезды (что, как легко посчитать на расстоянии в 3.5 парсека соответствует области размером примерно 100 а.е.), анализ спектра и интенсивности излучения этой области позволил выделить три кольца, идентифицируемые как перечисленные выше два астероидных пояса и пылевой диск на периферии системы (рисунки 50, 51 и 53). Особенности излучения (сравнение с известными параметрами, рисунок 52) позволяют предположить, что внутренний астероидный пояс состоит из «каменистых» силикатных объектов, а внешний из частичек льда (отметим, что в астрономии льдом называют все затвердевшие газы).

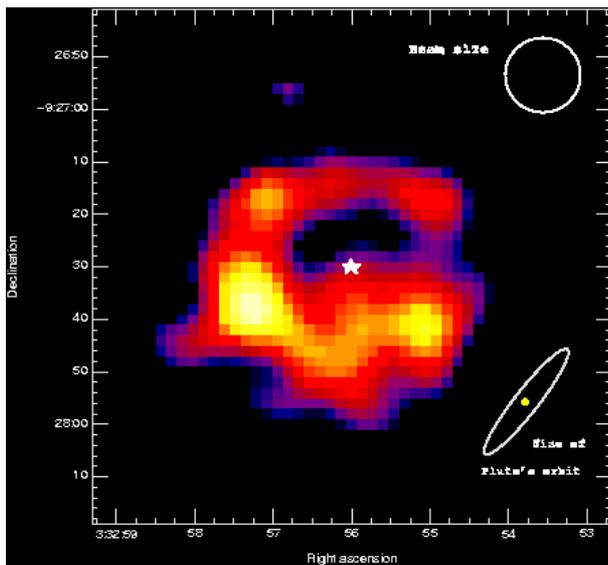


Рисунок 53: Изображение окрестности Эпсилон Эридана в инфракрасном диапазоне, полученное наземным телескопом (Телескоп Максвелл, Обсерватория Мауна Кеа, Гавайи) (рисунок с сайта www.solsattion.com/stars/eps-erid.htm)

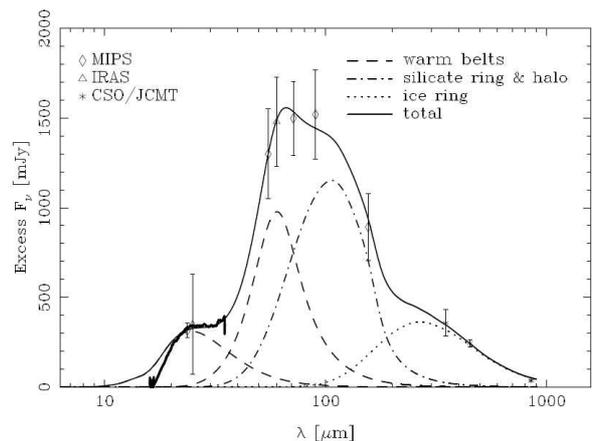


Рисунок 52: Распределение интенсивности излучения окрестности звезды Эпсилон Эридана по длине волны. Символы и жирная линия - данные измерения, остальные линии - моделирование вклада от колец с разной температурой. (из работы D.Backman и др. "Epsilon Eridani's Planetary Debris Disk: Structure and Dynamics based on Spitzer and CSO Observations", arXiv:0810.4564)

- самая легкая экзопланета: планета PSR B1257+12 A в системе звезды-пульсара PSR B1257+12 на расстоянии 980 световых лет от Земли в созвездии Девы. Масса этой планеты примерно 2% массы Земли — вдвое больше массы Луны. Большая полуось ее орбиты составляет 0.19 а.е. (большая полуось орбиты Меркурия 0.39 а.е.), период обращения примерно 25 дней. Система звезды PSR B1257+12 включает 3 или 4 планеты. Эти планеты были обнаружены по возмущениям, вносимым в излучение пульсара. Планеты системы звезды PSR B1257+12 были одними из первых открытых (1992).
- система с наибольшим числом экзопланет: система звезды *HD 10180*, находящейся на удалении 127 световых лет от нас в созвездии Гидры содержит от 5 до 7 планет. Параметры их орбит: планета *b* (неподтвержденная) 1.4 массы Земли, большая полуось 0.022 а.е., период 1.2 дня; планета *c* 13 масс Земли/0.064 а.е./5.8 дня; планета *d* 12 масс Земли/0.13 а.е./16 дней; планета *e* 25 масс Земли/0.27 а.е./50 дней; планета *f* 24 массы Земли/0.49 а.е./126 дней; планета *g* 21 масса Земли/1.42 а.е./600 дней; планета *h* (неподтвержденная) 64 массы Земли/3.4 а.е./2200 дней. Планеты обнаружены по доплеровскому сдвигу излучения звезды.

Современная модель формирования планетной системы.

Таким образом, в распоряжении ученых есть очень большой объем фактических данных. Кроме того, рост мощностей вычислительной техники позволяет решать задачу многих тел с сотнями взаимодействующих объектов, что открывает возможности к моделированию формирования планет из мелких планетоидов, движущихся вокруг звезды.

Как мы видели, формирование планет является нормальным ходом астрофизических процессов. Но во избежание излишней абстрактности, рассказ о формировании планетной системы мы привяжем к нашей Солнечной системе.

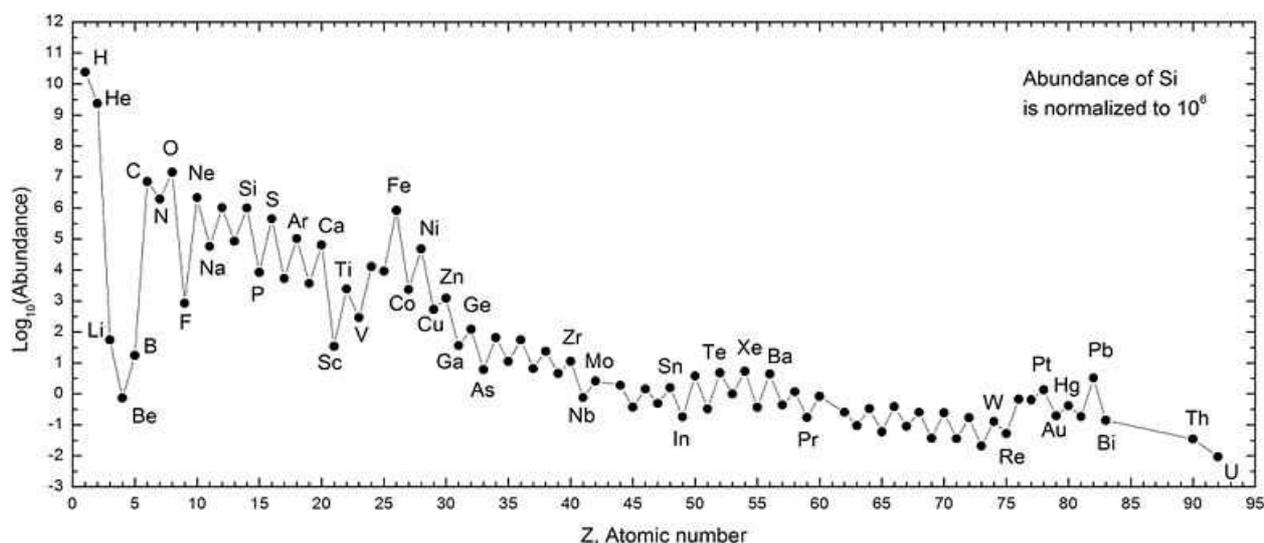


Рисунок 54: Доля различных элементов в Солнечной системе (атомные доли, нормировка произвольная - доля кремния принята равной 10^6 (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements))

В Солнечной системе наиболее распространенными элементами являются водород (71% по массе) и гелий (27% по массе). Все другие элементы (железо, углерод, кремний и так далее) составляют всего 2% массы Солнечной системы. Этот избыток легких элементов соответствует модели Большого Взрыва — момента рождения нашей Вселенной примерно 13.7 миллиарда лет назад, при котором образовывалось вещество только в форме легких элементов. Тяжелые элементы образуются в ходе реакций в недрах звёзд, при «сжигании» легких элементов. Эти элементы попадают в межзвездное пространство при завершении эволюции звёзд — либо как результат испарения внешних слоев звезды, либо в результате взрыва сверхновой. Таким образом, материал из которого собрана Солнечная система является уже «переработанным» материалом. Как уже отмечалось, состав метеоритов указывает на возможный взрыв сверхновой в окрестности Солнечной системы более 4 миллиардов лет назад. Возможно, этот взрыв был одним из источников тяжелых элементов в будущей Солнечной системе. Отметим также, что среди тяжелых элементов доминирует железо. По этой причине в астрономии часто говорят «железное ядро», «железные метеориты» - просто потому, что среди тяжелых элементов железо встречается гораздо чаще других.

Формирование Солнечной системы началось с облака, содержащего в основном водород и гелий и несколько обогащенного тяжелыми элементами. При этом облако может иметь

ненулевой полный момент вращения — гораздо труднее предположить, что случайным образом собравшиеся частицы (часть из которых возникла в произошедшем рядом катаклизме взрыва сверхновой) имеют момент вращения в точности равный нулю. Формирование такого облака заняло примерно 100000 лет.

Между частицами существует сила взаимного притяжения. Если облако имеет примерно сферическую форму, то равнодействующая всех этих сил направлена к центру облака. Под действием сил гравитации большая часть материала облака собирается в центре, образуя Протосолнце. Протосолнце — это разогретое за счет работы силы гравитации скопление газа, существенно более плотное чем исходное облако. Внутри него уже начинают идти некоторые ядерные реакции (например, реакция «литиевого горения»), но термоядерные реакции в ядре еще не зажглись. Расчёты показывают, что примерно через 100000 лет температура поверхности Протосолнца стабилизируется на уровне 6000К. Этот этап эволюции длится примерно 50 миллионов лет. На большей части этого этапа Протосолнце является так называемой звездой типа Т-Тельца. Эти звезды характеризуются большой нестабильностью излучения и интенсивным излучением в радио и рентгеновском диапазоне, часто с интенсивным звездным ветром (истекающим от звезды заряженным и нейтральным газом).

Протосолнце продолжает сжиматься под действием силы гравитации и разогреваться. На этом этапе источником тепла является работа сил гравитации — потенциальная энергия гравитационного поля, высвобождаемая при движении частиц к центру Протосолнца. Примерно через 50 миллионов лет с начала образования системы температура и плотность вещества в центре Протосолнца достигают нескольких миллионов градусов и 10^5 кг/м³, соответственно, что достаточно для запуска термоядерной реакции превращения водорода в гелий. С запуском термоядерной реакции можно говорить о появлении звезды — Протосолнце стало Солнцем. Выделяющаяся при термоядерной реакции энергия стабилизирует размер Солнца за счёт конкуренции давления излучения и силы гравитационного сжатия.

Как мы отметили выше, у исходного облака был некоторый момент вращения. Облако в целом является практически изолированной системой — поэтому выполняется закон сохранения момента вращения. И подобно тому, как быстрее раскручивается фигурист, прижимающий руки к телу, облако начинает вращаться быстрее когда основная часть его массы (а масса Солнца составляет 99.9% массы Солнечной системы) собралась в центре. Центробежные силы при этом изменяют форму облака, «сплющивая» его к плоскости перпендикулярной оси вращения. Вокруг Протосолнца образуется протопланетный диск.

Материал протопланетного диска является смесью веществ и соединений, имеющих в исходном облаке. Эта космическая пыль в результате случайных столкновений может собираться в мелкие «комочки», которые смогут стать зародышами планет и планетоидов в будущем. Однако, различные вещества имеют разные физические параметры, в частности, разные температуры плавления. Уже на ранних этапах формирования Протосолнца его поверхность имеет температуру в тысячи градусов. Это значит, что легкоплавкие вещества вблизи к Солнцу не могут находиться в твердом состоянии — не могут быть существенной частью формирующихся зародышей планет. Они могут присутствовать здесь только в виде газа. В частности, расчёт показывает, что в формирующейся Солнечной системе вода не могла существовать в виде льда ближе, чем примерно орбита Юпитера (5 а.е.), а метан не мог существовать в виде льда ближе орбиты Нептуна (30 а.е.). По этой причине внутренние планеты системы должны формироваться из тяжелых элементов (и формировать планеты земного типа), а внешние могут использовать твердые газы для наращивания своего ядра (и

образовать газовые гиганты).

Под действием случайных столкновений, вещество протопланетного диска начинает группироваться — однородное вращение газового диска неустойчиво к возмущениям от таких случайных столкновений. На первых этапах вещество связывается в «комочки» за счет обычных химических сил. По мере роста массы этих «комочков» начинает сказываться и гравитационное притяжение — они начинают притягивать к себе окружающую пыль и газы. В течение нескольких миллионов лет, согласно расчетам, в Солнечной системе образовалось таким образом около 10^9 астероидоподобных объектов диаметром порядка километра.

После этого начался бурный этап эволюции Солнечной системы, последние отголоски которого мы наблюдаем как кратеры на Луне. Миллиарды астероидов, движущихся по разным орбитам взаимодействовали и неизбежно сталкивались друг с другом. В результате некоторых столкновений образовывались астероиды большей массы. В результате столкновений материал астероидов разогревался и плавился. Следы таких процессов мы находим в хондритах — каменных метеоритах с характерными включениями, образующимися именно при быстром расплавлении вещества и его последующем затвердевании. Различные численные моделирования показывают, что при этом продолжается наращивание массы некоторых, более удачливых в соударениях, планетоидов и, таким образом, общее количество планетоидов в системе уменьшается.

Выделение тепла при столкновениях с планетоидами, нагрев от Солнца приводили к тому, что в этот активный момент развития большие планетоиды были просто огромными каплями расплава тяжелых элементов во внутренних областях системы и газов и их соединений во внешних областях. В этих каплях расплава под действием силы тяжести происходило химическое разделение соединений — более плотные собирались к центру капли, менее плотные оставались на поверхности. По мере сокращения количества ударов и в связи с некоторым ослаблением активности Солнца эти капли стали остывать. Следы этих процессов мы видим на Земле — расплавленная магма под затвердевшей корой все еще хранит тепло тех времён, геофизические представления о железном ядре земли находятся в полном соответствии с химическим разделением веществ в расплаве. Если капли были достаточно небольшими, чтобы полностью затвердеть за достаточно долгое время, а потом образовавшийся планетоид оказывался разрушен в очередном столкновении, то из сердцевины такого планетоида появлялись железные метеориты с их характерными структурами Витманштеттена: химическое разделение позволяет отделить железо от других соединений, а долгое остывание приводит к характерной кристаллизации.

Столкновения крупных планетоидов на этой стадии приводило к весьма катастрофичным последствиям. Так, по современным представлениям, Луна образовалась в результате столкновения Земли с объектом размером с Марс. Подобное столкновение предположительно «очистило» Меркурий от коры, оставив только богатое железом ядро.

Таким образом по прошествии нескольких сотен миллионов лет во внутренней части системы остаются планеты земного типа, состоящие из тяжёлых элементов, с железным ядром. В этот момент столкновения между планетами, планетоидами и астероидами уже очень редки. Поверхность Луны свидетельствует о том, что действительно максимум интенсивности метеоритной бомбардировки был 4 миллиарда лет назад.

Внешние планеты системы наращивают свою массу по такому же сценарию, но также имеют возможность непосредственно притягивать к себе газ из облака. В принципе, существует возможность формирования газового гиганта вообще без планетоидного ядра на случайной нестабильности протопланетного диска (по той же схеме, что и формирование Протосолнца,

но в меньшем масштабе). По некоторым расчётам все газовые гиганты сформировались в районе современной орбиты Юпитера, но мигрировали в периферийные районы Солнечной системы в результате гравитационного взаимодействия друг с другом.

Активность формирующейся в это же время звезды очищает систему за счет солнечного ветра от остатков газа — и вот уже примерно 4 миллиарда лет Солнечная система находится в примерно сегодняшнем состоянии: несколько планет и «неудачные» планетоиды в поясе астероидов.

Интересно отметить, что, в принципе, внутренняя структура Солнечной системы не является стабильной в долговременной (по астрономическим меркам) перспективе. Меняется масса Солнца, солнечная активность мало предсказуема, меняется взаимодействие с галактическими объектами, взаимодействие малых тел трудно предсказуемо — все эти малые факторы накапливаются за долгое время. В результате, траектории планет современные вычисления предсказывают на 2-200 миллионов лет вперед. За пределами этого времени с точки зрения современного знания возможны достаточно сильные изменения: например, может увеличиться эксцентриситет орбиты Марса настолько, что станет возможно столкновение Марса и Земли, а рост эксцентриситета орбиты Меркурия может привести к тому, что в результате взаимодействия с Венерой Меркурий будет выброшен из Солнечной системы. Но на несколько ближайших миллионов лет мы можем быть спокойны.

Дальнейшая «глобальная» эволюция Солнечной системы связана с циклом жизни Солнца. Кроме того, через 2.5 миллиарда лет ожидается столкновение нашей Галактики Млечного Пути и Галактики Андромеды.

Вся эволюция Солнечной системы сведена в таблицу ниже:

<i>фаза развития</i>	<i>возраст с момента формирования Солнечной системы</i>	<i>содержание этапа развития</i>
Большой Взрыв	$-13.6 \cdot 10^9$ лет	возникновение Вселенной
предыстория Солнечной системы	миллиарды лет до формирования системы	предыдущие поколения звёзд в ходе своей эволюции обогащают межзвездный газ тяжёлыми элементами
	$-50 \cdot 10^9 \dots 0$ лет	образование молодых звёзд в окрестности будущей Солнечной системы, наиболее массивные из них быстро проходят свой цикл эволюции и взрываются как сверхновые
начало формирования	0	предположительно, взрыв одной из сверхновых приводит к формированию газового облака
формирование Солнца	0- 10^5 лет	формирование и сжатие Протосолнца
	10^5 - $50 \cdot 10^6$ лет	Протосолнце является звездой типа G-Тельца. Источником энергии является гравитационное сжатие, термоядерные реакции в ядре еще не зажглись.
	10^5 - $10 \cdot 10^6$ лет	формирование внешних планет — газовых гигантов, за 10 миллионов лет активность звезды «выдувает» газы из протопланетного диска.
	10^5 - $100 \cdot 10^6$ лет	формирование внутренних планет, богатых тяжёлыми элементами, столкновения планетоидов, образование метеоритов.
Солнце — звезда главной последовательности	$50 \cdot 10^6$ лет	начало термоядерных реакций в ядре Солнца
	$200 \cdot 10^6$ лет	формирование самых старых горных пород на Земле
	$500 \cdot 10^6$ - $600 \cdot 10^6$ лет	предположительная миграция Нептуна под действием гравитационных сил Юпитера и Сатурна вызывает возмущения в движении малых планетоидов и активную бомбардировку внутренних планет, формируется большинство кратеров на Луне.
	$800 \cdot 10^6$ лет	первые известные проявления жизни на Земле
	$4.6 \cdot 10^9$ лет	современное состояние, Солнце движется по главной последовательности, разогреваясь примерно на 10% за миллиард

		лет.
	$6 \cdot 10^9$ лет	рост активности Солнца сделает невозможной жизнь на Земле, «зона обитания» сместится к орбите Марса.
	$7 \cdot 10^9$ лет	столкновение Галактики Млечного Пути с Галактикой Андромеды
Сход с главной последовательности	$10 \cdot 10^9 - 12 \cdot 10^9$ лет	Солнце становится красным гигантом, расширяясь в 250 раз, поглощая Меркурий и , возможно, Венеру и Землю, «зона жизни» сместится к спутникам Сатурна.
	$12 \cdot 10^9$ лет	Солнце становится белым карликом, термоядерные реакции прекращаются
Остывание Солнца	после $12 \cdot 10^9$ лет	Солнце остывает, предположительно становясь черным карликом, через 10^{15} лет температура Солнца опустится до 5К

С этой моделью, как может показаться, несколько расходится наблюдение экзопланет типа Юпитера на близких к звезде орбитах. Это, однако, объясняется «миграцией» планет. На ранних этапах формирования планет из-за «удачного» взаимодействия с другими планетами уже сформировавшийся газовый гигант оказывается «вброшен» во внутренние области планетной системы, где он тормозится за счет трения с материалом протопланетного диска и стабилизируется на орбите малого радиуса. Численное моделирование подтверждает возможность такого сценария. И также необходимо еще раз подчеркнуть, что из-за особенностей доступных нам методов наблюдения такие большие планеты на малых орбитах гораздо легче обнаружить. Поэтому нельзя считать, что наши сведения о экзопланетах противоречат изложенной выше модели формирования планет.

Лекция 3. Солнечная система. Сравнительный анализ.

Вспомним сначала некоторые известные нам факты об устройстве Солнечной системы.

Солнце — ближайшая к нам звезда.

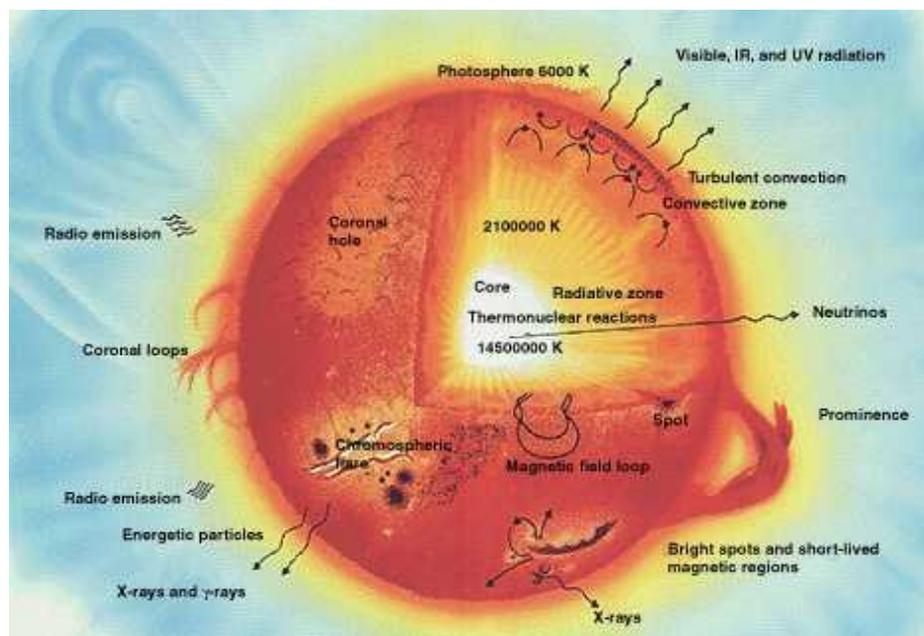


Рисунок 55: Схема строения Солнца (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>)

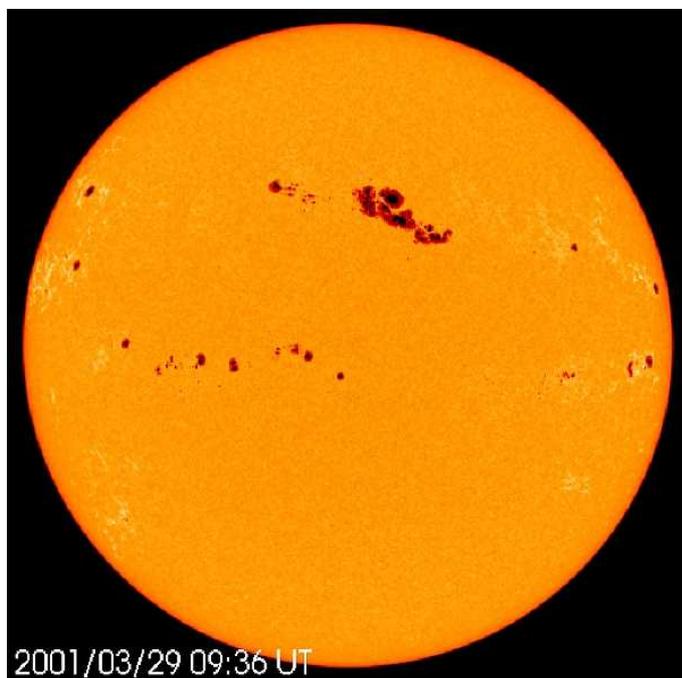


Рисунок 56: Солнечные пятна. Фотография получена обсерваторией SOHO (с сайта <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/>)

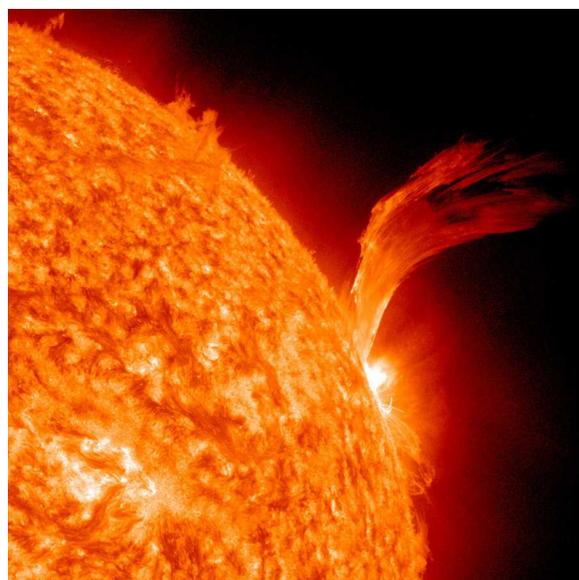


Рисунок 57: Небольшая вспышка на Солнце. Фотография в ультрафиолетовом свете с космической обсерватории СДО. (с сайта <http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/>)

Солнце является ближайшей к нам звездой, центром нашей Солнечной системы, оно

обеспечивает энергией жизнь на Земле — поэтому для нас важно понимание природы явлений, происходящих на Солнце, поэтому Солнце всегда было объектом для наблюдения. Схема строения Солнца показана на рисунке 55. Откуда мы получили информацию для построения этой схемы?

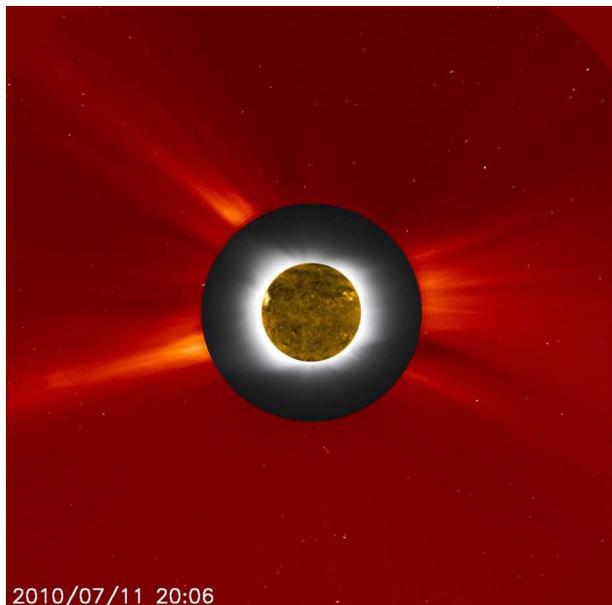


Рисунок 58: Композиция одновременно полученных фотографий с Земли и с обсерватории СДО. Внешние "лучи" - фотография внешних слоев солнечной короны во время солнечного затмения 2010 года, белое свечение - внутренние слои короны в то же время, центральная часть - наложенное изображение Солнца в ультрафиолетовом диапазоне с обсерватории СДО в то же время (с сайта <http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/>)

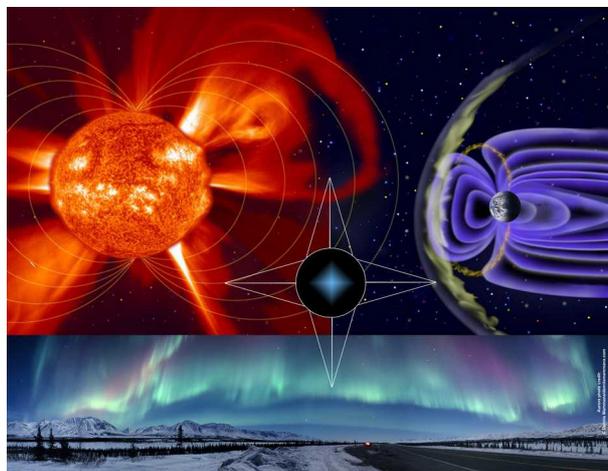


Рисунок 59: Композиция фотографии солнечной вспышки с обсерватории СОХО, схемы взаимодействия солнечного ветра и магнитного поля Земли и фотографии полярного сияния. (с сайта <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/>)

Источники этой информации многочисленны. Существуют специализированные солнечные обсерватории, занимающиеся изучением только Солнца с помощью современных приборов. Список этих приборов включает и спектрометры, и телескопы всех диапазонов (некоторые из результатов показаны на рисунках 56, 57, 58, 59). Часть наблюдений проводится с помощью космических зондов. Среди них можно отметить недавно запущенные обсерватории СОХО (SOHO, Solar and Heliospheric Observatory) и СДО (SDO, Solar Dynamics Observatory), запущенные в 1995 и 2010 году соответственно. Обсерватория СОХО находится в точке Лагранжа системы Солнце-Земля, обсерватория СДО на геостационарной орбите. Обе миссии имеют веб-страницы на сайте НАСА (<http://soho.nascom.nasa.gov/> и <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>, соответственно), на которых доступно множество изображений Солнца, полученных разными приборами. Использование зондов позволило рассмотреть Солнце не только с плоскости эклиптики: зонд НАСА «Улисс», запущенный в 1990 году, пролетел мимо обоих полюсов Солнца в 1994 (южный) и 1995 (северный) годах. Зонд НАСА «Генезис», запущенный в 2001 году, в 2004 году доставил на Землю образцы частиц «солнечного ветра». В 2018 году к запуску планируется зонд «Солар Проб +» («Solar

Probe+»), который должен будет подойти к поверхности Солнца на расстояние 8.5 радиусов Солнца или 0.04 а.е.

Основные наблюдаемые параметры.

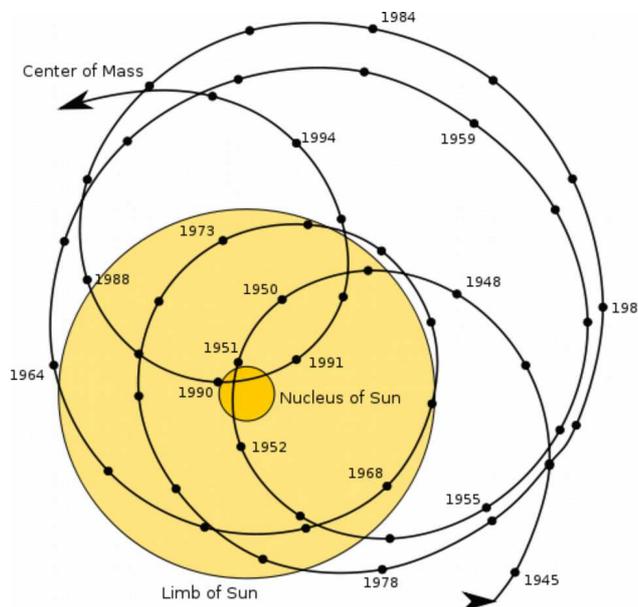


Рисунок 60: Положение центра масс солнечной системы относительно Солнца. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Center_of_mass)

Угловой размер Солнца с Земли около $32'$. Масса Солнца составляет $1.9891 \cdot 10^{30}$ кг (или 332900 масс Земли), средний диаметр Солнца в 109 раз больше диаметра Земли и составляет $1.329 \cdot 10^6$ км. Средняя плотность Солнца равна $1.408 \cdot 10^3$ кг/м³. Полная мощность излучения Солнца $3.846 \cdot 10^{26}$ Вт. Отметим, что все эти параметры доступны к непосредственному измерению: расстояние до Солнца можно определить точными астрометрическими измерениями, массу можно определить зная параметры орбиты Земли и закон всемирного тяготения, полная мощность излучения вычисляется, зная радиус земной орбиты и интенсивность излучения на земной орбите.

Измерения показывают, что Солнце (и, соответственно, вся Солнечная система) движутся в пространстве. Скорость орбитального движения вокруг центра нашей Галактики около 220 км/сек, скорость движения по отношению к реликтовому излучению 396 км/сек.

Солнце вращается вокруг своей оси. Это вращение неоднородно, период вращения меняется от примерно 25 дней на экваторе до 34 дней у полюсов.

Солнце движется вокруг центра масс солнечной системы, но так как в Солнечной системе много планет это движение нерегулярно, и параметры «орбиты» и даже видимое направление движения могут изменяться. Траектория центра масс Солнечной системы показана на рисунке 60. С точностью до 1-2 солнечных радиусов (что достаточно для многих задач) можно считать, что центр масс Солнечной системы и центр Солнца совпадают.

Солнце не имеет четкой поверхности, видимый нами диск Солнца это диаметр на котором находятся оптически плотные слои, испускающие тепловое излучение на длинах волн видимого света. Эта видимая поверхность Солнца называется фотосферой. Её температура, определенная по сравнению спектра Солнца со спектром черного тела, составляет около

5800К. Концентрация частиц в фотосфере (в основном протонов) составляет около 10^{23} м^{-3} , что соответствует примерно 0.3% от концентрации частиц в идеальном газе при нормальных условиях (напомним, что молярный объем при нормальных условиях равен 22.4 литра). Линейчатые спектры позволяют определить химический состав фотосферы: 73.5% массы фотосферы (91% частиц) составляет водород, 24.9% массы (7.8% частиц) — гелий, 0.8% массы — кислород, 0.3% массы — углерод и 0.16% массы фотосферы составляет железо.

Над фотосферой выделяют еще два доступных для наблюдения слоя: хромосфера и корона. Хромосфера это тонкий в масштабах Солнца (2000 км) слой относительно холодного (4000-20000К) разреженного газа, собственное излучение которого не видно из за интенсивного свечения фотосферы и наблюдается только во время затмений. Корона — это слой разреженного ($10^{15} — 10^{16} \text{ м}^{-3}$) очень горячего газа со средней температурой 1-2 миллиона градусов и температурой самых горячих участков до 20 миллионов градусов. Корона наблюдается как ярко-белое свечение при полном затмении либо в ультрафиолетовом спектре.

Поверхность фотосферы неоднородна. На ней существуют темные пятна (солнечные пятна), температура которых составляет 4300-5000К (см. рисунок 56). Кроме того, наблюдения за доплеровским сдвигом спектральных линий показали наличие на поверхности фотосферы сети гранул, часть которых поднимается к поверхности, а часть уходит вглубь — то есть в фотосфере имеются постоянно идущие конвективные процессы.

Неоднородные процессы идут и в в короне — при периодически возникающих солнечных вспышках (рисунок 57) корона выбрасывает в окружающее пространство горячую плазму, образующую так называемый солнечный ветер. Скорость частиц солнечного ветра составляет 300-1200 км/сек. Взаимодействие заряженных частиц выброшенной солнечной плазмы с магнитным полем Земли приводит к возникновению красочного полярного сияния (рисунок 59), а в некоторых случаях — к возмущениям в работе чувствительных приборов.

У Солнца есть свое магнитное поле, наличие которого подтверждается характерным расщеплением спектральных линий некоторых элементов, а также наблюдением за движением плазмы в солнечной короне. Наблюдения показывают, что солнечные пятна связаны с выходом силовых линий магнитного поля на поверхность Солнца. Магнитное поле Солнца периодически меняет полярность, этот 22 летний цикл солнечной активности сопровождается появлением и исчезновением солнечных пятен дважды за период (рисунок 61).

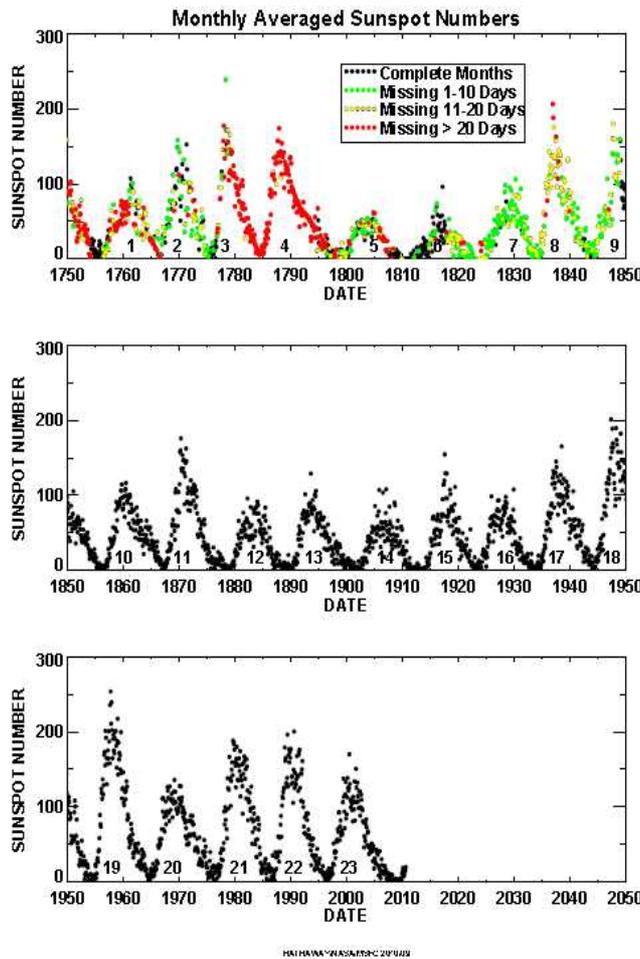


Рисунок 61: График среднего за месяц числа солнечных пятен за время регулярного наблюдения. (с сайта <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>)

Ядро Солнца.

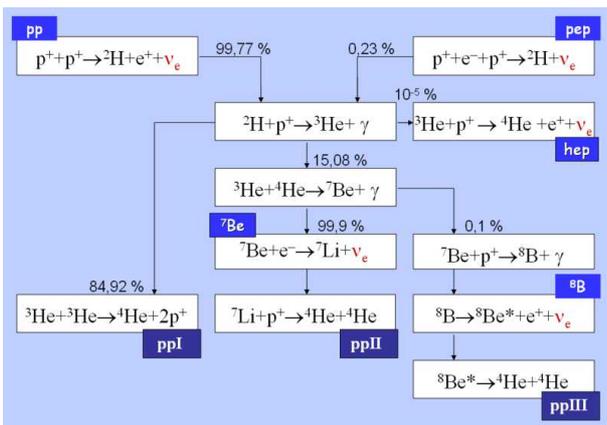
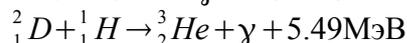
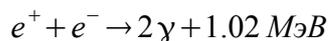
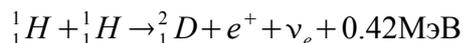


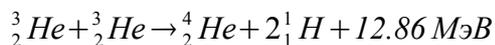
Рисунок 62: Схема ветвей протон-протонной цепочки термоядерных реакций. (рисунок с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino>)

Слои под фотосферой непосредственному наблюдению не доступны. Источником наших знаний о них являются модельные расчеты и измерения потока солнечных нейтрино, подтверждающих, что в глубине Солнца идут термоядерные реакции. Именно эти реакции — точнее выделяющаяся в них энергия создает давление, противодействующее гравитационному сжатию Солнца.

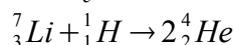
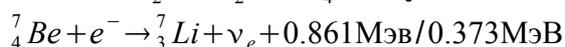
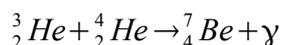
Радиус ядра составляет примерно 20-25% от солнечного радиуса, плотность ядра оценивается в примерно 150000 кг/м³, а температура в 13.5-15 миллионов градусов. Внутри ядра выделяется 99% всей излучаемой Солнцем энергии. Основная реакция в ядре — это протон-протонная цепочка реакций:



ppI ветвь (на Солнце эта ветвь основная, она происходит с вероятностью 85-86% и является доминирующей при температурах 10-14 миллионов градусов):

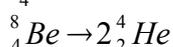
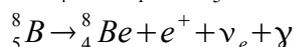
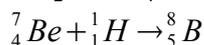
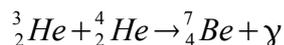


ppII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 14-15%, является доминирующей реакцией при температурах 14-23 миллиона градусов):



на втором этапе этой реакции энергия нейтрино зависит от получившегося состояния ядра лития-7, в 90% случаев энергия нейтрино равна 0.861МэВ.

ppIII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 0.11%, но эта ветвь важна для наблюдений как источник высокоэнергичных нейтрино, она становится доминирующей при температуре выше 23 миллионов градусов):



энергия нейтрино на предпоследнем этапе может достигать 14.06МэВ.

В основной ppI ветви из 4 протонов получается одно ядро атома гелия, дефицит массы составляет 0.7%, полный выход этой реакции 26.73МэВ. Нейтрино уносит 2% этой энергии, остальная энергия выделяется в виде гамма-квантов, давление которых противодействует гравитационному сжатию. В ветвях ppII и ppIII нейтрино уносит 4% и 28% энергии.

Интенсивность излучения Солнца соответствует тому, что каждую секунду в энергию превращается $4.26 \cdot 10^9$ кг вещества. Цифра огромная сама по себе, но сравнение с массой Солнца ($1.9891 \cdot 10^{30}$ кг) показывает, что Солнца хватит надолго.

Перенос энергии от горячего ядра к поверхности фотосферы осуществляется через два промежуточных слоя, отличающихся механизмами теплопередачи: радиационный и конвекционный слои. Радиационный слой по расчетам простирается от 0.25 до 0.7 солнечного радиуса. Температура вещества меняется от примерно 7 миллионов градусов у внутренних слоев до 2 миллионов у внешних, плотность изменяется от 20000 кг/м³ до 200 кг/м³. В радиационном слое перенос энергии осуществляется за счет постоянного поглощения и переизлучения фотонов. Конвективный слой имеет толщину около 200000 километров и простирается от 0.7 солнечного радиуса до поверхности, здесь становится активным конвективный метод переноса энергии. Конвекция приводит к колебаниям уровня фотосферы, обнаруживаемым по доплеровскому сдвигу.

Проблема солнечных нейтрино.

Нейтрино, образующиеся в результате термоядерных реакций в ядре Солнца, являются непосредственным «отпечатком пальцев» этих реакций. Энергичные гамма-кванты, образующиеся при реакциях, активно взаимодействуют с веществом, поглощаются и переизлучаются — по оценкам, «потомок» гамма-кванта, образовавшегося в ядре, достигает поверхности Солнца через 10000-200000 лет. Нейтрино же по большей части выходят из Солнца без взаимодействия с веществом. Поэтому довольно рано возникла задача детектирования потока солнечных нейтрино, так как интенсивность потока нейтрино однозначно связана с интенсивностью излучения Солнца. Для этого были построены «нейтринные обсерватории», о которых мы уже упоминали.

Первые измерения, проведенные будущим нобелевским лауреатом Рэймондом Дэвисом в конце 1960-х обнаружили, что интенсивность потока нейтрино составляет 1/3 от ожидаемого. Этот же результат был получен и в других измерениях, использующих радиохимические (на принципе превращения элементов при поглощении нейтрино) или водные (по черенковскому излучению выбитого электрона) детекторы. Этот дефицит нейтрино получил название «проблемы солнечных нейтрино» и оставался одной из нерешённых проблем до начала 2000-х годов.

Решением этой проблемы явилось открытие массы нейтрино. В природе существуют три вида нейтрино: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. В реакциях протон-протонной цепочки образуются электронные нейтрино, к ним же чувствительны радиохимические и водный детекторы. Если бы нейтрино были безмассовыми частицами, они бы могли двигаться только со скоростью света, и эти три вида нейтрино оказались бы независимыми. Из-за наличия массы оказались возможны превращения одного вида нейтрино в другой. Такие превращения были наблюдаемы непосредственно. Кроме того, запаздывание нейтринной вспышки от сверхновой 1987А в 1987 году, отмеченное между детекторами в Японии (детектор Камиоканде) и в США (детектор Ирвин-Мичиган-Брукхэвен) указывало на то, что скорость нейтрино чуть меньше скорости света.

В 2001 году была запущена нейтринная обсерватория в Сэдбури (Канада), детектор которой был способен обнаруживать все типы нейтрино и различать их. Результаты этого детектора показали, что в потоке солнечных нейтрино 35% являются электронными нейтрино, а 65% составляют нейтрино двух других сортов, что полностью объяснило «пропадавшие» 2/3 потока нейтрино. Таким образом, современные измерения подтверждают, что вся излучаемая Солнцем энергия образуется в результате термоядерной реакции.

Более того, как мы отмечали, энергия нейтрино, образующихся в разных ветвях протон-протонной цепочки отличается. Интенсивность потока высокоэнергичных нейтрино ветви ppIII очень сильно зависит от температуры (теория предсказывает, что вероятность этой ветви пропорциональна T^{25}), выделение высокоэнергичных нейтрино, связанных с этой ветвью реакции, и определение интенсивности их потока позволяет непосредственно «измерить» температуру ядра: по результатам этих измерений она равна 15.7 миллионов градусов.

Земля и Луна.

Земля.

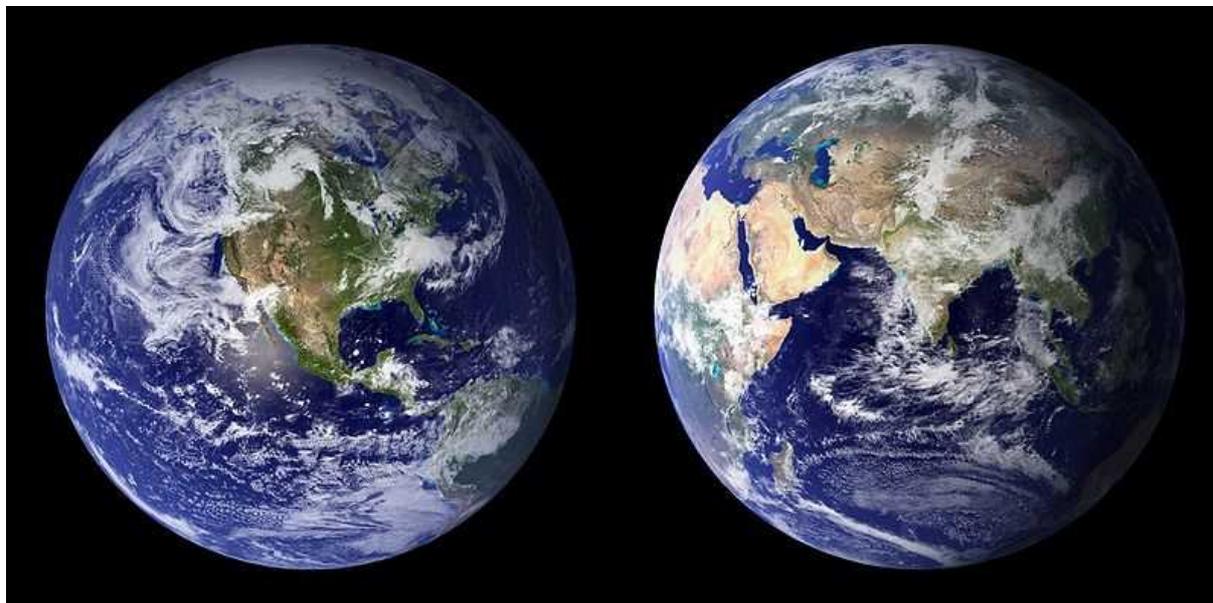


Рисунок 63: Земля, вид из космоса. Изображение получено суммированием многочисленных фотографий, сделанных зондом НАСА «Модис» (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) в 2001-2002 годах (фотография с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/The_Blue_Marble)

Изучение Земли в деталях является предметом отдельных наук: географии, геологии, геофизики. Отметим здесь некоторые факты, которые важны для решения задач астрономической тематики и для общего понимания астрономических вопросов.

Радиус Земли составляет примерно 6400 километров. Точнее, Земля имеет форму более близкую к слегка сплюсненному эллипсоиду вращения с полярным радиусом 6356.8 км и экваториальным радиусом 6378.1 км. Масса Земли $5.9736 \cdot 10^{24}$ кг, средняя плотность 5515 кг/м^3 . Перепад высот поверхности Земли достигает от +8848 метров на вершине Эвереста до -10911 метров на дне Марианской впадины. Первая космическая скорость (скорость орбитального движения по низкой орбите) для Земли равна 7.9 км/сек, скорость убегания (вторая космическая скорость) 11.2 км/сек.

В структуре Земли выделяют несколько слоев. Верхний твердый слой, кора, простирается на 5 (под океаном) — 70 (под материками) километров вглубь. Кора состоит в основном из материалов на основе оксида кремния (60.6% массы) и оксида алюминия (15.9% массы). Плотность коры меняется от 2700 кг/м^3 в верхних слоях до 3200 кг/м^3 в нижних, то есть плотность коры существенно ниже средней плотности Земли. Следующий слой, мантия, простирается до глубины примерно 2900 км. Температура мантии меняется от $900 \text{ }^\circ\text{C}$ на границе с корой до $4000 \text{ }^\circ\text{C}$ на границе с ядром, мантия состоит из расплавленных пород. Вязкое течение мантии обеспечивает динамику тектонических плит, выход расплавленных пород в разломы коры приводит к вулканической активности. Ядро состоит в основном из железа и никеля, собравшихся в центре расплавленного планетоида на этапе формирования планеты за счет механизма химического разделения элементов. Температура ядра достигает 6000К. Большая плотность ядра приводит к тому, что средняя плотность Земли оказывается выше плотности поверхностных слоев.

Земля вращается вокруг своей оси с периодом 23 часа 56 минут 4.1 секунды, то есть 0.99726968 стандартного дня. Стандартный день определяется как время от одного астрономического полдня до другого, это время оказывается чуть больше периода вращения из-за орбитального вращения Земли, происходящего в том же направлении: за время полного оборота вокруг оси Земля немного смещается по орбите, так что для того, чтобы Солнце для того же наблюдателя оказалось в наивысшей точке необходимо еще немножечко подождать. Ось вращения наклонена к плоскости орбиты вокруг Солнца на угол $23^{\circ}26'21''.4119$, этот наклон ответственен за смену сезонов и изменение соотношения длительности дня и ночи в течение года

Земля вращается по орбите вокруг Солнца с периодом 365.256363004 стандартного дня. Эта «не кратность» продолжительности суток и продолжительности года является старинной головной болью составителей календарей. Большая полуось земной орбиты равна 149598261 км (примерно 150 миллионов километров или 8.3 световых секунды), эксцентриситет орбиты незначителен (0.067): афелий и перигелий орбиты равны примерно 152 и 147 миллионам километров. Поэтому во многих задачах орбиту Земли можно считать круговой — отличие апогелия и перигелия от большой полуоси (2-3 миллиона километров) сравнимо с диаметром Солнца (1.3 миллиона километров) и, как мы видели ранее, с расстоянием между центром Солнца и центром масс Солнечной системы. Средняя скорость орбитального движения Земли равна 29.8 км/сек.

Луна

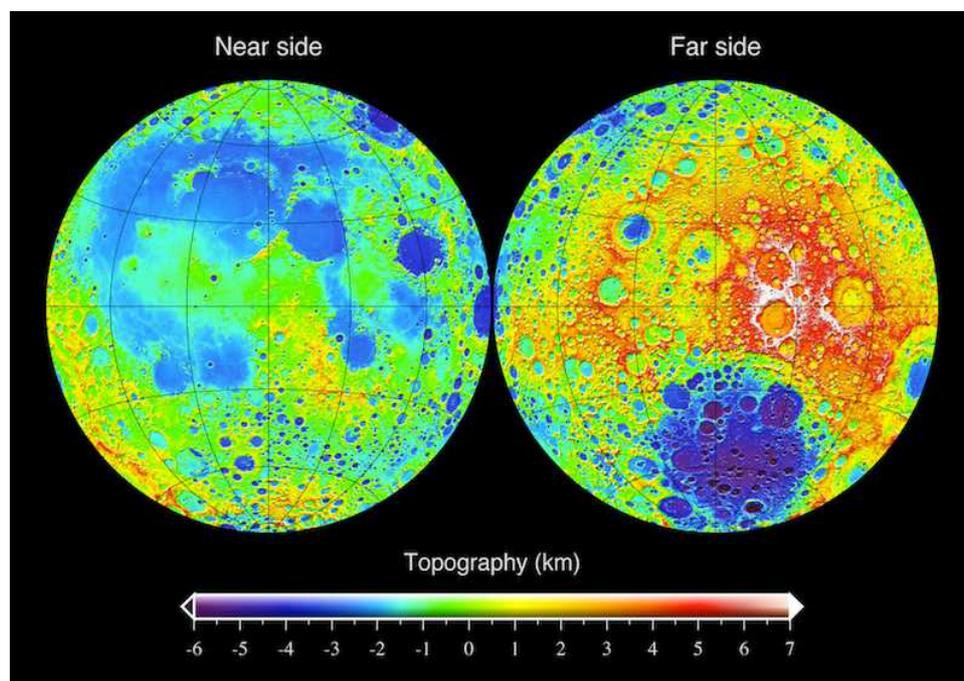


Рисунок 64: Топографические карты видимой и обратной стороны Луны (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Moon>)

Единственный спутник Земли — Луна. Наблюдения за Луной велись всю историю астрономических наблюдений. Близость Луны к Земле позволяет применить всевозможные инструменты для наблюдения — вплоть до радиолокации с Земли. К Луне были совершены многочисленные полеты исследовательских зондов и пилотируемых миссий. Образцы

лунного грунта были доставлены на Землю и исследованы в земных лабораториях. Таким образом, известно нам о Луне довольно много.

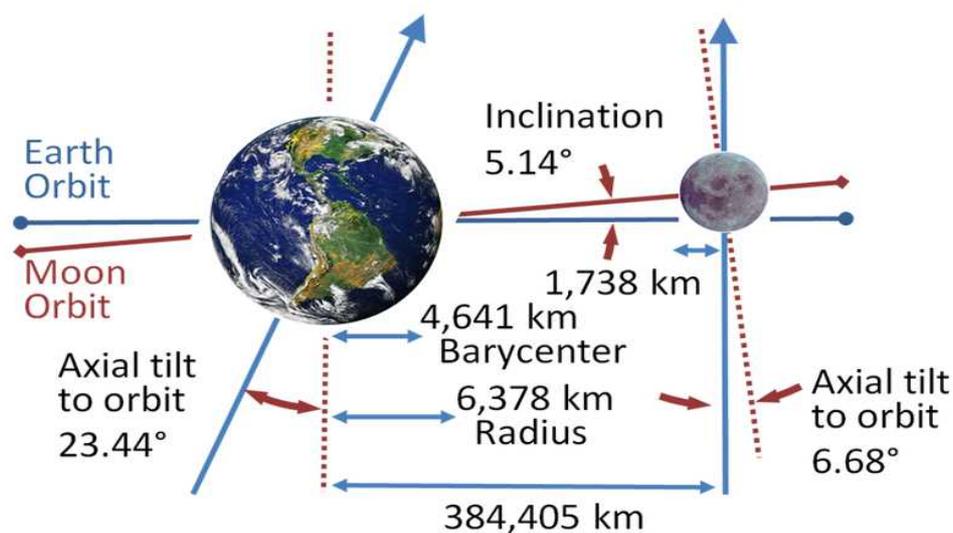


Рисунок 65: Схема взаимной ориентации Земли и Луны (рисунок с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Moon>). Не в масштабе.

Радиус Луны равен примерно 1700 километрам (27% от земного), масса $7.3477 \cdot 10^{22}$ кг (1.23% земной), средняя плотность 3350 кг/м^3 (близка к плотности земной коры). Средний радиус орбиты 384000 километров (1.3 световых секунды). Центр масс системы Земля-Луна лежит на расстоянии примерно 4600 километров от центра Земли (то есть «внутри» Земли). Орбита слегка эллиптическая: перигей равен 363000 километров, апогей — 406000 километров. Плоскость орбиты слегка наклонена к плоскости эклиптики (5.14°), ось собственного вращения Луны почти нормальна к плоскости эклиптики (наклонена к плоскости лунной орбиты на угол 6.68°). Схема взаимного расположения Луны и Земли показана на рисунке 65.

Орбитальный период Луны равен 27.3 дня, синодический период (для земного наблюдателя) оказывается почти на 2 дня больше (29.5 дня), так как земля вращается вокруг своей оси в ту же сторону. Средняя скорость орбитального движения Луны примерно 1000 м/сек. Луна вращается вокруг своей оси, период собственного вращения синхронизован с периодом орбитального вращения из-за эффекта приливного торможения, о котором мы поговорим позже. Скорость убегания для Луны 2.38 км/сек, первая космическая скорость — 1.7 км/сек.

Параметры лунной орбиты постоянно контролируются с 1969 года в ходе эксперимента по лазерной локации Луны. Эксперимент начался с инсталляции командой «Аполлона 11» углового отражателя. В дальнейшем были установлены отражатели в ходе миссий «Аполлон 14» и «Аполлон 15», угловые отражатели были установлены и на советских аппаратах «Луноход 1,2». Этот эксперимент обнаружил увеличение среднего радиуса лунной орбиты на 38 мм в год (10^{-10} от радиуса орбиты), что также связано с приливным торможением.

Для того, чтобы понять степень точности инструментов, участвующих в эксперименте, приведем некоторые факты и оценки. Размер углового отражателя, установленного миссией «Аполлон 11» составляет примерно 0.5x0.5 метра. В эту мишень надо попасть лучом лазера с расстояния 380000 километров — задача сравнимая с попаданием в волос на расстоянии 1 километр. Кроме того, из-за дифракционного расхождения луч лазера на волне

500 нм диаметром 5 см дает на Луне пятно диаметром $D = \frac{\lambda}{d} L = 3.8 \text{ км}$, то есть (пренебрегая потерями по пути) обратно отражается примерно $(0.5/4000)^2 \sim 10^{-8}$ интенсивности излучения. Отраженный луч также испытывает дифракционное расхождение и образует на Земле пятно диаметром 38 метров. Если для наблюдения за отраженным лучом используется метровый телескоп — то в него попадет $(1/38)^2 \sim 10^{-3}$ от интенсивности вернувшегося пучка или 10^{-11} от исходного! В реальности, отраженный сигнал еще слабее — только 1 из 10^{17} фотонов возвращается в приемник.

Средний видимый угловой размер Луны равен $31'$ и практически совпадает с видимым угловым диаметром Солнца ($32'$). (Точнее, из-за эллиптичности орбит угловой размер Луны меняется от $29'24''$ до $33'40''$, а угловой размер Солнца — от $31'27''$ до $32'31''$). Интересно упомянуть известный оптический обман — Луна у горизонта (как и Солнце у горизонта) кажутся больше, чем вблизи зенита. Этот эффект, иногда называемый «лунной иллюзией» имеет чисто психологическую природу и связан с тем, что мозг автоматически делает поправку на эффект перспективы по видимым «уходящим к горизонту» объектам. Эта случайная близость угловых размеров позволяет осуществляться таким ярким астрономическим явлениям, как солнечные затмения. Причем, из-за отмеченного небольшого изменения угловых размеров, Луна может как полностью закрыть Солнце, так и оставить незакрытое «кольцо» - что приводит к полному и кольцевому затмениям соответственно.

Состав лунной поверхности очень близок к составу земной коры: это в основном соединения кремния и алюминия. На поверхности выделяют «возвышенности» и «моря». Возраст возвышенностей оценивается в 4.4 миллиарда лет, возраст морей 3-3.5 миллиарда лет с некоторыми участками датируемыми в 1.2 миллиарда лет. Эти данные получены по радиоуглеродному анализу образцов, доставленных на Землю. Интересно, что изотопный состав лунного и земного грунтов практически совпадает, а многие отличия изотопного состава описываются влиянием космического излучения, от которого поверхность Луны не защищена атмосферой. Миссиями программы «Аполлон» на Луну были доставлены сейсмографы, анализ данных которых позволил изучить внутреннюю структуру Луны (источниками сигнала для сейсмографов являлись метеоритные удары и несколько контролируемых рукотворных, например, падение разгонной ступени лунного модуля после ее использования). Эти сейсмографы также обнаружили «лунотрясения», причиной которых вероятно являются приливные деформации Луны. Полученные данные показывают, что Луна имеет внутреннюю структуру, похожую на земную: кора толщиной 60-100 километров, мантия простирается до глубины примерно 1350 километров, причем верхний слой (толщиной около 1000 километров в данное время полностью затвердел, и ядро, богатое железом, внешняя часть которого пребывает в расплавленном состоянии).

Современная картина происхождения и эволюции Луны связывает возникновение Луны с соударением Протоземли с объектом размером с Марс. По одной из версий, этим объектом была протопланета Тея, формировавшаяся в точке Лагранжа L_4 или L_5 системы Земля-Солнце и вышедшая из этой точки под действием какого-то возмущения. Это соударение произошло предположительно 4.5 миллиарда лет назад на конечных этапах формирования Земли. Касательный удар планетоида массой около 10% от массы Земли выбил материал земной коры и мантии, из которого образовалась Луна. Затем будущая Луна прошла стадию химического разделения, но из-за своего меньшего размера Луна остывала гораздо быстрее Земли, что привело к довольно быстрому образованию толстой литосферы. На ранних этапах развития Луны приливное влияние Земли и сильные метеоритные удары приводили к вулканической активности, следами которой являются «моря» - области относительно

молодой лавы. В настоящее время на Луне случаются «лунотрясения», фиксированные доставленными на Луну сейсмографами, но их причина лежит не в собственной тектонической активности, а в накоплении напряжений под действием приливных сил со стороны Земли.

Другие объекты систем Земля-Солнце и Земля-Луна.

Как мы обсудим позднее, в системе двух тяготеющих тел есть несколько выделенных точек — точек Лагранжа, в которых гравитационное влияние этих тел в некотором смысле компенсируется, и эти точки являются положениями равновесия для малых тел. В случае системы Юпитер-Солнце в точках Лагранжа L_4 и L_5 , например, находятся семейства так называемых троянских астероидов. В точках Лагранжа систем Земля-Солнце и Земля-Луна не обнаружено никаких крупных объектов естественного происхождения. Точки Лагранжа системы Земля-Солнце используются для размещения некоторых космических обсерваторий (например, упоминавшаяся уже обсерватория СОХО находится в точке L_1).

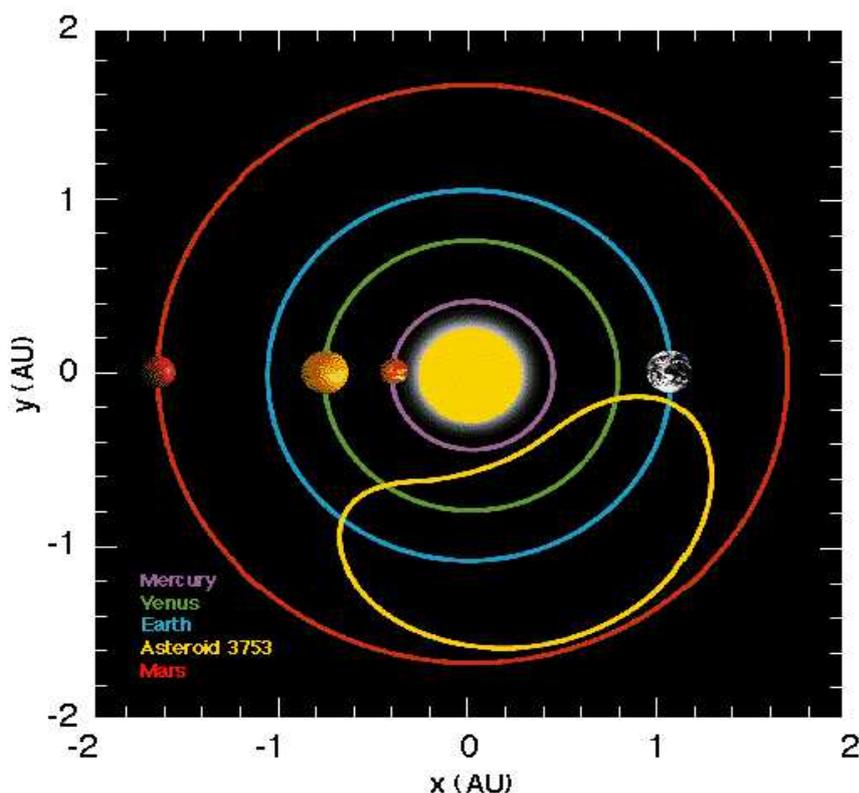


Рисунок 66: Видимая с Земли траектория астероида 3753. (Рисунок с сайта http://www.astronet.ru/db/msg/1163750/ast3753_pw_big.gif.html)

В Солнечной системе существует, однако, несколько малых тел, движущихся по орбитам, близким к земной и под действием силы притяжения к Земле попавшие в так называемый орбитальный резонанс 1:1 — их период обращения вокруг Солнца практически совпадает с земным. Еще раз подчеркнем, что такие малые тела испытывают существенное влияние Земли — поэтому их движение не точно подчиняется законам Кеплера, верным для системы двух тел. Крупнейшим из таких «компаньонов» Земли является астероид 3753 Кринье (Crithne), открытый в 1986 году. Этот астероид диаметром 5 километров движется по орбите

вокруг Солнца с афелием 1.51 а.ед и перигелием 0.484 а.ед. (из-за наклона орбиты риска столкновения с Землей нет). Из-за совпадения периодов обращения с точки зрения земного наблюдателя этот астероид выглядит совершающим движение по орбите своеобразной «фасолевидной» формы с периодом 1 год (рисунок 66). Из-за этого этот ко-орбитальный астероид называют иногда «второй луной Земли» - что, конечно, не совсем верно, так как он движется не вокруг Земли, а вокруг Солнца, а «орбита вокруг Земли» является кажущейся.

Другие планеты земного типа (Меркурий, Венера, Марс). Сравнительный анализ планет земного типа.



Рисунок 67: Сравнение размеров планет земного типа. Слева-направо: Меркурий, Венера (изображения по результатам радарного сканирования), Земля, Марс. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/File:Terrestrial_planet_size_comparisons.jpg)

Внутренние планеты Солнечной системы называют планетами земного типа. Это четыре отличных друг от друга планеты: Меркурий, Венера, Земля и Марс (рисунок 67). Тем не менее у этих планет есть ряд общих черт:

- их размеры близки;
- их средние плотности достаточно высоки, что указывает на наличие в их составе тяжелых элементов (железа);
- их орбиты лежат ближе к Солнцу, чем точка образования льда для воды и других соединений (точка образования льда для воды лежит на расстоянии примерно 5 а.ед. от Солнца, это удаление соответствует орбите Юпитера), поэтому формирование этих планет должно было происходить одинаково — за счет присоединения более мелких планетоидов.

Некоторые физические характеристики планет земного типа представлены в таблице:

	Меркурий	Венера	Земля	Марс
масса	0.330·10 ²² кг (0.055 земной)	48.7·10 ²³ кг (0.815 земной)	52.7·10 ²³ кг	6.42·10 ²³ кг (0.107 земной)
средний радиус	2440 км (0.383 земного)	6050 км (0.950 земного)	6370 км	3380 км (0.532 земного)
средняя плотность	5430 кг/м ³	5200 кг/м ³	5520 кг/м ³	3930 кг/м ³
ускорение свободного падения на экваторе	3.7 м/с ²	8.87 м/с ²	9.78 м/с ²	3.71 м/с ²
большая полуось орбиты	57.9·10 ⁶ км (0.387 а.ед., 3.2 св.мин.)	108.2·10 ⁶ км (0.723 а.ед., 6 св.мин.)	149.5·10 ⁶ км (8.3 св.мин.)	227.9·10 ⁶ км (1.523 а.ед., 12.7 св.мин.)
перигелий	46·10 ⁶ км (0.307 а.ед.)	107.5·10 ⁶ км (0.718 а.ед.)	147.1·10 ⁶ км (0.983 а.ед.)	206.7·10 ⁶ км (1.381 а.ед.)
афелий	69.8·10 ⁶ км (0.467 а.ед.)	108.9·10 ⁶ км (0.728 а.ед.)	152.1·10 ⁶ км (1.016 а.ед.)	249.2·10 ⁶ км (1.666 а.ед.)
период обращения вокруг Солнца	88.0 дней	224.7 дней	365.256 дней	687 дней
период вращения вокруг оси	58.6 дней (спин-орбитальный резонанс 3:2)	243 дня	0.997 дня (23ч. 56мин. 4.1сек.)	1.026 дня
наклон орбиты к эклиптике	7°	3.4°	0°	1.85°
наклон оси вращения к плоскости орбиты	2.11'	177.3° (собств. вращение обратно орбитальному)	23°26'	25.19°
средняя орбитальная скорость	47.9 км/сек	35.0 км/сек	29.8 км/сек	24.1 км/сек
первая космическая скорость	3.00 км/сек	7.23 км/сек	7.9 км/сек	3.54 км/сек
скорость убегания	4.25 км/сек	10.22 км/сек	11.2 км/сек	5.0 км/сек
атмосфера	остаточная (42% O ₂ , 29% Na, 22% H ₂ , 6% He)	плотная, 93 атм на поверхности (95% CO ₂ , 5%N ₂)	стандартная, 1 атм на поверхности (78% N ₂ , 21%O ₂ , 1%Ar, ~1% H ₂ O, 0.04% CO ₂)	разреженная, 0.005 атм на поверхности (95% CO ₂ , 2.7%N ₂ , 1.6%Ar, 0.13%O ₂)
магнитное поле	есть, 300нТ (1% земного)	нет	есть, средняя индукция 5·10 ⁻⁵ Т	остаточная намагниченность пород
Температура поверхности	дневная сторона - до 700К, ночная - 100К	средняя 730К	средняя 287К (183К-333К)	средняя 250К (133К-293К)

Источником наших знаний о планетах являются наблюдения при помощи телескопов (в различных частях спектра), радиолокация планет, наблюдения с космических зондов, а для Венеры и Марса также наблюдения со спускаемых аппаратов, достигших поверхности.

Меркурий.

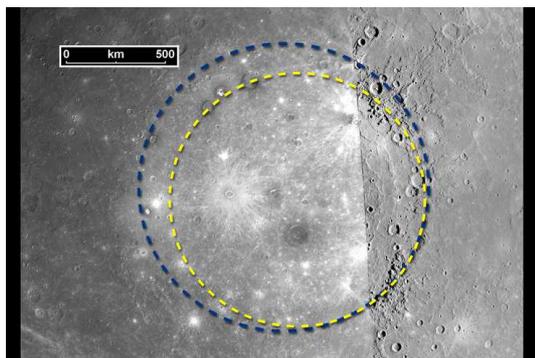


Рисунок 68: Кратер Бассейн Калорис. Мозаика изображений зонда "Маринер 10" (1974, левая часть) и зонда "Мессенджер" (2008, правая часть). Пунктирные линии - оценка размера кратера по данным зонда "Маринер 10" (синий) и "Мессенджер" (жёлтый). (с сайта http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=10289)

Ближайшей к Солнцу планетой является Меркурий. Эта планета чуть больше Луны по размеру. Из-за близости к Солнцу температура поверхности на нагретой стороне Меркурия достигает 700К, поэтому он не в состоянии удерживать атмосферу и его окружает только очень разреженная экзосфера с давлением порядка одного нанопаскаля.

Из-за отсутствия атмосферы (плотная атмосфера защищает от мелких метеоритов, а атмосферная активность сглаживает следы ударов) поверхность Меркурия, как и поверхность Луны, покрыта кратерами. Один из них — Бассейн Калорис, он является крупнейшим известным кратером и его диаметр составляет более 1000 километров (рисунок 68). Интересно отметить, что на диаметрально противоположной этому кратеру стороне Меркурия имеется большой участок иррегулярной поверхности (Земля Хаоса), предположительно вызванный фокусировкой сейсмических волн от удара, породившего кратер.

Наличие кратеров создает на поверхности Меркурия участки, всегда находящиеся в тени, по данным радарных исследований в таких участках может находиться замерзшая вода (лед хорошо отражает радиоволны частот используемых в этих исследованиях). Объем этих «ледяных полей» на самой близкой к Солнцу планете оценивается в 10^{14} - 10^{15} кг (масса антарктических ледников $4 \cdot 10^{18}$ кг).

Плотность Меркурия примерно равна плотности Земли, что говорит о наличии у него железного ядра. Однако при этом сравнении необходимо учесть, что материал земной мантии и ядра во внутренних частях Земли существенно сжат гравитацией. Размер и масса Меркурия существенно меньше — поэтому для него такое сжатие существенно слабее. Тогда для описания столь большой плотности Меркурия необходимо предположить, что железное ядро занимает примерно половину объема планеты, а его радиус равен примерно 3/4 радиуса планеты (у Земли радиус ядра чуть меньше 1/2 радиуса планеты). Таким образом, Меркурий гораздо богаче железом, чем другие планеты. Для объяснения этого избытка тяжелых

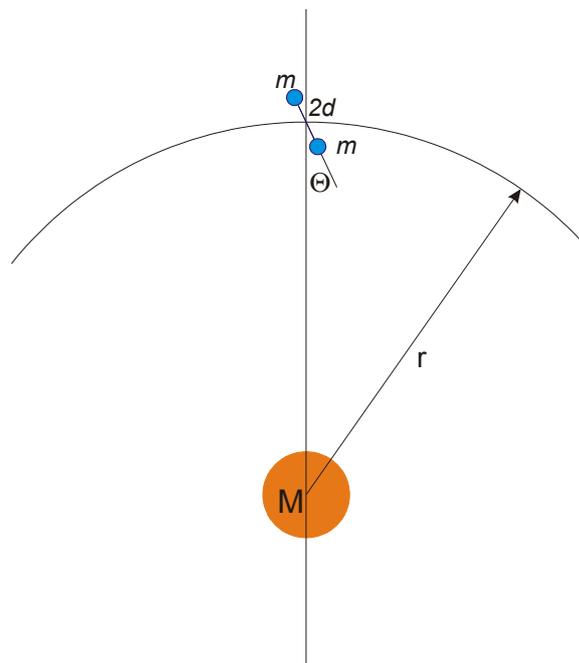


Рисунок 69: К объяснению спин-орбитального резонанса 3:2.

элементов есть две основных гипотезы. По одной из них прото-Меркурий испытал соударение с планетоидом массой примерно в 1/6 от собственной и этот удар «очистил» Меркурий от верхних слоев мантии. По другой, на ранних этапах формирования Меркурия он находился очень близко к прото-Солнцу и температура на его поверхности могла достигать 2000К, что привело к плавлению и испарению более легкоплавких пород.

Зонды «Маринер 10» (1974-1975) и «Мессенджер» (2008) произвели фотосъемку поверхности. Также они обнаружили наличие у Меркурия постоянного магнитного поля со средней индукцией 300нТ (примерно 1% земного). Это говорит о том, что, несмотря на маленький размер, ядро Меркурия остается в жидком состоянии. Дополнительным источником подогрева ядра являются приливные силы со стороны Солнца.

С орбитальным и собственным вращениями Меркурия связаны два интересных явления. Первое из них — это так называемый спин-орбитальный резонанс 3:2. Период собственного и орбитального вращений Меркурия согласованы так, что на два оборота вокруг Солнца приходится 3 оборота вокруг оси. Причина этой синхронизации связана с относительно сильной эллиптичностью орбиты Меркурия и небольшой вытянутостью формы планеты. Для того, чтобы показать действующие силы, рассмотрим экстремально упрощенную модель, в которой, вместо небольшой вытянутости планеты, «планета» представляет собой «гантелю» из двух равных точечных масс, находящихся на расстоянии $2d$ друг от друга (рисунок 69). Легко заметить, что на ближний к Солнцу шар гантели действует большая сила, чем на дальний. Таким образом, возникает момент, стремящийся направить ось гантели вдоль прямой, соединяющей ее центр и Солнце. То же самое можно показать из энергетических соображений: потенциальная энергия гантели в поле силы тяжести

$$E = -G \frac{Mm}{r-d \cos \Theta} - G \frac{Mm}{r+d \cos \Theta} \approx -G \frac{2Mm}{r} \left(1 + \frac{d^2 \cos^2 \Theta}{r^2} \right) \quad \text{имеет минимум при } \Theta = 0 .$$

Из-за большой эллиптичности орбиты оказывается, что ситуация резонанса 3:2, при которой при прохождении перигелия (вблизи Солнца) ось распределения масс оказывается направлена к Солнцу, но обращенная к Солнцу сторона чередуется в последующих прохождении перигелия, оказывается устойчивой: полная синхронизация орбитального и собственного вращения (как в системе Земля-Луна) потребует в течение какого-то времени выйти из этого оптимума при прохождении перигелия.

Второе явление — это прецессия перигелия Меркурия. Так как Солнечная система является системой многих тел, то законы Кеплера, предсказывающие движения по эллиптическим орбитам, выполняются лишь приближенно. В частности, точки перигелия и афелия могут изменять свое положение со временем. Внимательное изучение орбиты Меркурия привело в середине 19 века к заключению, что наблюдаемая прецессия орбиты Меркурия не может быть объяснена классической механикой: влияние других планет приводит к прецессии в 530" в столетие, а наблюдаемая прецессия на примерно 40" в столетие больше. Этот эффект был объяснен только общей теорией относительности и он связан с нарушением законов классической механики вблизи массивного тела. Для сведения, отметим здесь что аналогичный релятивистский дрейф перигелия Земли составляет 5" в столетие, а для двойных систем нейтронных звезд (например, системы пульсаров PSR J0737-3039 и PSR 1913+16) он может достигать нескольких градусов в год (17° и 4° для перечисленных систем).

Венера.



Рисунок 70: Изображение Венеры, полученное телескопом Хаббл в видимом (с диапанаоне, 1999 год. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00073>)

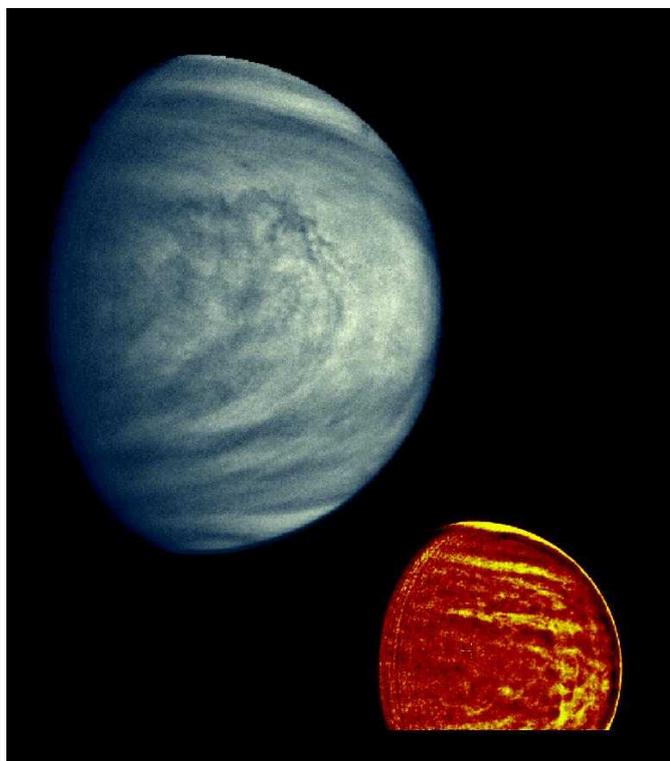


Рисунок 71: Изображения Венеры полученные зондом "Галилео" с фиолетовым фильтром (большое изображение) и в ближнем ИК

диапазоне (маленькое изображение), 1996 год. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00073>)

Венера является наиболее похожей на Землю по массе и размеру планетой. Ее размер и масса должны позволять ей сохранить достаточно тепла для поддержания внутренностей планеты в расплавленном (или точнее в пластичном) состоянии. Действительно, поверхность Венеры, подробно исследованная в настоящее время благодаря радарному сканированию с наземных радиотелескопов и космических зондов, несет на себе следы вулканической активности: лавовые поля и вулканы, включая своеобразные «вулканические блины» - выходы вязкой лавы на поверхность, образующие плоские участки практически идеальной круглой формы (показаны на рисунке 74).

Однако, в отличие от Земли, тектоника Венеры другая — на Венере не сформировались массивные тектонические плиты. Предположительно, кора Венеры относительно тонкая (по сравнению с Землей), поэтому вулканическая активность происходит практически по всей поверхности планеты, в то время как на Земле сейсмическая активность привязана к местам соприкосновения тектонических плит. Это подтверждается также и тем, что возраст кратеров, обнаруженных на поверхности Венеры практически одинаков — то есть возраст всех участков поверхности примерно один и тот же. Хотя активных вулканов зафиксировано не было, геологические оценки показывают что некоторые из обнаруженных лавовых полей

имеют возраст около 10 миллионов лет, что по геологическим меркам является недавним образованием (возраст старейших земных горных пород оценивается в 200 миллионов лет). Такая тектоника, предположительно была и на Земле миллионы лет назад, когда внутренние слои Земли были горячее и конвекционные процессы в них шли активнее. То есть в тектоническом плане Венера является «молодой Землей».

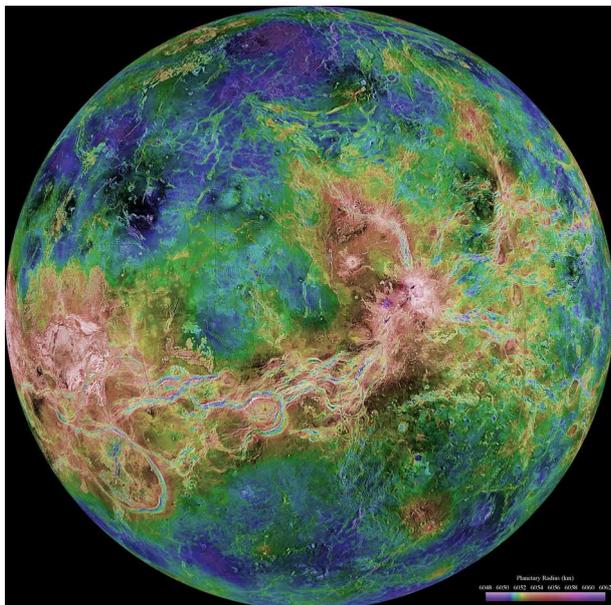


Рисунок 73: Топографическая карта Венеры, полученная по результатам радарного сканирования (в основном с зонда "Магеллан"). Цветом показана высота: фиолетовый - впадины, красные оттенки - горы, полный перепад высот около 15 км, 1998 год.(с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00159>)



Рисунок 72: Изображение поверхности Венеры, переданное спускаемым аппаратом зонда "Венера-14" в 1982 году. (фото с сайта http://nssdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photo_gallery-venus.html)

Как и Земля, Венера вероятно имеет железное ядро (средние плотности Венеры и Земли близки). Однако медленная скорость вращения Венеры вокруг оси не позволяет генерировать сколь-либо заметное магнитное поле. Период собственного вращения Венеры равен 243 дням, что является самым большим периодом вращения для планет Солнечной системы. Более того, Венера вращается в обратном относительно орбитального движения направлении, что является исключением для планет Солнечной системы. Предположительно, медленная скорость и необычное направление вращения Венеры связано с несколькими соударениями с планетоидами, подобных тому, которое привело к образованию Луны или соударению, предположительно «очистившему» Меркурий от внешних слоев литосферы.

Как и Земля, Венера обладает атмосферой. Однако эта атмосфера гораздо плотнее (давление у поверхности равно 90 атмосферам), горячее (температура у поверхности 700К) и безжизненное (в составе атмосферы 97% составляет CO_2). В атмосфере содержится заметное количество серных соединений, что приводит к формированию облаков из серной кислоты. Такой состав атмосферы Венеры близко соответствует составу вулканических газов на Земле — так что источником атмосферы на Венере, как и земной атмосферы, вероятно является вулканическая активность. На Земле, однако, атмосфера смогла очиститься от избытка CO_2 благодаря тому, что температура атмосферы была достаточно низка, чтобы позволить воде конденсироваться. Эти дожди связывали двуокись углерода, которая потом связывалась в минеральные отложения. Большая близость Венеры к Солнцу привела к тому, что этот механизм связывания не работает — водяные пары не конденсируются. При этом оба газа — и водяной пар, и двуокись углерода являются парниковыми газами, они прозрачны для видимого излучения Солнца, нагревающего поверхность, но непрозрачны для теплового излучения поверхности. В результате, в атмосфере Венеры реализуется «экстремальный» сценарий парникового эффекта.



Рисунок 74: Вулканические "блины" на поверхности Венеры. Диаметр больших образований 65 километров, их высота - менее 1 километра. Изображение получено зондом "Магеллан" (радарное сканирование) в 1991 году. (С сайта <http://www2.jpl.nasa.gov/magellan/image29.html>)

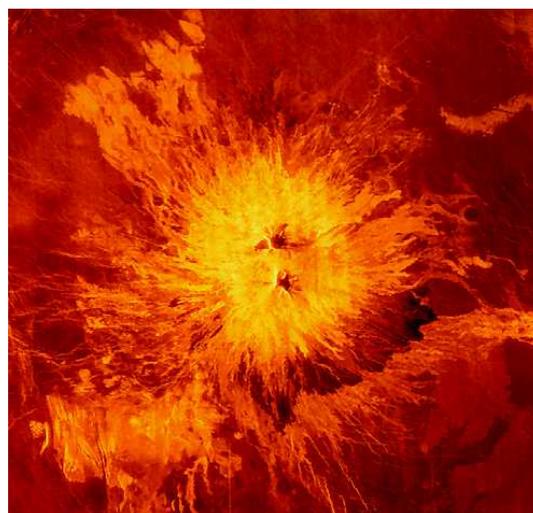


Рисунок 75: Вулкан СапаМон (Sapas Mons) на Венере. Диаметр вулканического конуса - около 400 километров, высота - 1.5 километра. Изображение получено зондом "Магеллан" (радарное сканирование) в 1991 году. (С сайта <http://www2.jpl.nasa.gov/magellan/image28.html>)

Марс.



Рисунок 76: Вид марсианской поверхности, переданный марсоходом "Оппортьюнити", 2006 год. (фотография с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Mars>)

Марс является самой далекой от Солнца планетой земного типа. Радиус Марса примерно вдвое меньше земного, а масса составляет около 10% земной.

Меньший размер привел к более быстрому остыванию Марса (в грубом приближении, поток уходящего тепла при той же температуре поверхности пропорционален площади, то есть R^2 , а запасенное тепло пропорционально массе, то есть R^3). Анализ возмущений в орбитальном движении космического зонда «Марс Глобал Сурвейор» (Mars Global Surveyor, НАСА, запущен в 1996 году) показал, что распределение массы в марсианской коре соответствует толщине коры от 40 до 70 километров, что даже в абсолютном исчислении больше, чем толщина земной коры. Поэтому у Марса нет тектонической активности. Земля оказывается уникальной в этом смысле: если кора планеты тонкая, как на Венере, то происходят мелкие «прорывы» лавы по всей поверхности, если кора планеты толстая (как у Марса), то кора оказывается слишком прочной, чтобы распасться на тектонические плиты.

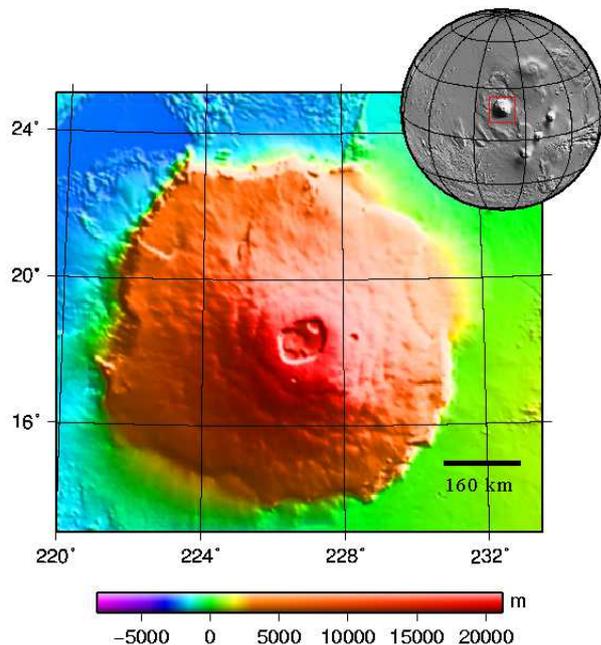


Рисунок 78: Вулкан Олимп (Olympus Mons) на Марсе (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Olympus_Mons)

Рисунок 77: Фотография Марса с орбиты. Видна атмосфера Марса. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Mars>)

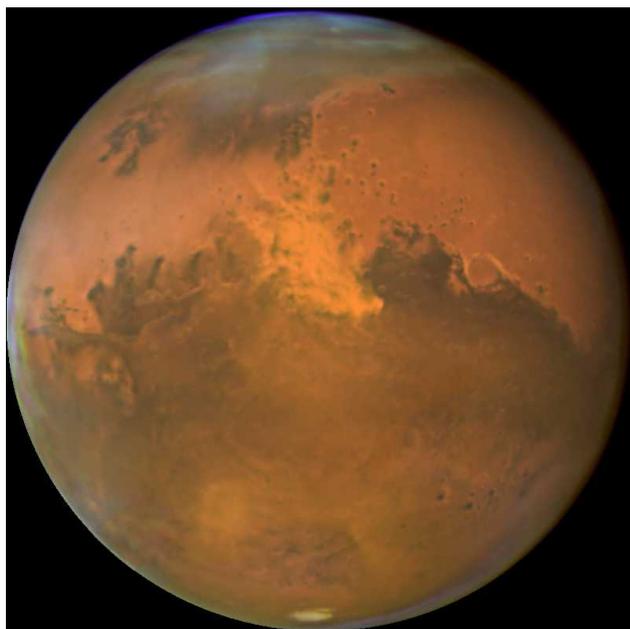


Рисунок 80: Вид Марса в космический телескоп "Хаббл" (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Mars>)

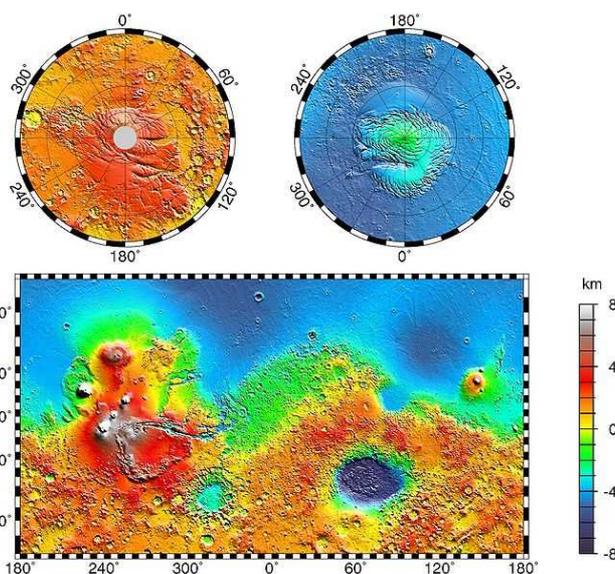


Рисунок 79: Топографическая карта Марса. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Mars>)

Тем не менее, на Марсе имеются следы вулканической активности в прошлом. Об этом свидетельствует и спектроскопический анализ поверхности, показывающий, что поверхность в основном покрыта лавовыми породами, и многочисленные наблюдения поверхности, обнаруживающие образования типично вулканической природы. Крупнейшая гора Марса — Олимп является потухшим вулканом и достигает в высоту 27 километров от среднего уровня поверхности. Возраст самых молодых из обнаруженных лавовых пород оценивается в 10 миллионов лет, то есть вулканическая активность продолжалась и в недавнем геологическом прошлом. Некоторые из упавших на землю метеоритов («марсианские метеориты») считаются «выходцами» с Марса¹, по одной из гипотез они были выброшены в космос именно в результате вулканической активности. Эти метеориты обнаруживаются на Земле, их марсианское происхождение установлено по характерному изотопному составу самих метеоритов и остаточного газа, содержащегося в их порах, совпадающим с соответствующими характеристиками марсианских пород и атмосферы. Всего идентифицировано 124 марсианских метеорита из примерно 60000, обнаруженных на настоящий момент.

Плотность Марса указывает на наличие у него железного ядра. Однако, несмотря на наличие ядра и достаточно быстрое вращение (примерно 1 земной день) в настоящее время у Марса нет своего магнитного поля. При этом участки марсианской поверхности демонстрируют остаточную намагниченность, что говорит о том, что ранее Марс обладал планетарным магнитным полем. Одной из возможных причин исчезновения этого поля является остановка планетарной динамо-машины из-за остывания ядра, возможно отягощенная наличием в железном ядре больших примесей серы, препятствующих «разгону» динамо-машины.

Марсианская атмосфера очень разрежена, давление на поверхности составляет около 0.5% нормального (около 0.5 кПа). Атмосфера в основном состоит из двуокси углерода (95%). Интересно отметить обнаружение в атмосфере Марса метана: метан легкий газ и должен «убегать» из марсианской атмосферы за несколько лет из-за слабого притяжения. Наличие в

¹ Mars Meteorites Homepage, <http://www2.jpl.nasa.gov/snc/index.html>

атмосфере метана предположительно указывает на все еще текущие вулканические процессы. Слабая гравитация и большее, чем у Земли, удаление от Солнца объясняют разреженность атмосферы и низкую температуру поверхности Марса. Предполагается, что на ранних этапах эволюции Марса (во время активной вулканической деятельности) атмосфера была плотнее и содержала и водяной пар. Из-за низкой средней температуры атмосферы (связанной с большим расстоянием до Солнца) вода активно конденсировалась и вымывала двуокись углерода из атмосферы. Из-за остывания планеты и прекращения вулканической активности вымытая из атмосферы двуокись углерода не рециркулирует, а остается связанной на поверхности (на Земле осадочные породы постепенно поглощаются мантией и двуокись углерода возвращается в атмосферу в извержениях вулканов. В результате, из-за большой активности этого процесса вымывания парниковых газов, в противоположность Венере Марс является примером «разогнавшегося» «ледникового» эффекта: атмосфера практически не оказывает парникового эффекта. Поэтому температура поверхности в холодные сезоны (наклон оси вращения к орбите равен примерно 25° , поэтому как и на Земле на Марсе должны быть ярко выраженные сезоны) опускается ниже 150К, что приводит к появлению полярных шапок из замерзающей двуокиси углерода — сухого льда.

Марс является единственной планетой земного типа, помимо Земли, имеющей спутники: Фобос (размер примерно 27x22x18 км, орбитальный период 7 часов 40 минут) и Деймос (размер примерно 15x12x10 км, орбитальный период примерно 30 часов). Природа этих спутников не до конца ясна. С одной стороны, они напоминают по многим своим параметрам захваченный гравитационным полем планеты астероиды, с другой их орбиты практически круговые и лежат практически в плоскости экватора Марса, что возможно указывает на их формирование из «остатков марсианских стройматериалов». Интересно, что один из спутников вращается быстрее собственного периода вращения Марса, а другой — медленнее. Поэтому из-за действия приливных сил Деймос, подобно Луне, постепенно удаляется от Марса, а Фобос — приближается. Примерно через 40 миллионов лет Фобос упадет на поверхность Марса (или, если он ранее будет разрушен приливными силами, образует кольцо вокруг Марса).



Рисунок 81: Фобос. Мозаика фотографий с зонда "Викинг 1", 1978 год. (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Phobos_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Phobos_(moon)))



Рисунок 82: Фобос, изображение с зонда "Марс Реконнэсанс Орбитер", 2008 год (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Phobos_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Phobos_(moon)))



Рисунок 83: Деймос, фотография с зонда "Марс Реконнэсанс Орбитер", 2008 год (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Deimos_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Deimos_(moon)))

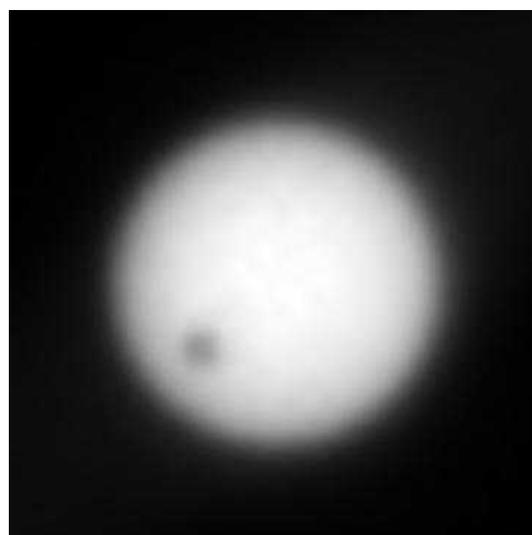


Рисунок 84: "Попытка солнечного затмения" - прохождение Деймоса по диску Солнца, зафиксированное марсоходом "Оппортюнити" (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Deimos_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Deimos_(moon)))

С Марсом связано несколько тем, иногда громко обсуждаемых в средствах массовой информации. Перечислим их здесь кратко.

1. Вода на Марсе. В настоящее время жидкая вода на Марсе существовать не может. Некоторые образования на поверхности указывают на то, что на ранних этапах развития жидкая вода на поверхности была. Считается доказанным присутствие замерзшей воды под поверхностью Марса (результаты гамма-активационного анализа, проведенного зондом «Марс Одиссей»).
2. Жизнь на Марсе. Марсианские миссии провели ряд опытов по обнаружению жизни на Марсе. В частности, посадочный аппарат «Феникс» (НАСА, 2008 год) провел анализ грунта в месте посадки в поисках продуктов органического происхождения. В целом, эти миссии не дали позитивного результата. В современном понимании биологической жизни, для нее необходима жидкая вода — которая в современных условиях на поверхности Марса существовать не может. Гипотетически обсуждалась возможность существования жидкой воды в кавернах в глубине марсианской коры, подогреваемых теплом от внутренних частей планеты. В отношении возможности существования жизни на Марсе в прошлом существует противоречивая информация по анализу марсианского метеорита ALH84001, обнаруженного в 1984 году в Антарктиде. В структуре этого метеорита, который предположительно покинул поверхность Марса около 15 миллионов лет назад и упал на Землю около 13000 лет назад, обнаружены включения, возможно являющиеся свидетельством деятельности бактериальных форм жизни. Таким образом, этот вопрос обсуждается в научных



Рисунок 85: "Лицо на Марсе". Изображения с зондов "Марс Реконнэсанс Орбитер" (крупное) и "Викинг 1" (мелкое). (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Face_on_Mars)

кругах, однако общепризнанного положительного мнения о существовании на Марсе жизни в настоящем или прошлом нет.

3. «Каналы» на Марсе. Марсианские «каналы» были обнаружены итальянским астрономом Джованни Чипарелли в 1877 году. Эти наблюдения были оптической иллюзией связанной с несовершенством телескопов. При наблюдении глазом мы подсознательно пытаемся построить геометрическую картину. По мере роста качества телескопов наблюдения «каналов» становились все реже, а наблюдаемые каналы — все короче.

4. «Лицо на Марсе». На фотографиях, полученных зондом «Викинг 1» в 1976 году обнаружили несколько объектов, которые человеческий глаз (из-за той же подсознательной привычки накладывать геометрические модели на наблюдаемые объекты) определял огромное «лицо». Более качественные фотографии (рисунок 85), полученные новыми зондами показывают, что это совершенно естественный холм, возникновение «человеческих черт» на котором является комбинацией грубого разрешения камеры и удачного угла освещения.

**Газовые гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун).
Сравнительный анализ и интересные особенности.**

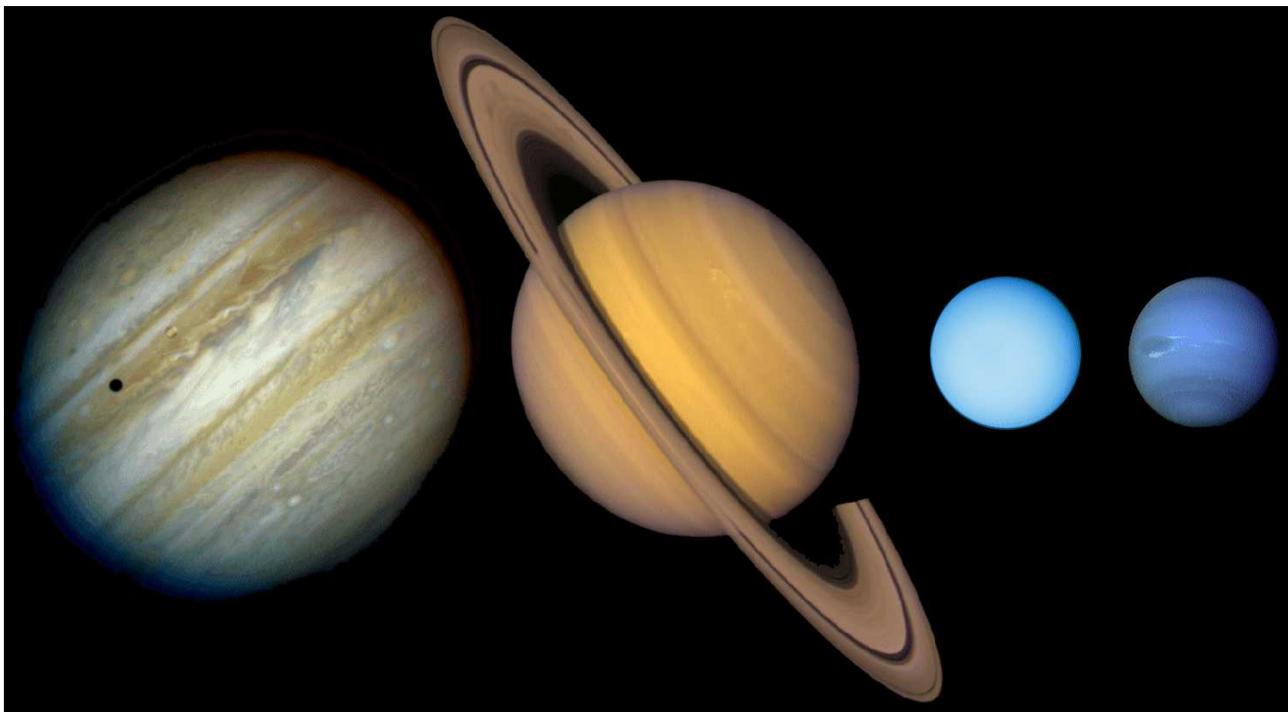


Рисунок 86: Сравнение размеров газовых гигантов. Слева-направо: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. (с сайта <http://scienceclass.ning.com/profiles/blogs/1677792:BlogPost:3598>)

Вторая группа планет Солнечной системы — газовые гиганты. Это четыре планеты за поясом астероидов: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Общими характеристиками этих планет, отличающими их от планет земной группы, являются:

- большие размеры;
- маленькая средняя плотность, свидетельствующая о большой доле легких элементов и газов в составе этих планет.
- многочисленные спутники и системы колец.

Приведем некоторые физические характеристики этих планет:

	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
масса	19.0·10 ²⁶ кг (317.8 земной, 1/1047 солнечной)	5.70·10 ²⁶ кг (95.2 земной)	0.87·10 ²⁶ кг (15.9 земной)	1.02·10 ²⁶ кг (17.1 земной)
средний радиус	68000 км (10.5/11.2 земного на полюсе/экваторе)	57300 км (8.55/9.45 земного на полюсе/экваторе)	25200 км (3.929/4.007 земного на полюсе/экваторе)	24600 км (3.82 земного)
средняя плотность	1330 кг/м ³	687 кг/м ³	1270 кг/м ³	1638 кг/м ³
большая полуось орбиты	7.79·10 ⁸ км (5.20 а.ед., 43 св.мин.)	14.3·10 ⁸ км (9.59 а.ед., 79 св.мин.)	28.7·10 ⁸ км (19.2 а.ед., 160 св.мин.)	45.0·10 ⁸ км (30.1 а.ед., 250 св.мин.)
перигелий	7.41·10 ⁸ км (4.95 а.ед.)	13.5·10 ⁸ км (9.05 а.ед.)	27.5·10 ⁸ км (18.4 а.ед.)	44.5·10 ⁸ км (29.8 а.ед.)
афелий	8.17·10 ⁸ км (5.46 а.ед.)	15.1·10 ⁸ км (10.1 а.ед.)	30.0·10 ⁸ км (20.1 а.ед.)	45.5·10 ⁸ км (30.4 а.ед.)
период обращения вокруг Солнца	11.86 лет	29.46 лет	84.02 года	164.8 года
период вращения вокруг оси	около 10 часов, разница периодов на полюсе и экваторе около 5 минут (экватор вращается быстрее)	около 10.5 часов, разница периодов на полюсах и экваторе около 25 минут (экватор вращается быстрее)	17 часов 14 минут	16 часов 6 мин.
наклон орбиты к эклиптике	1.305 ⁰	2.49 ⁰	0.77 ⁰	1.8 ⁰
наклон оси вращения к плоскости орбиты	3.13 ⁰	26.73 ⁰	97.77 ⁰	28.32 ⁰
средняя орбитальная скорость	13 км/сек	9.69 км/сек	6.81 км/сек	5.43 км/сек
скорость убегания	60 км/сек	35.5 км/сек	21.3 км/сек	23.5 км/сек
атмосфера	плотная (90% H ₂ , 10% He, метан, аммиак)	плотная, (96% H ₂ , 3% He, метан, аммиак)	83% H ₂ , 15% He, 2.3% CH ₄	80% H ₂ , 19% He, 1.5% CH ₄
магнитное поле	сильное, 0.5-1мТ (в 14 раз сильнее земного)	есть, 20мкТ (примерно 1/2 земного)	есть, от 10 до 110 мкТ (сравнимо с земным)	есть, на экваторе 14 мкТ (сравнимо с земным)
спутники	63 естественных спутника, система слабых колец	около 60 спутников на стабильных орбитах, всего около 200, система колец	27 естественных спутников, система узких колец	13 естественных спутников, система колец.

Эта общность физических свойств связана с тем, что при формировании Солнечной системы эти планеты формировались в области протопланетного диска, где многие летучие соединения могли присутствовать в виде льда. В результате, накопление массы происходило не только (и даже не столько) за счет «каменных» образований, сколько за счет этих ледяных «осколков». Это обусловило большую массу планетоидов на ранних этапах формирования и позволило им также захватить газ протопланетного диска, подобно тому как формирующееся Протосолнце в большем масштабе делало это в центре системы.

Структура всех планет-гигантов похожа. Предположительно, в их центре находится

относительно небольшое ядро из тяжелых элементов. Вокруг ядра формируются слои различных легких соединений, находящиеся порой в экзотических фазовых состояниях. Из-за большой массы в центральных частях планет давления и температуры достигают огромных величин (для Юпитера давления в некоторых областях оцениваются в 200 ГПа (2 миллиона атмосфер), а температура в 10000 К). Причина такого нагрева — гравитационное сжатие, которое служило источником тепла для Протосолнца до начала термоядерных реакций. По современным оценкам, однако, для эволюции в звезду необходима масса примерно в 50 масс Юпитера, поэтому планеты-гиганты иногда называют «звездами-неудачниками».

В таких экстремальных условиях реализуются необычные фазовые состояния вещества: в условиях Юпитера и Сатурна, предположительно, реализуется металлическое состояние водорода. В этом уникальном состоянии, реализуемом при сверхвысоких давлениях, электроны отрываются от своих ядер и получается проводящий (а возможно и сверхпроводящий) жидкий металл. Предположительно, этот металлический водород играет роль, аналогичную расплавленному железному ядру Земли, в работе планетарных динамо-машин Юпитера и Сатурна.

Более легкие Уран и Нептун не создают столь высокие давления, их «мантия» (определенная условно, так как поверхности в земном смысле у планет-гигантов нет) состоит из сильно сжатой смеси воды и аммиака. Эти давления могут разрушать молекулярные связи, что приводит к появлению проводимости и является, предположительно, источником для работы планетарных динамо Урана и Нептуна. Внешние планеты (Уран и Нептун) предположительно формировались ближе к центру Солнечной системы, чем их сегодняшние орбиты, и мигрировали к своим нынешним орбитам в результате гравитационного взаимодействия с более тяжелыми Юпитером и Сатурном.

Системы колец газовых гигантов.

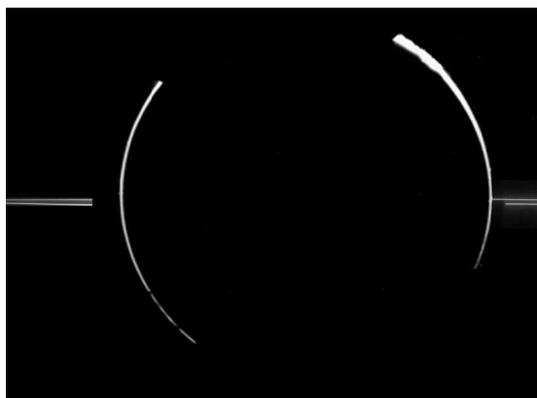


Рисунок 88: Затмение Солнца Юпитером, наблюдаемое с зонда "Галилео" (зонд был на орбите Юпитера с 1995 по 2003 год). Кольца видны как горизонтальные тонкие полосы. (с сайта http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_995.html)

Кольца Сатурна широко известны. Однако и остальные газовые гиганты имеют достаточно

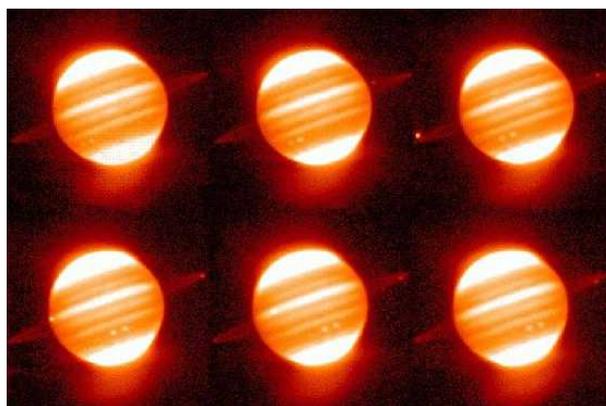


Рисунок 87: Изображения Юпитера и его колец в инфракрасном диапазоне. Также видны луны Юпитера Метис (второй снимок) и Амальтея (третий). Изображения получены ИК телескопом обсерватории Мауна Кеа (Гавайи) в 1994 году. (с сайта <http://apod.nasa.gov/apod/ap970205.html>)

сложные системы колец. Материал колец — это пыль, «камни» и частички льда. Структура колец часто связана с «нормальными» спутниками. Кольца находятся внутри (или вблизи) предела Роше — расстояния до планеты на котором тяготение планеты разрушает естественные спутники. Эту задачу мы обсудим чуть позже. А пока просто рассмотрим красивые изображения систем колец газовых-гигантов, полученные разными зондами (рисунки 88, 87, 89, 90, 91, 92, 94, 93, 95 и 96).

У Юпитера выделяют 4 кольца, состоящих из пыли выбиваемой из его внутренних спутников метеоритными ударами. Два внешних «кольца-паутинки» связаны со спутниками Фивы и Амальтея, главное, более плотное, кольцо связано со спутниками Метис и Адрастея, а внутреннее «кольцо-гало», образуется заряженными частицами главного кольца, захваченными магнитосферой Юпитера.

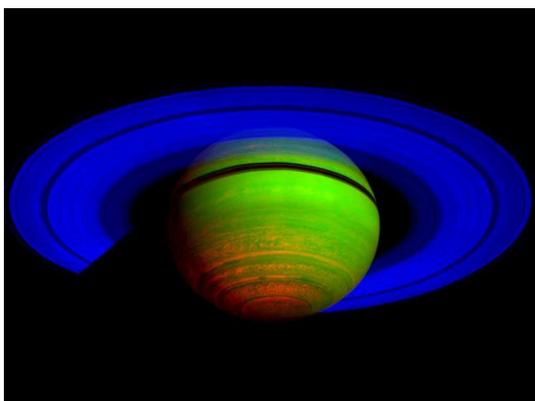


Рисунок 89: Сатурн в инфракрасном диапазоне. Изображение получено на основе фотографий зонда НАСА "Кассини". Оттенки голубого - длина волны 2 микрометра, оттенки зеленого - длина волны 3 микрометра, оттенки красного - длина волны 5 микрометров. Фотография с сайта http://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia13405.html

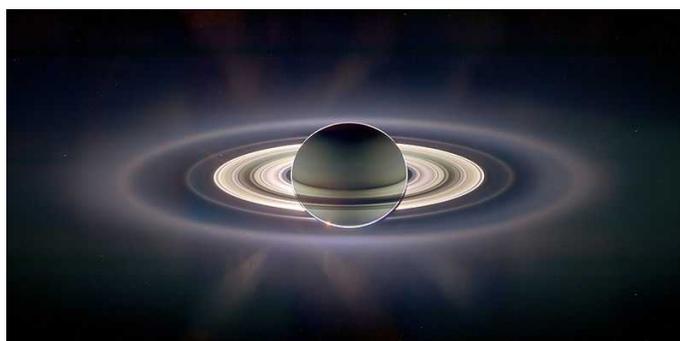


Рисунок 90: Затмение Солнца Сатурном, наблюдаемое зондом "Кассини" в 2006 году. Яркость колец искусственно усилена. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Rings_of_Saturn)

Кольца Сатурна в основном состоят из обычного льда, их толщина составляет всего около 10 метров. Кольца Сатурна имеют сложную структуру с многочисленными щелями. Возникновение щелей связано с влиянием спутников и различными орбитальными резонансами. Кольца Сатурна обозначаются буквами в порядке открытия, выделяют семь колец. Их обозначения в порядке следования от планеты D (радиус $R=70000$ км, ширина $D=7500$ км), C ($R=80000$ км, $D=17500$ км), B ($R=105000$ км, $D=25000$ км), A ($R=130000$ км, $D=14600$ км), F ($R=140000$ км, $D=30 - 500$ км), G ($R=170000$ км, $D=8000$ км), E ($R=320000$ км, $D=300000$ км). Самый большой разрыв между кольцами Сатурна — щель Кассини, имеет ширину около 5000 километров и находится сразу за кольцом B.

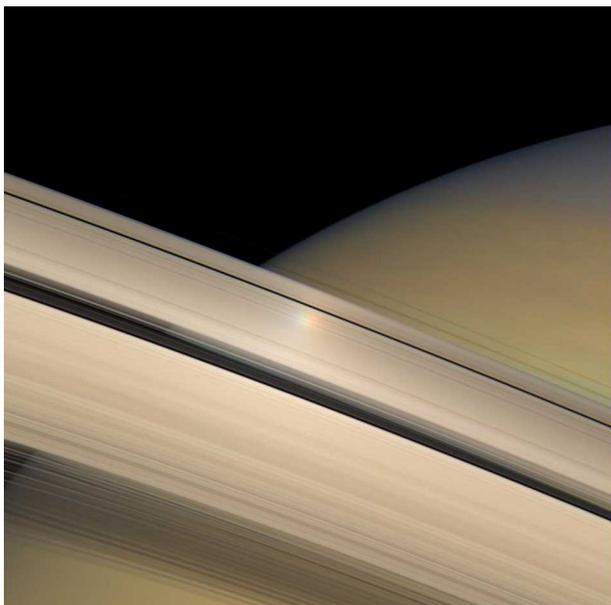


Рисунок 91: Кольца Сатурна. Изображение получено зондом "Кассини" в 2007 году. Расстояние до Сатурна 523000 км. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA08393>)

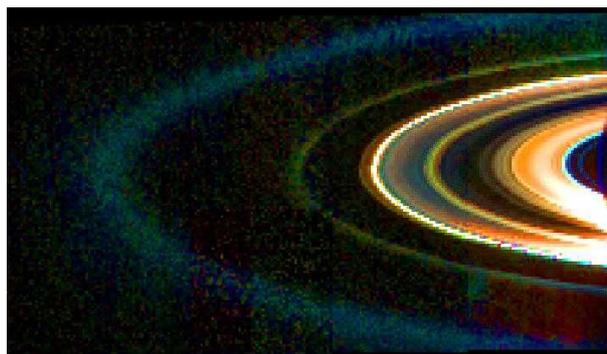


Рисунок 92: Кольца Сатурна, наблюдаемые в ИК телескоп зонда "Кассини", голубой, зеленый и красный цвета соответствуют длинам волн 1, 1.75 и 3.6 мкм. 2006 год. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01940>)

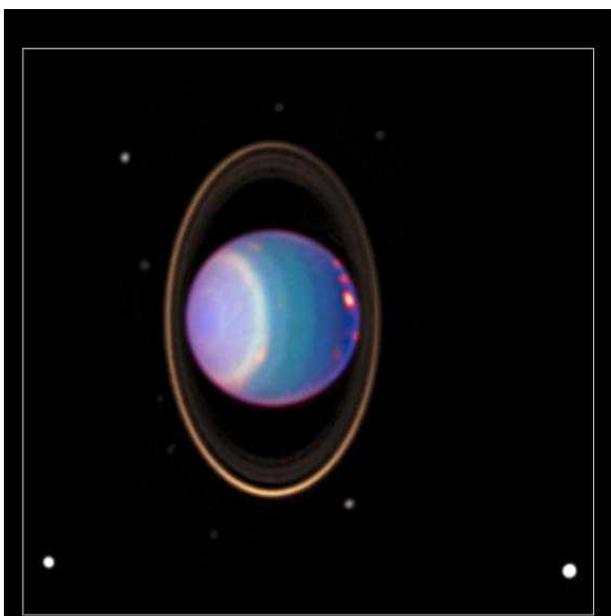


Рисунок 94: Уран, его спутники (видно 10 из 17) и кольца. Изображение получено инфракрасной камерой телескопа "Хаббл" в 1998 году. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02963>)

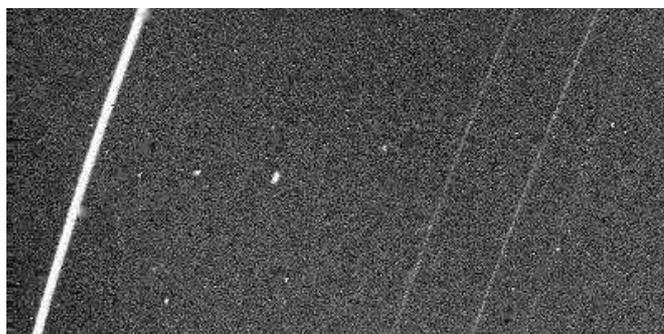


Рисунок 93: Изображение колец Урана, переданное зондом "Вояджер 2", 1986 год. С сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01350>

В системе колец Урана выделяют 13 колец. По некоторым источникам, их наблюдал Гершель в 1789, но это не считается установленным, так как кольца Урана очень слабо отражают свет, требуют очень качественного телескопа и долгое время не наблюдались никем после Гершеля. Кольца Урана состоят в основном из довольно крупных обломков размером 20 см - 20 м. В отличие от колец Юпитера и Сатурна, которые предположительно образовались практически одновременно с планетами, кольца Урана считаются довольно молодыми (600 миллионов лет). Возможно они являются результатами разрушения некоторых спутников Урана. Интересно отметить, что современное открытие колец Урана в 1977 было случайным — целью эксперимента было изучение атмосферы Урана во время прохождения Урана мимо звезды. Но приборы зафиксировали несколько мерцаний звезды до закрытия ее диском Урана и столько же — после. Эти мерцания были связаны с кольцами Урана.

В системе колец Нептуна обнаружено 5 колец, в основном пылевых. Как и с Ураном, есть ранняя заявка о наблюдении колец Нептуна астрономом Вильямом Ласселом в 1846 году, однако вероятнее всего это артефакт наблюдения. Два самых ярких кольца наблюдались в телескоп «Хаббл» в ИК диапазоне, их яркость чуть выше уровня шума. Окончательное открытие колец Нептуна состоялось только в 1989 году во время пролета зонда «Вояджер 2»

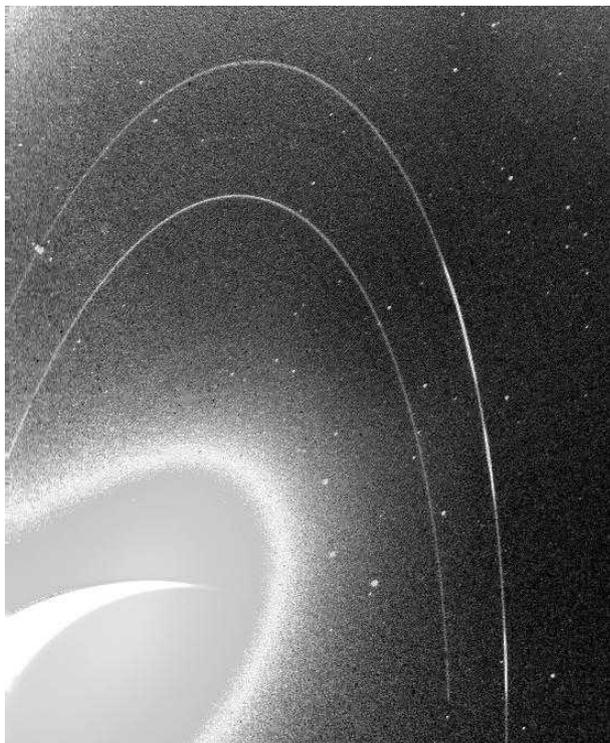


Рисунок 95: Кольца Нептуна, видны дуги с большей плотностью частиц. Фотография сделана зондом "Вояджер 2" в 1989 году. С сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02207>

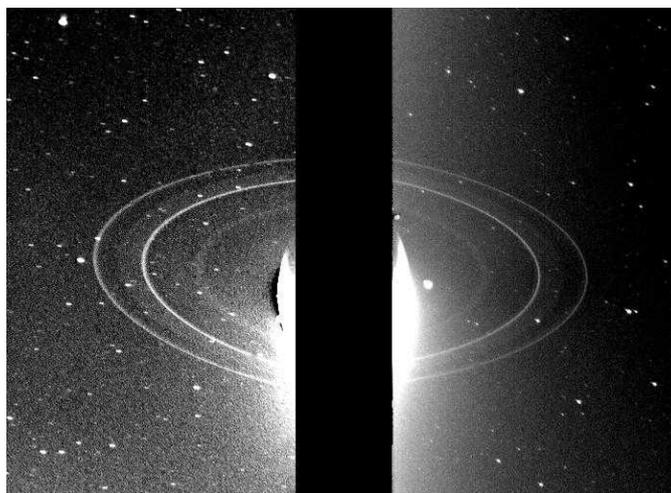


Рисунок 96: Кольца Нептуна. Фотография сделана зондом "Вояджер 2" в 1989 году. С сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01997>

Спутники газовых гигантов.

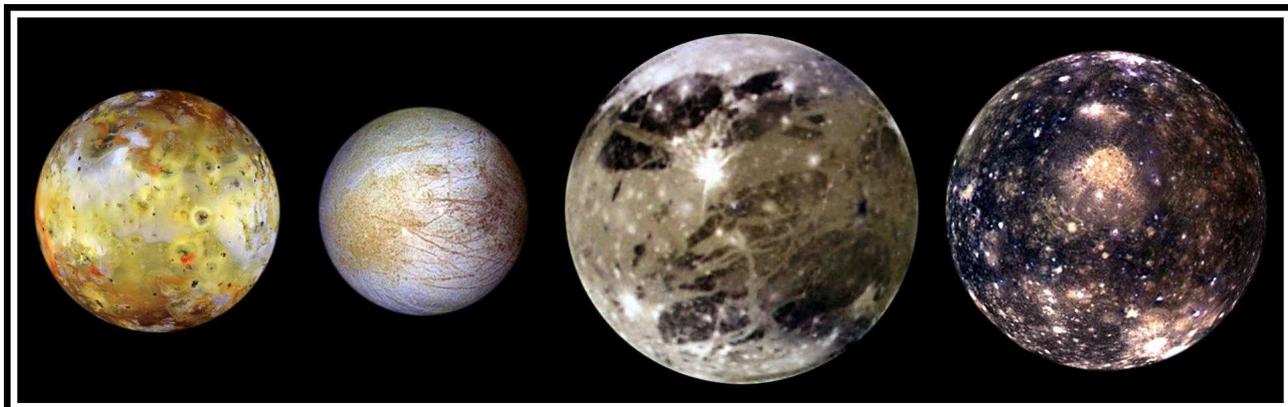


Рисунок 97: Галилеевы луны Юпитера. Слева направо, в порядке удаления от Юпитера: Ио, Европа, Ганимед и Калисто. Изображения получены зондом "Галилей", относительный размер лун соответствует реальности. Цвета искажены для большей контрастности деталей. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01400>)

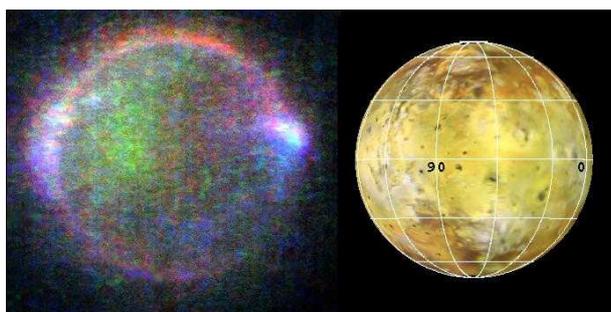


Рисунок 98: Слева: полярные сияния на Ио. Изображение в видимой части спектра получено зондом "Галилей" в 1998 году. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01637>)

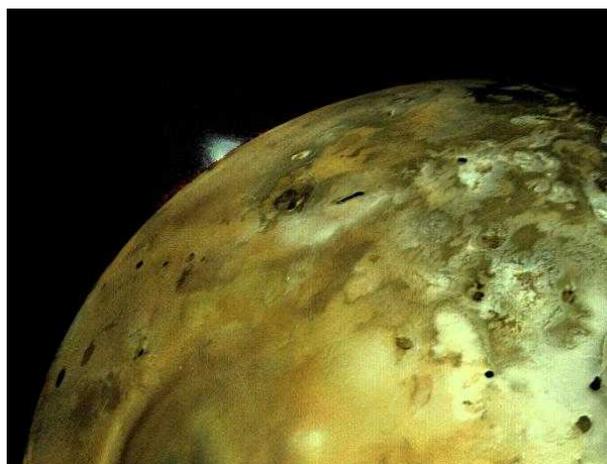


Рисунок 99: Извержение вулкана на Ио. Изображение получено зондом "Вояджер 1"

У газовых гигантов есть многочисленные спутники. Некоторые из них по размеру сравнимы с Луной (и даже больше ее). Четыре галилеевых спутника Юпитера (рисунок 97) все больше 3100 км в диаметре (диаметр Луны 3400 км). Считается, что часть спутников образовалась одновременно с формированием планет — их формирование было «Солнечной системой в миниатюре». Помимо этого, некоторые спутники, видимо, были захвачены гравитационным полем планет позднее — некоторые из захваченных спутников вращаются по орбитам в обратном направлении (например, Тритон — крупнейшая из лун Нептуна).

Отметим здесь несколько интересных фактов, связанных со спутниками планет-гигантов:

- Синхронное вращение. Из-за приливного торможения, как и Луна, галилеевы спутники Юпитера находятся в синхронном вращении: период их орбитального движения совпадает с периодом вращения спутника вокруг оси. Как и Луна, эти спутники всё время повернуты «одной стороной» к Юпитеру.
- Вулканизм Ио. Ближайший спутник Юпитера Ио вулканически активен (рисунок 99).

Продукты извержения вулканов Ио являются соединениями серы. Источником тепла для вулканической деятельности является нагрев спутника приливными силами.

- Вода на Европе, Ганимеде и Калисто. Европа покрыта льдом, предположительно на ней существует незамерзающий океан, разогреваемый приливными силами. Поверхность Европы является одной из самых гладких в Солнечной системе (рисунок 100) — кратеры на льду сглаживаются вновь замерзающей водой. Возможно такая же водяная «мантия» существует и на Ганимеде и Калисто.
- Титан имеет плотную атмосферу. Крупнейший спутник Сатурна Титан (0.4 радиуса Земли, 0.023 массы Земли) является единственным спутником Солнечной системы, имеющим плотную атмосферу (рисунок 101). При температуре поверхности 94К давление атмосферы (98% N₂, 1.4% CH₄) на поверхности около 150 кПа (1.5 атм).



Рисунок 100: Европа. На левом изображении - натуральные цвета, на правом - цвета искажены для придания контраста. Изображение получено зондом "Галилео", 1997 год. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01295>)

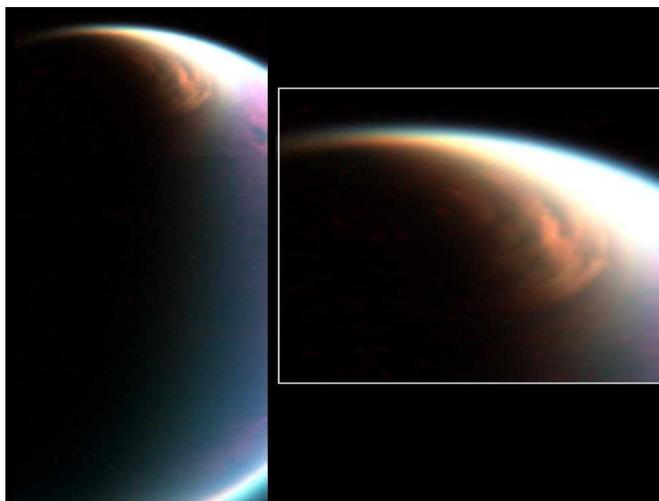


Рисунок 101: Титан. Видна атмосфера и большое облако вблизи северного полюса. Изображение получено зондом «Кассини». С сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA09171>

Пояс астероидов, пояс Койпера, облако Оорта.

Помимо планет в Солнечной системе существуют многочисленные мелкие тела — своеобразные «остатки» стройматериалов после формирования больших тел системы. Выделяют три группы таких мелких объектов:

- Пояс астероидов. Пояс астероидов объединяет многочисленные мелкие тела сосредоточенные между орбитами Марса и Юпитера, хотя орбиты некоторых астероидов оказываются и ближе к Солнцу. Например, «вторая луна Земли» - астероид 3753 Кринья имеет афелий в 1.5 а.е, а перигелий в 0.48 а.е.
- Пояс Койпера. Пояс Койпера объединяет объекты за орбитой Нептуна. В частности, «разжалованный» из планет Плутон является частью пояса Койпера.
- Облако Оорта. Облако Оорта — это остатки протопланетного диска на расстоянии 5000-50000 а.е. (0.08-0.8 св.лет) от Солнца.

Рассмотрим эти «хранилища» мелких тел подробнее.

Пояс астероидов.

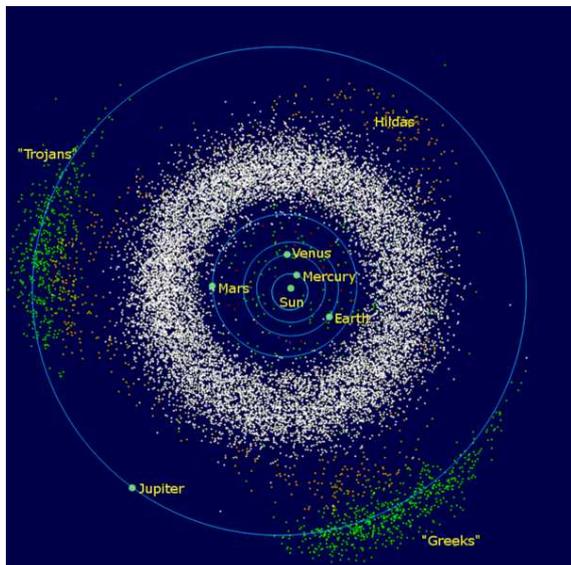


Рисунок 102: Положение астероидов в Солнечной системе. Основной пояс - белые точки, троянские астероиды Юпитера - зеленые. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid_belt)

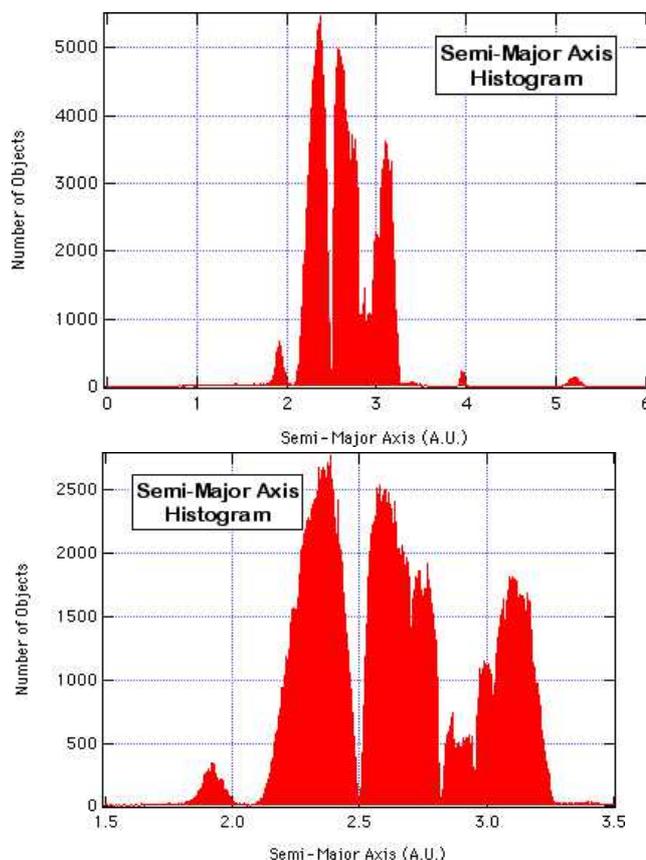


Рисунок 103: Гистограммы распределения астероидов по величине большой полуоси. Провалы на гистограмме связаны с орбитальными резонансами с обращением Юпитера. С сайта <http://burro.astr.cwru.edu/stu/advanced/asteroid.html>

Открытие пояса астероидов во многом обязано эмпирическому правилу Тициуса-Боде. По этому правилу расстояние от Солнца до i -ой планеты в астрономических единицах приближенно описывается как $R_i = 0.4 + 0.3 \cdot 2^i$ (для Меркурия $i = -\infty$, для Венеры: 1, для Земли: 2 и так далее). Все планеты до Урана удовлетворяют этому правилу с 5% точностью, однако при этом возникает провал для $i = 4$ между Марсом ($i = 3$) и Юпитером ($i = 5$). Это привело к поиску планет на расстоянии примерно 3 а.е. от Солнца, и в 1801 году был обнаружен первый и крупнейший из астероидов — Церера (рисунок 104).

Причина, по которой орбитальные радиусы планет подчиняются такому простому численному правилу не ясна. Это может быть как простым численным совпадением, так и отражением каких-то орбитальных резонансов при формировании планет. Необходимо при этом отметить, что системы лун планет-гигантов не подчиняются этому правилу. Так что это правило заведомо не является столь же общим, как спектроскопическая формула Ридберга, также изначально появившаяся, как занятное численное совпадение.



Рисунок 104: Церера - крупнейший из астероидов. Изображение получено космическим телескопом "Хаббл" в 2003-2004 годах. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA10235>)

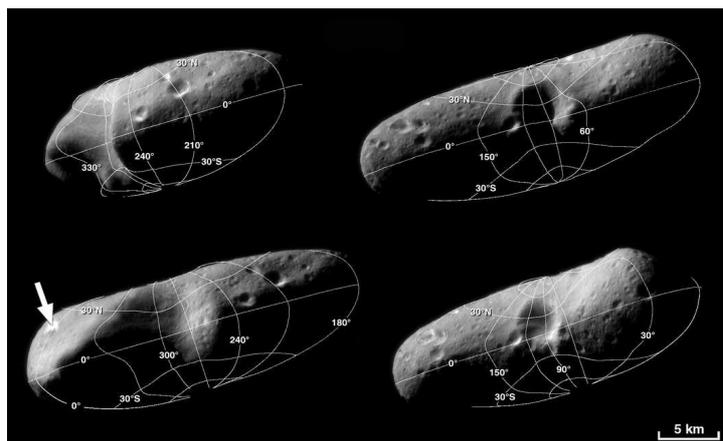


Рисунок 105: Серия снимков астероида 433 Эрос полученные космическим зондом NEAR (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03112>)

На данный момент известно более 300000 астероидов, причем орбиты около 100000 из них достаточно точно определены (схема расположения астероидов показана на рисунке 102). Всего около 200 астероидов имеет размер более 100 километров. Оценки, основанные на наблюдениях за поясом астероидов, показывают, что число астероидов размером более 1 километра составляет 1-2 миллиона. Несмотря на это большое число астероидов, пояс на самом деле весьма пустынен — его геометрические размеры тоже астрономически велики. Если для оценки считать, что пояс астероидов располагается на расстоянии от 2 до 3 а.ед. от Солнца и имеет примерно постоянную плотность, то при 2 миллионах астероидов на один астероид приходится площадь $\pi(R_{\text{внеш}}^2 - R_{\text{внутр}}^2)/N \approx 8 \cdot 10^{-6} \text{ а.ед.}^2$, что соответствует расстоянию между ближайшими астероидами в 0.003 а.ед. (т.е. 500000 км).

В поясе астероидов есть несколько провалов, связанных с орбитальными резонансами с Юпитером (рисунок 103) — из-за кратного совпадения периодов обращения притяжение Юпитера сильно возмущает движение астероидов в этих областях, называемых щелями Кирквуда. Резонансу 5:1 соответствует расстояние 1.78 а.ед., 9:2 — 1.91 а.ед., 4:1 — 2.06 а.ед., 3:1 — 2.50 а.ед., 2:1 — 3.28 а.ед. Помимо собственно пояса астероидов выделяют две группы астероидов, находящиеся вблизи точек Лагранжа L_4 и L_5 системы Солнце-Юпитер. Эти астероиды называются в честь героев «Иллиады» троянцами, одна группа называется именами греческих героев, другая — именами героев из Трои (рисунок 102).

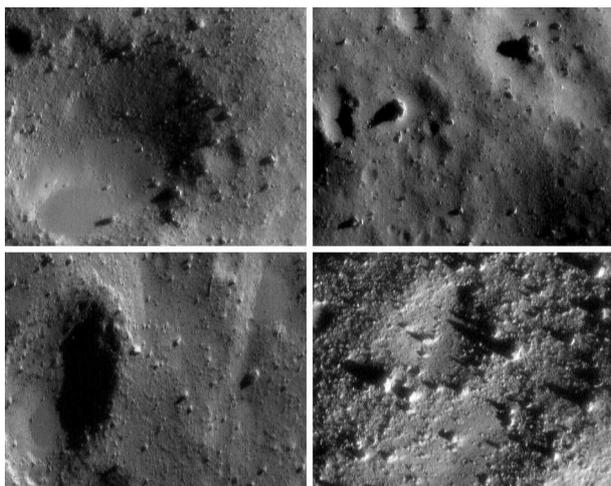


Рисунок 107: Изображения поверхности астероида 433 Эрос, полученные зондом NEAR перед контактом с астероидом в 2001 году. Расстояние до астероида (от левого верхнего к правому нижнему кадру) 13.5 км, 11.1 км, 4.9 км, 230 м. (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03138>)

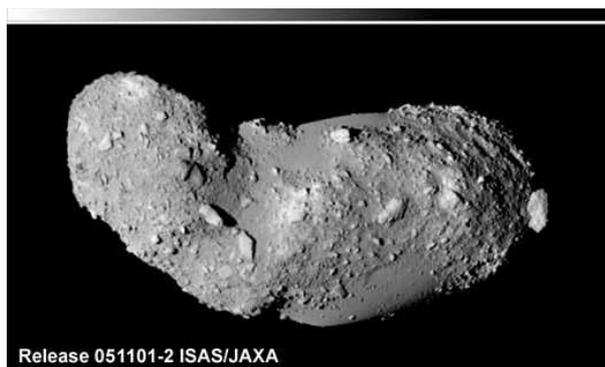


Рисунок 106: Астероид 25143 Итокава, пробы грунта с которого были доставлены на Землю в 2010 году зондом "Хаябуса". Размер астероида 500x300x200 м. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/25143_Itokawa)

Кроме того, выделяют, из-за их важности для нашей безопасности, астероиды, орбиты которых проходят близко к Земле. Эти, так называемые околоземные орбиты, имеют перигелий меньше 1.3 а.е. и, потенциально, некоторые из таких объектов могут столкнуться с Землей. По принятой теории, вымирание динозавров связано с падением астероида диаметром около 10 километров. Из недавних событий такого рода можно выделить Тунгусский метеорит — его диаметр оценивается в 45-70 метров (эквивалент взрыва равен 10 мегатоннам ТНТ), вхождение в атмосферу Земли 10-метрового астероида над Средиземным морем 6 июля 2002 года (эквивалент взрыва 20 килотонн — сравним с небольшой ядерной бомбой).

Эти объекты постоянно каталогизируются, известно около 7000 таких астероидов. И хотя риск столкновения с большим астероидом достаточно мал, необходимо отметить, что и относительно небольшой астероид может привести к непредсказуемому развитию событий. Упомянутый выше средиземноморский астероид 2002 года упал во время очередного пика индийско-пакистанского конфликта. По мнению некоторых экспертов, если бы он упал на несколько часов раньше — над территорией Индии или Пакистана, то это могло бы привести к локальному ядерному конфликту.

Самым опасным для нас околоземным объектом считается в данное время астероид 29075 (1950 DA) с поперечником чуть больше 1 километра. Он пройдет очень близко от Земли и возможно столкнется с ней (вероятность столкновения 1/300) 16 марта 2880 года. В ближайшем будущем нас ожидает близкое прохождение астероида 99942 Апофис (размер около 300 метров) в 2029 и 2036 годах, но столкновение не ожидается: при прохождении 2029 года столкновение невозможно, вероятность столкновения 2036 года оценивается как 1/250000.

Астероиды состоят из каменных и каменно-железных образований. Их форма часто причудливо отличается от сферической (например, астероид Эрос на рисунке 105). Размер

крупнейшего астероида - Цереры около 1000 километров. Астероиды сферической формы (Церера, Веста) предположительно являются протопланетами, не смогшими набрать большую массу. Несмотря на популярную «теорию» о разрушенной планете между Марсом и Юпитером, масса пояса астероидов существенно недостаточна для формирования планеты. Полная масса пояса астероидов оценивается в $3 \cdot 10^{21}$ кг, что составляет около 4% от массы Луны. При этом 1/3 этой массы сосредоточена в Церере, а 1/2 в четырех крупнейших астероидах (1 Церера, 4 Веста, 2 Паллада, 10 Гигея). Материал пояса астероидов является основным источником метеоритов, что предоставляет довольно много информации о типичном составе астероидов. Помимо того, в 2010 году на Землю были доставлены пробы грунта с астероида 25143 Итокава. Эта миссия была выполнена зондом Японского Аэрокосмического Агентства «Хаябуса» (запущен в 2003).

Пояс Койпера.

Пояс Койпера находится за орбитой Нептуна и простирается на расстояния от 30 до 55 а.е. от Солнца. Как и пояс астероидов, он состоит из обломков и планетоидов, которые не смогли стать планетами. Однако, из-за большего расстояния до Солнца, имеется разница в составе астероидов и объектов пояса Койпера: если астероиды — это каменно-металлические объекты, то в поясе Койпера в основном представлены ледяные (лёд метана, аммиака и воды).

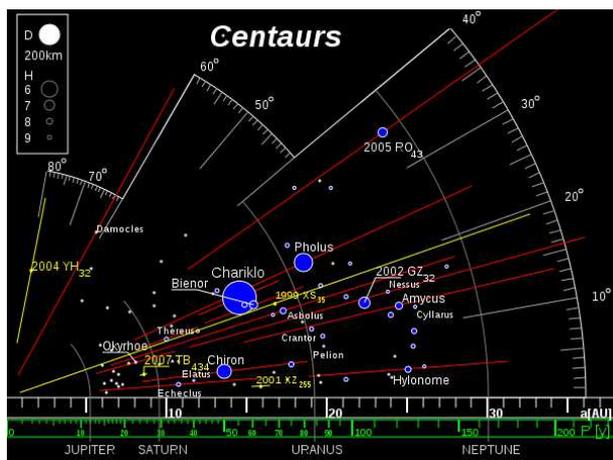


Рисунок 109: Орбиты известных планетоидов-кентавров. (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Centaur_\(minor_planet\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Centaur_(minor_planet)))

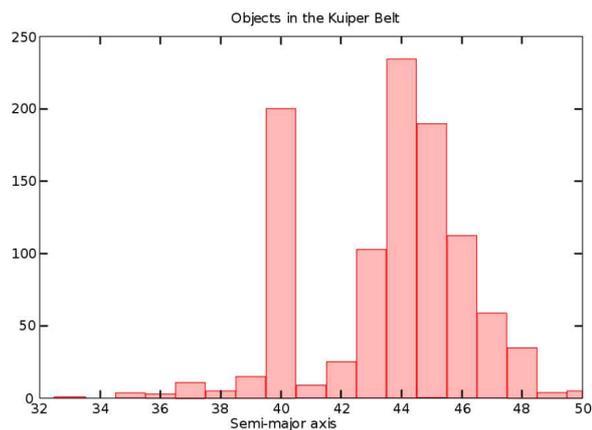


Рисунок 108: Распределение объектов в поясе Койпера по расстоянию от Солнца. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Kuiper_belt)

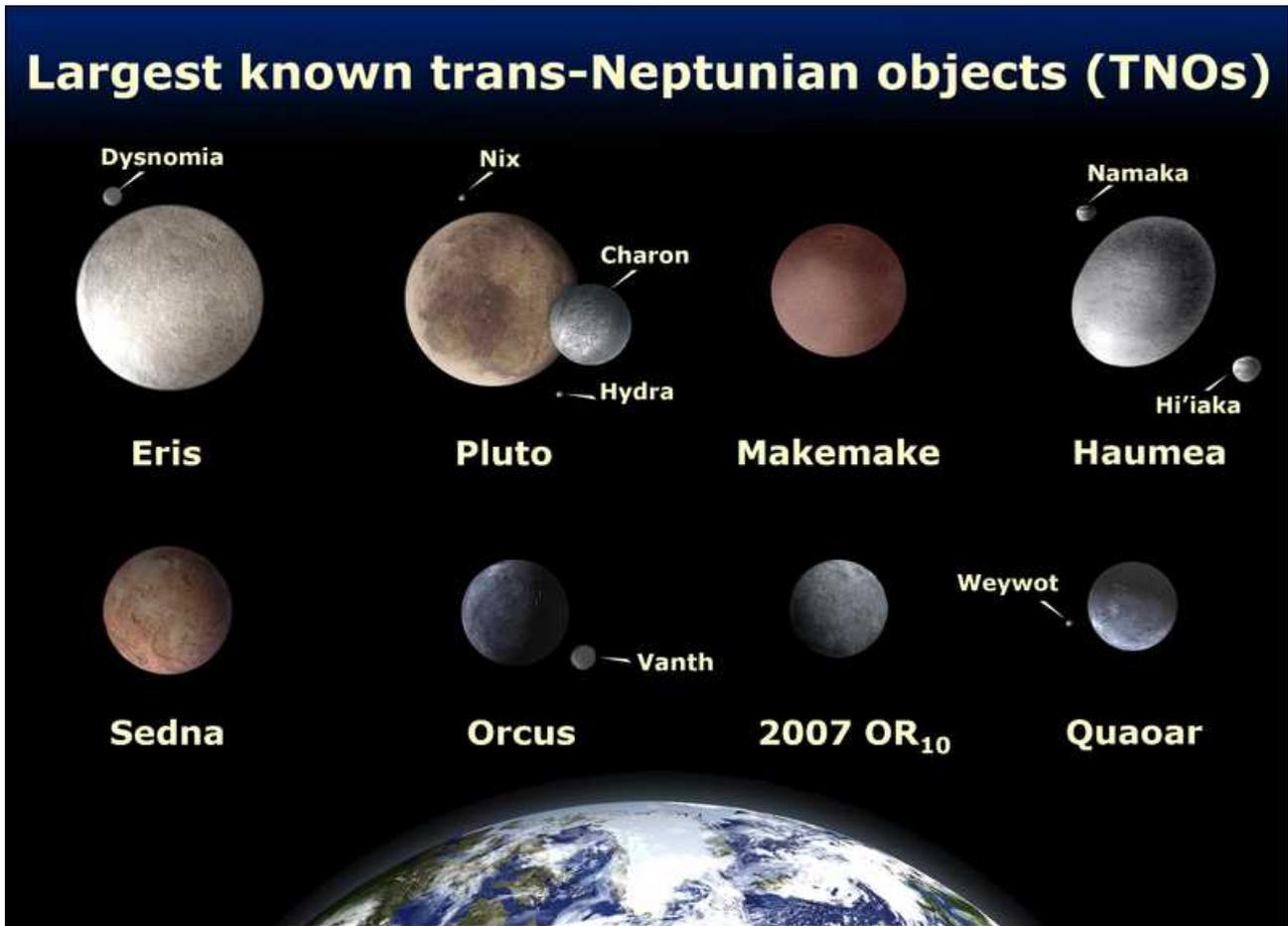


Рисунок 110: Крупнейшие транс-нептуновые объекты и их сравнение с размером Земли. Детали поверхности - художественный вымысел. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Kuiper_belt)

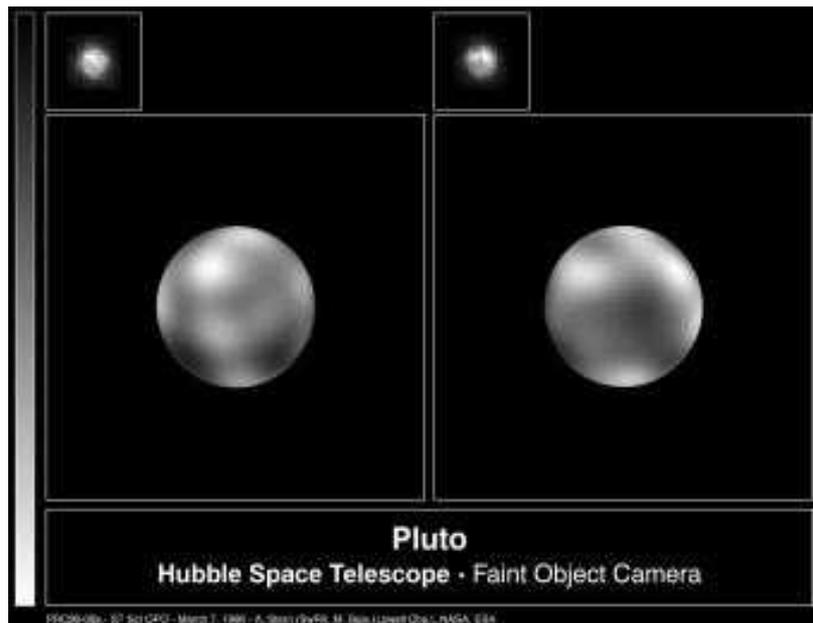


Рисунок 111: Плутон в космический телескоп "Хаббл", 1994 год (с сайта <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00825>)

Возможность существования такого пояса за орбитой Нептуна обсуждалась с 1930-х годов. В частности, наличие такого пояса считалось необходимым для пополнения популяции планетоидов-кентавров: семейства планетоидов на орбитах между орбитой Юпитера и Нептуна. Орбиты этих планетоидов подвержены влиянию всех планет гигантов и типичное время существования на «стабильной» орбите оценивается в миллионы лет. Соответственно, за время жизни Солнечной системы (миллиарды лет) такие планетоиды должны исчезнуть — если только вместо них не появляются новые. Непосредственное открытие пояса Койпера состоялось в 1987-1992 году, когда в результате активного поиска транс-нептуновых объектов эти объекты стали обнаруживаться во все нарастающем количестве. Отметим, что важную роль в этом открытии сыграла разработка и большой прогресс в развитии цифровых матриц для фотографии (за изобретение матрицы была присуждена 1/2 Нобелевской премии 2009 года), что позволило быстро обрабатывать фотографии участков звездного неба и сравнивать их для обнаружения перемещающихся объектов.

В данный момент известно более тысячи объектов в поясе Койпера, оценки предполагают существование не менее 70000 объектов с размером более 100 км. Наиболее известным объектом пояса Койпера является Плутон. Его орбита находится в орбитальном резонансе 2:3 с Нептуном. Таким же свойством обладает еще 200 известных объектов, называемых иногда плутоноидами. Некоторые из объектов пояса Койпера сравнимы по размеру с Плутоном. Полная масса пояса Койпера оценивается в 20-200 масс пояса астероидов, то есть масса порядка 10 масс Луны.

Наличие многочисленных объектов схожего размера на схожих орбитах стало причиной исключения Плутона из списка «полноправных» планет. Это произошло после длительных обсуждений и в 2006 было принято следующее определение планеты:

1. Объект находится на орбите вокруг Солнца.
2. Масса объекта достаточна для того, чтобы придать ему сферическую форму под действием гравитационных сил.
3. Окрестность объекта должна быть свободна от других объектов.

Плутон не удовлетворяет третьему определению. Иногда космические объекты, отвечающие первым двум определениям, называют планетами-карликами. На 2008 год таких объектов было 5: Церера, Плутон, Эрис, Мэйкмэйк и Хэумейа. Церера, как уже говорилось, является крупнейшим из астероидов, остальные планеты-карлики находятся в поясе Койпера (рисунок 110).

В 2006 году с миссией исследования Плутона и других объектов пояса Койпера был запущен зонд НАСА «Новые горизонты» («New Horizons»), https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html, достигший Плутона в 2015 году. С этого зонда были получены съёмки поверхности Плутона и его спутника Харона с высоким разрешением (рисунок 112), получены доказательства существования атмосферы Плутона (рисунок 113).

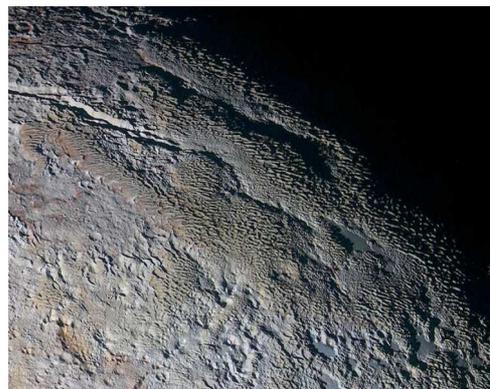


Рисунок 112 Снимки Плутона с борта зонда НАСА «Новые горизонты», 2015 год. Слева: Плутона, цветопередача искусственно усилена (https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/images/index.html?id=370883). Справа вверху: Харон, цветопередача искусственно усилена, не в масштабе с изображением Плутона (https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/images/index.html?id=371322). Справа внизу: фрагмент поверхности Плутона в высоком разрешении (https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/images/index.html?id=370917)

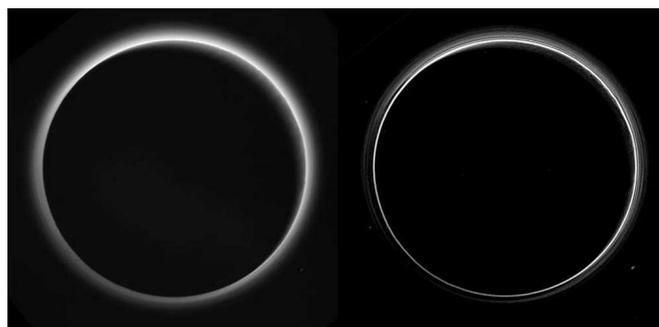
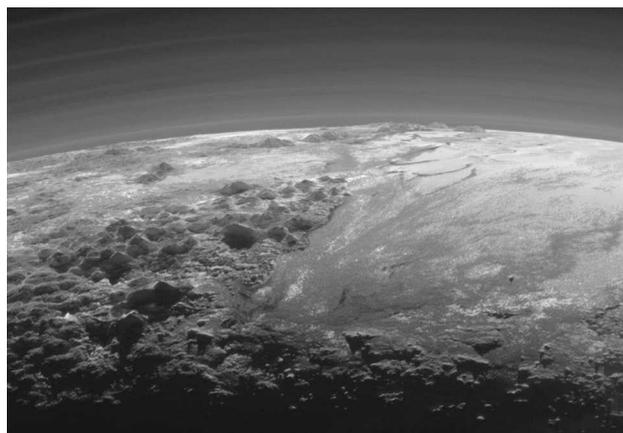


Рисунок 113 Наблюдение атмосферы Плутона с борта зонда НАСА «Новые горизонты», 2015 год. Слева: вид на горизонт слоистая структура атмосферы (https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/images/index.html?id=370517). Справа: структура атмосферы Плутона (https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/images/index.html?id=370451).

Облако Оорта.

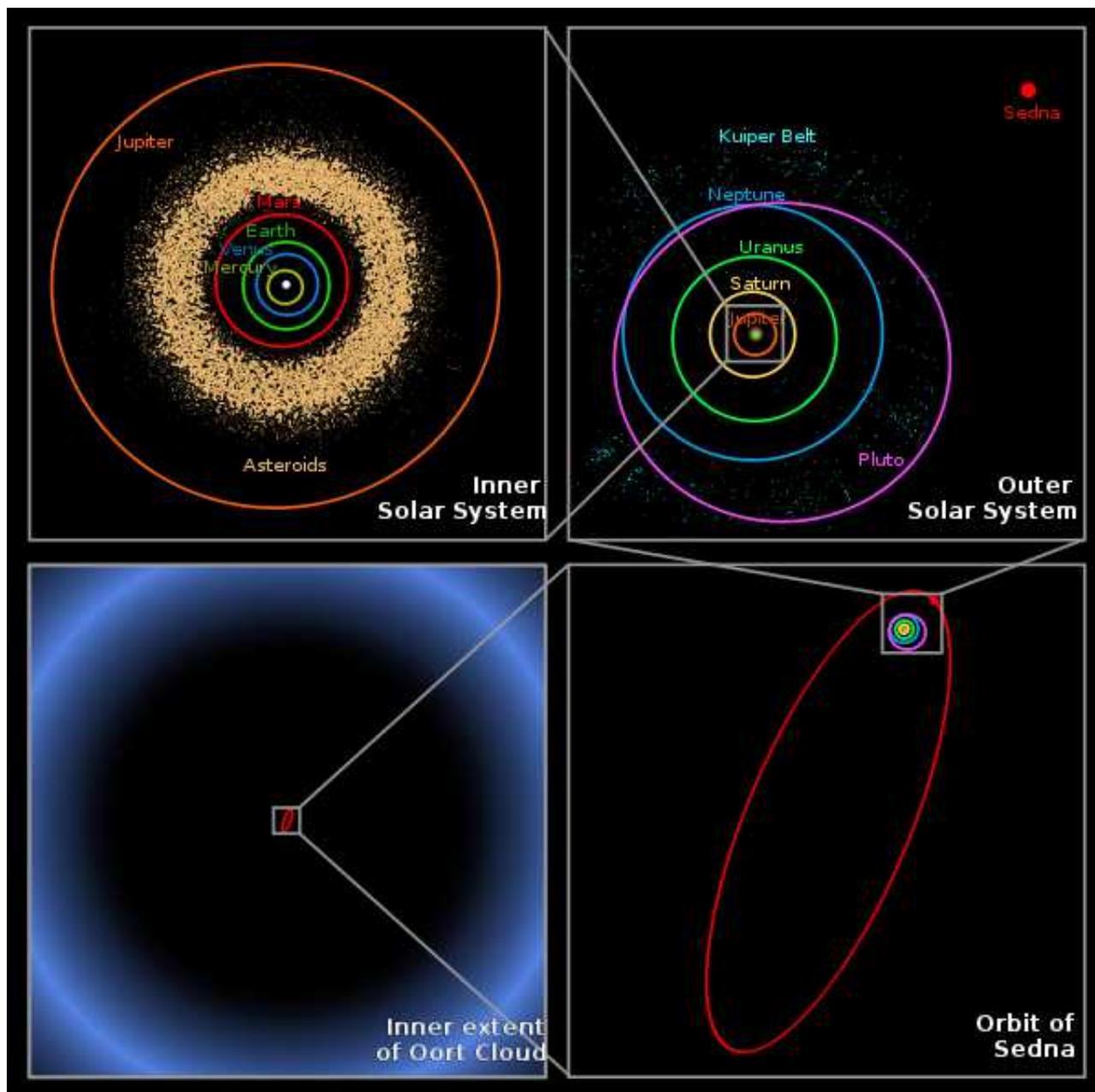


Рисунок 114: Сравнение масштаба облака Оорта и Солнечной системы. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Oort_cloud)

Облако Оорта предположительно занимает пространство от 2-5 тысяч а.ед. до 50000 а.ед от Солнца (почти световой год). Для сравнения вспомним, что радиус орбиты Юпитера — около 5 а.ед., а расстояние до ближайшей звезды чуть больше 4 световых лет. Считается, что облако Оорта не «плоское», как внутренняя часть Солнечной системы, а практически сферически симметричное.

Гипотеза о существовании такого облака связана с несколькими наблюдаемыми фактами:

1. Полуоси комет с большими периодами обращения имеют распределение с максимумом около 10000 а.ед.
2. Кометы неустойчивы в долговременной перспективе. Они разрушаются при

прохождении мимо Солнца, могут быть захвачены планетами. Поэтому необходим резервуар, восполняющий потери комет.

3. Кометы с большими периодами обращения не привязаны к плоскости эклиптики, в отличие от короткопериодических.

Современные модели формирования Солнечной системы предполагают, что облако Оорта сформировалось из остатков протопланетного диска и объектов, «выкинутых» из Солнечной системы гравитационными взаимодействиями с планетами-гигантами. Внешняя граница облака Оорта определяет границу гравитационного притяжения Солнечной системы.

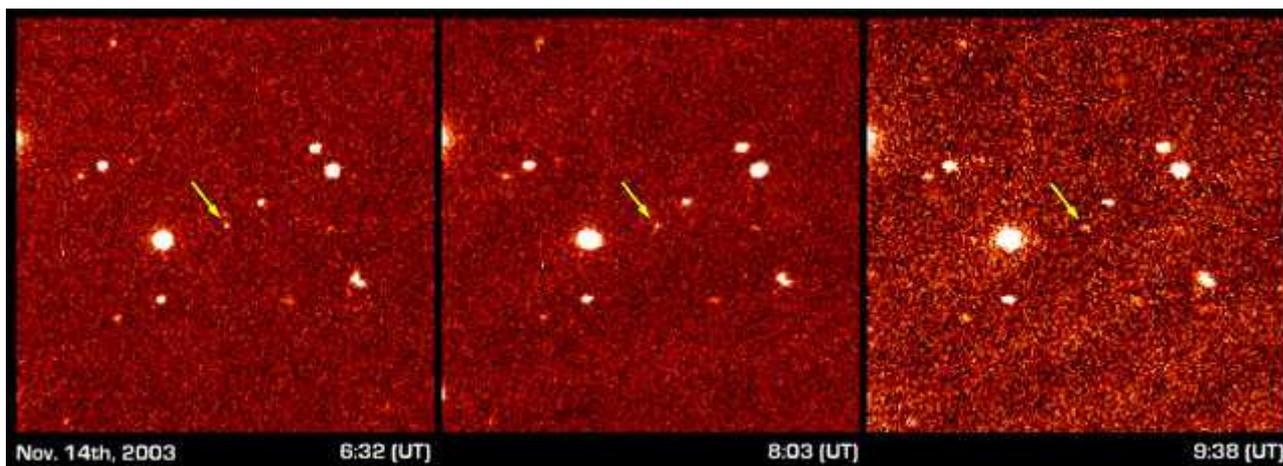


Рисунок 115: Фотографии, позволившие обнаружить планетоид Седна (смещение объекта, отмеченного стрелкой). (с сайта <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=85>)

Облако Оорта находится слишком далеко, чтобы непосредственно наблюдать отдельные объекты в нем. Исследованию доступны кометы, которые проникают вглубь Солнечной системы. Кроме того некоторые объекты на периферии Солнечной системы имеют очень эксцентричные орбиты и, предположительно, происходят из внутренних областей облака Оорта. Примером является планетоид 90377 Седна, открытый в 2003 году. Его размер примерно 2/3 от размера Плутона, перигелий около 76 а.е. (2.5 орбитальных радиуса Нептуна), а афелий около 1000 а.е.

Лекция 4. Некоторые задачи небесной механики.

Рассмотрим несколько интересных задач небесной механики, которые возникают при рассмотрении движения тел в Солнечной системе. При разговоре о структуре Солнечной системы мы уже упоминали некоторые из этих результатов или неявно пользовались ими. Рассмотрим их теперь более формально.

К определению масс планет и Солнца.

Как определить массы планет, их спутников или даже массу Солнца? Ответ лежит в применении закона всемирного тяготения. Как мы уже показали при выводе законов Кеплера из ньютоновского закона тяготения $\vec{F}_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \vec{n}_{12}$ следует связь геометрических параметров орбиты и периода обращения, коэффициентами пропорциональности в которых является масса: если одно тело гораздо массивнее $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, если массы произвольные

$$\frac{P^3}{T^2} = \frac{1}{4\pi^2} G (m_1 + m_2) .$$

Помимо масс в эти уравнения входят известное число π и гравитационная постоянная G . Гравитационная постоянная может быть определена из лабораторных опытов типа опытов Кавендиша. Отметим здесь, что в собственно опытах Кавендиша в 1797 году гравитационная постоянная не определялась. Задачей Кавендиша было измерить массу (среднюю плотность) Земли, сравнивая взаимодействие маленького шара на торсионных весах с большим шаром известной массы и с Землей. При этом важно отношение этих сил взаимодействия, то есть при расчётах константа G сокращается. Только позднее, когда стала понятна фундаментальность гравитационной постоянной, она была вычислена из результатов опыта Кавендиша. Для нас сейчас, однако, принципиально важно, что гравитационная постоянная может быть измерена лабораторно.

Масса Земли (или другой планеты, на поверхности которой находится наблюдатель) может быть определена по измерению ускорения свободного падения:

$$m g = G \frac{Mm}{R^2}$$

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

Если такое измерение на поверхности невозможно, но у объекта есть естественный спутник, то масса может быть найдена по законам Кеплера. Это открывает возможность к нахождению, например, массы Солнца и массы всех планет за исключением Венеры и Меркурия.

Для нахождения масс планет без спутников, а также масс спутников планет необходимо уже более внимательно, часто с применением сложных численных методов решать задачу многих тел и определять массы таких объектов по возмущениям, которые они вносят в движение уже «прокалиброванных» объектов.

В некоторых случаях, уточняющие данные можно получить из анализа движения

космических зондов в гравитационном поле планет.

Наконец, для оценки масс различных мелких объектов и планетоидов можно пользоваться нашими представлениями о их структуре и средней плотности и оценивать массу исходя из определенных размеров.

Задача 1: Найти во сколько раз масса Солнца больше массы Земли, зная ускорение свободного падения на Земле. Считать известными $g=9.8 \text{ м/с}^2$, $R_{\text{земли}}=6400 \text{ км}$, $a=150 \cdot 10^6 \text{ км}$, $T=365 \text{ дней}=31.5 \cdot 10^6 \text{ сек}$.

Решение:

$$g = G \frac{M_{\text{земли}}}{R_{\text{земли}}^2}$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_{\text{Солнца}}}$$

$$\frac{M_{\text{Солнца}}}{M_{\text{земли}}} = 4\pi^2 \frac{a^3}{T^2 g R_{\text{земли}}^2} \approx \frac{40 \cdot 3400 \cdot 10^{30}}{10 \cdot 1000 \cdot 10^{12} \cdot 4000 \cdot 10^{10}} = 340000$$

Значение в справочнике: 333000 земных масс.



В связи с этой задачей интересно обсудить, как можно, хотя бы в принципе, определить единственный «астрономический» параметр в условии — радиус земной орбиты. Первый вариант — метод параллакса. При достаточно легко достижимой на Земле базе измерений в 1000 километров, видимое угловое перемещение объекта на расстоянии 1 а.ед.=150·10⁶ км составит 7·10⁻⁶ рад, что чуть больше 1". Даже дифракционный предел метрового телескопа в 10 раз меньше этой цифры. Таким образом, расстояние до Солнца реально измеримо астрометрическими методами. Из более экзотических методов без особого труда можно предложить, например, измерение доплеровского сдвига какой-то звезды в плоскости эклиптики в моменты движения к звезде и от звезды по орбите. Так как орбита Земли практически круговая, из найденной скорости легко найти радиус орбиты. Еще более экзотически, можно использовать, например, результаты радиолокации Венеры. Зная расстояние до Венеры и отношение полуосей орбит Венеры и Земли (из их периодов) можно вычислить радиус Земной орбиты. Зная же радиус орбиты, мы автоматически увеличиваем базу измерений параллакса до диаметра орбиты, тогда, очевидно, не представляет принципиальной проблемы определение расстояния до любого из объектов Солнечной системы (напомним, что расстояние с которого большая полуось земной орбиты видна под углом 1" — это 1 парсек, примерно равный 200000 а.ед. или 3.5 световым годам).

Оценка эксцентриситета земной орбиты.

Оценим эксцентриситет земной орбиты, зная даты равноденствий и солнцестояний. Даты этих астрономических событий за несколько последних лет и на ближайшее будущее приведены в таблице ниже (с сайта <http://ru.wikipedia.org/wiki/Солнцестояние>). Время событий приведено по так называемому всемирному координированному времени. Небольшое изменение дат связано с несовпадением астрономического и календарного годов.

Даты и время солнцестояний и равноденствий по UTC										
год	Равноденствие Март		Солнцестояние Июнь		Равноденствие Сентябрь		Солнцестояние Декабрь			
	день	время	день	время	день	время	день	время		
2002	20	19:16:00	21	13:24:00	23	04:55:00	22	01:14:00		
2003	21	01:00:00	21	19:10:00	23	10:47:00	22	07:04:00		
2004(ВСК)	20	06:49:00	21	00:57:00	22	16:30:00	21	12:42:00		
2005	20	12:33:00	21	06:46:00	22	22:23:00	21	18:35:00		
2006	20	18:26:00	21	12:26:00	23	04:03:00	22	00:22:00		
2007	21	00:07:00	21	18:06:00	23	09:51:00	22	06:08:00		
2008(ВСК)	20	05:48:00	20	23:59:00	22	15:44:00	21	12:04:00		
2009	20	11:44:00	21	05:45:00	22	21:18:00	21	17:47:00		
2010	20	17:32:00	21	11:28:00	23	03:09:00	21	23:38:00		
2011	20	23:21:00	21	17:16:00	23	09:04:00	22	05:30:00		
2012(ВСК)	20	05:14:00	20	23:09:00	22	14:49:00	21	11:11:00		
2013	20	11:02:00	21	05:04:00	22	20:44:00	21	17:11:00		
2014	20	16:57:00	21	10:51:00	23	02:29:00	21	23:03:00		

Несложным подсчетом можно убедиться, что интервалы между событиями не меняются от года к году:

- от зимнего солнцестояния до летнего солнцестояния: 181 день и примерно 18 часов
- от летнего солнцестояния до зимнего солнцестояния: 183 дня и примерно 12 часов
- от весеннего равноденствия до летнего солнцестояния: 92 дня и примерно 18 часов
- от летнего солнцестояния до осеннего равноденствия: 93 дня и примерно 16 часов
- от осеннего равноденствия до зимнего солнцестояния: 89 дней (практически ровно)
- от зимнего солнцестояния до весеннего равноденствия: 89 дней и примерно 18 часов
- между равноденствиями: 178 дней 18 часов от осеннего до весеннего и 186 дней 10 часов от весеннего до осеннего.

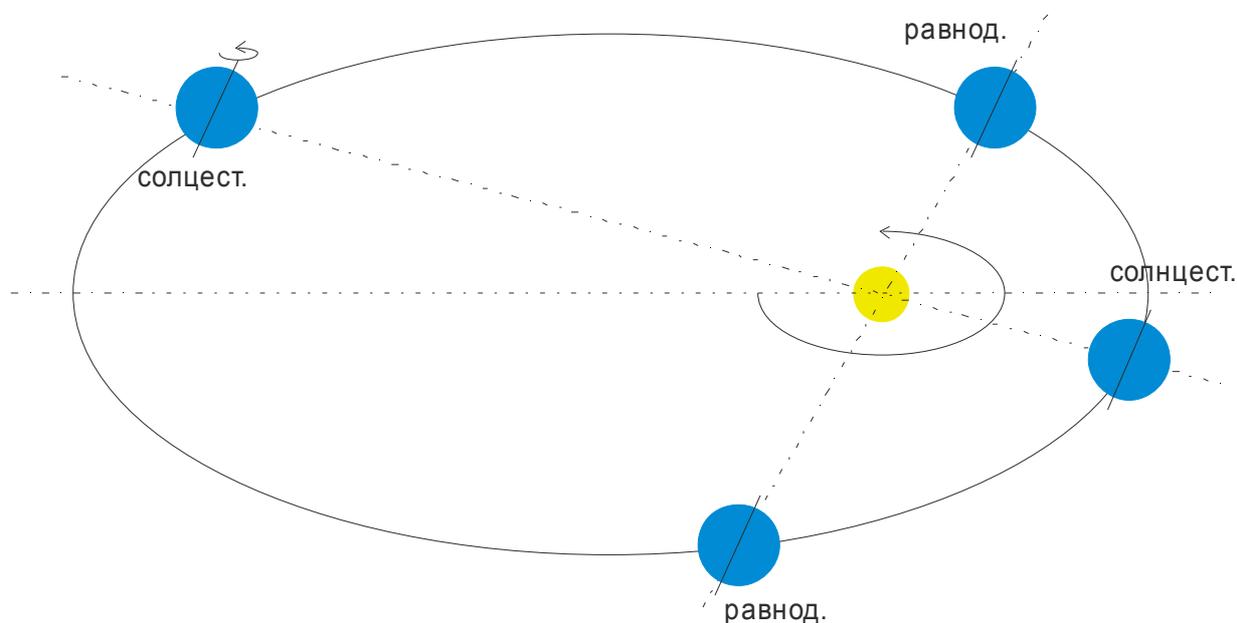


Рисунок 116: К причине отличия интервалов между равноденствиями и солнцестояниями. Северный полюс Земли — сверху.

Явления солнцестояния и равноденствия связаны с наличием у земной оси наклона к плоскости орбиты. Солнцестояния возникают, когда земная ось оказывается в плоскости нормальной к плоскости орбиты и проходящей через Солнце. При этом для земного

наблюдателя видимая высота подъема Солнца над горизонтом оказывается экстремальна. Равноденствия, наоборот, возникают когда прямая, соединяющая Землю и Солнце оказывается нормальна к плоскости, проходящей через земную ось и нормаль к плоскости орбиты.

Если бы орбита Земли была круговой — то из тривиальных геометрических соображений понятно, что интервалы между этими событиями были бы равны 1/4 года. Таким образом, это отличие связано с эллиптичностью орбиты. Однако эксцентриситет мал, так как отличие этих интервалов составляет несколько процентов.

Далее, если бы в точках солнцестояния земля находилась бы в самой близкой и самой далеких от Солнца точках орбиты, то интервалы между солнцестояниями были бы равны (по закону площадей). Аналогично для точек равноденствия. Таким образом, точки наибольшего приближения и удаления от Солнца не совпадают ни с какими из рассматриваемых астрономических событий. В этом нет ничего удивительного, так как орбитальное движение и наклон оси есть параметры независимые.

Отличие интервалов между солнцестояниями меньше отличия интервалов между равноденствиями. Таким образом, точки солнцестояния находятся ближе к оси симметрии. Вспоминая известный факт, что зимой (в январе) Земля находится ближе к Солнцу, чем летом, и сравнивая площади «половинок» эллипса из закона площадей можно восстановить схематическое положение точек равноденствия и солнцестояния (рисунок 116).

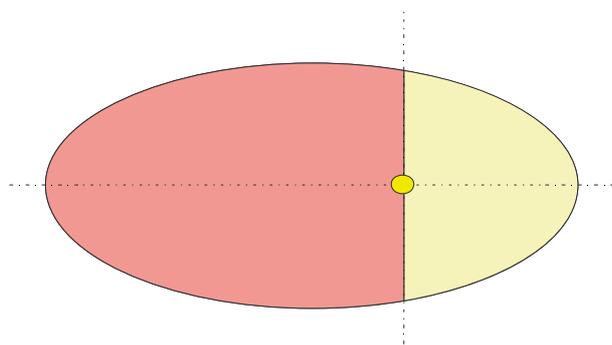


Рисунок 117: Упрощенная модель для оценки эксцентриситета орбиты Земли.

и перпендикулярной большой оси эллипса (на рисунке). Из закона площадей и интервала между равноденствиями получаем, что площади красного и желтого сегмента эллипса

соотносятся как $\frac{S_1}{S_2} = \frac{186.4 \text{ дня}}{178.75 \text{ дня}} = 1.04$. Учитывая малость эксцентриситета можно связать

это отличие площадей с различием осей эллипса: простое геометрическое приближение для этой оценки заключается в том, чтобы представить эллипс с полуосями a и b в виде разрезанного по диаметру круга радиуса R с прямоугольной вставкой ширины $2\delta R$. При этом малая полуось «эллипса» равна R , а большая полуось $R + \delta R$. Для сравниваемых

площадей: $\frac{S_1 - S_2}{S_2} \approx \frac{2R \cdot 2\delta R}{\pi R^2/2} = \frac{8}{\pi} \frac{\delta R}{R} \approx 2.55 \frac{a-b}{b}$. Откуда, $\frac{a}{b} \approx 0.015$. Точное значение

отношения полуосей из справочника: 0.017.

Для точного ответа на поставленный вопрос необходимы достаточно сложные геометрические соображения — необходимо вычисление площадей секторов эллипса. Однако для оценки можно воспользоваться уже показанной большей близостью точек солнцестояния к оси эллипса и для оценки предположить, что точки солнцестояния лежат на большой оси симметрии эллипса. Тогда точки равноденствия оказываются на пересечении эллипса и прямой, проходящей через фокус

Удержание атмосферы.

При обсуждении планет земного типа мы отметили, что Меркурий не может удержать атмосферу, а Марс способен удержать лишь разреженную атмосферу. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Есть несколько каналов потери атмосферных газов. Термический канал связан с убеганием молекул, имеющих тепловую скорость больше второй космической. Средняя тепловая скорость, как мы помним, определяется температурой $\frac{m\langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2}kT$, то есть

$$\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \text{ При температуре } 1000\text{К (температура экзосферы) для атомарного водорода}$$

это дает оценку для средней скорости в 5 км/сек. Напомним, что вторая космическая скорость для Венеры и Земли составляет около 10-11 км/сек, а для Меркурия и Марса — около 5 км/сек. Таким образом, термический механизм убегания работает для высокоскоростного хвоста распределения Максвелла и наиболее существенен для легких газов и для легких планет. Этот механизм обуславливает бедность атмосфер планет земного типа на водород и гелий. Для более тяжелых газов: молекулярных кислорода и азота или углекислого газа процесс теплового убегания для Земли или Венеры не существен.

К нетепловым каналам относится в первую очередь «выдувание» атмосферы солнечным ветром. Энергичные частицы солнечного ветра передают при столкновениях свою энергию атмосферным молекулам, разгоняя часть из них до скорости большей скорости убегания. Земля защищена от этого воздействия своим магнитным полем. Считается, что именно взаимодействие с солнечным ветром является причиной разреженности марсианской атмосферы, изначально относительно разреженной из-за меньшей массы планеты. Венера же, хотя находится ближе к Солнцу, страдает от солнечного ветра меньше, так как плотная атмосфера Венеры эффективно тормозит частицы солнечного ветра. При этом, благодаря большей концентрации газа, энергия заторможенной частицы перераспределяется между многими атмосферными молекулами, приводя к лишь незначительному их перегреву.

Сравнение плотности атмосфер Венеры и Земли, имеющих почти равные массы, показывает, что Земля могла бы удерживать атмосферу на два порядка более плотную. Считается, что основная причина менее плотной Земной атмосферы — это возможность конденсации воды, приводящая к связыванию воды в более компактной жидкой форме в океанах, а двуокиси углерода — в осадочных породах.

Приливные силы.

Рассмотрим систему двух тел (массы m_1 и m_2), вращающихся вокруг общего центра масс по круговым орбитам (радиусы орбит a_1 и a_2) с периодом T . Если эти тела точечные, то мы получим уже решенную нами задачу небесной механики:

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$$\frac{(a_1 + a_2)^3}{T^2} = \frac{1}{4\pi^2} G(m_1 + m_2)$$

Что изменится, если тела имеют конечный размер (радиусы тел R_1 и R_2) и не являются абсолютно жесткими? Для качественного рассмотрения можно заметить, что, так как твёрдое

тело движется как целое, то точки, находящиеся ближе к центру масс движутся несколько медленнее орбитальной скорости на орбите радиуса $a_1 - R_1$, а точки, наиболее удаленные от центра масс движутся быстрее орбитальной скорости на орбите радиуса $a_1 + R_1$. Поэтому, если бы тело не было связанным, «внутренние» точки стремятся «упасть» на второе тело, а «внешние» - «улететь» прочь. Таким образом, возникает пара сил, «растягивающих» взаимодействующие тела вдоль прямой, соединяющей их центры.

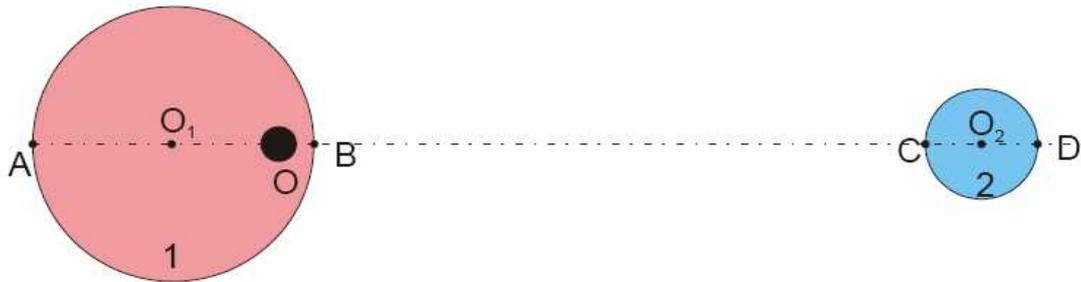


Рисунок 118: К рассмотрению приливных сил во вращающейся системе координат. Положение центра масс - точка O , центры тел находятся в точках O_1 и O_2 .

Для более строгого рассмотрения удобно пересечь в систему координат, связанную с выбранным вращающимся телом. Совместим начало этой системы координат с центром масс выбранного тела, исключим пока из рассмотрения собственное вращение тел и будем считать оси движущейся системы координат остающимися параллельно осям системы центра масс. Выбранное тело будет покоится в движущейся системе координат. Однако, эта система координат — неинерциальная. Поэтому в ней возникнет дополнительная сила, хорошо известная всем пассажирам общественного транспорта — это центробежная сила. Её легко заметить простым формальным вычислением. Пусть \vec{R} - радиус-вектор материальной точки в системе центра масс, $\vec{\rho}$ - радиус-вектор той же точки во вращающейся системе координат, a — радиус траектории начала вращающейся системы координат. Так как движение плоское, достаточно рассматривать двумерную задачу с осями координат в плоскости движения. В системе центра масс уравнение динамики — второй закон Ньютона записывается как $m\ddot{\vec{R}} = \vec{F}$. Пересчитаем его в движущуюся систему координат:

$$\ddot{\vec{R}} = \frac{d^2}{dt^2} (a(\cos(\omega t); \sin(\omega t)) + \vec{\rho}) = -a\omega^2(\cos(\omega t); \sin(\omega t)) + \ddot{\vec{\rho}}$$

$$m\ddot{\vec{\rho}} = \vec{F} + a\omega^2(\cos(\omega t); \sin(\omega t))$$

То есть, в движущейся системе координат возникает дополнительная (фиктивная) сила инерции: центробежная сила, направленная от центра масс к центру выбранного тела и равная $F_{ц-б} = m\omega^2 a$. Эта сила в точности компенсируется силой притяжения от второго тела в центре выбранного тела:

$$0 = m_1\omega^2 a_1 - G \frac{m_1 m_2}{(a_1 + a_2)^2}$$

Однако, из-за зависимости силы тяготения от расстояния, в более удаленной точке А центробежная сила больше силы притяжения, а в близкой ко второму телу точке В сила тяготения больше центробежной силы. Более того, в случае когда центр масс системы

оказывается внутри одного из тел, то силы притяжения со стороны другого тела и центробежная сила оказываются сонаправлены (в точке В на рисунке 118). Вычислим поправку к ускорению свободного падения в точке А на рисунке 118. При этом учтём, что $a_1 + a_2 \gg r_1, r_2$. Положительным считаем направление от центра масс.

$$\begin{aligned} \delta g_A &= \omega^2 a_1 - G \frac{m_2}{(a_1 + a_2 + r_1)^2} = \omega^2 a_1 - G \frac{m_2}{(a_1 + a_2)^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{r_1}{a_1 + a_2}\right)^2} \approx \\ &\approx \omega^2 a_1 - G \frac{m_2}{(a_1 + a_2)^2} + 2 \frac{r_1}{a_1 + a_2} G \frac{m_2}{(a_1 + a_2)^2} = 2 \omega^2 r_1 \frac{a_1}{a_1 + a_2} \end{aligned}$$

Как легко заметить, для других «экстремальных» точек системы ответ получается из этого заменой индексов и знака радиуса. Отношение $a_1/(a_1 + a_2)$ принимает значение 1 если $a_1 \gg a_2$ (что соответствует влиянию Земли на Луну или Солнца на Землю) и значение a_1/a_2 , если $a_1 \ll a_2$ (что соответствует влиянию Луны на Землю)

Оценим численно эффекты, наблюдаемые на Земле из-за влияния Солнца и Луны. Для приливного влияния Солнца:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi / (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ сек}^{-1} = 2.00 \cdot 10^{-7} \text{ сек}^{-1} \\ \delta g_{\text{Солнца}} &= 2 \cdot (2 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 6.4 \cdot 10^6 \frac{M}{\text{сек}^2} = 5.1 \cdot 10^{-7} \frac{M}{\text{сек}^2} = 0.51 \cdot 10^{-7} g \end{aligned}$$

Для приливного влияния Луны:

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi / (27.3 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ сек}^{-1} = 2.66 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1} \\ a_1/a_2 &= m_1/m_2 = 0.012 \\ \delta g_{\text{Луны}} &= 2 \cdot 0.012 \cdot (2.66 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 6.4 \cdot 10^6 \frac{M}{\text{сек}^2} = 1.09 \cdot 10^{-6} \frac{M}{\text{сек}^2} = 1.1 \cdot 10^{-7} g \end{aligned}$$

Таким образом, влияние Луны оказывается вдвое сильнее солнечного. Из планет Солнечной системы наибольшее приливное влияние на Землю оказывает Венера, это влияние составляет однако около 10^{-4} от солнечного.

Достаточно ли велико такое изменение ускорения свободного падения, чтобы быть заметным. Это легко оценить, воспользовавшись тем, что Земля покрыта слоем легко перемещаемой воды. Поэтому под влияние приливных сил это водяное «одеяло» должно деформироваться, образуя горбы на осях Земля-Солнце и Земля-Луна. Из-за этого перераспределения массы притяжение к центру Земли несколько увеличивается в районе «горбов».

Точный анализ требует расчета поля тяготения для тела сложной формы. Для грубой оценки достаточно оценить, на сколько надо было бы увеличить массу и радиус Земли, чтобы скомпенсировать приливные силы возросшей силой притяжения. Как мы помним

$$g = G \frac{M}{R^2} = \frac{4}{3} \pi G \rho R$$

. То есть, для увеличения силы притяжения на 10^{-7} от нормальной необходимо увеличить радиус (с сохранением средней плотности) также на 10^{-7} от нормального, то есть на 64 сантиметра.

Более точный расчет согласуется с нашей оценкой: теоретическая максимальная амплитуда лунного океанского прилива около 54 сантиметров, солнечного — около 25 сантиметров. Эксцентриситет орбит приводит к вариации амплитуды лунного прилива на $\pm 18\%$ и к вариации амплитуды солнечного прилива на $\pm 5\%$.

В зависимости от взаимного расположения Солнца и Луны эти величины могут складываться (если Солнце и Луна находятся на одной прямой) или практически уничтожаться (если Солнце и Луна находятся под 90° относительно Земли). В оптимальном случае, когда Солнце и Луна находятся на одной прямой и в ближайшем к Земле положении суммарная амплитуда прилива может достигнуть 93 сантиметров. Из-за вращения Земли приливы в океане случаются два раза в день.



Рисунок 119: Прилив и отлив в заливе Фанди, Канада. Фотографии с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Tides>

Из-за вращения Земли приливной горб перемещается вслед за видимым вращением Луны и Солнца — приливная волна бежит вокруг Земли. Поэтому в некоторых участках побережья, из-за особенностей рельефа дна и профиля берега, приливная волна может набирать большую амплитуду. Так в заливе Фанди в Канаде амплитуда приливной волны достигает 17 метров (а рекордное значение, вызванное дополнительным вмешательством циклона, достигает 21.6 метров) (рисунок 119).

Приливному воздействию подвержены не только океаны — литосфера (в некотором смысле — океан магмы) также оказывается подверженной приливным деформациям, достигающим по амплитуде 50 сантиметров. Эти деформации приходится учитывать при калибровке системы GPS, при точных астрономических наблюдениях, а также при работе больших ускорителей частиц (например в ЦЕРН и Станфордском линейном ускорителе). Приливные деформации океана и литосферы взаимодействуют между собой. Это осложняется тем, что скорость распространения поверхностных волн в океане достаточно мала (такая волна

обегает экватор за примерно 30 часов), а в литосфере сравнительно велика (аналогичное обегание экватора происходит примерно за час). Поэтому реальный приливной максимум может быть заметно смещен от положения Луны.

Наконец, приливные силы возникают всегда, когда есть градиент гравитационного поля. Солнечная система подвержена действию приливных сил со стороны нашей Галактики — по некоторым моделям возмущение облака Оорта галактическими приливами приводит к изменениям кометной активности. Более того, есть астрономические наблюдения взаимодействия двух близких галактик (рисунок 120), показывающие проявление приливных сил в галактическом масштабе.



Рисунок 120: Галактики NGC2207 (слева) и IC2163 (справа) в созвездии Большого Пса. Менее массивная галактика IC2163 деформирована приливными силами. Расстояние до галактик около 100 миллионов световых лет, их диаметры - около 100000 световых лет. Фотография получена телескопом "Хаббл" в 1999 году. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/NGC_2207_and_IC_2163)

Приливное торможение и синхронизация собственного и орбитального вращений.

Рассмотрим внимательнее систему двух тел, например Землю и Луну, и посмотрим к каким последствиям приводит собственное вращение этих тел. Как мы уже обнаружили, тяготеющие тела вызывают друг на друге приливные волны, проявляющиеся в перемещении океанических вод или деформации литосферы, которые следуют за вращением тел относительно друг друга. Если пренебречь явлениями запаздывания, то максимумы приливной волны находятся на прямой, проходящей через центры двух тел.

Заметим теперь, что если рассматриваемая планета вращается вокруг своей оси в ту же сторону, в какую движется приливная волна (то есть в ту же сторону, в которую вращается спутник) с периодом, совпадающим с периодом вращения спутника, то приливная волна оказывается в покое относительно планеты. Если планета вращается быстрее — она «убегает» от приливной волны и возникает трение, тормозящее собственное вращение. Если планета вращается медленнее периода вращения спутника — то приливная волна обгоняет

планету и трение между волной и планетой, наоборот, разгоняет собственное вращение планеты. Таким образом, состояние с синхронизованными орбитальным и собственным вращениями оказывается устойчивым. При этом, в паре более массивной планеты и менее массивного спутника, спутник синхронизируется быстрее, так как большая масса планеты приводит к большему градиенту гравитационного поля на спутнике, а также из-за маленькой массы спутника его собственное вращение обладает меньшим моментом вращения.

В Солнечной системе наблюдаются многочисленные примеры такой синхронизации собственного и орбитального вращений: Луна, большинство крупных лун других планет. В системе Плутон-Харон и планета и спутник имеют сравнимые массы (масса Харона около 11% от массы Плутона), а расстояние между ними составляет всего около 20000 км. Поэтому в этой системе синхронизованы вращения и спутника и планеты — они всегда повернуты друг к другу одной стороной. Меркурий является интересным примером синхронизации собственного и орбитального вращений в отношении 3:2 — из-за достаточно большого эксцентриситета орбиты более важным оказывается то, что при прохождении перигелия длинная ось Меркурия направлена к Солнцу.

Приливное ускорение или торможение планеты оказывается решающим фактором в долговременной судьбе спутника. Так как возникающие силы трения являются внутренними, в системе планета-спутник должен сохраняться момент вращения. Если меняется угловая скорость собственного вращения планеты, то недостающий (или избыточный) момент вращения должен быть скомпенсирован изменением орбитального момента вращения спутника. Найдем связь орбитального момента вращения с радиусом круговой орбиты:

$$m \frac{v^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}$$

$$L = mvR = m \sqrt{GMR}$$

Таким образом, если планета вращается быстрее периода обращения спутника, то приливная волна тормозит вращение планеты. Следовательно, орбитальный момент спутника увеличивается — и увеличивается радиус орбиты спутника. По этой причине Луна убегает от Земли, увеличивая радиус своей орбиты на 3 сантиметра в год.

Если планета вращается медленнее (или, что то же самое, орбита спутника лежит ниже стационарной) то планета ускоряется, а спутник приближается к планете. Также спутник приближается к планете, если спутник и планета вращаются в разных направлениях. В результате, так как масса спутника обычно мала, такой спутник обречён — достигнув предела Роша (о чём мы поговорим ниже), он будет разрушен. Такая судьба ожидает, в частности, спутник Марса Фобос и спутник Нептуна Тритон. Предположительно, отсутствие спутников у Венеры связано с её очень медленным и ретроградным вращением — любой захваченный спутник в астрономической перспективе должен был бы упасть на Венеру.

Наконец, заметим, что трение между приливной волной и остальной планетой является существенным источником энергии. Именно эта энергия нагревает внутренности галилеевых спутников Юпитера. Несмотря на то что они синхронизованы по вращению, из-за эксцентриситета орбит, амплитуда приливной волны меняется, что приводит к периодической деформации планет. По некоторым оценкам на вулканически активной Ио эти приливные изменения уровня поверхности достигают 100 метров.

Предел Роша.

С действием приливных сил связано понятие предела Роша — минимального расстояния до планеты на котором спутник планеты может сохранять свою целостность за счет своей гравитации. Как мы уже показали, из-за градиента сил притяжения планеты на поверхности спутника в самой близкой к планете и в самой далекой от планеты точке спутника возникает составляющая ускорения свободного падения, направленная от поверхности спутника и равная $\delta g \approx 2 \omega^2 r \frac{a_1}{a_1 + a_2} \approx 2 \omega^2 r = 2 G \frac{M}{a^3} r = 2 \frac{4}{3} \pi G \rho_{\text{планеты}} \left(\frac{R}{a}\right)^3 r$ (здесь R — радиус планеты, a — радиус орбиты спутника, $\rho_{\text{планеты}}$ — средняя плотность планеты, r — радиус спутника. Мы воспользовались тем, что масса планеты много больше массы спутника, и центр масс практически совпадает с центром планеты).

Эта составляющая должна компенсироваться ускорением свободного падения на спутнике. Если масса спутника не достаточна, чтобы превысить эту «отрывающую» составляющую, то камень лежащий на поверхности спутника в точке ближайшей к планете или наиболее удаленной от планеты полетит от поверхности спутника. То есть, спутник начнет терять массу и рассыпаться. Нормальный вклад в ускорение свободного падения на поверхности тела сферической формы (для простоты анализа пренебрежём деформацией спутника под действием приливных сил) есть $g_0 = G \frac{m}{r^2} = \frac{4}{3} \pi G \rho_{\text{спутника}} r$.

Приравнивая полученные выражения, получаем:

$$\left(\frac{a}{R}\right)^3 = 2 \frac{\rho_{\text{планеты}}}{\rho_{\text{спутника}}} \quad \text{то есть} \quad \frac{a}{R} = \sqrt[3]{2 \frac{\rho_{\text{планеты}}}{\rho_{\text{спутника}}}} \approx 1.26 \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{планеты}}}{\rho_{\text{спутника}}}}$$

Расчёт для «жидкого» спутника: капли принимающей оптимальную форму под действием своей собственной силы тяжести и неоднородного поля тяготения планеты, дает ответ отличающийся численным множителем $\frac{a}{R} \approx 2.43 \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{планеты}}}{\rho_{\text{спутника}}}}$. Увеличение критического расстояния для «жидкого» спутника качественно понятно — из-за деформации вдоль направления спутник-планета, экстремальные точки «жидкого» спутника испытывают меньшее притяжение к центру масс спутника (и увеличение расстояния до центра масс, и вытянутость формы приводят к уменьшению силы притяжения). Поэтому собственное тяготение спутника оказывается недостаточно сильным раньше, по сравнению с «твёрдым» спутником.

Средние плотности планеты и спутника часто близки, так как они формируются в одной и той же области Солнечной системы (хотя, конечно, есть и исключения). Таким образом мы можем ожидать, что для большинства систем планета-спутник предел Роша (минимальное расстояние до планеты, на котором спутник еще может оставаться целым) составляет 1.5-2 радиуса планеты.

Случаи разрушения спутника, пересекшего предел Роша случаются не так уж и редко. Это, например, недавнее наблюдение бомбардировки Юпитера осколками кометы Шумахер-Леви 9 в 1993-1994 году. Эта комета была предположительно захвачена Юпитером в 1960-1970-х годах и, согласно расчетам траекторий обнаруженных в 1993 году обломков кометы, пересекла предел Роша Юпитера в 1992 году. Кольца планет-гигантов также связаны с пределом Роша. Например, для наиболее окольцованной планеты — Сатурна, система колец начинается на расстоянии примерно 70000 км от центра планеты, а внешняя граница группы

ярких колец (внешняя граница кольца А) на расстоянии примерно 135000 километров от центра планеты. Радиус Сатурна составляет около 60000 километров — таким образом, группа самых ярких колец оказывается расположена в полном соответствии с нашими оценками. Внешние же кольца во многом оказываются связаны с влиянием соседних спутников планеты.

Прецессия оси вращения Земли.

Интересным проявлением приливных сил, точнее, сил, связанных, как и приливные, с неоднородностью гравитационного поля, является прецессия оси вращения Земли. Известно из астрономических наблюдений, что положение северного полюса, а также точек равноденствия постепенно смещается по небесной сфере. Это наблюдение было сделано еще в древнем мире — традиция приписывает это открытие древнегреческому астроному Гиппарху (190-120 г. д.н.э), который, сравнив свои наблюдения с наблюдениями предшественников обнаружил, что положения звезд смещаются со скоростью примерно 1° в столетие.

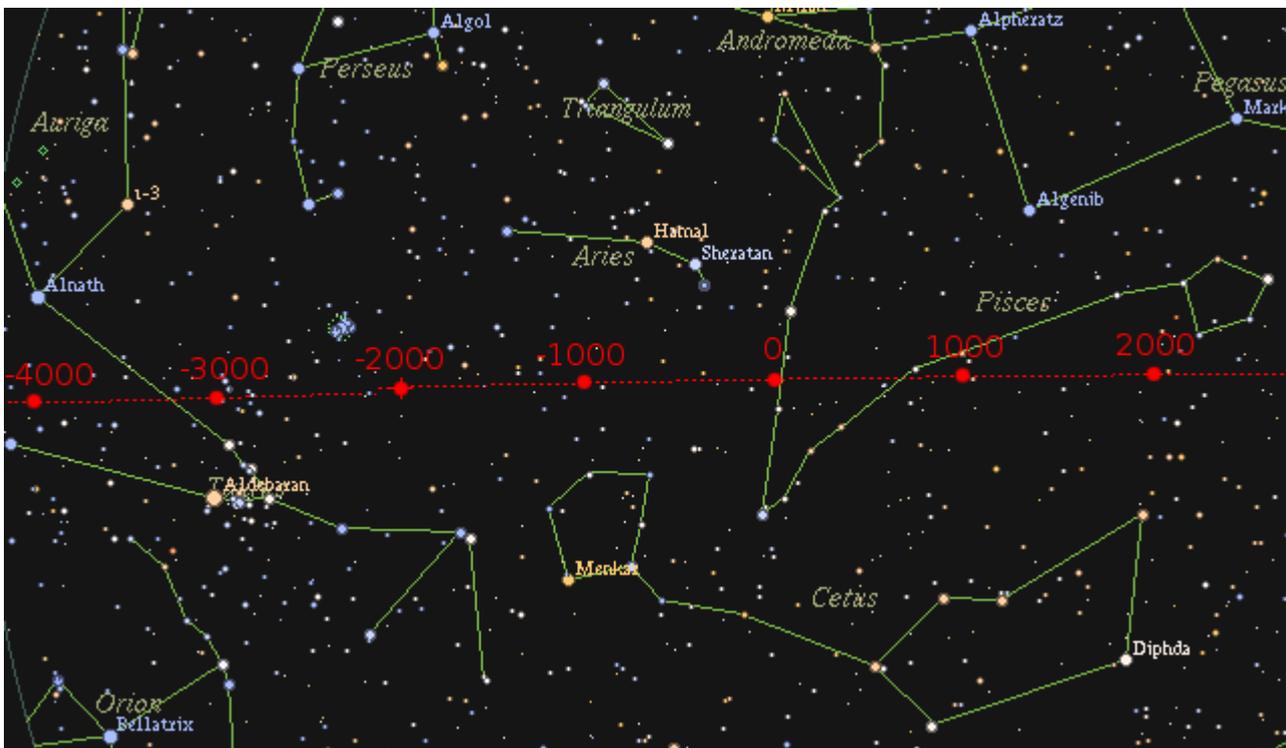


Рисунок 121: Смещение точки весеннего равноденствия за последние 6000 лет из созвездия Тельца в созвездие Рыб. (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Axial_precession_\(astronomy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Axial_precession_(astronomy)))

Для объяснения этого эффекта необходимо вспомнить некоторые факты из механики вращающихся тел. Нам всем привычен второй закон Ньютона, описывающий поступательное движение тел:

$\vec{F} = m \vec{a} = \frac{d}{dt} \vec{p}$. Это уравнение динамики движущегося тела.

Как записать уравнение динамики вращающегося вокруг своей оси тела? Если для простоты предположить, что в выбранной системе координат центр масс тела покоится, то все силы скомпенсированы: $\sum \vec{F}_i = 0$. Однако может быть не равен нулю момент сил

$$\vec{M} = \sum \vec{r}_i \times \vec{F}_i = \sum \vec{r}_i \times \left(\frac{d}{dt} \vec{p}_i \right) = \frac{d}{dt} \sum \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \frac{d \vec{L}}{dt} \quad (\text{здесь мы используем понятие векторного}$$

произведения, введённое ранее, для упрощения записи). Предпоследнее преобразование (вынос дифференцирования за знак суммирования) возможно так как импульс $\vec{p}_i = m_i \vec{V}_i$ и скорость $\vec{V}_i = \frac{d}{dt} \vec{r}_i$ параллельны, поэтому одно из слагаемых в производной произведения обратится в ноль. Таким образом, уравнение для динамики вращательного движения оказывается похоже на второй закон Ньютона, роль сил играет момент сил, а роль импульса — момент импульса.

Момент импульса связан с угловой скоростью вращения:

$$\vec{L} = \sum \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \sum m_i [\vec{r}_i \times \vec{V}_i] = \sum m_i [\vec{r}_i \times [\vec{\Omega} \times \vec{r}_i]] = \sum m_i (\vec{\Omega} (\vec{r}_i \cdot \vec{r}_i) - \vec{r}_i (\vec{\Omega} \cdot \vec{r}_i)) = \vec{\Omega} \sum m_i r_{i,\perp}^2 = I \vec{\Omega}$$

здесь $r_{i,\perp}$ - расстояние до i -ой точки от оси вращения, а I — момент инерции тела.

Если вектор момента сил оказывается сонаправлен с вектором угловой скорости — происходит ускорение или замедление вращения (легко проверить, что это правило для векторов полностью соответствует здравому смыслу). Если же вектор момента сил отличается от направления вектора угловой скорости — возникает перемещение направления оси вращения. Причем, если приложенный момент сил оказывается перпендикулярен вектору собственной угловой скорости $\vec{\Omega}$, то возникает прецессия: ось вращения начинает поворачиваться к направлению, задаваемому вектором момента сил. Величина угловой скорости при этом не меняется.

В общем случае, если момент вращения образует с осью прецессии угол α , то при повороте вокруг оси прецессии на угол $d\phi$ изменение вектора \vec{L} есть $dL = d\phi L \sin \alpha$, откуда угловая скорость прецессии $\omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{M}{L \sin \alpha} = \frac{M}{I \Omega \sin \alpha}$.

С полученным уравнением согласуется также и вывод, известный нам из закона сохранения момента вращения: направление оси вращения вращающегося тела сохраняется, если на это тело не действуют моменты сил. На этом основан принцип работы различных гироскопических стабилизаторов, используемых в системах навигации и наведения.

Какие же силы заставляют прецессировать земную ось? Это силы связанные с неоднородностью гравитационного поля Луны и Солнца. Однако, как мы сейчас увидим, для возникновения ненулевого момента этих сил необходимо два условия: наклон оси вращения Земли к плоскостям орбит (с точностью нашей оценки орбиту Луны можно будет считать лежащей в плоскости эклиптики, хотя реальный наклон плоскости лунной орбиты к эклиптике составляет около 5°) и небольшую «сплюснутость» формы Земли. Для простоты ограничим пока рассмотрение системой Солнце-Земля.



Рисунок 122: К описанию прецессии земной оси. Верхний рисунок: компенсация моментов сил для сферической Земли. Средний: возникновение нескомпенсированного момента для "сплюснутой" Земли. Нижний рисунок: упрощенная модель для вычисления момента сил с заменой сплюснутого пояса "эффективной гантелей".

Как легко видеть из рисунка 122, момент сил действительно возникает только при учёте несферичности формы Земли. Если бы Земля была идеальной сферой, то все силы возникали бы точно скомпенсированными парами. При этом, так как ось вращения Земли всё же примерно сохраняет свое направление, в течение года момент этих сил меняется: он максимален, когда прямая Солнце-Земля и земная ось лежат в одной плоскости (это моменты летнего и зимнего солнцестояний), и равен нулю, когда ось вращения Земли перпендикулярна линии Земля-Солнце (моменты равноденствий). При этом однако средний момент сил не обращается в ноль. На нашем рисунке момент сил стремится повернуть «Землю» против часовой стрелки. Через пол-периода «Земля» окажется справа от «Солнца», силы станут направлены «справа-налево», но при этом сила, приложенная к верхней по рисунку половине «Земли», будет больше силы, приложенной к нижней половине. Поэтому момент этих сил опять же будет стремиться повернуть «Землю» против часовой стрелки.

Для оценки рассмотрим простейшую ситуацию, когда момент максимален. Точное вычисление потребует интегрирования по «поясу», отличающему земной эллипсоид от сферы. Упростим задачу еще раз и заменим этот «пояс» гантелей из двух масс, равных половине массы «пояса», находящихся на экваторе Земли в верхней и нижней точках. Эта оценка также завышает получаемое значение момента, так как силы, действующие на части «пояса» в плоскости эклиптики не создают момента сил.

Массы шаров этой «гантели»:

$$2 \delta m = 2 \rho \left(\frac{4}{3} \pi R_{\text{пол}} R_{\text{экв}}^2 - \frac{4}{3} \pi R_{\text{пол}}^3 \right) = \frac{8}{3} \pi \rho R_{\text{пол}}^3 \left(\left(\frac{1 + \delta R}{R} \right)^2 - 1 \right) = 4 M_{\text{земли}} \frac{\delta R}{R}$$

Отличие полярного и экваториального радиусов Земли составляет 21 километр, поэтому

$$\frac{\delta m}{M_{\text{земли}}} = 2 \frac{\delta R}{R} = 6.6 \cdot 10^{-3}$$

Сила, действующая на верхнюю (дальнюю по рисунку 122) массу:

$$F_1 = G \frac{\delta m M_{\text{сол}}}{(a + R \sin \alpha)^2} \approx G \frac{\delta m M_{\text{сол}}}{a^2} \left(1 - 2 \frac{R \sin \alpha}{a} \right) \quad \text{здесь } \alpha \text{ — угол между осью Земли и нормалью к эклиптике.}$$

Сила действующая на нижнюю массу

$$F_2 = G \frac{\delta m M_{\text{сол}}}{(a - R \sin \alpha)^2} \approx G \frac{\delta m M_{\text{сол}}}{a^2} \left(1 + 2 \frac{R \sin \alpha}{a} \right),$$

плечи сил равны $R \cos \alpha$, откуда искомый момент сил

$$M = 4 \delta m R^2 \sin \alpha \cos \alpha G \frac{M_{\text{сол}}}{a^3}$$

Для нахождения частоты прецессии необходимо знать момент инерции Земли. Так как мы все равно делаем оценку, положим $I = M_{\text{земли}} R^2$. Это соответствует тому, что вся масса сосредоточена на экваторе. Точный ответ для момента инерции шара содержит множитель 0.4.

$$\omega = \frac{M}{I \Omega \sin \alpha} \sim 4 \frac{\delta m}{M_{\text{земли}}} \frac{\cos \alpha}{\Omega} G \frac{M_{\text{сол}}}{a^3}$$

До этого момента вычисления для системы Солнце-Земля и Луна-Земля ничем не отличаются. Более того, очевидно, что средние моменты сил от Солнца и от Луны сонаправлены. Для упрощения вычислений можно заметить, что для системы Солнце-Земля

$$G \frac{M_{\text{сол}}}{a^3} = \left(\frac{V}{a} \right)^2 = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \approx 4.0 \cdot 10^{-14} \text{ сек}^{-2} \quad (\text{здесь } T = 1 \text{ год})$$

Для системы Земля-Луна в этом множителе должна фигурировать масса Луны

$$G \frac{M_{\text{луны}}}{a^3} = \frac{M_{\text{луны}}}{M_{\text{земли}}} G \frac{M_{\text{земли}}}{a^3} = \frac{M_{\text{луны}}}{M_{\text{земли}}} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \approx 8.1 \cdot 10^{-14} \text{ сек}^{-2} \quad (\text{здесь } T = 28 \text{ дней}, \text{ масса Луны}$$

составляет 1.2% земной).

Таким образом, как и в случае приливов, лунное влияние оказывается сильнее. Остальные множители в формуле для скорости прецессии не зависят от того Солнце или Луна являются виновниками.

Входящая в ответ для частоты прецессии константа, связанная с собственным вращением

$$\text{Земли: } 4 \frac{\delta m}{M_{\text{земли}}} \frac{\cos \alpha}{\Omega} \approx 4 \times 6.6 \cdot 10^{-3} \times 1 \times 86400 \times \frac{1}{6.28} \text{ сек} = 360 \text{ сек}.$$

Итого, наша оценка для скорости прецессии земной оси, вызванной притяжением Луны:

$$2.9 \cdot 10^{-11} \frac{\text{рад}}{\text{сек}} = 0.05^{\circ} / \text{год} = 3' / \text{год}$$

Точный расчет дает ответ примерно в 5 раз меньше: 34" в год для лунного вклада. Завышенность нашей оценки связана с тем, что мы осознанно переоценивали момент сил. Солнечный вклад оказывается примерно вдвое меньше.

Точки Лагранжа в системе двух тел.

Рассмотрим систему двух тел, взаимодействующих друг с другом гравитационным образом. Эту задачу мы уже изучили, мы знаем, что эти два тела будут двигаться по эллиптическим орбитам (считаем начальные скорости достаточно малыми) вокруг общего центра масс. Существует интересная задача, поставленная и решённая в 1772 году знаменитым математиком Лагранжем.

Интересно отметить судьбу самого Лагранжа. Он родился в итальянском Турине (точнее на тот момент в столице Пьемонта — Турине) в 1736 году. С 1766 года он занимал, вслед за Эйлером, пост директора математического отделения Прусской Академии наук. С 1787 года он работает во Франции, становится членом французской Академии, является членом Палаты мер и весов и одним из отцов метрической системы единиц. Награждён знаком Почетного легиона в 1808 году и возведён в достоинство графа Империи. Скончался в 1813 и погребён в Пантеоне.

Задача заключается в поиске возможных точек в системе двух тел, движущихся по круговым орбитам, в которых третье тело малой массы будет находиться в равновесии относительно этих тел. Для решения этой задачи можно перейти в систему координат, вращающуюся относительно центра масс системы тел в ту же сторону и с той же угловой скоростью, что и вращение наших тел. Если M и m — массы тел (для определенности $M > m$), R и r — радиусы их орбит, а ω — угловая скорость вращения, то, как мы уже знаем:

$$RM = rm$$

$$\omega^2 r = G \frac{M_{\text{эфф}}}{r^2} = G \frac{M}{r^2 \left(1 + \frac{m}{M}\right)^2}$$

$$\omega^2 = G \frac{M^3}{r^3 (M+m)^2} = G \frac{m^3}{R^3 (m+M)^2}$$

Вращающаяся система координат является неинерциальной. В ней возникает центробежная сила, направленная от центра и равная $m\omega^2 \vec{r}$ и более хитрая сила Кориолиса, действующая на движущиеся тела. Упростим себе задачу — так как нас интересуют положения статического равновесия в этой системе координат, то в этих положениях тело может покоиться, а на покоящееся тело сила Кориолиса не действует. Наконец, заметим, что

центробежная сила является потенциальной¹ с потенциалом $U = -\frac{\omega^2 \rho^2}{2}$. Тогда, так как и силы тяготения потенциальны, задача о нахождении положений равновесия превращается в поиск точек экстремума полного потенциала:

$$U(x, y) = -G \frac{M}{\sqrt{(x+R)^2 + y^2}} - G \frac{m}{\sqrt{(x-r)^2 + y^2}} - \frac{\omega^2}{2} (x^2 + y^2)$$

Здесь мы выбрали ось X вдоль прямой, соединяющей наши тела. Более массивное тело находится в точке $(-R, 0)$, менее массивное — в точке $(r, 0)$. Экстремумы у такого потенциала несомненно есть — все слагаемые обращаются в минус бесконечность в разных точках, значит где-то между этими точками должен быть экстремум. Отсюда также очевидно, что найденные положения равновесия будут максимумами потенциала — то есть статически неустойчивыми положениями равновесия.

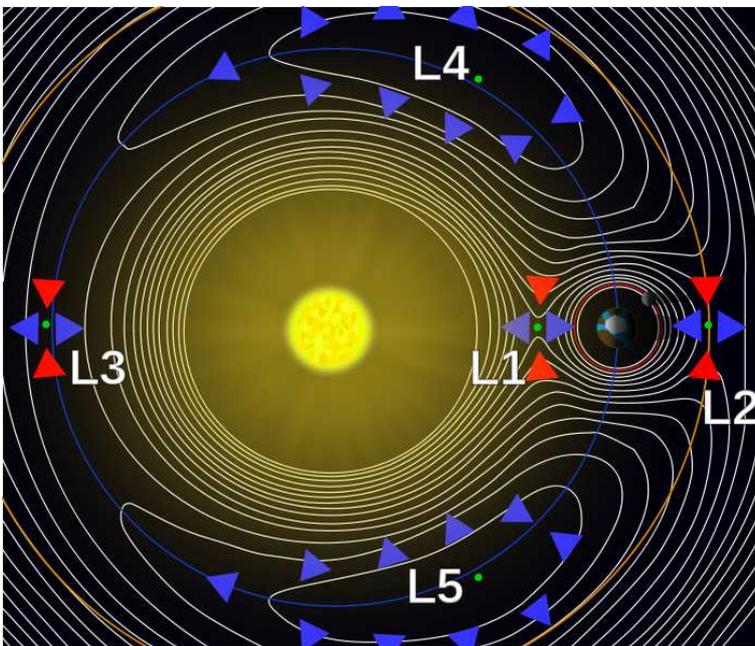


Рисунок 123: Схема расположения и обозначения точек Лагранжа (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Lagrangian_point)

Точное решение задачи об экстремумах требует скучных математических вычислений. Тем не менее частично ответ можно угадать. Заметим, что потенциал не меняется при замене y на $-y$. Поэтому производная dU/dy равна нулю при $y=0$ и для нахождения экстремумов на оси X достаточно рассматривать только функцию одной переменной. Первое слагаемое потенциала обращается в минус бесконечность при $x=-R$, второе при $x=r$, третье — на бесконечности. Поэтому есть три экстремума на этой оси: два по обе стороны менее массивного тела, одна — за более массивным телом. Это три первых точки Лагранжа L_1, L_2 и L_3 . Кроме этого, при точном решении оказывается, что есть

ещё две точки, не лежащих на одной прямой с тяготеющими телами, являющиеся вершинами равностороннего треугольника, в других вершинах которого находятся массивные тела. Это симметрично расположенные точки Лагранжа L_4 и L_5 (рисунок 123).

Если одно тело гораздо легче другого, то точки Лагранжа L_1 и L_2 находятся примерно на

¹ Потенциальность этой силы аналогична потенциальности силы упругости для пружины, формально записываемой также. Для короткого строгого доказательства (с использованием элементов высшей математики), вспомним, что критерий потенциальности силы — это равенство нулю работы по замкнутому контуру. Работа по замкнутому контуру для силы вида $\vec{F} = C\vec{r}$ есть $A_{замкн} = C \oint \vec{r} d\vec{l}$. По теореме о циркуляции (теореме Стокса), циркуляция вектора по контуру сводится к потоку ротора этого вектора через ограниченную площадку $A_{замкн} = C \int \text{rot } \vec{r} d\vec{S}$, а $\text{rot } \vec{r} = 0$.

одном и том же расстоянии от легкого тела $d \approx a \sqrt[3]{\frac{m}{3M}}$ (a — расстояние между телами). Для системы Земля-Солнце это расстояние равно 1500000 км от Земли (1% от радиуса земной орбиты), для системы Луна-Земля 61500 км от Луны (15% от радиуса лунной орбиты).

Все точки Лагранжа являются статически неустойчивыми. Однако точки L_4 и L_5 являются устойчивыми динамически, если отношение масс тел больше примерно 25. Это связано с тем, что при движении тела во вращающейся системе координат возникает сила Кориолиса, не учтённая нами в поиске статических точек равновесия. Эта сила искривляет траекторию и заставляет тело двигаться по орбите вокруг этих точек. По этой причине точки L_4 и L_5 являются точками сосредоточения космических объектов: пыли и астероидов. Две группы астероидов в этих точках на орбите Юпитера называют троянскими. Два небольших спутника Сатурна (Телесто и Калипсо) находятся в точках Лагранжа системы Сатурн-Тетис (Тетис один из крупных, но не крупнейший спутник Юпитера).

Неустойчивые точки L_1 , L_2 и L_3 представляют интерес для астрономических наблюдений. Несмотря на неустойчивость, поддержание положения зонда в этих точках требует достаточно мало топлива, а стационарное положение Солнца и Земли относительно этих точек существенно упрощает ряд наблюдений: точка L_1 удобна для наблюдений за Солнцем (например, запущенный в 1995 зонд Европейского космического агентства и НАСА «СОХО» (Solar and Heliospheric Observatory), а точка L_2 — наоборот оказывается всегда закрыта от излучения Солнца Землей (зонд НАСА «WMAP» (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), запущенный в 2001 году для изучения реликтового излучения). Находящаяся «за Солнцем» точка L_3 является потенциально интересной для наблюдения за Солнечной активностью для раннего предупреждения о вспышках.

Ещё одним следствием из этих рассуждений является то, что при формировании планеты на орбите не остается устойчивых положений для других тел, за исключением троянских точек Лагранжа. То есть, сформировавшаяся планета «очищает» свою орбиту от других частиц протопланетного диска.

Орбитальные резонансы.

Пусть у некоторой воображаемой звезды существуют две планеты. Пересядем в систему координат, вращающуюся вокруг общего центра масс с угловой частотой одной из планет. В отсутствие взаимодействия планет друг с другом, эта планета покоится и находится в устойчивом равновесии. К какому эффекту приведет учет взаимодействия? Точное решение этой задачи трёх тел невозможно. Однако есть один важный момент, связанный с отношением частот обращения планет.

Если это отношение частот произвольно, то сила взаимодействия планет все время меняется по величине и направлению, так что можно ожидать, что эффект от этого взаимодействия «усреднится» до какой-то малой поправки.

Если же отношение частот является отношением близких целых чисел, то некоторые взаимные конфигурации планет будут регулярно повторяться. Например, в экстремальном случае, если вторая планета движется с той же угловой скоростью — то возникает просто постоянная сила взаимодействия во вращающейся системе координат. В другом экстремальном примере можно вообразить что вторая планета движется по орбите с большим эксцентриситетом и тогда особенно важно взаимодействие планет в момент их наибольшего сближения. В случае кратности периодов обращения эти сближения будут

происходить примерно в одной и той же точке орбиты, поэтому средняя сила взаимодействия будет сохранять направление и величину.

В результате, кратность частот обращения может приводить не к взаимной компенсации сил взаимодействия, а к их суммированию — и слабая сила взаимодействия планет может в краткосрочной (с астрономической точки зрения) перспективе привести к существенной перестройке орбит планет. По аналогии с явлением резонанса, когда малая сила на правильной частоте приводит к большой раскачке системы, это явление называют орбитальными резонансами.

Как правило, орбитальные резонансы приводят к неустойчивостям орбит. Примером этого является рассмотренный нами выше пример резонанса 1:1 — очистки планетой своей орбиты от других тел. Другим примером являются провалы в плотности пояса астероидов на орбитах, соответствующих различным орбитальным резонансам с Юпитером (рисунки 103 и 124).

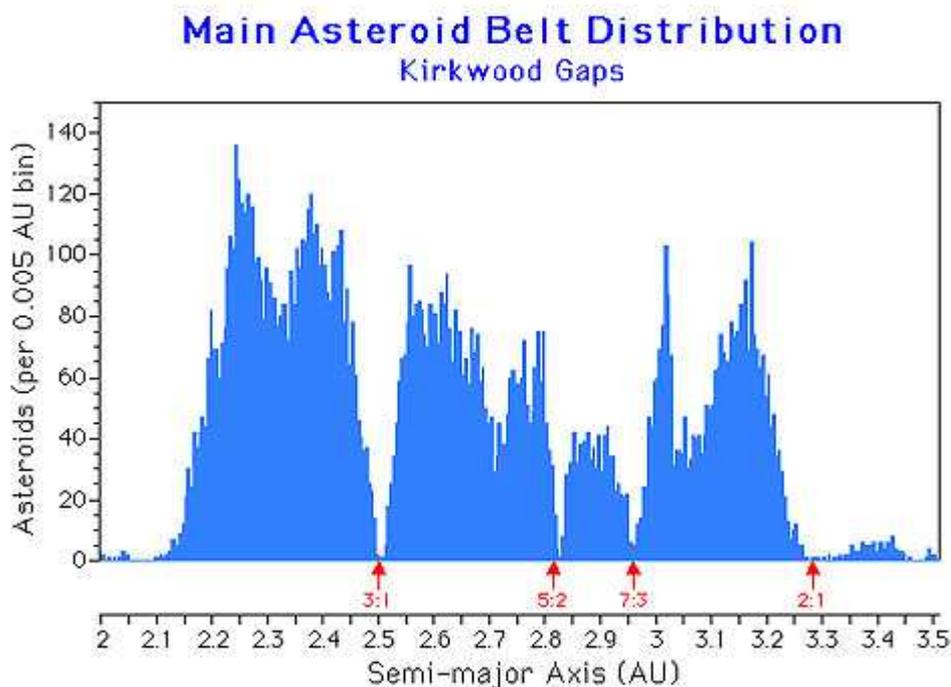


Рисунок 124: Распределение астероидов по расстоянию от Солнца демонстрирует наличие "щелей Кирквуда" на орбитах, соответствующих орбитальным резонансам с Юпитером. Красными стрелками показано положение резонансных орбит и подписаны отношения периодов обращения по этим орбитам. С сайта http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/AstroNews/e_astronews_07Oct.htm

Известно несколько систем со стабильными орбитальными резонансами. Так, спутники Юпитера Ганимед, Европа и Ио находятся в резонансе 1:2:4 (период Ио минимален в этой тройке). Плутон и Нептун находятся в резонансе 2:3 (на два оборота Плутона приходится три оборота Нептуна).

«Космическая праща».

Рассмотрим один манёвр, используемый при расчёте траекторий спутников: так называемая космическая праща. Идея этого маневра в том, чтобы дополнительно разогнать спутник во время пролета мимо планеты.

В такой формулировке это выглядит как попытка обмануть закон сохранения энергии. Но реально такой маневр можно осуществить, если вспомнить, что планеты движутся по орбитам вокруг Солнца со скоростями, измеряемыми десятками километров в секунду.

Если спутник приближается к планете «навстречу», то его относительная скорость в системе координат, связанной с планетой увеличивается на скорость орбитального движения планеты. Если эта суммарная скорость больше, чем скорость убегания данной планеты, то траектория движения спутника в системе координат, связанной с планетой будет параболой или гиперболой. Если подобрать параметры подлёта к планете так, чтобы эта траектория была достаточно «узкой», то по завершении пролета спутник будет двигаться в направлении почти противоположном исходному с той же скоростью (в системе координат связанной с планетой!), что и до начала облета. Если теперь вернуться в систему координат звезды, в которой планета движется, мы получим, что абсолютная величина скорости спутника увеличилась почти на удвоенную скорость планеты. Этот маневр оказывается похож на упругий удар о движущуюся стенку: скорость после отскока оказывается больше.

Нарушения законов сохранения конечно же нет — дополнительная энергия и импульс забираются у планеты. Но для планеты это изменение абсолютно незаметно.

Этот манёвр достаточно часто используется при запуске зондов к далеким от Земли планетам Солнечной системы, так как он позволяет существенно экономить топливо (и соответственно, увеличивать полезную нагрузку). Основными ограничениями является необходимость удачного сочетания положений планет, а также необходимость держаться достаточно далеко от планетарных атмосфер.

Примерами использования космической пращи являются:

- зонд НАСА «Маринер 10» воспользовался гравитационным полем Венеры для коррекции орбиты на пути к Меркурию
- зонд НАСА «Вояджер 1» - самый далеко улетевший зонд, на начало 2010 года он должен находиться на расстоянии 112 а.е. от Солнца. Зонд набрал скорость, достаточную для убегания из Солнечной системы, благодаря последовательным маневрам в гравитационном поле Юпитера и Сатурна.
- зонд НАСА «Кассини», запущенный к Сатурну в 1997 году воспользовался «космической пращой» 4 раза: два раза во время пролета Венеры (1998 и 1999), во время пролета Земли в 1999 и во время пролета Юпитера в 2000 году. В результате он достиг Сатурна в 2004 году.

Затраты энергии на межпланетные перелёты.

Рассмотрим затраты энергии, необходимые на переход зонда постоянной массы с одной планетной орбиты на другую. Для простоты будем считать орбиты планет круговыми. По второму закону Ньютона для кругового движения $m \frac{V^2}{r} = G \frac{M m}{r^2}$, где M — масса

Солнца, а m — масса нашего межпланетного зонда.

Поэтому кинетическая энергия зонда на круговой орбите радиуса r равна

$$E_K = \frac{mV^2}{2} = \frac{1}{2} G \frac{Mm}{r}, \text{ потенциальная энергия } E_{\Pi} = -G \frac{Mm}{r}, \text{ а полная энергия}$$

$$E = -\frac{1}{2} G \frac{Mm}{r}. \text{ Полная энергия уменьшается по мере приближения к Солнцу.}$$

Пусть V_0 и R_0 орбитальная скорость на исходной орбите и радиус этой орбиты (для земной орбиты это около 30 км/сек и 1 а.е. соответственно).

Тогда для переноса зонда на внешнюю орбиту ($R > R_0$) над ним необходимо совершить работу $A_{(R > R_0)} = E_{\text{кон}} - E_{\text{нач}} = \frac{mV_0^2}{2} \left(1 - \frac{R_0}{R} \right)$. Эту работу должна совершить двигательная установка зонда.

При переходе на внутреннюю орбиту необходимо отобрать у зонда излишек энергии и это опять работа двигательной установки – если этого не сделать мы получим вместо круговой орбиты эллиптическую. Поэтому для $R < R_0$ затраты энергии оказываются

$$A_{(R < R_0)} = \frac{mV_0^2}{2} \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right).$$

Обратите внимание, что при $R < R_0/2$ затраты энергии на полёт к внутренней планете оказываются больше чем затраты энергии на вылет из Солнечной системы. Из-за этого роста технических сложностей, как мы увидим далее, внутренние планеты (и особенно Меркурий) реже становятся целью межпланетных зондов.

Наша оценка не учитывала возможность использования эффектов типа «гравитационной пращи», которые могут повысить эффективность полётов как к внешним так и к внутренним планетам.

Фазы Луны, затмения и приливы.



Напомним, как возникают наблюдаемые фазы Луны: этот вопрос часто вызывает недоразумения¹, хотя и обсуждается в школьной программе регулярно.

Солнце освещает ближайшую к нему полусферу лунной поверхности. Наблюдатель на Земле видит только часть этой освещённой полусферы. В частности (рисунок 125):

- если Луна находится со стороны Солнца (положение А), то никакая часть видимого с Земли лунного диска не освещена. Наблюдается новолуние, Луна не видна.
- если Луна находится «за Землёй» (положение В), то (не учитывая пока земную тень) со стороны Земли видна вся освещённая полусфера лунной поверхности. Наблюдается полнолуние.
- если Луна находится «сбоку» (положения Б и Г), то видна только часть освещённой поверхности Луны, это соответствует одной из фаз Луны.

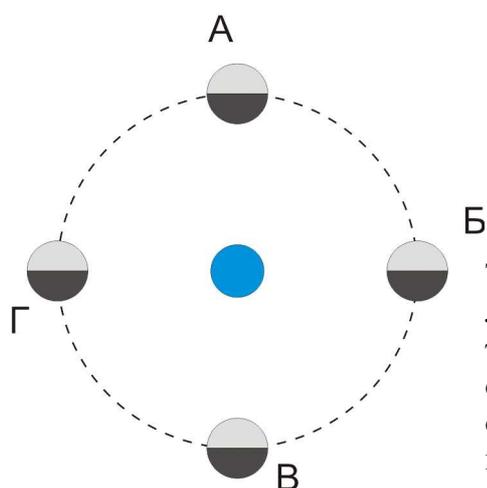


Рисунок 125: Схематическое изображение возникновения фаз Луны.

Так как Земля вращается вокруг своей оси быстрее, чем Луна вокруг Земли, то можно считать (с «бытовой» точностью), что полнолуние и новолуние наблюдаются в один день на всей Земле. Однако видимая наблюдателем ориентация серпа Луны зависит от того в северном или южном полушарии находится наблюдатель. Действительно, плоскость лунной орбиты почти совпадает с плоскостью эклиптики, угол наклона земной оси к плоскости эклиптики не так велик. Если считать, что на рисунке 125 к нам обращено северное полушарие, то для наблюдателя, стоящего на северном полюсе (головой «к нам») для луны в положении Г освещена правая часть диска, а для наблюдателя на южном полюсе (головой «от нас») - левая часть диска.

Солнечное затмение связано с прохождением Луны по диску Солнца, лунное затмение — с прохождением Луны в земной тени. Как очевидно из рисунка 125, солнечное затмение может наблюдаться только в новолуние, лунное — только в полнолуние. Если бы плоскость лунной орбиты точно совпадала с плоскостью эклиптики, то эти явления наблюдались бы раз в месяц. Из-за наклона плоскости лунной орбиты для наблюдения затмения необходимо совпадение новолуния или полнолуния с моментом пересечения Луной плоскости эклиптики. В истории часто с затмениями связывались различные мистические страхи и ожидания, однако с астрономической точки зрения и солнечное и лунное затмения являются достаточно частыми явлениями, они случаются в масштабах планеты в среднем несколько раз в год, а

¹ Часто встречающимся заблуждением является представление о том, что невидимая часть лунного диска является земной тенью.

относительно редким является лишь наблюдение полного затмения в конкретной точке. Информацию о затмениях, как прошедших так и будущих, можно найти на сайте НАСА <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html>.

Отметим, что с лунным затмением связано явление красной (иногда драматично называемой «кровавой») Луны. При входе в земную тень в момент лунного затмения Луна освещается лучами Солнца, проходящими через земную атмосферу (напомним, что лунное затмение наблюдается в полнолуние), а как мы знаем синяя часть спектра более активно рассеивается в атмосфере¹. Поэтому, прошедший через атмосферу солнечный свет «краснеет», соответственно, и отражённый от Луны свет оказывается красным.

Наконец, возвращаясь к теме приливных сил, отметим, что в новолуние и полнолуние приливные силы, вызванные влиянием Луны и Солнца суммируются. В этом случае наблюдается (с точностью до эффектов запаздывания приливной волны) максимальная высота океанского прилива (то есть прилива вдали от береговой линии), такой прилив называют также сизигийным.² Если же Луна находится в первой или последней четверти, или, как говорят, в квадратуре (позиции Б и Г на рисунке 125), то лунная и солнечная приливные волны максимально разнесены и наблюдается минимальная высота океанского прилива, такой прилив называют квадратурным.

1 По этой же причине небо — голубое.

2 Сизигией (от греч. «сопряжение, соединение») в астрономии называют расположение трёх небесных тел на одной прямой.

Лекция 5. «Активное» изучение человеком космоса: автоматические и пилотируемые космические программы.

Эта лекция посвящена краткому обзору фактов, связанных с различными космическими программами. Целью этого обзора является создать общее представление об уровне развития техники, в частности, техники, используемой в астрономических наблюдениях. Также этот обзор представляет интерес с исторической точки зрения.

Пилотируемая космическая программа СССР и России.

Космические корабли

В списке космонавтов СССР и России числится более 100 человек (по данным Википедии на ноябрь 2010 года) 107 человек. Кроме этого около 15-20 граждан других стран участвовали в полетах по советской и российской космической программе. Среди них — первый космонавт Юрий Гагарин (12 апреля 1961 года), первый человек, вышедший в открытый космос, Алексей Леонов, первая женщина в космосе, ряд рекордов по пребыванию на орбите.

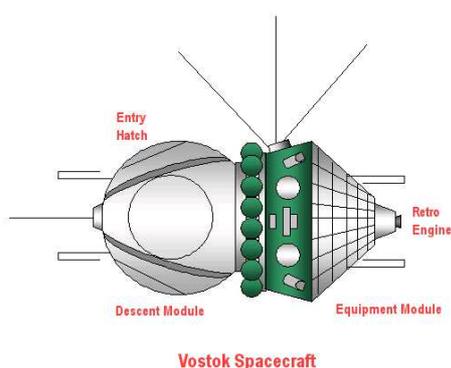


Рисунок 127: КА "Восток" (с сайта wikipedia.org)

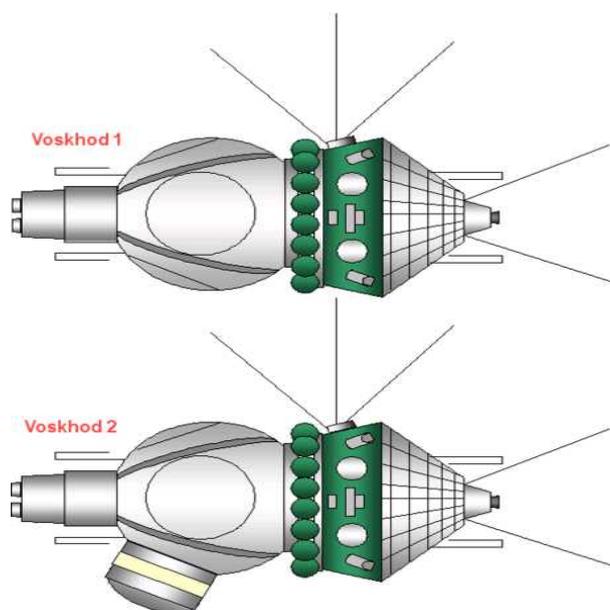


Рисунок 126: КА "Восход" (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Voskhod_programme)

Этапами нашей пилотируемой программы являлись:

- Программа «Восток» (рисунок 127) . Включает 7 непилотируемых пусков в 1960-1961 году и 6 пилотируемых («Восток 1» - «Восток 6») в 1961-1963 годах. Планировалось еще 7 пусков, но от них отказались в пользу программы «Восход». Полная масса космического аппарата около 5 тонн, экипаж — 1 человек. Покидание спускаемого аппарата осуществлялось на высоте около 7 км с дальнейшим спуском на парашюте. Ракета-носитель «Восток» являлась модификацией баллистической ракеты Р-7. Стартовая масса ракеты составляла около 150 тонн. Топливо — керосин/жидкий

кислород. Модификации ракеты-носителя «Восток» использовались до 1991 года для запуска искусственных спутников Земли.

- Программа «Восход» (рисунок 126). Включает 3 непилотируемых пуска, 2 пилотируемых («Восход 1,2») в 1964-1965 годах. Планировалось еще 4 пуска, которые не были осуществлены. Основными целями программы были первый запуск экипажа из нескольких человек (3 человека на «Восходе 1» и 2 на «Восходе 2») и выход в открытый космос («Восход 2»). Спускаемый аппарат осуществляет посадку на парашюте. Ракета-носитель «Восход» является развитием ракет «Восток» и Р-7 с более мощной второй ступенью. Стартовая масса ракеты около 180 тонн. Носители такого типа использовались до 1976 года для вывода на орбиту ИСЗ в примерно 300 пусках.

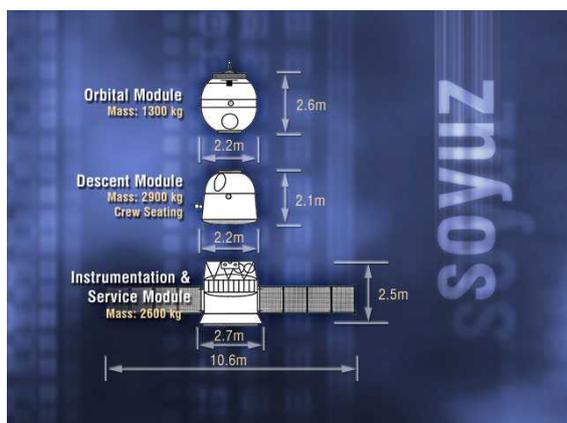


Рисунок 128: КА "Союз-ТМА". С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Soyuz-TMA>



Рисунок 129 Старт комплекса «Энергия»-«Буран» 15.11.1988. Фото с сайта [ru.wikipedia.org/wiki/Буран_\(космический_корабль\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Буран_(космический_корабль))

- Программа «Союз» (рисунок 128). Является основной и продолжающейся в настоящее время. Включает несколько модификаций корабля и носителя. Экипаж 3 человека. Аппараты «Союз» разных модификаций использовались с конца 1960-х годов (первый непилотируемый пуск в 1966, первый пилотируемый в 1967). Было несколько модификаций этого космического аппарата. В частности, в настоящее время используется «Союз-ТМА-М» для доставки экипажей к МКС (Международной Космической Станции). Носитель «Союз» и его модификации являются развитием Р-7. Всего осуществлено более 1700 пусков этого носителя, что делает его наиболее используемой ракетой. В частности, носитель «Союз-2» планируется к использованию на совместном с Европейским космическим агентством проекте строительства космодрома во Французской Гвиане.
- Программа «Буран» (рисунок 129). Разработанный в 1970-х как советский аналог американского космического челнока, «Буран» совершил один пробный

непилотируемый полет в 1988 году. Программа «Буран» была закрыта в 1993 году. Возможно, разработка программы «Буран» была неоправданным политическим решением, связанным с опасениями в возможностях военного использования американских челноков и желания военного руководства страны иметь аналогичный инструмент. Параллельно с программой «Буран» был разработан один из самых мощных носителей «Энергия», способный вывести на низкую околоземную орбиту до 100 тонн (и даже более в проектной модификации с дополнительными ускорителями). Носитель «Энергия» запускался дважды, один пуск частично успешный (1987, платформа «Полнос» не была выведена на орбиту), второй — успешный (1988, «Буран»). Вероятно, технологию строительства тяжелого носителя «Энергия» можно считать практически утраченной. Однако потомки двигателей, разработанных для «Энергии», используются на носителях «Зенит» (Украина) и «Атлас 5» (США)



Рисунок 130: Макет разрабатываемого НПО "Энергия" КА "Клипер" (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Klipper>)

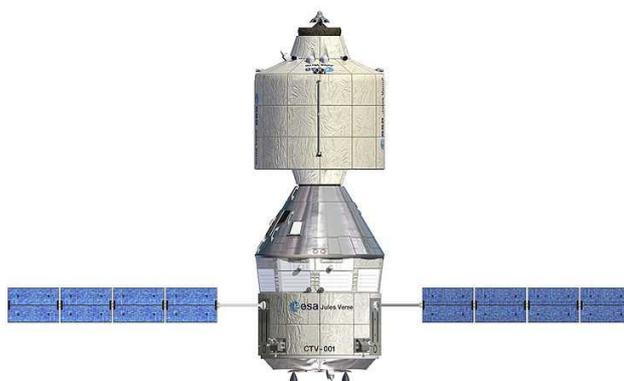


Рисунок 131: Проект КА CSTS, разрабатываемого Роскосмосом и Европейским космическим агентством. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/CSTS>)

- Программы «Клипер» и CSTS/ASTS (Crew Space Transportation System/Advanced Crew Transportation System) (рисунки 130, 131). На замену заслуженным «Союзам» разрабатывается несколько вариантов космических аппаратов. Из публично известных можно назвать разрабатывающийся НПО «Энергия» аппарат «Клипер» и разрабатывающийся в кооперации Роскосмоса и Европейского космического агентства аппарат CSTS. «Клипер» является «мини-челноком» с экипажем до 6 человек, способный к щадящему для экипажа входу в атмосферу под малым углом. CSTS является аппаратом более классической компоновки с перспективой использования в лунный и марсианских миссиях. Из-за причин политического и экономического характера, сроки реализации (и реализация вообще) этих проектов неопределенны.

Орбитальные станции.



Рисунок 132: Станция "Салют 7", фотография с отлетающего корабля "Союз Т-13". (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Salyut>)



Рисунок 133: Орбитальная станция "Мир" 26 сентября 1996 года. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Mir>)

В СССР была разработана серия орбитальных станций — постоянно находящихся на орбите аппаратов, на которых работают сменные экипажи. Наследием этой программы сейчас является Международная космическая станция.

Программа «Салют» развивалась с 1971 по 1982 год. Орбитальные станции «Салют» - это однокорпусные (не модульные) станции. В рамках этой программы было успешно запущено 7 орбитальных станций, кроме того два пуска были неудачными, а станция «Салют 2» не была посещена ни разу из-за технических проблем. Станции «Салют 3» и «Салют 5» были частью военного проекта «Алмаз», остальные станции — научные. Две последние станции проработали на орбите несколько лет: «Салют 6» пробыл на орбите 1764 дня, из них 683 дня с экипажем, принял 16 экспедиций; «Салют 7» пробыл на орбите 3216 дней, из них 816 с экипажем и принял 12 экспедиций.

Следующим поколением орбитальных станций была станция «Мир», работавшая на околоземной орбите с 1986 по 2001 год. Это станция модульного типа, включавшая помимо основного обитаемого блока блоки для астрофизических, технологических, биологических исследований и исследования Земли. На станции «Мир» был совершен самый длительный

полет в космосе (Валерий Поляков, 437 дней). Станция изначально рассчитывалась на 5 лет эксплуатации, провела на орбите около 15 лет: 5519 дней, из них 4592 дней с экипажем. 23 марта 2001 года станция вошла в плотные слои атмосферы над южными областями Тихого океана.

Лунная программа СССР.

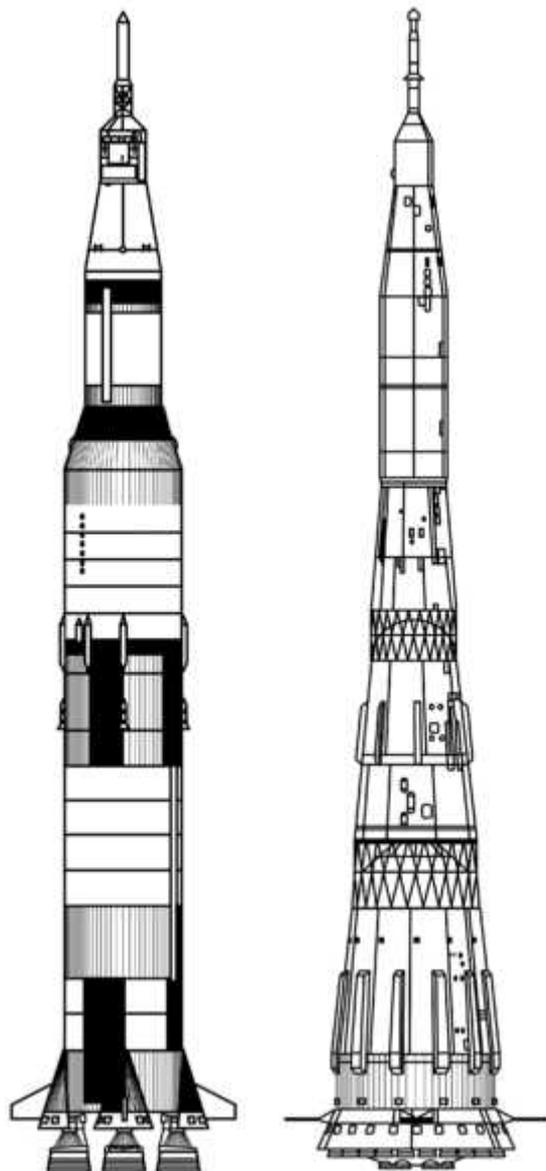


Рисунок 134: Сравнение носителей Сатурн 5 (США) и носителя Н1 (СССР). Рисунок в масштабе. С сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/N1_\(rocket\)](http://en.wikipedia.org/wiki/N1_(rocket))



Рисунок 135: Ракета Н1 на стартовом столе в Байконуре (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/N1_\(rocket\)](http://en.wikipedia.org/wiki/N1_(rocket)))

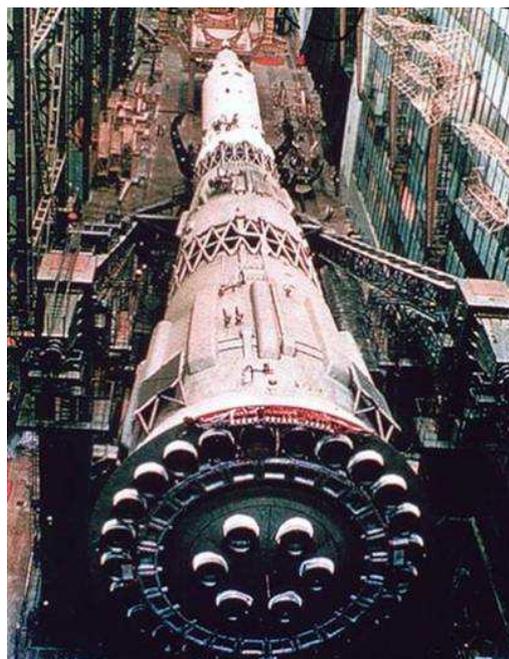


Рисунок 136: Ракета Н1 в сборочном ангаре (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/N1_\(rocket\)](http://en.wikipedia.org/wiki/N1_(rocket)))

В СССР разрабатывалась программа пилотируемого полета к Луне. В качестве корабля планировалось использование модификаций корабля «Союз». Планировалось фактически две программы — облёт Луны, с использованием носителя «Протон» и посадка на Луну с использованием носителя «Н-1».

Лунная программа осталась нереализованной. Облёт Луны потерял интерес для политического руководства страны после того, как «Аполлон 8» совершил облёт раньше. Проект высадки на Луну оказался не реализован в связи с проблемами в тяжелом носителе

«Н-1»: из четырех пробных пусков ни один не увенчался успехом.

В 1970-х планировались миссии пилотируемого облета Марса и Венеры, но они не пошли дальше проектов из-за тех же проблем с носителем «Н-1».

Пилотируемая космическая программа США.

Космические корабли.

В списке астронавтов США на ноябрь 2010 года содержится 327 человек. По определению международной федерации аэронавтики, космическим полетом считается подъем на высоту более 100 километров, поэтому 5 пилотов, совершивших суборбитальные полеты считаются формально вышедшими в космос. Кроме того, в США выдают знаки отличия астронавтов пилотам, совершавшим полеты на высоте более 80 километров, что добавляет еще 8 человек.

Перечислим основные пилотируемые программы американской космонавтики:



Рисунок 137: "Меркурий 8" в ангаре на мысе Канаверелл. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Project_Mercury)



Рисунок 138: КА "Джемини 7" на орбите. Фотография сделана экипажем "Джемини 6". С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Project_Gemini

- Программа «Меркурий» (рисунок 137). Включает 20 непилотируемых и 6 пилотируемых полетов (2 суборбитальных и 4 орбитальных). Экипаж космического корабля — 1 человек. Пуски по программе начались в 1959 году. Среди непилотируемых пусков в четырех запускались приматы (макаки-резусы и шимпанзе). Первым американцем в космосе был Алан Шепард, совершивший суборбитальный полет менее чем через месяц после Гагарина (5 мая 1961 года). Первый орбитальный полет был совершен в феврале 1962 года.
- Программа «Джемини» (перевод — созвездие Близнецов) (рисунок 138). Эта

программа являлась предтечей лунной программы, разрабатывалась в 1962-1966 годах. В ходе ее выполнения были отработаны полеты длительностью сравнимой с лунным полетом, работы в открытом космосе, орбитальные маневры космических аппаратов, полет экипажа из нескольких человек, тренировка астронавтов для лунной программы. В рамках программы выполнено 10 пилотируемых полетов в 1965-1966 годах.



Рисунок 139: Полет "Союз-Аполлон" в представлении художника. С сайта <http://images.jsc.nasa.gov/luceneweb/browse.jsp>

- программа «Аполлон». Программа развивалась с 1961 по 1972 год. Её кульминацией стала серия высадок на Луну. Программа включала около двух десятков непилотируемых пусков, 12 пилотируемых пусков в рамках лунной программы, полет «Союз-Аполлон». Разработанный в рамках этой программы носитель «Сатурн-5» (рисунок 134) остаётся самой высокой (111 метров) и самой мощной (выводилось 140 тонн на низкую околоземную орбиту) из успешно запускавшихся ракет.



Рисунок 140: Первый запуск шаттла "Колумбия" 12 апреля 1981 года. Фото с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_program



Рисунок 141: КА "Орион" в представлении художника. С сайта <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-orion-58.html>

- Программа «Шаттл» (рисунок 140). Английское слово «shuttle» в переводе означает «челнок», поэтому этот и аналогичные аппараты часто называют «космическими челноками». Программа запущена в 1972 году и являются «рабочей лошадкой» американской астронавтики. Всего построено 5 кораблей, совершивших 135 полётов. Два полёта закончились катастрофами («Челленджер» в 1986 и «Колумбия» в 2003). Последний полёт по программе «Шаттл» завершён 21 июля 2011 года.
- Программа «Орион» (рисунок 141). Вероятной перспективой является разрабатываемая компанией Локхид Мартин программа «Орион». Эта программа развивается в русле «советского» подхода к космическим аппаратам — это не продолжение линии «Шаттлов». Планируется интеграция этого проекта с будущими лунными и марсианскими миссиями. Тестовый полёт совершён в декабре 2014 года.

Орбитальные станции США.



Рисунок 142: Станция "Скайлэб", фотография сделана с отлетающего модуля экспедиции "Скайлэб 4" (с сайта <http://grin.hq.nasa.gov/IMAGES/SMALL/GPN-2000-001055.jpg>)

В рамках программы «Аполлон» (с использованием носителей «Сатурн») была запущена единственная в США орбитальная станция «Скайлэб» (перевод — небесная лаборатория) (рисунок 142). Она находилась на орбите с 1973 по 1979 год и была трижды посещена в 1973-1974 году. Во избежание возможного недоразумения при чтении литературы отметим, что нумерация миссий программы «Скайлэб» означает именно номер пуска в рамках этой программы («Скайлэб 1» - запуск собственно станции, «Скайлэб 2,3,4» - пилотируемые миссии к станции). Это отличает от нумерации советских станций «Салют», где очередным номером обозначалась именно новая орбитальная станция.

Лунная программа США.

«Маленький шаг для одного человека, но огромный шаг для человечества».



Рисунок 144: Нейл Армстронг на поверхности Луны (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11)



Рисунок 143: След Эдвина Олдрина на лунном грунте (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11)

Цель высадки на Луну была поставлена президентом Кеннеди в 1961 году. После серии непилотируемых пусков и катастрофы при пуске «Аполлона 1» (три астронавта погибли на старте), начались успешные пуски: полет на орбите «Аполлона 7» (октябрь 1968), облет Луны «Аполлоном 8» (декабрь 1968), полет лунного модуля «Аполлона 9» на околоземной орбите (март 1969), полет лунного модуля «Аполлона 10» к Луне (май 1969), высадка на Луну Нейла Армстронга в экспедиции «Аполлон 11» (июль 1969). За этим последовала серия высадок на Луну: «Аполлон 12» в ноябре 1969 года прилунился рядом с местом посадки зонда «Сурвейер 3» и вернул некоторые его обломки на Землю, «Аполлон 13» из-за технических проблем совершил облет Луны в апреле 1970 года, высадка на Луну миссии «Аполлона 14» в январе 1971, трехдневное пребывание на Луне миссии «Аполлон 15» в июле 1971 года, посадка на лунное высокогорье «Аполлона 16» в апреле 1972 года и последняя на данный момент высадка на Луну экипажа «Аполлона 17» в декабре 1972. Кроме этого планировалось еще три полета с высадкой на Луну, но они были отменены.



Рисунок 145: Панорама Луны. Справа - посадочный модуль и Нейл Армстронг. (С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11)

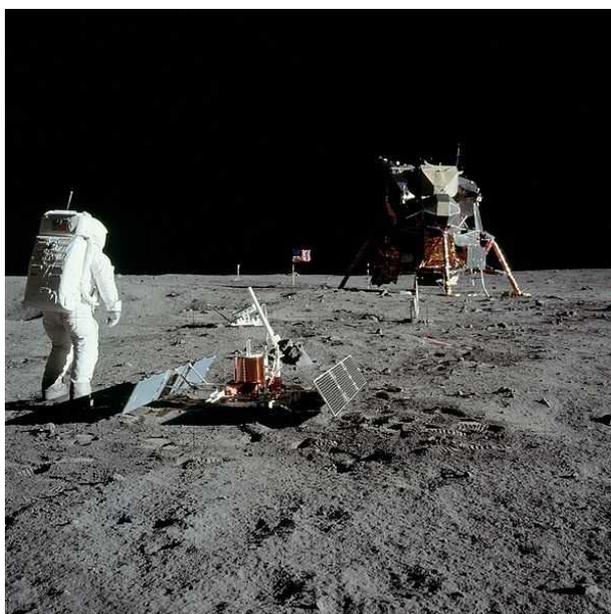


Рисунок 146: Установка Эдвином Олдрином сейсмографа (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11)



Рисунок 147: Гаррисон Шмидт у лунного валуна (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_17)

Таким образом, осуществлено 3 облета Луны, 6 высадок на Луну. К Луне слетало в этих миссиях 24 человек (трое летали дважды: Джим Ловелл «Аполлон 8, 13», Евгений Цернан «Аполлон 10, 17» и Джон Янг «Аполлон 10, 16»). На Луну высаживалось 12 человек. С Луны доставлено около 382 килограмм грунта, детали всех образцов грунта доступны на сайте <http://curator.jsc.nasa.gov/lunar/compendium.cfm>.

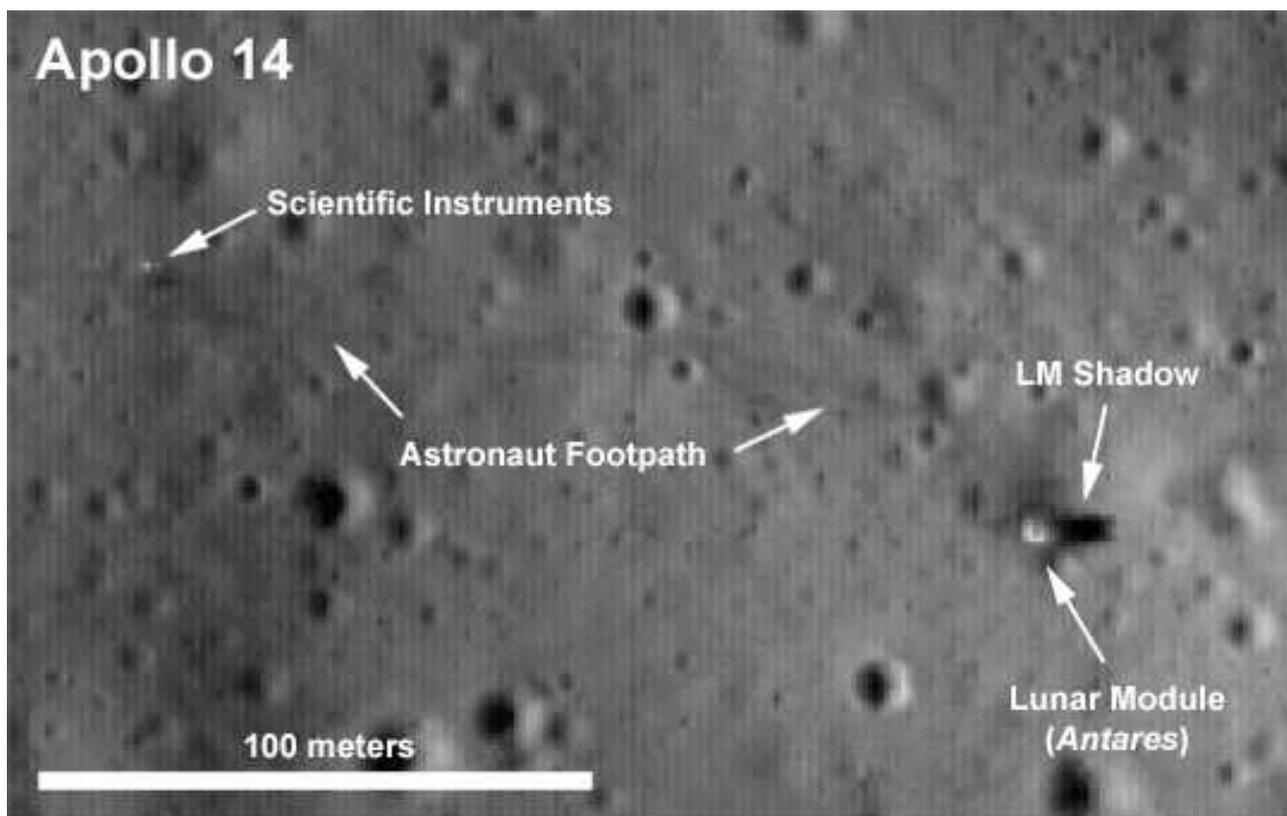


Рисунок 148: Место посадки "Аполлона 14" снятое зондом *Lunar Reconnaissance Orbiter* в июле 2009 года (с сайта http://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/apollosites.html)

К сожалению, с высадкой на Луне связано много раздуваемых в прессе недостоверных историй, коротко сводящихся к фразе «американцы на Луне не были». Анализировать это сейчас — неоправданная потеря времени. Критический разбор основных аргументов «теории лунного заговора» доступен в сети Интернет, например http://ru.wikipedia.org/wiki/Лунная_афера. Отметим еще раз, что программа «Аполлон» - это сложная, рискованная (одна катастрофа и одна миссия с большими проблемами из 10), но соответствующая уровню развития техники программа. Не вызывает сомнений, что с Луны доставлены образцы грунта, фрагменты зонда «Сурвейер», на Луну доставлены уголкового отражатели, которые используются в экспериментах по определению расстояния до Луны. Наконец, в 2008 и 2009 годах зонды Японского космического агентства и НАСА засняли места посадки «Аполлонов» (рисунок 148).

Пилотируемые космические программы других стран.

Единственная страна, помимо СССР/России и США, развивающая свою независимую пилотируемую космическую программу — Китай.



Рисунок 149: Модель КА "Шень Чжоу" (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Shenzhou_spacecraft)

В Китае разработан пилотируемый космический аппарат «Шень Чжоу» (один из переводов - «Небесный корабль богов»). Экипаж 3 человека. Дизайн напоминает наш «Союз», но есть отличия. В частности, орбитальный модуль (сверху на рисунке) имеет собственные солнечные батареи и двигатели, что допускает его автономное пребывание на орбите.

Для вывода на орбиту использовался носитель «Большой Поход», последнее поколение этих носителей способно выводить на низкую околоземную орбиту более 8 тонн полезной нагрузки.

По состоянию на 2015 год в рамках китайской космической программы совершено 10 пусков: пять непилотируемых и пять пилотируемых. Первый пилотируемый полет состоялся 15 октября 2003 года. В рамках программы «Шэнь Чжоу» в космосе побывало 11 человек (две женщины, один космонавт слетал дважды).

Китай также разработал собственную программу орбитальных станций. Первая 8-тонная станция «Тяньгонг 1» (перевод - «Небесный дворец») была запущена в 2011 году. К этой станции было совершено две пилотируемых миссии в 2012 и в 2013 годах. К 2017 году планируется строительство модульной станции.

Международная космическая станция.

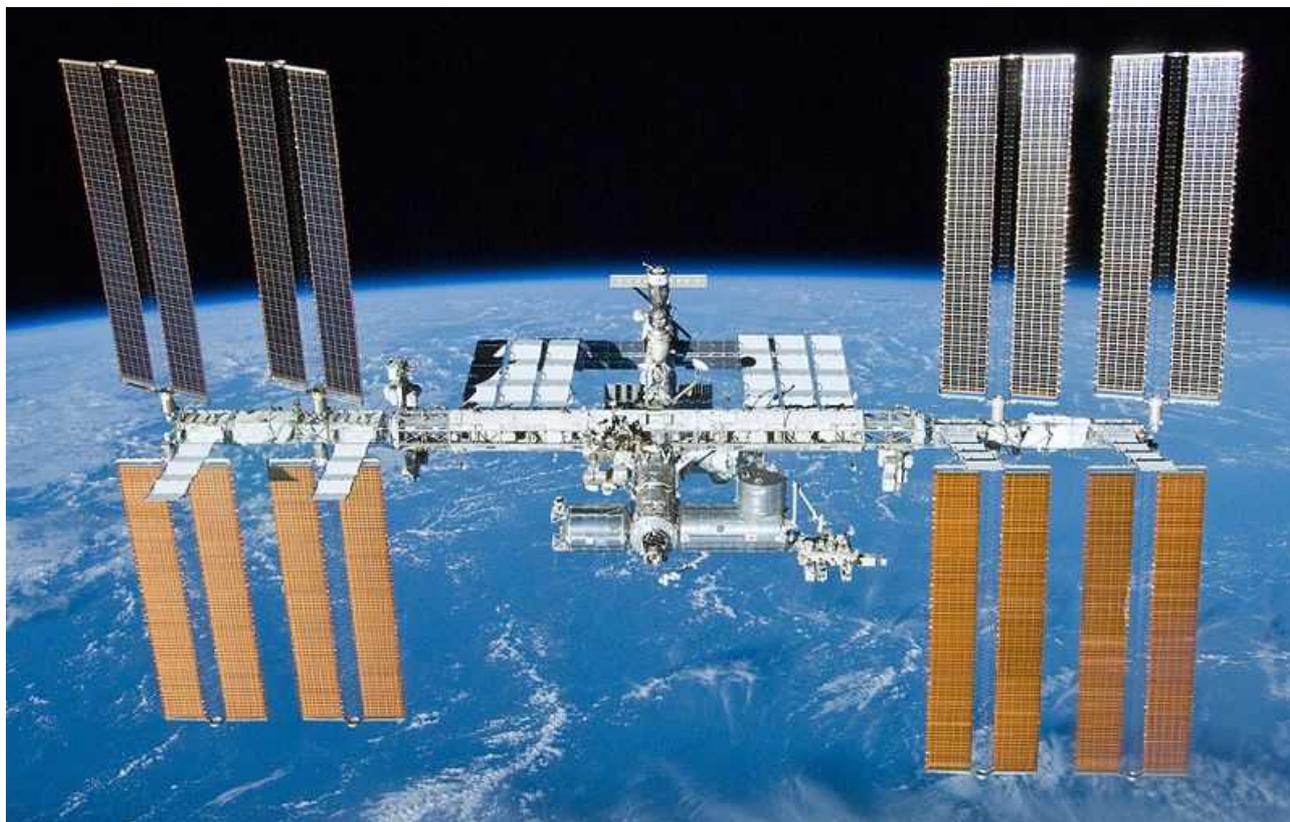


Рисунок 150: Международная космическая станция 23 мая 2010 года. Фотография сделана с отстыковавшегося шаттла "Атлантис". (С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Iss>)

Международная космическая станция (МКС) явилась плодом объединения проектов орбитальных станций России, США, Европы и Японии. Также участником этой кооперации является Канада.

Первый модуль станции был запущен в ноябре 1998 года. К 2010 году станция состоит из 14 модулей, весит около 370 тонн и имеет длину около 50 метров. По плану сборка станции должна завершиться в 2011 году выводом еще двух модулей.

МКС является на данный момент крупнейшим спутником земли, рекордсменом по непрерывной работе сменных экспедиций на станции, самым посещаемым космическим кораблем.

Ожидается что станция проработает до 2020 года.

Пилотируемые проекты частных корпораций.

Интересно отметить, что в настоящее время мы возможно являемся свидетелями интересного исторического процесса: выход в космос становится доступным не только правительственным агентствам (НАСА или Роскосмос), но и частным компаниям. Причём речь не идёт о больших компаниях типа американских Локхид Мартин или Боинг или российских коммерческих компаниях (РКК «Энергия») с заметным государственным участием.



Рисунок 151: Суборбитальный аппарат на самолете-носителе. С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>



Рисунок 153: Суборбитальный аппарат на фазе разгона. С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>

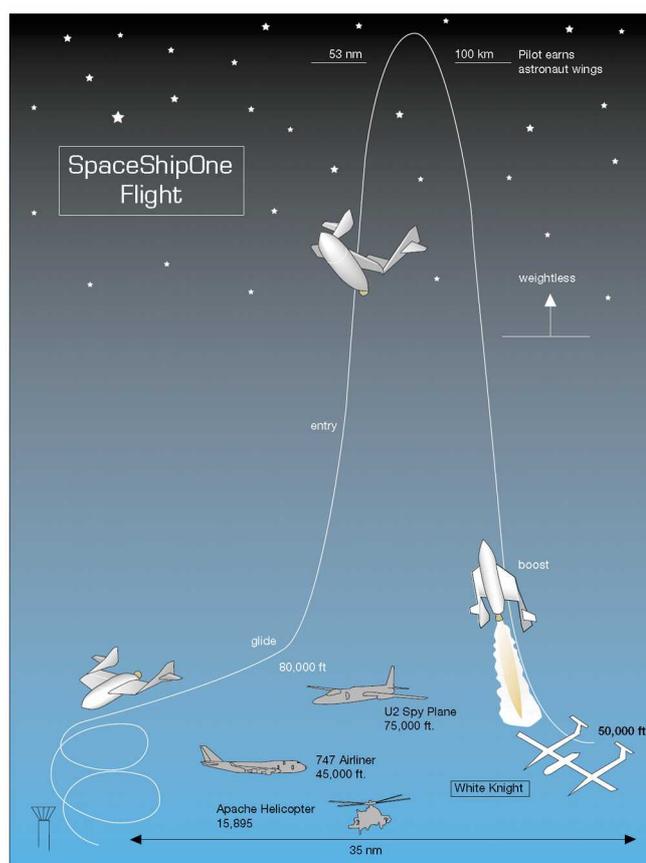


Рисунок 152: Схема полета аппарата "SpaceShipOne". С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>

Примером такого частного проекта освоения космоса является проект «SpaceShipOne» (перевод — космический корабль один) фонда Мохав Аэроспэйс (США). В рамках этого проекта (сайт проекта <http://www.scaled.com/projects/tierone/>) создан суборбитальный самолет, способный подняться на высоту более 100 километров. Суборбитальный аппарат стартует с самолета-носителя «Белый рыцарь» («White Knight») также специально сконструированного для этого проекта. Фотографии и схемы полёта этого аппарата показаны на рисунках 151, 152, 153, 154, 155, 156.

Носитель поднимает суборбитальный аппарат на высоту около 15 километров. После разгона при помощи гибридного реактивного двигателя (твёрдое топливо и жидкий окислитель), аппарат по параболической траектории движется к апогею. Этап после отработки двигателя и до начала входа в атмосферу проходит в свободном падении. В 2004 году аппарат совершил три пилотируемых суборбитальных полёта с подъёмом на высоту более 100 км. Этот аппарат является победителем конкурса Ansari Xprize (<http://ansari.xprize.org/>) с призом в 10 миллионов долларов, по условиям которого необходимо за две недели дважды подняться на высоту более 100 километров с весовым эквивалентом трех человек на борту и с заменой не более 10% сухой массы аппарата (не считая топлива) между стартами.

Проект «SpaceShipOne» получил дальнейшее развитие в проект «SpaceShipTwo» с заявленными коммерческими перспективами: компания Вирджин Галактикс планирует

использовать флот из 5 аппаратов такого типа для суборбитальных полётов (космический туризм, исследования в условиях микрогравитации, перспективы использования для суборбитального полёта между двумя пунктами на земле). Оптимистичные планы предполагали начало коммерческих полётов в 2013 году, но пока аппараты второго поколения этого проекта не совершили суборбитального полёта. В ходе тестов была достигнута высота 22000 метров. В 2014 году в результате технических проблем потерпел катастрофу (погиб один из пилотов) первый из кораблей проекта («Энтерпрайз»). Второй из кораблей планировался к постройке в 2015 году.

Это, конечно, еще не полноценный орбитальный полет — скорость суборбитального самолета «SpaceShipOne» достигала лишь 1 км/сек. Но, возможно, это шаг к бурному прогрессу. Как мы уже видели, пилотируемая космическая программа США также началась с суборбитального полета.



Рисунок 154: Суборбитальный аппарат, планирующий к месту посадки. С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>



Рисунок 155: Суборбитальный аппарат в апогее. С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>



Рисунок 156: Суборбитальный самолет и самолет носитель на земле. С сайта <http://www.scaled.com/projects/tierone/gallery>

Другим примером частного освоения космоса, следующим более традиционной стезе, является работа американской компании «SpaceX» (<https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX>, <http://www.spacex.com/>). Этой компанией разработана своя ракета-носитель «Falcon 9» (рисунок 157) и необитаемый космический аппарат «Dragon» (рисунки 158 и 159), разрабатывается пилотируемая версия космического аппарата.



Рисунок 157: Ракета-носитель "Falcon 9" на стартовом столе. Запуск спутника ABS/Eutelsat-1, 4 марта 2015 года. С сайта <http://www.spacex.com/media-gallery/detail/127081/4881>



Рисунок 158: КА "Dragon" пристыкованный к МКС. С сайта <http://www.spacex.com/media-gallery/detail/118081/4061>



Рисунок 159: КА "Dragon" на орбите. С сайта <http://www.spacex.com/media-gallery/detail/125916/4816>

Компания «SpaceX» вошла в историю освоения космоса, как первая частная компания, построившая жидкостную ракету, достигшую околоземной орбиты («Falcon 1», 2008 год), первая частная компания, доставившая на орбиту космический аппарат и вернувшая его с орбиты («Falcon 9» и «Dragon», 2010 год), первая частная компания, доставившая груз к МКС («Falcon 9» и «Dragon», 2012 год) и первая частная компания, доставившая груз на геостационарную орбиту («Falcon 9» и «AsiaSat 6», 2014 год). По состоянию на сентябрь 2015 года осуществлено пять грузовых полётов корабля «Dragon» к МКС и 19 пусков носителя «Falcon 9» (17 успешных).

Космические державы, имеющие средства запуска космических аппаратов.

Не только СССР и США развили свою программу вывода объектов на околоземную орбиту. Многие страны и компании разрабатывают свои спутники для вывода на орбиту «сторонними» ракетами. Однако ряд стран осуществил и разработку своих носителей, способных вывести нагрузку на орбиту. Перечислим эти страны «космического клуба» в порядке вывода на орбиту их первых спутников (более подробные детали могут быть найдены на сайте http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_first_orbital_launches_by_country):

- СССР, 4 октября 1957 года. Наследниками космической программы СССР являются Россия и Украина. Первый пуск «независимого» украинского носителя произошел 28 сентября 1991 года. Первый пуск «независимого» российского носителя — 21 января 1992 года.
- США, 1 февраля 1958 года.
- Франция, 26 ноября 1965 года.
- Япония, 11 февраля 1970 года.
- Китай, 24 апреля 1970 года.
- Великобритания, 28 октября 1971 года.
- Европейское космическое агентство, 24 декабря 1979 года.
- Индия, 18 июля 1980 года.
- Израиль, 19 сентября 1988 года.
- Иран, 2 февраля 2009 года.

Имеются неподтвержденные заявления о запуске своих спутников Ираком (1989) и Северной Кореей (1998, 2009) . Бразилия и Южная Корея предприняли несколько неудачных попыток запуска своих носителей.

Искусственные спутники Земли.



Рисунок 160: Спутник GPS "BlockII-F", рисунок художника. (с [сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System))



Рисунок 161: Гражданский навигатор системы GPS (с [сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System))

Освоение космического пространства началось 4 октября 1957 года с запуска советского спутника. С тех пор множество спутников разного назначения выведено на орбиту. Эти спутники используются и в военных (в основном разведка), и мирных целях. Среди мирных применений можно перечислить связь, метеорологию, картографию — услугами этих спутников многие пользуются почти каждодневно (спутниковое телевидение, прогнозы погоды, карты GoogleEarth). О применениях непилотируемых аппаратов, связанных с научными астрофизическими целями мы поговорим чуть позже, а пока рассмотрим вкратце интересный пример навигационных спутниковых систем американской GPS (Global Positioning System, Глобальная система позиционирования) и разворачиваемой российской ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система).

Система GPS начала создаваться в США в 1972 году в военных целях, одной из которых было точное позиционирование подводных лодок перед пуском баллистических ракет. Первый опытный спутник запущен в 1978 году. Орбитальная группировка достигла функциональной мощности в 1993 году.

Решение о предоставлении доступа к навигационным услугам системы GPS в гражданских целях было принято в 1983 году, после того как из-за навигационной ошибки корейский «Боинг» KAL007 влетел в советское воздушное пространство и был сбит. До 2000 года информация доступная в гражданских целях намеренно загроублялась, позволяя определение положения с точностью до 300 метров. Это ограничение было снято в 2000 году, приравняв точность военных и гражданских приложений, составляющую теперь около 20 метров. Численность орбитальной группировки спутников GPS составляет до 30 спутников, находящихся на разных орбитах. Орбитальный радиус составляет 26600 километров, в минимальной конфигурации (24 спутника) орбиты спутников сгруппированы в 6 плоскостей, в каждой из которых вращается по 4 спутника. Дополнительные спутники увеличивают надежность системы. В текущей конфигурации из каждой точки земной поверхности одновременно видны не менее 8 действующих спутников.

Принцип определения координат прост. Все спутники постоянно передают (частоты 1.57 ГГц и 1.23 ГГц, длина волны примерно 20 см) информацию о времени на часах спутника и о параметрах орбиты спутника. Приёмник имеет свои собственные часы, поэтому, получив информацию о времени на борту спутника и зная скорость света и положение спутника (параметры орбиты и точное время позволяют это определить), можно определить расстояние до спутника. Таким образом, получив сигнал с одного из спутников, положение наблюдателя определяется как положение точки на сфере некоторого радиуса. Для определения координаты необходимо принять сигнал с 4 спутников: два спутника определяют положение как окружность на пересечении двух сфер, три спутника — две точки на пересечении этой окружности со сферой равных расстояний до третьего спутника, и четвертый позволяет выбрать правильную точку. В некоторых случаях (например, если известно примерное положение, или если наблюдатель находится на поверхности Земли) может оказаться достаточно трех спутников. Дополнительные спутники на линии видимости позволяют уменьшить ошибки определения координаты.

Из-за большой величины скорости света, такое определение положения требует точной синхронизации часов в приемнике и на спутниках. Ошибка в 1 мкс приводит к ошибке определения координаты в 300 метров. Частично это требование смягчается за счет использования более чем четырех спутников для определения координаты — это позволяет использовать в приемниках не слишком точные (и не слишком дорогие) часы.

Интересно отметить, что для поддержания правильных показаний часов на борту спутников приходится периодически их корректировать из-за релятивистских эффектов. Часть этого эффекта нам известна еще со школы. Длительности интервалов времени t и t' , прошедших в покоящейся и движущейся системах координат, связаны преобразованием Лоренца

Лоренца $t' = t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$. Поэтому часы в движущейся системе координат (на спутнике)

немного отстают от покоящихся (наземных). Для скоростей малых по сравнению со скоростью света легко показать, что связанное с этим относительное отставание

$\frac{\delta t}{t} = -\frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}$. Скорость на орбите радиуса R : $V = \sqrt{G \frac{M}{R}} = V_1 \sqrt{\frac{R_{Земли}}{R}}$ (где V_1 — первая космическая скорость на поверхности, равная 7.9 км/сек). Для орбиты радиуса 26600 километров она равна 3.9 км/сек, тогда $\frac{\delta t}{t} = -0.85 \cdot 10^{-10}$, что соответствует ежедневному отставанию примерно на 7 микросекунд. Однако помимо этого эффекта, есть эффект, связанный с общей теорией относительности, по которому часы находящиеся в сильном гравитационном поле отстают от часов в свободном пространстве. Эти расчеты показывают, что часы на спутнике должны опережать наземные на 45 микросекунд в день. Сумма этих двух эффектов приводит к тому, что часы на спутниках GPS опережают земные на 38 микросекунд в день, что приводит к ошибке определения положения спутников в 15 сантиметров в день (скорость спутника 3.9 км/сек). Для избежания накопления такой ошибки, периодически производится корректировка часов, а стандарт частоты, используемый для измерения времени еще на земле подстраивается с тем, чтобы учитывать большую часть этих эффектов.

Система ГЛОНАСС (<https://www.glonass-iac.ru/>) начала разрабатываться в СССР в 1976 году, плановая численность группировки — 24 спутника, сгруппированных в трех плоскостях. На сентябрь 2015 года плановая численность поддерживается. Радиус орбит спутников 25500 км. Заявленная точность позиционирования — около 10 метров. Принцип работы — тот же

что и у системы GPS.

Работа этой системы пострадала из-за переходного периода в российской экономике. Полная численность орбитальной группировки была достигнута в 1995 году, однако ее поддержание оказалось невозможным и к апрелю 2002 года оставалось в работе всего восемь спутников, что делало систему неработоспособной. Восстановление системы началось в 2001 году и было завершено в 2011 году.

Космические обсерватории.

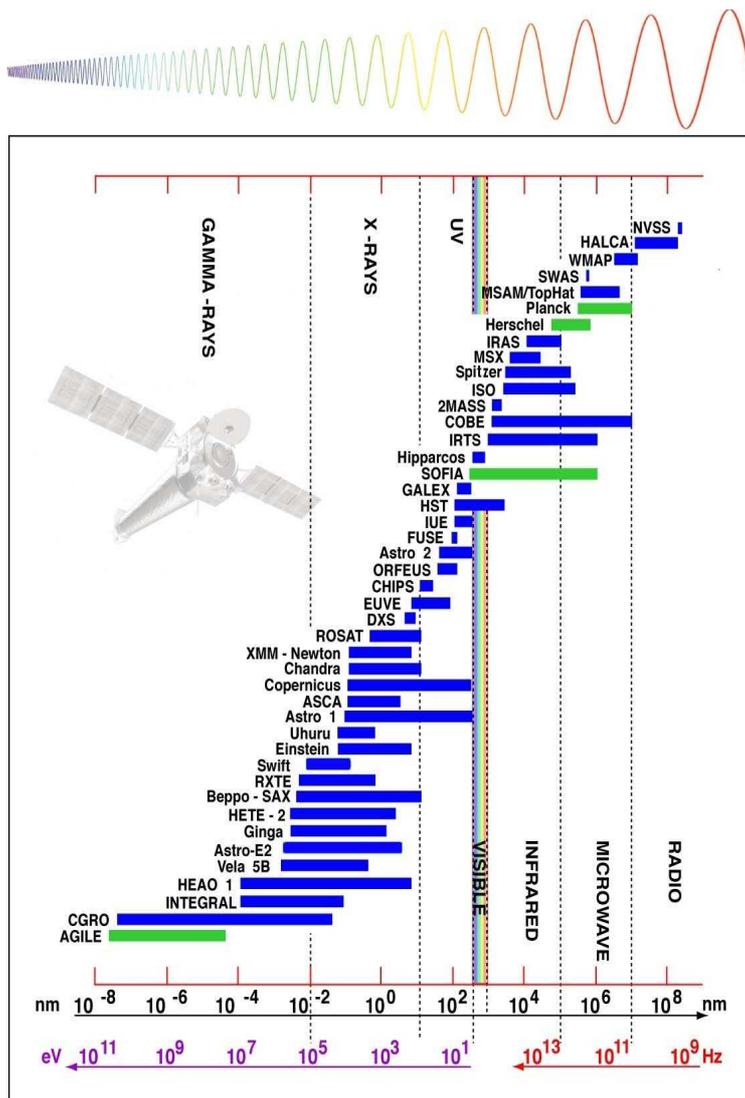


Рисунок 162: Диапазоны наблюдения различных космических обсерваторий. Синий цвет - выполненные или выполняемые миссии, зеленый - проектируемые. (с сайта <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/astro/astrolist.html>)

О некоторых космических обсерваториях мы уже говорили. Напомним, что наблюдения на некоторых частотах с поверхности земли невозможны из-за непрозрачности атмосферы (в частности, в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах). Кроме того, наблюдение из-за пределов атмосферы позволяет избежать погрешностей, вносимых атмосферой. Перечислим здесь некоторые примечательные космические обсерватории.

Гамма-обсерватория «Комптон» (CGRO, Compton Gamma Ray Observatory)



Рисунок 163: Вывод обсерватории "Комптон" в космос с борта шаттла "Атлантис". С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Compton_Gamma_Ray_Observatory

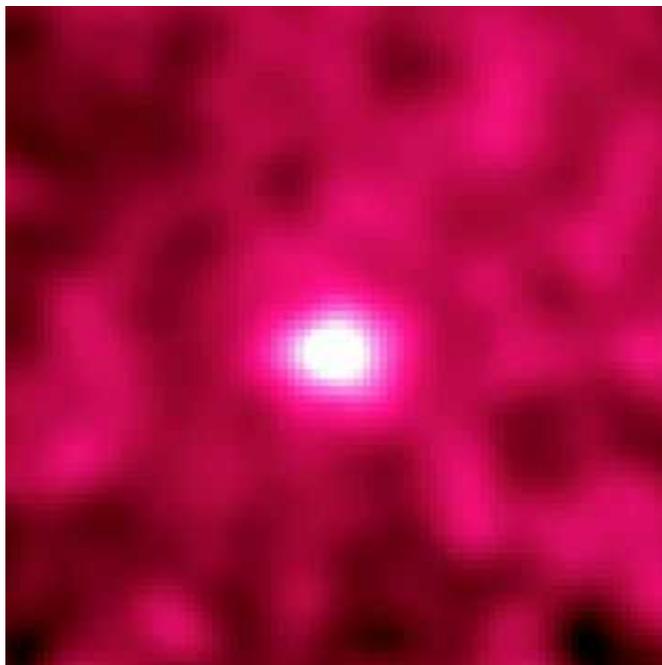


Рисунок 164: Луна в гамма-диапазоне. Луна оказывается ярким источником гамма-лучей, образующихся при бомбардировке лунной поверхности космическим излучением. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Compton_Gamma_Ray_Observatory

Гамма-обсерватория «Комптон» (рисунок 163) была запущена на орбиту в 1991 году и выведена с орбиты в 2000 году. Содержала ряд приборов для наблюдения в высокоэнергетичной части электромагнитного спектра от 20кэВ до 30 Гэв. В результате измерений снята карта звездного неба в гамма-диапазоне, обнаружено почти 300 источников гамма излучения, в том числе 170 неидентифицированных (не совпадающих с известными объектами). Например, Луна оказывается довольно ярким источником гамма-излучения (рисунок 164): в гамма диапазоне высвечивается бомбардируемая космическими лучами лунная поверхность.

По наблюдению характерного гамма-излучению снята карта распределения изотопа ^{26}Al в диске нашей Галактики (рисунок 165). Этот изотоп образуется на последних стадиях термоядерного синтеза в массивных звездах и выбрасывается в пространство во время взрыва сверхновой. Эти данные, в частности, позволяют показать, что вспышки сверхновых происходили во всех областях Галактики. А доплеровский сдвиг гамма-излучения из различных частей Галактики является прямым доказательством ее вращения.

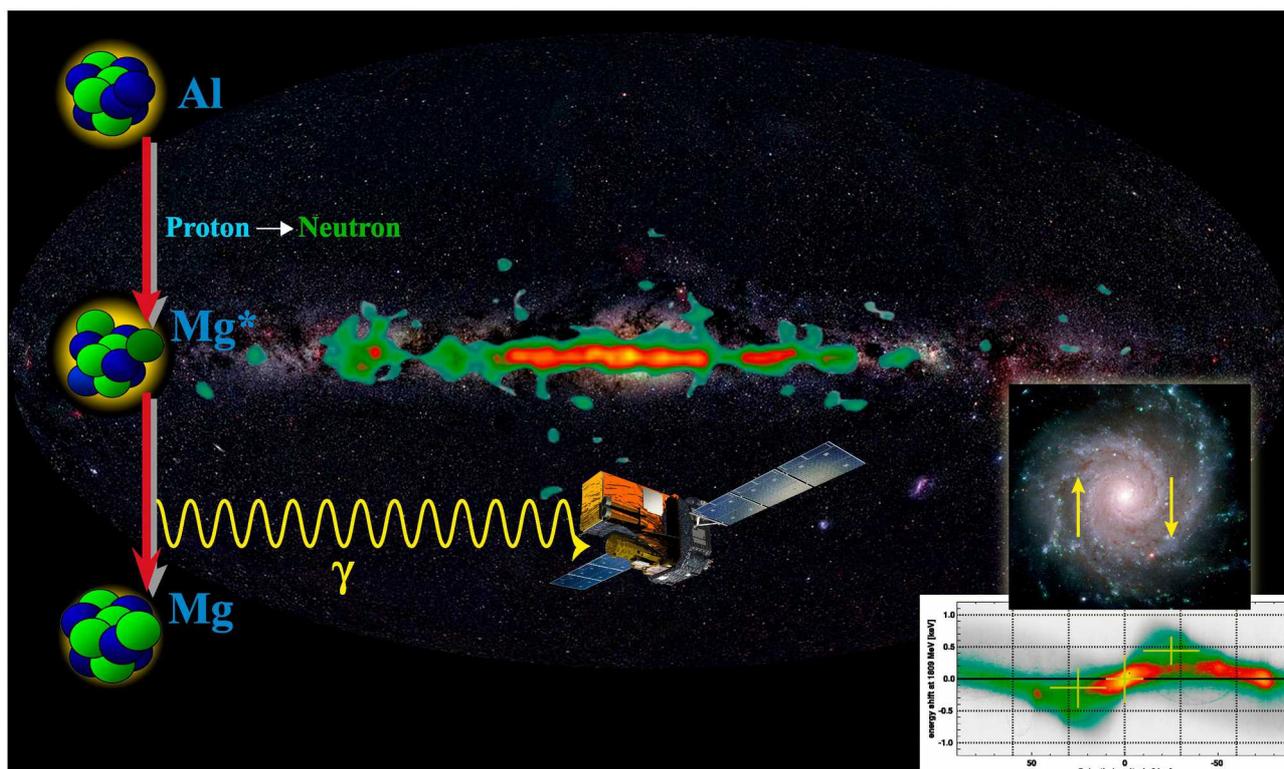


Рисунок 165: Карта распределения изотопа Al-26. В правом нижнем углу - доплеровский сдвиг гамма-излучения, связанный с вращением Галактики. С сайта <http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/26Al/26Al.html>

Космический телескоп «Хаббл» (HST, Hubble Space Telescope)

Вероятно наиболее известный широкой публике телескоп «Хаббл» был запущен в 1990 году с шаттла «Дискавери» (рисунок 166). Планируется, что он будет оставаться на орбите до 2020-2030 года. Этот телескоп занимает уникальное положение среди остальных в связи с тем, что изначально планировалось его периодическое обслуживание астронавтами. К 2010 году таких миссий обслуживания было 4. В частности, такое обслуживание позволило исправить знаменитую проблему, возникшую из-за ошибки при полировке главного зеркала телескопа. По вине изготовителя, поверхность зеркала диаметром 2.4 метра была изготовлена с отклонением от заданной формы на 2 микрона. Это привело к заметным aberrациям: размытие точечных источников составляло более одной секунды дуги, вместо планировавшихся 0.1". Для устранения этой ошибки пришлось смонтировать корректирующую оптику, своеобразные «очки» для телескопа (рисунок 167).



Рисунок 166: Телескоп "Хаббл" с борта удаляющегося шаттла "Атлантис" после миссии обслуживания в 2009 году. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope)



Рисунок 167: Изображение спиральной галактики Мессьер 100 до (слева) и после (справа) коррекции оптики телескопа Хаббл в 1993 году. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope)

Инструменты телескопа работают в видимом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах. С помощью этого телескопа получено много высококачественных изображений различных космических объектов. Их полная коллекция доступна на сайте НАСА <http://hubblesite.org/gallery/album/>, несколько полученных телескопом «Хаббл» изображений показано на рисунках 168, 169, 170, 171.

Из важных открытий, сделанных с помощью этого телескопа можно отметить:

- уточнение значения постоянной Хаббла, описывающей расширение Вселенной.
- подтверждение наличия черных дыр в центрах галактик.
- изучение различных объектов в Солнечной системе. В частности, изучение столкновения кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером.
- обнаружение протопланетных дисков у звезд, экзопланет.
- обнаружение многочисленных галактик на расстояниях в миллиарды световых лет, изучение которых позволяет заглянуть на ранние этапы развития Вселенной.

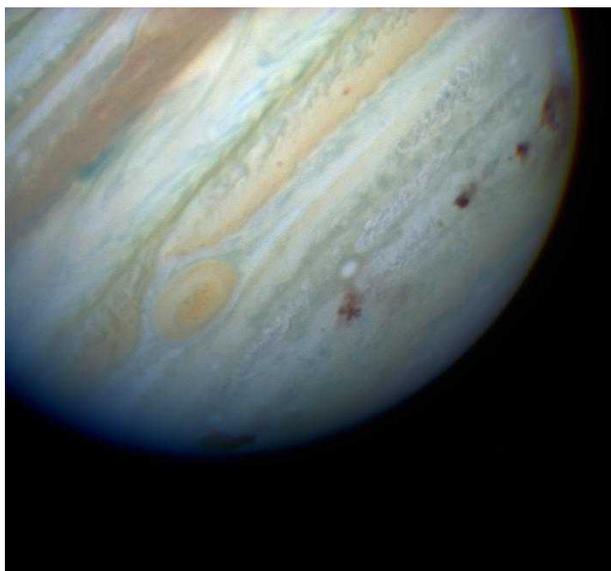


Рисунок 168: Юпитер. Видны Большое красное пятно (долгоживущее образование в атмосфере) и места ударов фрагментов кометы Шумейкер-Леви 9. (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album>)

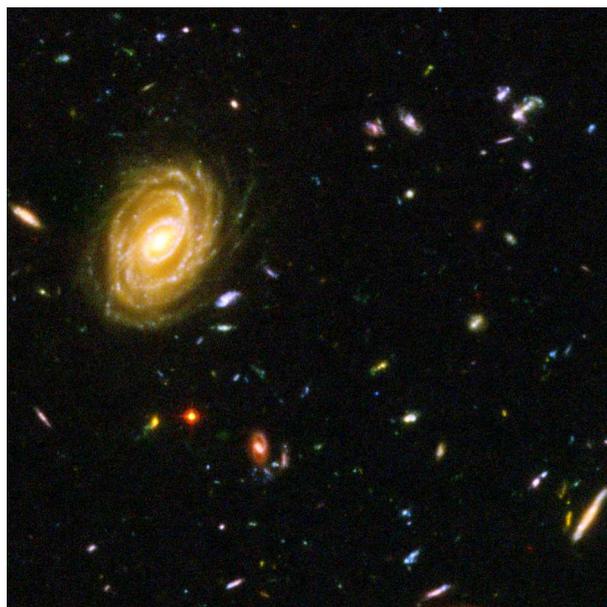


Рисунок 169: Многочисленные галактики в поле зрения телескопа "Хаббл" (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album/>)

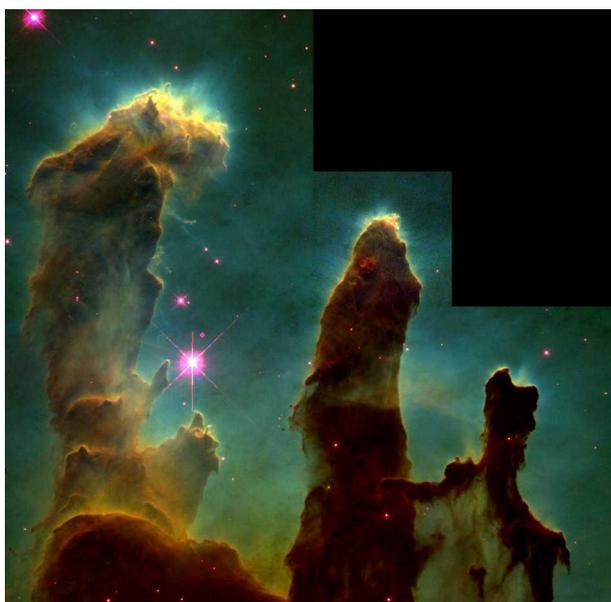


Рисунок 171: "Столпы творения" - туманность Орла NGC6611. Новые звезды формируются из материала тёмной туманности. (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album>)



Рисунок 170: Планетарная туманность (выбросы вещества умирающей звездой) "Кошачий глаз" NGC6543 (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album>)

Обсерватория «Кобе» (COBE, Cosmic Background Explorer)

Эта обсерватория, работающая в инфракрасном и микроволновом диапазонах специально создана для изучения космического реликтового излучения — фотонов, оставшихся с ранних этапов рождения Вселенной. Аппарат (рисунок 172) был запущен в 1989 году, проработал на орбите около 4 лет.

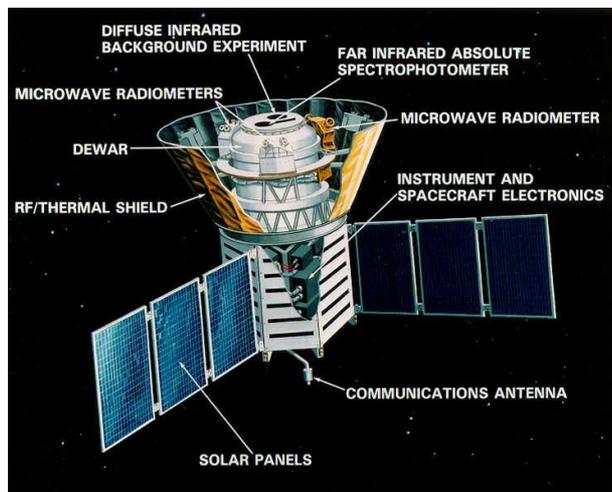


Рисунок 172: Изображение обсерватории "Кобе". С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>

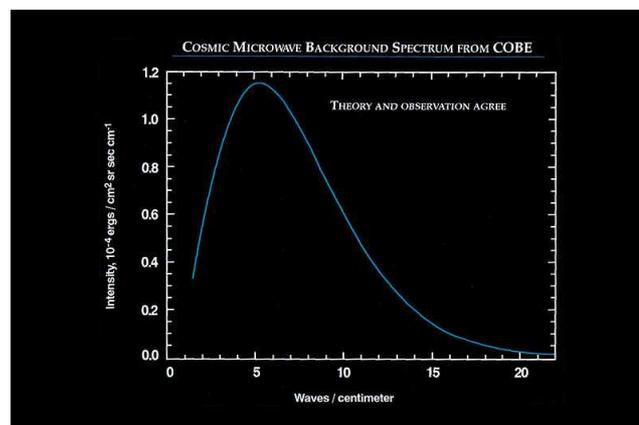


Рисунок 173: Спектр реликтового излучения, измеренный "Кобе" полностью согласуется с излучением черного тела температурой 2.7К. С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>

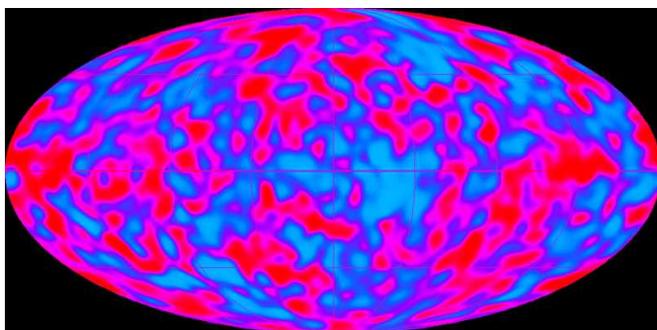


Рисунок 174: Анизотропия реликтового излучения: температура, соответствующая спектру излучения, меняется примерно на 100нК (на фоне 2.7К!). С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>

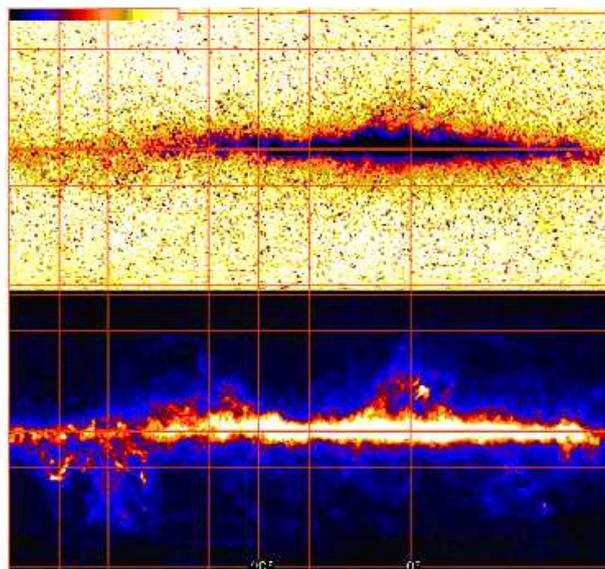


Рисунок 175: Сечение диска нашей Галактики, определенное по данным наблюдений в инфракрасном спектре. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>)

Основными результатами работы обсерватории «Кобе» являются:

- подтверждение соответствия спектра реликтового излучения спектру черного тела (рисунок 173).
- открытие и измерение анизотропии реликтового излучения (рисунок 174). За это открытие была присуждена Нобелевская премия 2006 года. Изменения температуры реликтового излучения отражают случайную неоднородность формирования сатерии на ранних этапах развития Вселенной.
- исследование нашей Галактики в инфракрасном диапазоне. Наблюдения в ИК диапазоне менее чувствительны к рассеянию на космической пыли, что позволило, в частности, уточнить положение Солнечной системы в нашей Галактике: Солнце находится на расстоянии 8.6 килопарсек от центра Галактики и на 15.6 парсек выше срединной плоскости галактического диска.

Исследование Луны при помощи космических аппаратов.

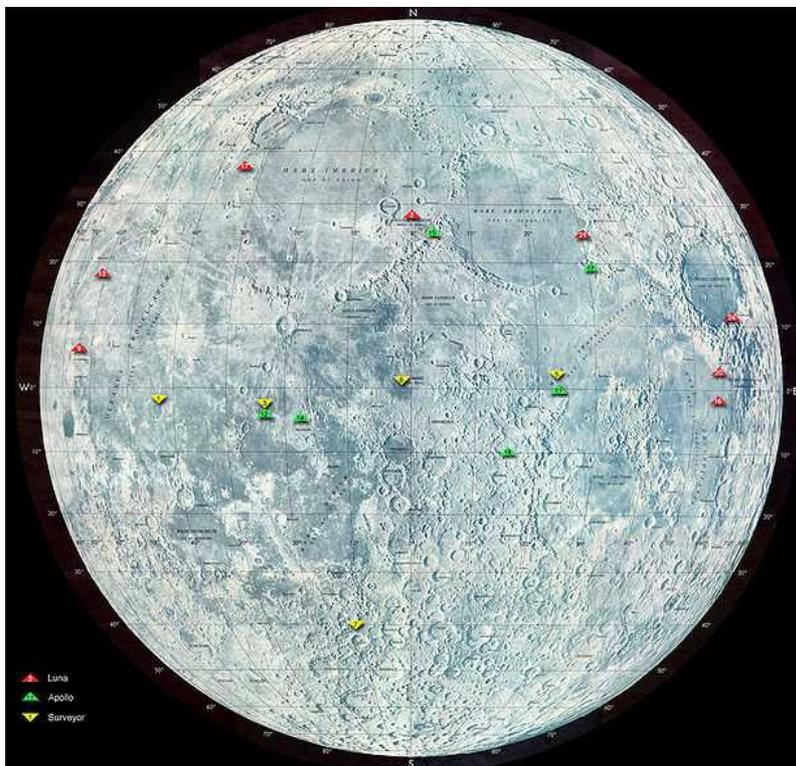


Рисунок 176: Места посадки различных КА на Луне (видимая сторона). Красные треугольники - станции "Луна" (СССР), желтые - "Сурвейор" (США), зеленые - "Аполлон" (США). (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Luna_program)

Советская программа исследования Луны состояла из 24 аппаратов серии «Луна». По политическим соображениям, только удавшимся миссиям присваивался порядковый номер. Было также сравнимое количество неудавшихся миссий (список приведен, например, на сайте http://en.wikipedia.org/wiki/Luna_program).

В рамках этой программы:

- впервые запущен аппарат в окрестности Луны («Луна 1», 1959)
- впервые искусственный аппарат стал спутником Солнца («Луна 1»)

- первая жесткая посадка на Луну («Луна 2», 1959)
- первая мягкая посадка на Луну («Луна 9», 1966)
- первый искусственный спутник другого небесного тела («Луна 10», 1966)
- впервые доставлен образец грунта другого небесного тела («Луна 16», 1970)
- доставка на Луну подвижного аппарата («Луна 17»/ «Луноход 1», 1970; «Луна 21»/ «Луноход 2», 1973)

Американская непилотируемая лунная программа «Сурвейор» была реализована с 1966 по 1968 год, состояла из 7 успешных миссий и 6 тестовых пусков. Все зонды программы были рассчитаны на мягкую посадку. Первый зонд серии «Сурвейор 1» был запущен в 1966 году, всего через несколько месяцев после зонда «Луна 9» - таким образом разрыв между первой мягкой посадкой на Луну зонда «Луна 9» и мягкой посадкой на Луну зонда «Сурвейор 1» составляет несколько месяцев. Целью миссий программы «Сурвейор» было исследование лунной поверхности и отработка некоторых этапов будущей пилотируемой программы. В частности, на зонде «Сурвейор 6» в 1967 году были отработаны элементы взлета с поверхности: были включены двигатели, зонд поднялся на небольшую высоту и совершил повторную мягкую посадку. Фрагменты зонда «Сурвейор 3» были позднее доставлены на Землю миссией «Аполлона 12».

Пилотируемая программа «Аполлон», как мы уже обсуждали привела к 3 облетам Луны, 6 высадкам на Луну. К Луне слетало в этих миссиях 24 человека (трое летали дважды: Джим Ловелл «Аполлон 8, 13», Евгений Цернан «Аполлон 10, 17» и Джон Янг «Аполлон 10, 16»). На Луну высаживалось 12 человек. С Луны доставлено около 382 килограмм грунта.

После 1990 произошло возвращение к Луне:

- В 1990 году зонд «Хитен» Японского космического агентства вышел на окололунную орбиту.
- В 1994 году на окололунную орбиту запущен зонд НАСА «Клементин», впервые снявший полную карту лунной поверхности в разных спектральных диапазонах.
- В 1997 году совершён двойной облет Луны спутником AsiaSat 3/HGS-1. Этот облет является некоторым техническим курьёзом — из-за ошибки при работе разгонного блока спутник вывели не на планируемую геостационарную орбиту, а на сильно вытянутую эллиптическую. Коррекцию орбиты удалось осуществить, используя гравитационное поле Луны: было совершено два пролёта на расстоянии 6800 км от Луны и на расстоянии 33000 км от Луны. Не имея научной ценности, этот случай, однако, показывает «близость» Луны для космической техники: *случайно запущенный* спутник достиг окрестности Луны.
- В 1998 году был запущен зонд НАСА «Лунар Проспектор». Спектральные анализаторы этого зонда показали возможное наличие водяного льда в постоянно затененных кратерах.
- В 2004 году зонд Европейского космического агентства «Смарт 1» произвёл с окололунной орбиты детальный анализ химического состава лунной поверхности.
- В 2007 году китайский зонд «Чанъэ 1» проработал 6 месяцев на лунной орбите
- С 2007 по 2009 год зонд Японского космического агентства «Кагуя» передал

изображения поверхности Луны в стандарте высокой четкости.

- В 2008 Индия запустила зонд «Чандраян 1»
- Запущенный в 2009 году зонд «Лунар Реконнэсанс Орбитер» в частности снял места посадки некоторых миссий проекта «Аполлон». Запущенный одновременно с ним зонд LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) нёс ударный зонд «Кентавр». По результатам анализа удара этого зонда о лунную поверхность подтверждено наличие воды на поверхности Луны.
- В 2010 году запущен второй китайский лунный зонд «Чанъэ-2». Он осуществил детальную съёмку (снижался до высоты 15 км от поверхности Луны) лунной поверхности для анализа возможных мест посадки следующих зондов. По результатам составлена карта Луны с разрешением около 10 метров. После осуществления миссии зонд был отведён в точку Лагранжа L_2 системы Земля-Луна, а в 2012 году выведен из этой точки на убегающую орбиту с пролётом мимо близкого к Земле астероида Таутатис¹, мимо которого зонд пролетел на расстоянии 3.2 км.
- В 2011 году запущены зонды-близнецы «Эбб» и «Флоу» (английские слова «прилив» и «отлив») миссии НАСА GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory). Эти зонды позволили детально изучить отклонения силы тяжести на лунной орбите, связанные с неоднородностью Луны. по данным этих измерений удалось уточнить толщину лунной коры.
- В 2013 году запущен зонд НАСА LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer). Основная цель миссии — исследование остаточной атмосферы Луны (экзосферы). Также в этой миссии была продемонстрирована возможность оптической связи (модулированный лазерный луч) с объектом на окололунной орбите (достигнута скорость передачи 20 мегабит/сек с Земли на зонд и 650 Мбит/сек с зонда на Землю).
- В 2013 году запущен китайский зонд «Чанъэ-3», осуществивший мягкую посадку на Луну (первая за 37 лет после посадки советской станции «Луна-24» в 1976 году). Этот зонд успешно доставил на поверхность Луны китайский луноход «Юйту».
- В 2014 году запущен китайский зонд «Чанъэ-5Т1» совершивший облёт Луны и вернувшийся на Землю. Это был испытательный полёт для планируемого на 2017 год полёта с доставкой лунного грунта.

Российская лунная программа (<http://kosmolenta.com/index.php/project-lunar/lunar-program-overview>) планирует запуск зонда к Луне в 2019 году. В 2020-2030 годах планируется рядом стран возобновление пилотируемой лунной программы. Компания Гугл объявила в 2007 году о призе в 20 миллионов долларов за доставку к Луне подвижного зонда-лунохода, осуществленное частной компанией.

¹ Астероид (4179) Таутатис (Tautatis), близко сближающийся с Землёй астероид. Максимальное сближение составляет около двух радиусов лунной орбиты, имеет неправильную форму с главными размерами около 4.5 и 2.5 км.

Полёты к Венере.

Советская программа полётов к Венере началась в 1961 году. Она состоит из 16 станций программы «Венера», запущенных с 1961 по 1983 год и зондов программы «Вега».

В рамках этой программы впервые были достигнуты следующие результаты:

- Зонд «Венера 1», запущенный в 1961 году, был первым запущенным межпланетным аппаратом. Однако связь с аппаратом была потеряна через 7 дней после запуска. Предположительно, он пролетел на расстоянии 100000 километров от Венеры.
- Зонд «Венера 3» в 1966 году стал первым созданным человеком объектом, достигшим поверхности другой планеты.
- Зонд «Венера 4» в 1967 году произвел анализ атмосферы Венеры.
- Зонд «Венера 7» в 1970 совершил почти мягкую посадку на Венеру и в течение 20 минут передавал данные с поверхности — также впервые.

Американские полёты к Венере осуществлялись в рамках программ «Маринер», «Пионер-Венус» и «Магеллан». Зонд «Маринер 2» в 1962 году стал первым исправным аппаратом, достигшим другой планеты. Зонд «Маринер 10» в 1974 году впервые использовал эффект «гравитационной пращи», пролетая на пути к Меркурию на расстоянии около 6000 километров от Венеры, осуществив при этом серию измерений и фотографирований. Зонд «Пионер-Венус Орбитер» проработал на орбите Венеры с 1980 по 1992 год. Зонд «Магеллан», запущенный в 1989 и проработавший до 1994 года осуществил подробную радарную съемку поверхности.

С 2006 по 2015 год на орбите Венеры проработал зонд «Венера-экспресс» Европейского космического агентства. В частности, этим зондом получены прямые доказательства продолжающейся на Венере вулканической деятельности (http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express/Hot_lava_flows_discovered_on_Venus).

В 2010 году к Венере был запущен зонд Японского космического агентства «Акацуки», однако по техническим причинам его не удалось вывести на орбиту вокруг Венеры во время планового пролёта в декабре 2010 года. Возможно, удастся восстановить контроль над аппаратом и осуществить этот манёвр во время следующего прохождения в 2015 году.

Полеты к Меркурию.

К Меркурию совершили полет два зонда НАСА: «Маринер 10» в 1974-1975 годах и «Мессенджер». Пролёты зонда «Мессенджер» мимо планеты состоялись в 2008 (дважды) и 2009 годах, в 2011 году зонд вышел на орбиту вокруг Меркурия и проработал на этой орбите до 2014 года.

Марсианская программа.

Посылка зондов к Марсу оказалась технически более сложной, примерно половина всех пусков (сумма по всем странам) оказалась неудачной.

Марсианская программа СССР реализовывалась с 1960 по 1973 год в рамках программы «Марс» (6 пусков с выводом на траекторию к Марсу и марсианскую орбиту, некоторые из которых страдали из-за технических проблем, также было несколько ошибочных пусков) и в 1988 году в рамках программы «Фобос» (2 частично успешных пуска, миссии прекращены досрочно из-за компьютерной ошибки). Эти миссии позволили получить изображения Марса, некоторые данные о поверхности и атмосфере. Первый зонд «Марс 1» был запущен в 1962 году, но связь с ним была потеряна на расстоянии примерно 200000 километров до Марса. Зонд «Марс б» стал первым зондом, передавшим данные из атмосферы Марса.

Ранняя марсианская программа США выполнялась в рамках проектов «Маринер» и «Викинг». Программа «Маринер» также как и советская программа страдала от технических проблем. Зонд «Маринер 3» не смог открыть панели солнечных батарей и не смог отправиться к Марсу. Тем не менее, именно программе «Маринер» принадлежит несколько приоритетов в исследовании Марса:

- зонд «Маринер 4» пролетел мимо Марса в 1965 году с минимальным расстоянием до поверхности Марса около 10000 километров. Этот зонд стал первым зондом, достигшим Марса и первым зондом, передавшим фотографии другой планеты, полученные с близкого расстояния.
- зонд «Маринер 9», запущенный в 1971 году, стал первым аппаратом, вышедшим на орбиту вокруг Марса (и вообще первым аппаратом, вышедшим на орбиту вокруг другой планеты). Проведя на орбите 349 дней, зонд передал более 7000 изображений поверхности, осуществив полное картографирование поверхности.

Два зонда, запущенных в рамках проекта «Викинг» в 1976 году, состояли из орбитальных и спускаемых модулей. Модули зонда «Викинг 1» проработали около 4 лет (орбитальный) и 6 лет (спускаемый), модули зонда «Викинг 2» - около 2 лет (орбитальный) и около 4 лет (спускаемый). Некоторым курьезом является прекращение работы спускаемого модуля зонда «Викинг 1», проработавшего чуть более 6 лет, из-за человеческой ошибки — ошибочно поданная команда отклонила антенну так, что восстановить связь не удалось. Зонды программы «Викинг» провели многочисленные физические, химические и биологические эксперименты на поверхности.

После 1990 года активность исследования Марса увеличилась. Успешными оказались миссии зондов НАСА «Марс Глобал Сурвейор» (запуск 1996, на орбите Марса с 1997 по 2006 год), «Марс Пасфайндер» (запуск 1996, работа марсохода на поверхности 3 месяца в 1997), марсоходы «Спирит» и «Оппортюнити» (запуск 2003, на поверхности с 2004). Марсоход «Спирит» перестал отвечать 22 марта 2010. Марсоход «Оппортюнити» продолжает (на сентябрь 2015 года) функционировать. Информация о текущем состоянии марсоходов доступна по адресу <http://mars.nasa.gov/mer/mission/status.html> Также в настоящее время продолжает работать на орбите Марса запущенный в 2005 году зонд НАСА Mars Reconnaissance Orbiter. По данным работы этого зонда недавно (в сентябре 2015, <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-evidence-that-liquid-water-flows-on-today-s-mars>) были обнаружены свидетельства сезонных потоков солёной воды на современном Марсе: обнаружена характерная эрозия поверхности в одном из кратеров, а в

образовавшихся складках обнаружено присутствие гидратированных солей.

Можно отметить, что к Марсу были запущены зонды Японского космического агентства «Нодзоми» (аппарат запущен в 1998, пролетел мимо Марса в 2003, не смог выйти на орбиту вокруг Марса) и зонд Европейского космического агентства «Марс Экспресс» (запущен в 2003 году, на орбите Марса с 2003 года, по состоянию на октябрь 2015 года продолжает работать) (http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express).

Также интересно отметить курьезную ошибку, приведшую к потере зонда НАСА «Марс Климат Орбитер», запущенного в 1998. Зонд вышел на орбиту Марса в 1999 году, но из-за ошибки в программе, связанной с переводом неметрических единиц (фунты) в метрические, вошел в атмосферу и сгорел.

Исследование внешних планет Солнечной системы.

Зонды, запущенные к внешним планетам, запускались только в рамках программ НАСА.

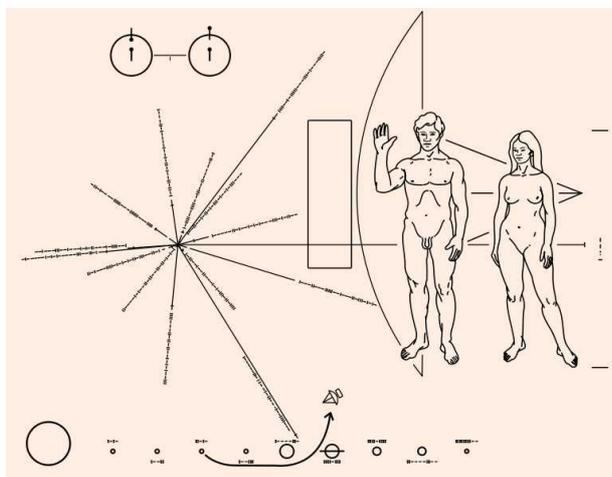


Рисунок 177: Табличка, находящаяся на борту зондов "Пионер 10" и "Пионер 11". (с сайта

http://en.wikipedia.org/wiki/Pioneer_10)

Зонды «Пионер 10» и «Пионер 11» запущенные в 1972 и 1973, пролетали мимо Юпитера и Сатурна (только «Пионер 11»). Они были первыми зондами, вышедшими за пояс астероидов. В данный момент зонды находятся на расстоянии более 100 астрономических единиц от Солнца. Последний сигнал от зонда «Пионер 10» был получен в 2003 году, от зонда «Пионер 11» в 1995. На обоих зондах была помещена позолоченная пластинка со схематическим представлением положения Солнца и Земли и изображением человека (рисунок 177).

В рамках программы «Вояджер» было запущено два зонда в 1977 году. Они осуществили пролет мимо Юпитера и Сатурна, а «Вояджер 2» также мимо Урана и Нептуна. Оба зонда в данный момент

находятся на удалении около 100 астрономических единиц от Солнца. Зонды продолжают функционировать, предоставляя информацию о далеких областях Солнечной системы. Источниками энергии для зондов являются радиоизотопные генераторы: термоэлементы, спаянные с изотопом плутоний-238, которые нагреваются распадом изотопа плутоний-238. Период полураспада этого изотопа 88 лет, за 30 лет миссии мощность генераторов упала до 58% мощности при пуске, что чуть больше чем уменьшение связанное с распадом (только из-за распада мощность должна бы уменьшиться до 78%). Ожидается, что зонды будут продолжать работать до 2020 года. На борту зондов находятся капсулы с позолоченными пластинками с символической информацией о Земле и нашей цивилизации и записями музыки и фотографий (<http://voyager.jpl.nasa.gov/spacescraft/scenes.html>).

Относительно недавно к Юпитеру был отправлен зонд «Галилео», запущенный в 1989 году, и пребывавший на орбите Юпитера с 1995 по 2003 год.

К Сатурну был отправлен зонд «Кассини», запущенный в 1997 году. Он находится на орбите

Сатурна с 2004 года, предположительно миссия будет продолжаться до 2017 года.

В 2006 году с миссией исследования Плутона и тел пояса Койпера был запущен зонд НАСА «Новые горизонты» («New Horizons», веб-сайт миссии https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html). Зонд совершил пролёт Юпитера в 2007 году и в 2015 году достиг Плутона.

Исследование малых тел Солнечной системы.

Зонды к малым телам (кометам и астероидам) отправлялись с 1980-х годов. Здесь можно вспомнить миссии исследования кометы Галлея в 1986 (советские «Вега 1, 2», европейский «Джотто», японские «Сакигаке» и «Суйсэй»). А также несколько миссий с возвращением образцов: зонд НАСА «Стардаст», вернувший образцы вещества из хвоста кометы Вильда (запуск 1999, пролет кометы 2004, возврат 2006), и японский зонд «Хаябуса», вернувший образцы астероидного вещества (с посадкой и взлетом с астероида, запуск 2003, возвращение на Землю 2010).

Лекция 6. Звёзды, эволюция звёзд.

Некоторые сведения из других разделов физики и ранее пройденного.

Вспомним сначала некоторые сведения из других разделов физики и ранее изученного материала, которые нам понадобятся в ходе этой лекции.

1. Понятия связанные с терминами яркость, светимость и звездная величина. Светимость L — полная мощность, излучаемая с поверхности звезды. Если не уточнено, под светимостью подразумевается мощность излучаемая во всем спектре. Светимость измеряется в единицах мощности (Ватт) либо в относительных единицах (например, в единицах светимости Солнца). Солнечная светимость $L_{\odot} = 3.827 \times 10^{26}$ Вт, светимость ближайшей к нам звезды — Проксимы Центавра — составляет $5-12 \times 10^{-5} L_{\odot}$, светимость яркой компоненты Сириуса (Сириус — ярчайшая звезда нашего звездного неба, является двойной звездой) $25.4 L_{\odot}$. Видимая яркость b — это мощность излучения объекта, приходящаяся на единичную площадь в месте расположения наблюдателя. Видимая яркость связана со светимостью очевидным соотношением $b = \frac{L}{4\pi d^2}$ (d — расстояние до звезды).

Видимая звездная величина объекта определяется как: $m = -2.512 \lg \frac{b}{b_0}$ (здесь b и b_0 — видимая яркость объекта и видимая яркость, соответствующая нулевой звездной величине). Абсолютная звездная величина небесного тела по определению равна его видимой звездной величине для наблюдателя, находящегося на расстоянии 10 парсек. Зная расстояние до объекта d (в парсеках) и его видимую звездную величину m , можно легко вычислить абсолютную звездную величину:

$$M = -2.512 \lg \left(\left(\frac{d}{10} \right)^2 \frac{b}{b_0} \right) = -5.024 \lg \frac{d}{10} + m.$$

Мы будем в основном пользоваться «не логарифмированными» понятиями светимости и видимой яркости.

2. Метод параллакса. Основой метода параллакса является наблюдение видимого смещения более близкого объекта относительно далеких ориентиров при смещении наблюдателя. Доступное для земного наблюдателя смещение точки наблюдения равно диаметру земной орбиты, а достигнутая точность измерения составляет 0.001". Таким образом, расстояния до объектов которые можно измерить методом параллакса достигают 1000-2000 парсек (3-6 тысяч световых лет).
3. Излучение черного тела. Спектр излучения черного тела определяется законами

квантовой физики (закон излучения Планка):
$$I = \frac{1}{S} \frac{dP}{d\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

(рисунок 178) Эта кривая имеет максимум вблизи частоты $\frac{h\nu}{kT} = 2.821$ (закон смещения Вина). Полная мощность, излучаемая с единицы поверхности $P = \int_0^{\infty} I(\nu) d\nu = \sigma T^4$ (закон Стефана-Больцмана, постоянная Стефана-Больцмана

равна $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$). Соответственно, светимость черного тела $L = \sigma S T^4$.

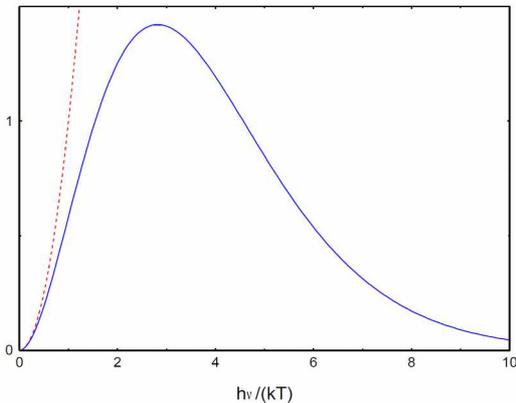


Рисунок 178: Синим цветом показана спектральная интенсивность излучения черного тела. Красный пунктир - классический результат Рэля-Джизинкса.

а при удалении от наблюдателя — красное смещение (увеличение длины волны). Величину этого смещения легко посчитать. Смещение источника при движении от одного максимума излучения до другого $\delta l = v T = V v = \lambda \frac{V}{c}$ и ровно на столько же, очевидно, изменится наблюдаемая длина волны. То есть $\frac{\delta \lambda}{\lambda} = \frac{V}{c}$.

4. Линейчатые спектры поглощения/излучения. Все атомы, ионы и молекулы излучают электромагнитные волны на характерных частотах, определяемых структурой их уровней энергии. Спектроскопический анализ (определение длин волн линий спектров поглощения и излучения) позволяет определить присутствие химических элементов и соединений.

5. Эффект Доплера. Если монохроматический источник движется относительно наблюдателя, то при приближении источника к наблюдателю возникает синее смещение (наблюдаемое излучение имеет меньшую длину волны),

Определение параметров звёзд: приборы и методы.

Прежде чем начать говорить о классификации звёзд и о наших современных представлениях об эволюции звёзд необходимо хотя бы качественно представлять как определяются те или иные характеристики звёзд. Если этого не сделать — изложение получится абстрактным и не убедительным. Итак, какие характеристики звёзд могут быть определены современными методами наблюдения?

Первая характеристика, доступная наблюдению это видимая яркость излучения звезды и спектральный состав излучения. Спектральный состав позволяет, в соответствии с законом излучения черного тела, определить температуру поверхности звезды. Линейчатые спектры в излучении звезды позволяют определить наличие различных элементов в атмосфере звезды.

Для достаточно близких звёзд (расстояния до нескольких тысяч световых лет) расстояние до звезды может быть непосредственно определено методом параллакса. Зная расстояние и видимую яркость можно найти полную светимость звезды $L = 4 \pi d^2 b$. Зная светимость и температуру звезды можно найти площадь поверхности и размер звезды $S = 4 \pi R^2 = \frac{L}{\sigma T^4}$.

В случае, если две звезды образуют двойную звезду, то по изучению взаимного орбитального движения звёзд (либо непосредственного наблюдения смещения звёзд, либо по переменному доплеровскому сдвигу линий поглощения), используя законы Кеплера, можно определить массы звёзд также, как мы определяем массы планет Солнечной системы. К счастью для астрономов, примерно половина звёзд образует двойные системы.

Для объяснения процессов, происходящих внутри звёзд, наши знания во многом опираются на изучение ближайшей к нам звезды — Солнца и на наши знания о ядерной физике. Помимо этого, обнаружение нейтринных вспышек от сверхновых подтверждает наши представления о том, что термоядерные реакции являются основой процессов в недрах звёзд.

Наконец, в распоряжении астрономов есть возможность численного моделирования процессов, происходящих в звездах и эволюции звёзд.

Классификация звёзд. Спектральный тип звезды, диаграмма Герцшпрунга—Рассела, главная последовательность.

Линейчатые спектры в излучении звёзд были обнаружены Фраунгофером в 1817 году. При дальнейшем изучении этих спектров обнаружилось, что, несмотря на общую схожесть, линейчатые спектры различных звёзд отличаются друг от друга относительной интенсивностью спектральных линий. Для некоторых звёзд в спектре были четко видны бальмеровские линии водорода, для других (в том числе и для Солнца) доминируют линии, связанные с более тяжелыми кальцием, натрием, железом.

Отметим сразу, что все спектроскопические результаты указывают на то, что большинство нормальной материи в межзвездном пространстве и в звездах — это водород и гелий. Однако в спектрах большинства звёзд (в том числе и Солнца) присутствуют многочисленные линии поглощения тяжелых элементов (железа, кальция, натрия). Эти звезды называют звездами первой популяции. Помимо таких звёзд есть менее многочисленная группа звёзд, в которых тяжелых элементов примерно в 30 раз меньше, чем в звездах первой популяции аналогичного класса. Эти звезды называют звездами второй популяции. Это обозначение популяций сложилось исторически. Современная теория развития Вселенной предполагает, что звезды второй популяции на самом деле старше звёзд первой популяции. Более того, предполагается что до них существовали звезды так называемой третьей популяции, перерабатывавшие в ходе термоядерных реакций легкие элементы, образовавшиеся после Большого Взрыва. При этом каждое поколение звёзд в ходе своей эволюции обогащало межзвездное пространство тяжелыми элементами.

Историческая классификация, формировавшаяся в 19 веке, обозначала различные характерные спектральный классы латинскими буквами от А до О в порядке убывания силы бальмеровских линий водорода. Дальнейший более тщательный анализ спектров (Гарвардский проект 1872 года, изучение и классификация сотни тысяч спектров звёзд) и обнаружение в 1920-х годах связи спектрального класса с температурой поверхности привело к пересмотру классификации и теперь в порядке понижения температуры поверхности звезды обозначают буквами, унаследованными от той первой классификации, но в перемешанном порядке OBAFGKM (английское мнемоническое правило для запоминания «Oh, Be A Fine Girl Kiss Me»). Температура поверхности для спектрального класса О около 35000К, для класса М — около 3000-4000К. Для более тонкой классификации каждый класс разбивают на 10 подклассов нумеруя их цифрами от 0 до 9 в порядке понижения температуры поверхности (например, G0, G1, G2 ... G9, температура поверхности звезды G9 меньше температуры поверхности звезды G0). Солнце является звездой класса G2. Наконец, с обнаружением коричневых карликов — холодных «недозвезд», к этой классификации добавили еще классы L, T, Y. Примерные характеристики звёзд разных классов приведены в таблице ниже (данные с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification)

Класс	T, К	Цвет	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	L/L_{\odot}	Выраженность линий водорода	Доля среди звёзд главной последовательности
O	>30000	голубой	>16	>6.6	>30000	слабо	~0.00003%
B	10000-30000	бело-голубой	2.1-16	1.8-6.6	25-30000	средне	0.13%
A	7500-10000	белый	1.4-2.1	1.4-1.8	5-25	сильно	0.6%
F	6000-7500	желтовато-белый	1.04-1.4	1.15-1.4	1.5-5	средне	3%
G	5200-6000	желтый	0.8-1.4	0.96-1.15	0.6-1.5	слабо	7.6%
K	3700-5200	оранжевый	0.45-0.8	0.7-0.96	0.08-0.6	очень слабо	12.1%
M	<3700	красный	<0.45	<0.7	<0.08	очень слабо	76.45%

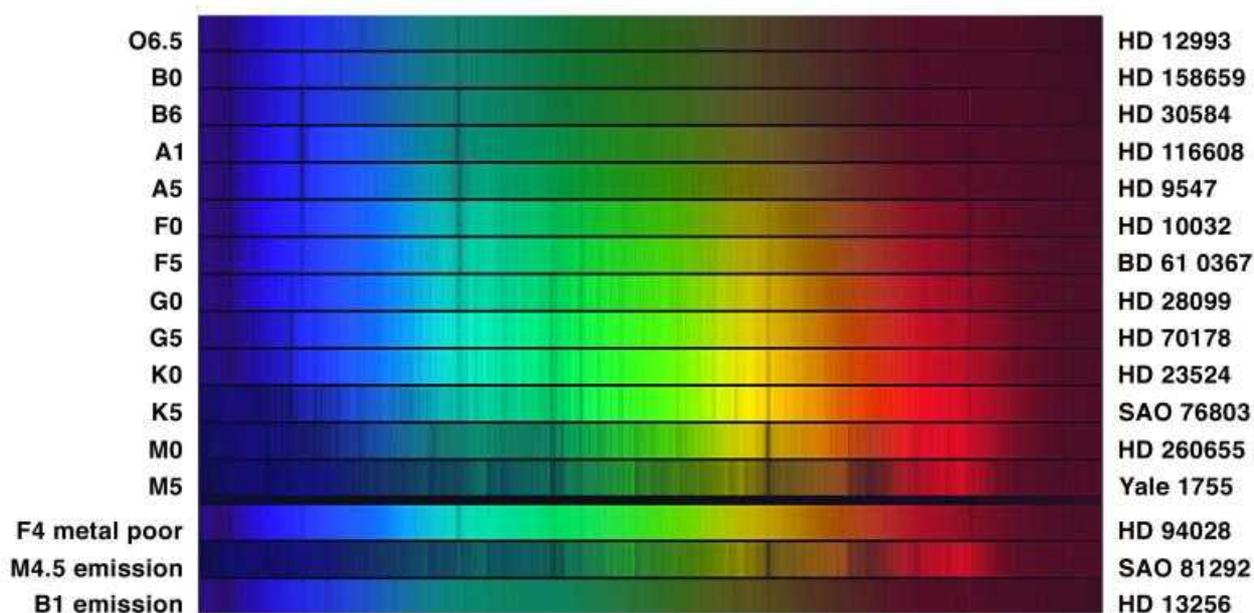


Рисунок 179: Примеры линейчатых спектров звёзд разных спектральных классов (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_classification)

Связь температуры и характерных линейчатых спектров довольно естественна. При низких температурах атомы образуют молекулы. Например, в спектрах звёзд класса М имеются характерные широкие полосы поглощения, связанные с присутствием оксида титана. С другой стороны, в горячих звездах ионы со слабо связанными электронами оказываются полностью ионизованы и не поглощают, поэтому в спектрах горячих звёзд класса О доминируют линии водорода (который, кстати, полностью диссоциирует при температурах в 35000К).

Другим способом классификации звёзд является разбиение на классы по светимости. При этом выделяют пять классов (в порядке убывания светимости): I. сверхгиганты; II. яркие

гиганты; III. гиганты; IV. субгиганты; V. звезды главной последовательности.

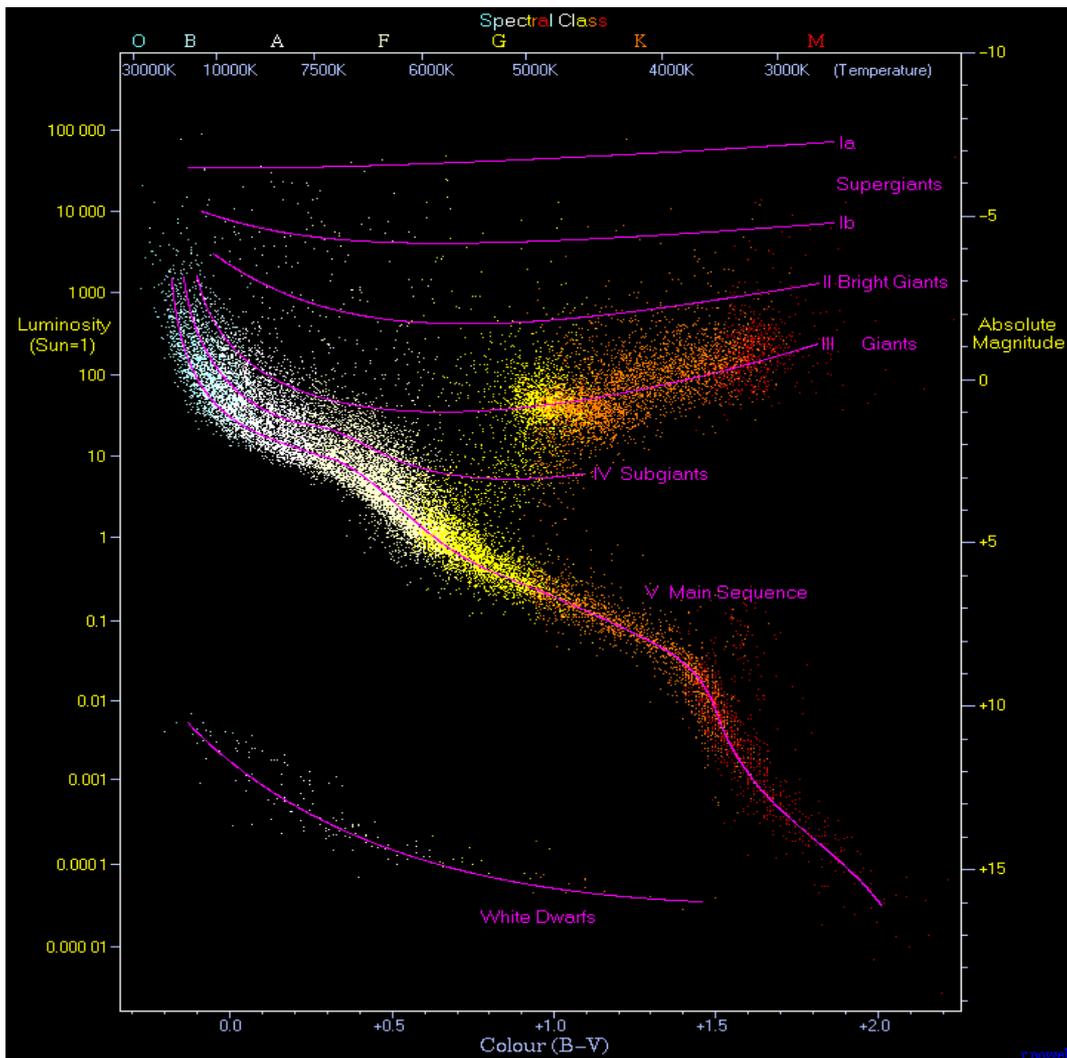
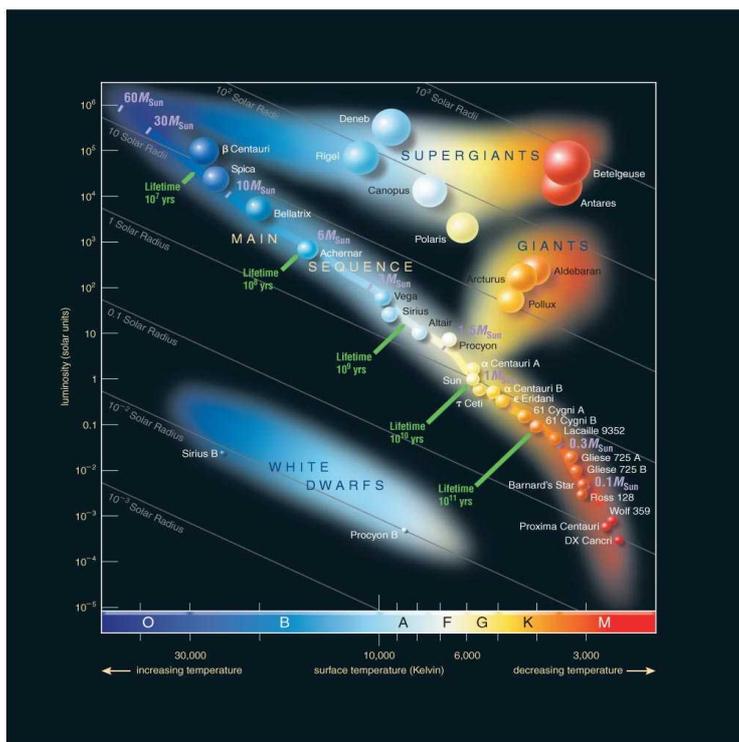


Рисунок 180: Диаграмма Герцшпрунга—Рассела. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell_diagram

Дальнейшим шагом к классификации звезд является графическое отображение известных параметров для обнаружения взаимосвязи между ними. Какие параметры имеет смысл отображать? Расстояние до звезды не является интересной физической характеристикой звезды (это характеристика нашего положения относительно звезды), остаются светимость, температура, радиус, масса. При этом не все эти величины независимы. Светимость, температура и радиус звезды связаны законом Стефана-Больцмана $L = 4\pi R^2\sigma T^4$. Естественно ожидать, что масса также связана с размером и другими характеристиками звезды. Однако эта связь нетривиальна так как плотности звезд также зависят от их размера и температуры (и неоднородны с глубиной от поверхности звезды). Как мы увидим далее, для так называемых звезд главной последовательности выполняется эмпирическое соотношение $L \propto M^{3.5}$. Таким образом, одним из осмысленных способов графического представления известной нам популяции звезд является диаграмма, по одной оси которой отложена температура поверхности, а по другой светимость. Эта диаграмма называется диаграммой Герцшпрунга—Рассела и она приведена на рисунках 180, 181 и 182.



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Рисунок 181: Диаграмма Герцшпрунга—Рассела с положением некоторых звёзд на ней (с сайта <http://hal.physast.uga.edu/~jss/1020/ch15/ovhd.html>)

По историческим причинам ось температур направлена справа налево. Это связано с тем, что исторически параметром по оси абсцисс была не температура, а спектральный класс звезды. А самый первый спектральный класс O0 соответствует самым горячим звездам.

Взгляд на диаграмму Герцшпрунга—Рассела, к нашему удивлению, показывает, что звезды не так уж и разнообразны по своим характеристикам. Большая часть звёзд сосредоточена на так называемой главной последовательности — кривой, пересекающей диаграмму по диагонали. Кроме этого есть несколько выраженных групп звёзд, отстоящих от главной последовательности: над главной последовательностью находятся группы гигантов и сверхгигантов, под главной последовательностью группа горячих маленьких звёзд — белых карликов.

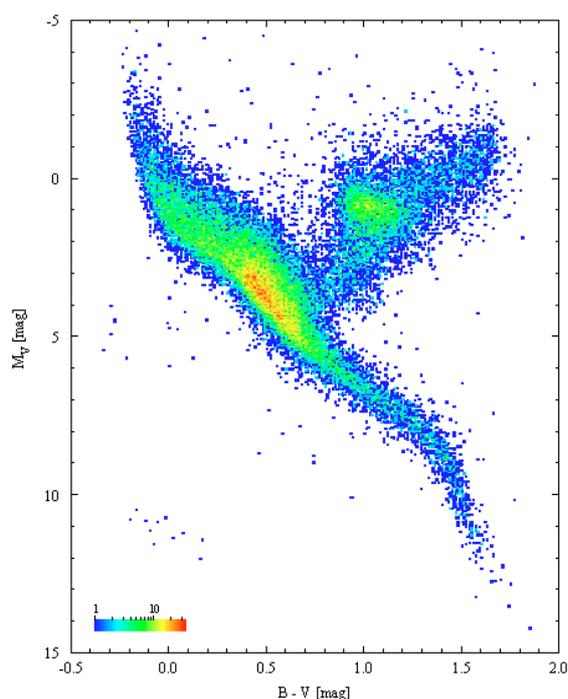


Рисунок 182: Диаграмма Герцшпрунга-Рассела построенная по данным измерения спутником "Гиппархос" параметров 41704 ближайших звёзд. (с сайта http://www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS&page=HR_dia)

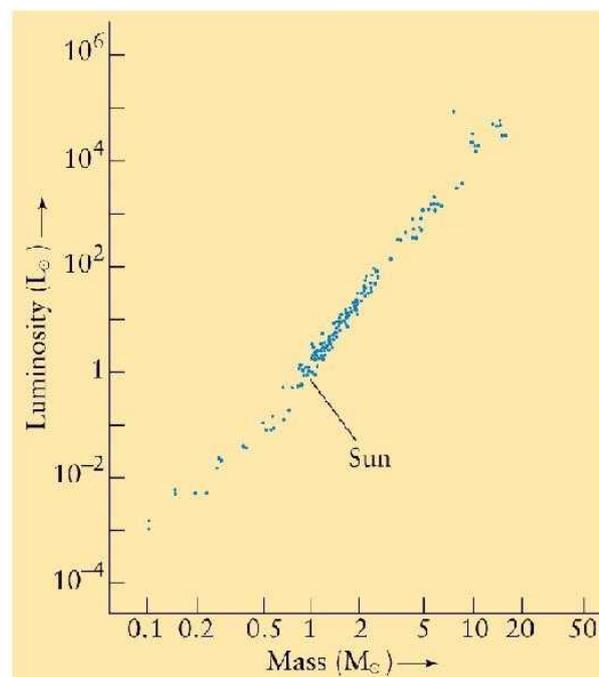


Рисунок 183: Диаграмма масса-светимость для звёзд главной последовательности. (с сайта <http://hal.physast.uga.edu/~jss/1020/ch15/ovhd.html>)

Для звёзд главной последовательности масса оказывается связана со светимостью. Приблизительно эта связь описывается законом $L \propto M^{3.5}$ (рисунок 183). В существовании такого закона нет ничего удивительного (хотя его обоснование выходит за рамки нашего курса). Действительно, масса определяет количество вещества в звезде. Дальше закон тяготения определяет как это вещество притягивается к центру, а излучение, противодействующее этому сжатию приводит к установлению равновесия. Таким образом для стабильных звёзд (находящихся в равновесном состоянии), в принципе, именно масса определяет все остальные параметры: радиус, температуру, светимость.

Отметим, что группировка звёзд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела дает нам дополнительный инструмент для оценки расстояния до далёких звёзд (когда метод параллакса уже неприменим). Действительно, если мы уверены, что данная звезда является звездой главной последовательности, то определив её температуру (по максимуму в тепловом излучении, фактически — по цвету) мы можем определить ее светимость по диаграмме Герцшпрунга—Рассела, а тогда из видимой яркости легко находится расстояние до звезды $d^2 = L / (4\pi b)$. Отличить же звезду главной последовательности от, скажем, гиганта с той же температурой можно по тонким деталям спектров поглощения. В менее плотных гигантах ионы в верхних слоях атмосферы звезды мало взаимодействуют друг с другом, поэтому линии поглощения в спектрах гигантов заметно уже, чем в спектрах звёзд главной последовательности. Этот метод определения расстояния до звёзд называют методом спектроскопического параллакса.

Тот факт, что большинство звёзд оказывается сосредоточено в такой узкой области

пространства параметров указывает на то, что действуют какие-то физические механизмы, из-за которых эволюция звёзд приводит их на главную последовательность. Качественно понятно, что эти механизмы связаны с балансом между тяготением звезды, выделением энергии в ходе термоядерной реакции в ядре звезды и постепенным выжиганием легких элементов, меняющем состав звезды. Уравнения этого баланса определяют равновесное соотношение между массой, размером и светимостью звезды, а также процессы прихода к этому равновесию и дальнейшую судьбу звезды. Однако, сколь либо строгое рассмотрение этих процессов существенно выходит за рамки нашего курса. Поэтому мы ограничимся изложением современного представления об эволюции звёзд и постараемся сфокусироваться на наблюдаемых доказательствах этой эволюции.

Рождение звёзд. Туманности, кластеры.

Туманности.



Рисунок 184: Туманность Ориона (светящаяся туманность) в телескоп "Хаббл". Расстояние до туманности 1340 св.лет. (с сайта <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2006/01/image/a/>)

спиральных галактик возникает в результате гравитационной неустойчивости однородного галактического диска.

Как мы уже обсуждали при рассмотрении эволюции Солнечной системы, именно такие облака межзвездной пыли и газов являются местом рождения звёзд: протозвезды образуются за счет гравитационного сжатия этих облаков. На ранних этапах гравитационному сжатию противостоит обычное газовое давление. Поэтому туманность должна быть достаточно плотной и холодной, чтобы гравитационное сжатие стало необратимым. Это может произойти не со всеми туманностями.

Помимо звёзд на небе наблюдаются и многочисленные туманности — области межзвездного пространства с относительно высокой концентрацией пылевых частиц и атомов. Относительно высокая концентрация по меркам межзвездного пространства является очень низкой по земным стандартам: речь идет о тысячах/миллионах/миллиардах частиц на кубический сантиметр. Для сравнения вспомним, что один моль идеального газа ($6 \cdot 10^{23}$ частиц) при нормальных условиях занимает объем 22.4 литра — то есть на кубический сантиметр приходится примерно $3 \cdot 10^{19}$ частиц. Но в «чистом» межзвездном пространстве типичная концентрация частиц 0.1-10 частиц на кубический сантиметр.

Концентрация пыли и газа в каком-то месте пространства является в чём-то случайным процессом, являющимся например последствием взрыва сверхновой где-то в окрестности. Кроме того, большая концентрация вещества в рукавах

Туманности бывают светящиеся, как например туманность в созвездии Ориона на рисунке 184. Эти туманности состоят из разреженного газа (тысячи частиц на кубический сантиметр), их полная масса типично составляет 100-1000 солнечных масс, а характерный поперечный размер измеряется световыми годами. Свечение этих туманностей связано с тем, что они окружают уже сформировавшиеся горячие звезды с большой светимостью. Ультрафиолетовое излучение звезд ионизует атомарный водород, а в процессе многоступенчатой рекомбинации выделяется излучение в том числе и на видимых частотах. Высокая температура газа в этих туманностях позволяет газовому давлению противостоять гравитационному сжатию — такие туманности являются плохими кандидатами в «родители» новой звезды.

Другая разновидность туманностей состоит из холодного, более концентрированного газа и пылевых частиц. Это темные туманности, например знаменитая «Конская голова» (рисунки 185, 186), и рассеивающие туманности (рисунок 187). Темные туманности наблюдаются как беззвездные участки на небесной сфере. Рассеивающие проявляют себя рассеянием света от близлежащих звезд. Эти туманности холодные (температура 10-100К), концентрация частиц в них выше (до миллиарда частиц на кубический сантиметр). Именно такие туманности являются наиболее вероятным местом рождения звезд.



Рисунок 185: Темная туманность Конская голова (1500 свет от Земли, созвездие Орион).
(с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Horsehead_Nebula)



Рисунок 186: Темная туманность Конская голова, фотография с телескопа "Хаббл". (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album/pr2001012a>)

В некоторых случаях (Тройная туманность в созвездии Стрельца, рисунок 188), все три типа туманности могут быть «смешаны». Это соответствует сильно меняющейся плотности частиц и является может и не типичным, но вполне ожидаемым явлением для области формирования звезд.



Рисунок 187: Рассеивающая туманность Голова Ведьмы (1000 св.лет от нас, созвездие Орион, рядом с Ригелем) (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_nebula)

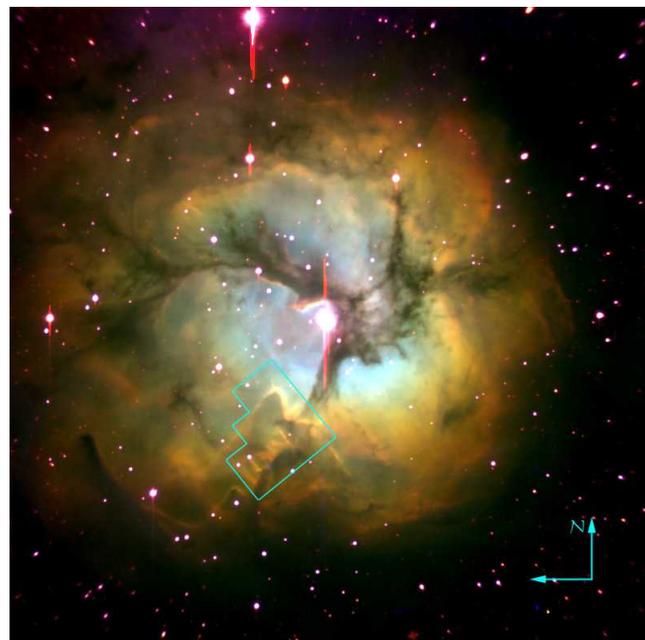


Рисунок 188: Тройная туманность (7600 св.лет, созвездие Стрельца). Изображение получено телескопом "Хаббл". Красные участки — светящаяся туманность, голубые — отражающая, черные «провалы» - темная туманность. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Trifid_Nebula)

Формирование протозвезд.

Начало формирования протозвезды может быть вызвано случайным возмущением в туманности, взрывом сверхновой и т.п. Так как масса туманности может составлять порядка 1000 солнечных масс, то в ней имеется достаточно вещества для формирования нескольких протозвезд. При этом может возникать своего рода «цепная реакция»: воздействие формирующейся протозвезды (выбросы вещества, звездный ветер) на окружающую туманность инициирует рождение звезд рядом. Такие группы звезд, возникшие в одной туманности практически (по астрономическим меркам) одновременно называют кластерами. Звездные кластеры (один из известных кластеров — Плеяды) позволяют исследовать и сравнивать эволюцию звезд разного типа, возникших одновременно.

Начальные стадии формирования протозвезды — это гравитационное сжатие и разогрев газопылевого облака. Они скрыты от наблюдения окружающей туманностью, однако наблюдения в инфракрасном диапазоне способны проникнуть вглубь туманности (рэлеевское рассеяние на мелких частицах возрастает с уменьшением длины волны — это явление из-за которого небо синее, а противотуманные фары желто-красные). Действительно, в некоторых туманностях смена диапазона наблюдения позволяет обнаружить горячие объекты,

идентифицируемые как протозвезды (рисунки 189, 190).

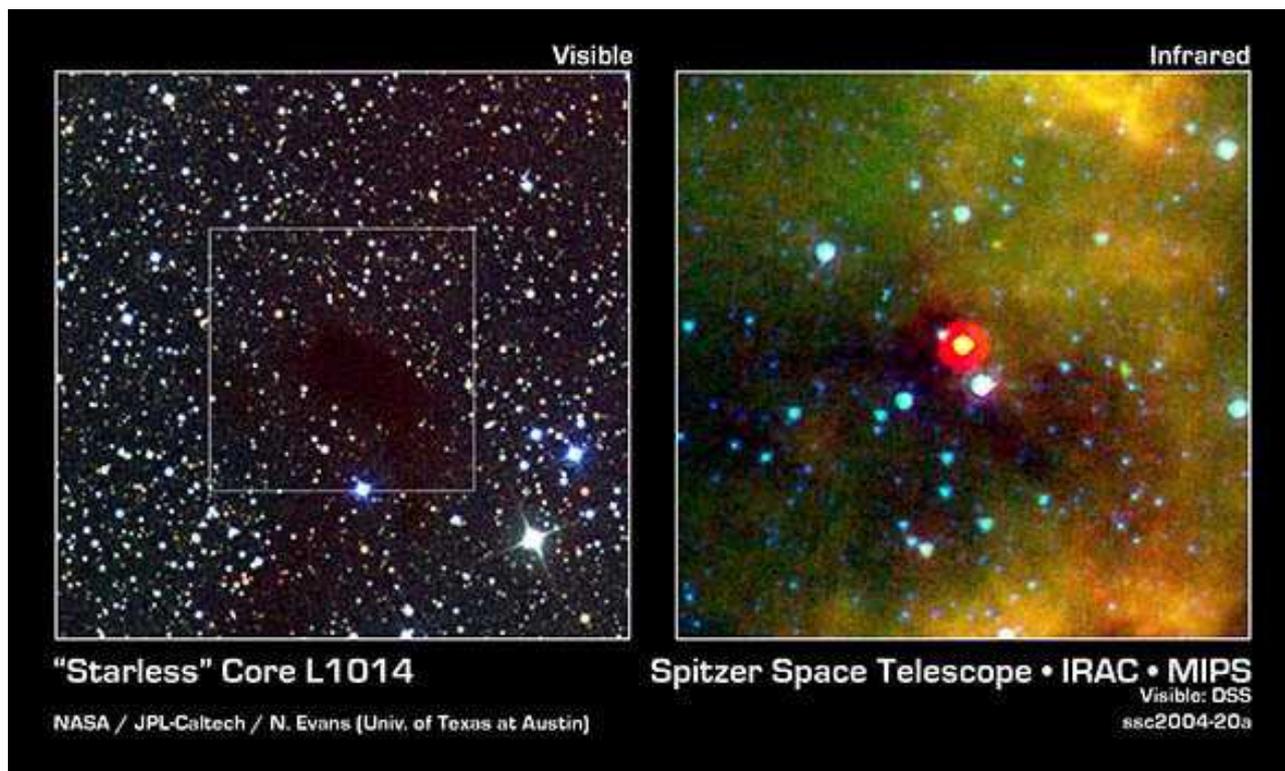


Рисунок 189: Изображение тёмной тусанности L1014 в видимом (слева) и ИК (справа) диапазонах. ИК изображение, полученное орбитальной обсерваторией "Спитцер" позволяет обнаружить горячий объект (протозвезду) в туманности. (с сайта <http://www.spitzer.caltech.edu/images/1328-ssc2004-20a-The-Starless-Core-that-Isn-t>)

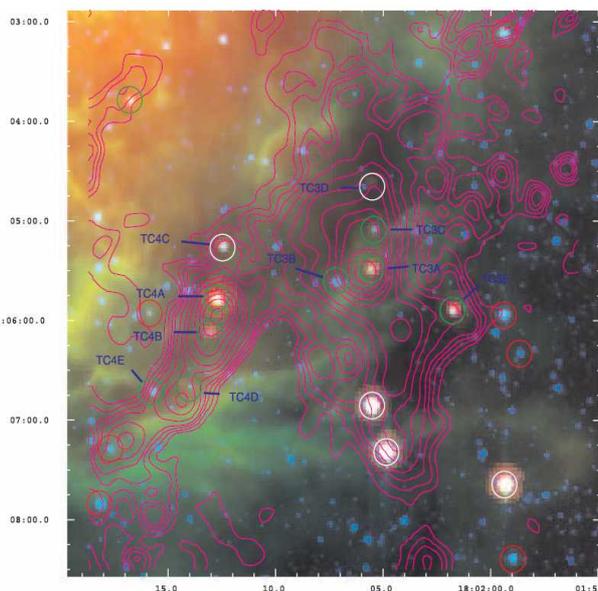


Рисунок 190: Обнаруженные в тройной туманности протозвезды, по данным анализа данных полученных в ИК спектре телескопом "Спитцер". (из работы Jeonghee Rho и др., *The Astrophysical Journal*, 643:965–977, 2006 June 1)

Эволюция протозвезд, рождение звёзд.

По мере разогрева облака и запуска термоядерной реакции, излучение и звездный ветер «выдувает» частицы газопылевого облака вокруг звезды, открывая ее для наблюдения. Такие возникающие звезды наблюдаются на границах темных туманностей. Причудливая форма этих границ (например, образующих знаменитую фотографию «Столпы Творения», полученную телескопом «Хаббл», рисунок 191) связана именно с активной жизнью молодой протозвезды, с сильным звездным ветром и выбросами вещества. Из-за вращения протозвезды выбросы вещества происходят иногда в виде характерных «фонтанов» вдоль оси вращения. Такие характерные «фонтаны» также наблюдаются на границах туманностей (рисунок 192).

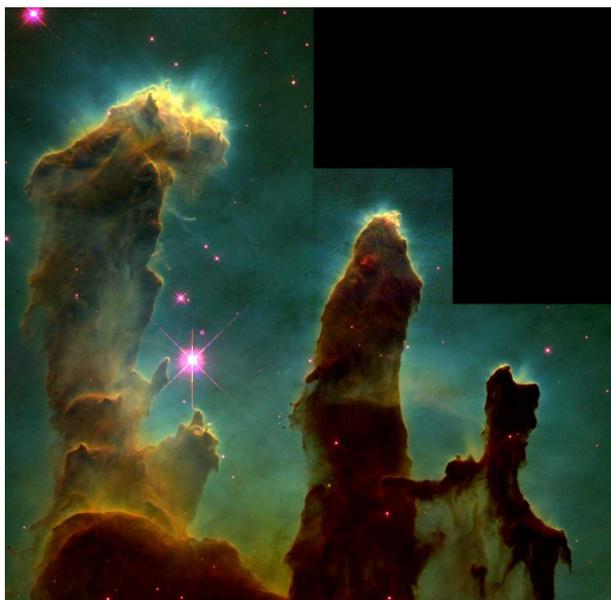


Рисунок 191: "Столпы творения" - "Хаббл" (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Eagle_Nebula)
фрагмент Туманности Орла в созвездии Змеи (7000 св.лет). Фотография сделана телескопом Хаббл.



Рисунок 192: "Фонтаны" - выбросы вещества формирующимися звездами в Тройной туманности (7600 св.лет, созвездие Стрельца). Фотография получена телескопом

Так как масса туманности заметно больше звездной, обычно из одной туманности образуется много звёзд. Например, в Тройной туманности обнаружено около 30 протозвезд и 120 молодых, только образовавшихся звёзд (поперечный размер туманности порядка 50 св.лет). Когда все звезды сформируются, то образуется звёздный кластер (или звёздное скопление). Наличие остатков газопылевого облака вокруг звездного кластера является одним из указаний на то, что этот кластер сравнительно молодой.

Выделяют два основных вида кластеров:

- Шаровое звездное скопление (рисунок 193), в котором звезды распределены сферически симметрично. В Млечном Пути находится около 150 таких звездных скоплений. Шаровые звездные скопления старые, их возраст сравним с возрастом Галактики. Обычно они содержат сотни тысяч звёзд, в центрах скоплений плотность звёзд может достигать 100-1000 звёзд на кубический парсек. Звезды в шаровых скоплениях характеризуются обычно низким содержанием тяжелых элементов.
- Рассеянное звездное скопление, в котором содержится сравнительно немного (до нескольких тысяч) звёзд и распределение которых имеет неправильную форму. Примером рассеянного скопления являются Плеяды (рисунок 194). Эти скопления бывают и относительно молодыми.



Рисунок 193: Шаровое звездное скопление М3 (NGC5272) в любительский телескоп. Находится на расстоянии 34 тысячи св.лет от Земли в созвездии Гончих Псов. Содержит около 500000 звёзд. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Messier_3)



Рисунок 194: Рассеянное звездное скопление Плеяды (440 св.лет, созвездие Тельца) (с сайта http://ru.wikipedia.org/wiki/Messier_45)

Диаграммы Герцшпрунга—Рассела для различных кластеров демонстрируют характерные отличия (рисунки 195, 196, 197). Для старых скоплений на главной последовательности представлены только звезды «левой-нижней» части (небольшие, холодные). Для молодых скоплений наоборот, только большие и горячие звезды находятся на главной последовательности. Вспоминая, что главная последовательность — это положение равновесия для звёзд, мы приходим к выводу, что тяжелые горячие звезды быстрее приходят

к равновесию, но и быстрее проходят свой жизненный цикл.

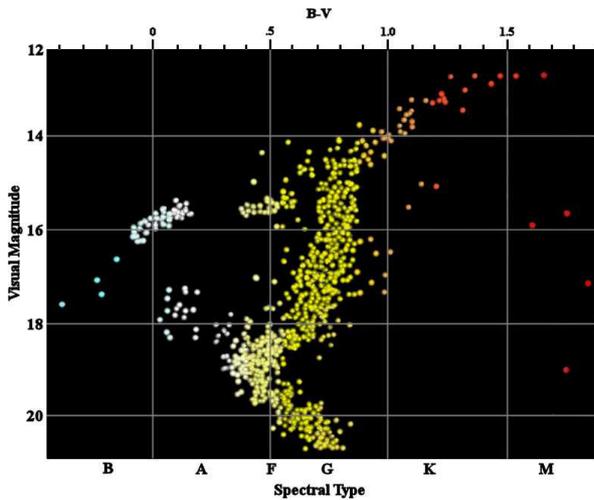
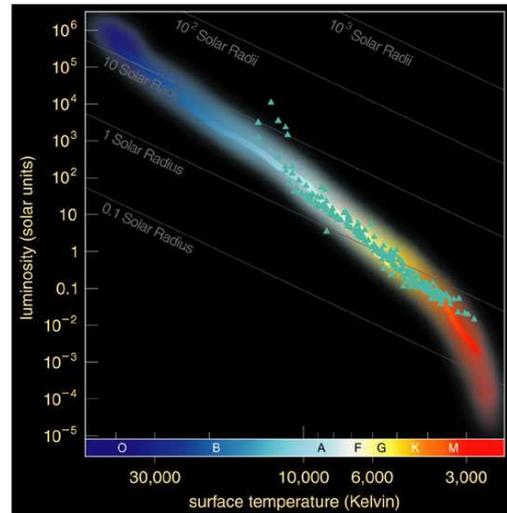
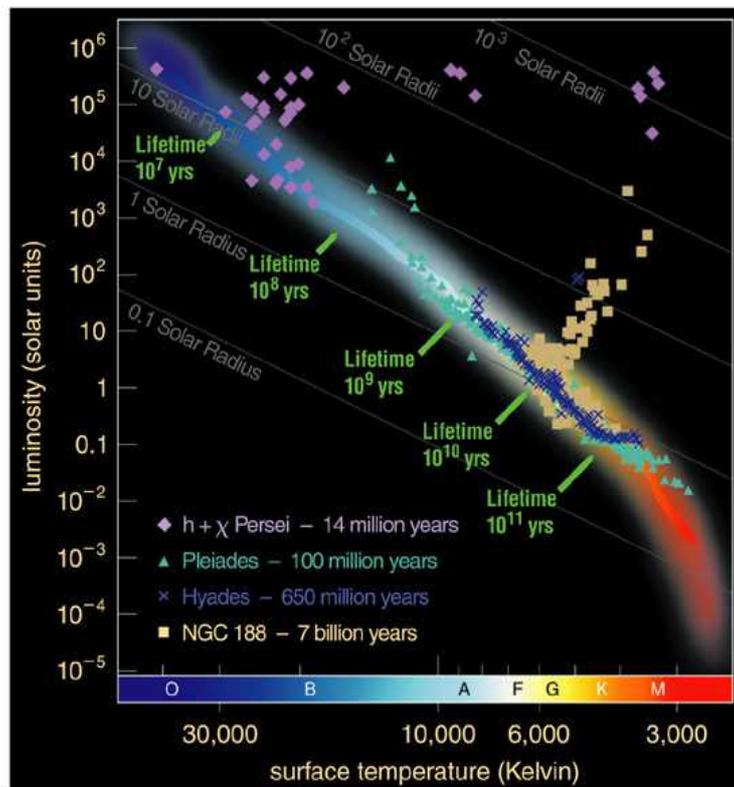


Рисунок 195: Диаграмма Герцшпрунга—Рассела для старого шарового звездного скопления М3. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Globular_cluster



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Рисунок 196: Диаграмма Герцшпрунга—Рассела для Плеяд. С сайта <http://hal.physast.uga.edu/~jss/1020/ch15/ovhd.html>



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Рисунок 197: Сравнение диаграмм Герцшпрунга—Рассела для 4 звездных скоплений разного возраста. С сайта <http://hal.physast.uga.edu/~jss/1020/ch15/ovhd.html>

Зависимость скорости прихода звезды на главную последовательность от массы довольно ожидаема. Действительно, более массивная протозвезда сжимается быстрее, температура и давление в ее глубине растут быстрее, поэтому и условия запуска термоядерной реакции достигаются раньше. Модельные расчёты показывают, что при массе протозвезды в 15 масс Солнца главная последовательность достигается за 100000 лет, а звезда с массой около солнечной — за 10 миллионов лет. В ходе эволюции протозвезд их масса, размер и светимость могут существенно изменяться. Например, модельные расчеты показывают, что через 1000 лет после начала сжатия протозвезда солнечной массы имеет размер в 20 раз больше размера Солнца, а светимость превышает солнечную в 100 раз.

Оказывается, что помимо зависимости скорости эволюции звезды от массы существуют предельные массы для звёзд главной последовательности. Если масса протозвезды меньше, чем 0.08 солнечной, то гравитационное сжатие оказывается не в силах преодолеть давление разогретого газа и создать условия для запуска термоядерной реакции. Такая протозвезда не становится звездой, она остается коричневым карликом, слабо светящимся объектом, источником энергии для которого является только гравитационное сжатие. Массивные протозвезды, с массой более 200 солнечных масс, наоборот, разогреваются слишком быстро и излучение оказывается сильнее гравитации — в результате внешние слои звезды выбрасываются в межзвездное пространство.

Необходимо подчеркнуть, что по астрономическим меркам эволюция протозвезды до прихода на главную последовательность весьма быстротечна. Даже если это потребовало 10 миллионов лет для Солнца, возраст Солнца составляет 4 миллиарда лет. Так что большая часть времени жизни звезды проходит на главной последовательности.

Жизнь звезды на главной последовательности.

Когда звезда достигает главной последовательности, она находится в состоянии равновесия между силами гравитационного сжатия, стремящимися уменьшить ее размер и силами радиационного давления, стремящимися «раздуть» ее. Этот баланс примерно сохраняется до тех пор, пока в ядре звезды идет термоядерная реакция превращения водорода в гелий. При этом происходят небольшие изменения размера и светимости звезды, связанные с изменением ее состава. Расчеты показывают, например, что радиус Солнца увеличился примерно на 6%, а температура поверхности повысилась с 5500К до 5800К за 4.5 миллиарда лет пребывания Солнца на главной последовательности. При этом светимость увеличилась на 40% ($L = 4\pi R^2 \sigma T^4$). Термоядерная реакция горения водорода продолжается, пока есть водород в центре звезды, где давление и температура достаточно высоки.

Доля водорода звезды, которая может быть «сожжена» в этом котле зависит от массы звезды. Для звёзд с массой более примерно 0.4 солнечной температура в центральных областях звезды настолько высока, что основным механизмом переноса энергии является радиационный перенос, а конвекция практически отсутствует. Поэтому перемешивания вещества не возникает и реакции протон-протонной цепочки в ядре останутся, когда весь водород в ядре звезды будет переработан в гелий. В легких звездах (массы меньше 0.4 солнечной) температуры ниже и есть активные конвекционные потоки, захватывающие всю звезду. Поэтому такая звезда (красный карлик) будет гореть, пока не выработается весь водород звезды. Так как светимость звёзд главной последовательности примерно пропорциональна $M^{3.5}$, а запас энергии для термоядерных реакций пропорционален массе, то время жизни на главной последовательности может быть оценено как $t \propto 1/M^{2.5}$,

Примерные времена жизни звёзд на главной последовательности для звёзд разных классов:

Масса (M_{\odot})	Температура поверхности (К)	Спектральный класс	Светимость (L_{\odot})	Ожидаемое время жизни на главной последовательности (млн. лет)
25	35000	O	80000	4
15	30000	B	10000	15
3	11000	A	60	800
1.5	7000	F	5	4500
1	6000	G	1	12000
0.75	5000	K	0.5	25000
0.5	4000	M	0.03	700000

Для звёзд с массой меньше солнечной ожидаемое время жизни на главной последовательности оказывается больше текущего возраста Вселенной, так что никакая из звёзд этого типа еще не завершила свой жизненный цикл. Но более тяжелые звезды успевают прожить свой век. Чем же завершается эволюция звёзд?

Уход с главной последовательности. Умирание звёзд. Сверхновые.

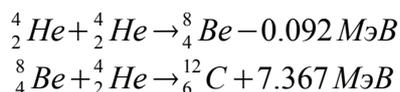
Самая простая эволюция у красных карликов — звёзд малой массы (составляющих около 85% звёзд Млечного пути). В этих звёздах весь водород перерабатывается в гелий, но их масса слишком мала для того, чтобы создать условия (температуру и давление), необходимые для гелиевого цикла термоядерных реакций. Поэтому после сгорания всего водорода термоядерные реакции в таких звездах прекращаются и они должны постепенно остывать. Отметим еще раз, что из-за меньшей интенсивности реакции в легких звездах, ожидаемые сроки жизни красных карликов превышают современный возраст Вселенной.

В более тяжёлых звездах (масса больше примерно 0.4 солнечной) эволюция звезды идет иначе. При выработке всего водорода в ядре звезды, термоядерные реакции в ядре останавливаются. Термоядерные реакции водородного цикла при этом продолжают идти в постепенно расширяющейся оболочке вокруг пока инертного гелиевого ядра. Само ядро при этом должно несколько остыть (так как реакции в нем не идут) и, следовательно, начать сжиматься под действием сил тяготения. Термоядерные реакции, идущие в оболочке ядра перерабатывают водород в гелий, масса гелиевого ядра увеличивается, его сжатие начинает приводить к разогреву, увеличивающему и температуру оболочки и интенсивность реакций в ней. Ускорение реакций приводит к увеличению радиационного давления на внешние слои. Оно оказывается теперь сильнее сил тяготения. И если ранее баланс радиационного давления и сил тяготения определял радиус звезды, то теперь звезда начинает расширяться. При расширении температура внешних слоев несколько уменьшается. Излучение звезды «краснеет», ее радиус увеличивается — звезда превращается в красный гигант. Оценка показывает, что для нашего Солнца на этой стадии развития радиус увеличится до радиуса земной орбиты.

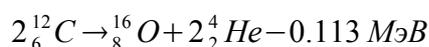
Увеличение размера, уменьшение температуры поверхности и увеличение полной светимости приводит к тому, что увеличивается скорость потери массы в виде «звёздного ветра». Например, являющееся звездой главной последовательности Солнце теряет примерно

10^{-14} своей массы в год, в то время как красный гигант такой же массы теряет 10^{-7} своей массы в год. Этот интенсивный звездный ветер был инструментально зафиксирован по доплеровскому сдвигу горячих газов, исходящих от звезды.

Сжатие и разогрев ядра приводят к тому, что в нем становится возможным дальнейший термоядерный синтез: два ядра гелия-4 могут объединиться в нестабильный изотоп бериллий-8, который, объединяясь с еще одним ядром гелия-4, образует стабильный углерод-12:



который, в свою очередь, может образовать кислород-16.



Подчеркнём, что таким образом получают два стабильных и необходимых для образования биологических систем изотопа: кислород, которым мы дышим, и углерод, без которого жизнь в нашем понимании невозможна, образовались когда-то в ядрах умирающих звёзд. Конвекционные потоки выносят соединения углерода на поверхность звезды и в спектрах таких старых звёзд видны линии, соответствующие «молекулам» C_2 , CH , CN .



Рисунок 199: Планетарная туманность Эскимос (около 3000 св.лет, созвездие Близнецов). Фотография сделана телескопом "Хаббл" (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Eskimo_Nebula)

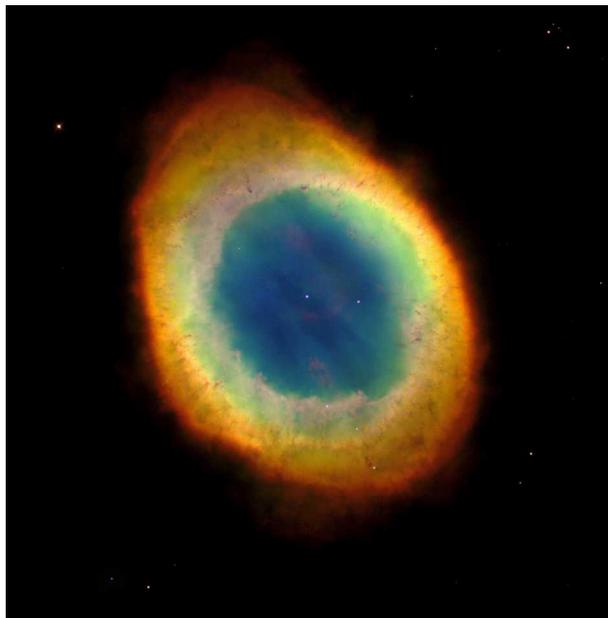


Рисунок 198: Планетарная туманность Кольцо (2-3 тыс. св.лет, созвездие Лиры) Фотография сделана телескопом «Хаббл». (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Ring_Nebula)

На этих стадиях развития звезда продолжает терять свою массу за счет интенсивного звездного ветра, интенсивность потери массы даже возрастает и доходит до 10^{-4} своей массы в год. Звезды относительно небольшой массы (до 4 солнечных) быстро теряют таким образом все внешние слои, которые образуют характерную планетарную туманность

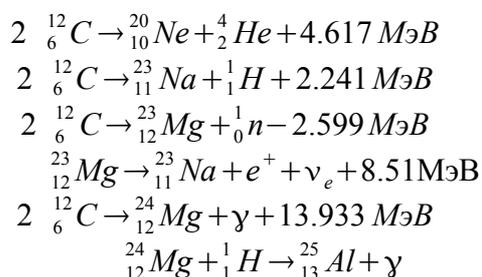
(рисунки 199, 198) вокруг остающегося ядра звезды. По оценкам астрономов, планетарные туманности весьма распространены — только в нашей Галактике их от 20 до 50 тысяч. В остающемся от звезды горячем ядре с выгоранием гелия прекращаются термоядерные реакции и оно начинает остывать. Такая звезда называется белым карликом. Интересно отметить, что белый карлик — это фактически очень плотное ядро умершей звезды.

Белый карлик с массой равной солнечной имеет размер сравнимый с размером Земли. Размер белого карлика определяется конкуренцией гравитационного сжатия и, неожиданно, квантового эффекта — запрета Паули. По этому фундаментальному принципу две элементарных частицы, относящихся к классу фермионов (в частности, электроны) не могут находиться в одном квантовомеханическом состоянии. В частности, электроны с одним импульсом и проекцией спина не могут находиться в одной точке пространства. Этот запрет проявляется в заполнении электронных орбит в атоме, что изучается в химии и физике. В звёздах он приводит к тому, что возникает очень сильное давление, связанное с запретом Паули, препятствующее дальнейшему уменьшению размера звезды. Состояние белого карлика может реализовываться только если масса остатка звезды не превышает примерно 1.4 солнечной (так называемый предел Чандрасекара).

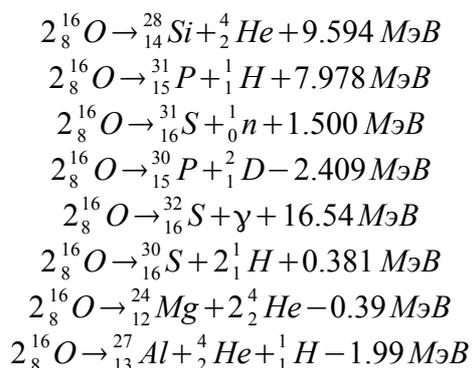
В более массивных звездах (от 4 солнечных масс и выше), давление в центре звезды оказывается настолько велико, что по окончании гелиевого горения оказывается возможным запустить в ядре дальнейшие реакции: углеродного, неоновомго, кислородного и кремниевого горения.

Приведем здесь для сведения основные реакции этих этапов:

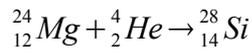
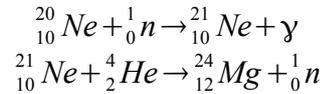
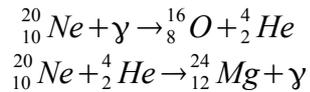
- углеродное горение



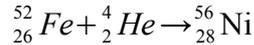
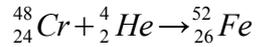
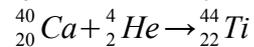
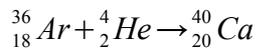
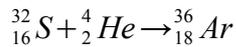
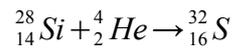
- кислородное горение



- неоновое горение



- кремниевое горение



Конечным продуктом кремниевого горения является никель-56, который через цепочку распадов (${}_{28}^{56}\text{Ni} \rightarrow (6 \text{ дней}) \rightarrow {}_{27}^{56}\text{Co} + e^+$, ${}_{27}^{56}\text{Co} + e \rightarrow (77 \text{ дней}) \rightarrow {}_{26}^{56}\text{Fe}$) преобразуется в железо-56. Дальнейший термоядерный синтез невозможен: для прохождения синтеза необходимо выделение энергии, а дальнейшее увеличение массы атома требует затрат энергии. Поэтому, если звезда достаточно массивна чтобы запустить кремниевый цикл реакций, после его окончания она оказывается «на краю пропасти» - дальнейшие термоядерные реакции невозможны, пропадает источник энергии, обеспечивавший радиационное давление, препятствующее гравитационному сжатию. Ядро начинает очень быстро сжиматься, достигая плотности ядерного вещества. В ходе этого сжатия этом электроны объединяются с протонами, выделяя огромный поток нейтрино: $e + p \rightarrow n + \nu_e$. Окружающие ядро слои, также начинают «падать» на ядро, разгоняясь до скорости в доли скорости света. Падение этих слоев на поверхность уже несжимаемого (достигшего ядерной плотности) ядра приводит к образованию мощной ударной волны, которая распространяется в обратном направлении к поверхности звезды и срывает внешние слои звезды. При этом оказываются открыты наблюдателю горячие внутренние области звезды и светимость звезды резко увеличивается - происходит явление, называемое вспышкой сверхновой. Остаток звезды образует нейтронную звезду, ее плотность сравнима с плотностью ядерного вещества: звезда массой в 2-3 солнечных имеет радиус 10-20 километров. От дальнейшего сжатия эту звезду также удерживает квантовомеханический запрет Паули, так как нейтроны тоже являются фермионами. У этого состояния также есть предел устойчивости по массе, примерно равный 2.1 солнечной.

Отметим, что есть несколько других сценариев взрыва сверхновой, реализующихся в бинарных звездных системах, одним из компонент которых является белый карлик. Захват вещества от звезды-компаньона может приводить к нестабильности белого карлика, масса которого не может превышать примерно 1.4 солнечной. Либо наоборот, потеряв часть своих внешних слоев более массивная звезда пары испытывает коллапс ядра, подобно вышеописанному.

Эволюция звёзд после ухода с главной последовательности относительно скоротечна. Для нашего Солнца время жизни на главной последовательности оценивается в 12 миллиардов лет (сейчас возраст Солнца 4.5 миллиарда лет), потом в течение примерно 300-400 миллионов лет Солнце проживает жизнь красного гиганта, далее за 50 тысяч лет теряет свои внешние слои с образованием планетарной туманности и становится белым карликом. Для звезды с массой в 25 солнечных время жизни на главной последовательности 7 миллионов лет, этап гелиевого горения длится 700 тысяч лет, этап углеродного горения 600 лет, неоновое горение 1 год, кислородное - 6 месяцев, кремниевое - 1 день, а время коллапса ядра, формирования ударной волны и взрыва сверхновой измеряется секундами.

Взрывы сверхновой являются достаточно регулярным явлением. Яркие, видимые невооруженным глазом сверхновые наблюдались несколько раз за историю. Причем некоторые из них можно было наблюдать и днем: SN185 -8^m , SN1006 -7.5^m , SN1054 -6^m , SN1572 -4^m . С привлечением телескопов с 2002 по 2008 год было зафиксировано 8 вспышек с видимой величиной $+14^m \dots +18^m$ (рисунки 200, 201).

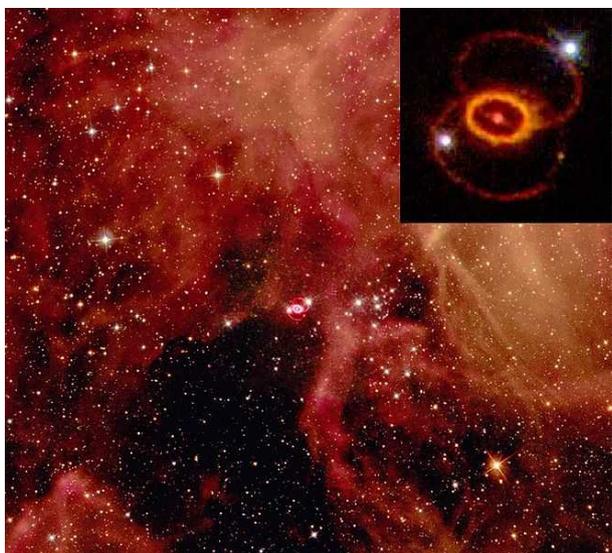


Рисунок 200: Остатки сверхновой 1987 года. Расстояние до Земли 51.4 кпк. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/SN_1987A)

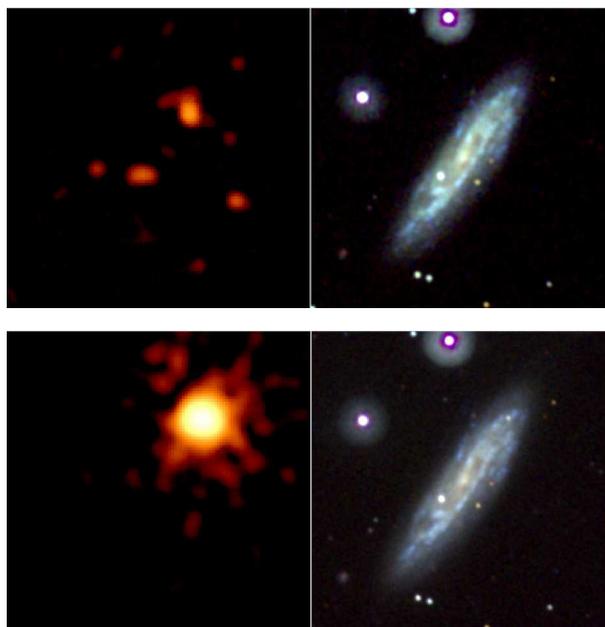


Рисунок 201: Вспышка сверхновой 2008 года. Фотография сверху - до вспышки, снизу - в момент вспышки. Левое изображение - рентгеновский диапазон, правое - в видимом свете. Фотографии получены зондом НАСА "Свифт" (с сайта http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/toastory/2008/swift_supernova.html)

Некоторые выделенные виды звёзд.

Переменные звёзды.

В описании эволюции звёзд мы часто говорили (или подразумевали), что звезда пребывает в некотором равновесии: термоядерная реакция в ядре производит энергию, радиационное давление уравнивает гравитационные силы. Кратковременных изменений размера и светимости звезды в таких предположениях нет. Долговременная эволюция звёзд связана как раз с изменением этого равновесного состояния, в основном связанным с запуском или прекращением термоядерных реакций.

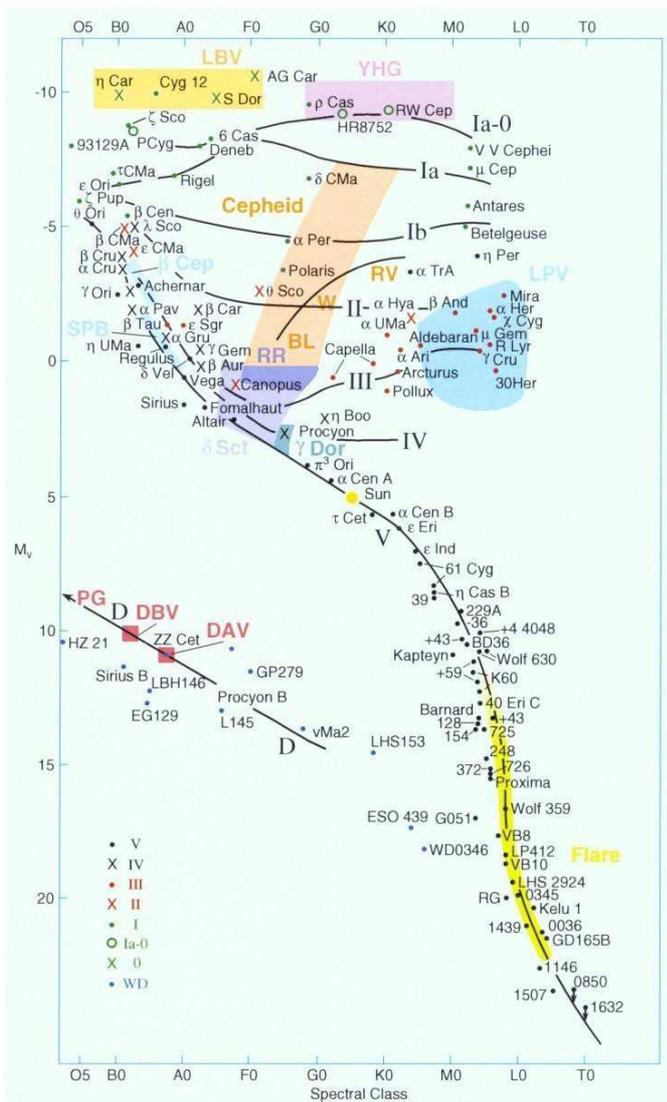


Рисунок 202: Положение переменных звёзд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела (с сайта <http://stars.astro.illinois.edu/sow/hrd.html>)

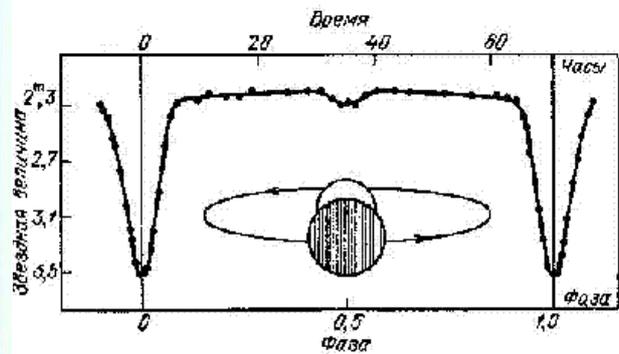


Рисунок 203: Зависимость звездной величины Алголя от времени. (с сайта <http://sd555.mylivepage.ru/wiki/1326/345>)

Однако наблюдения показывают, что существуют и какие-то кратковременные процессы. Они проявляются для наблюдателя в периодическом изменении яркости. Даже светимость Солнца меняется с амплитудой около 0.1% с 11 летним циклом. Существует несколько типов переменных звёзд (рисунок 202), о каждом из которых можно говорить отдельно, и с каждым из которых связана своя физика. Отметим несколько из них.

1. Переменные типа Алголя (эклиптирующие переменные, затменные переменные). Это наиболее понятный тип переменных звёзд. Звезда Алголь (β Персея), известная в фольклоре как «звезда демон» или «звезда чудовище», меняет свою яркость с периодом 2.87 суток. Основное время Алголь виден как звезда со звездной величиной 2.06, но в течение 5 часов яркость резко уменьшается и звездная величина становится равной 3.28 (рисунок 203). Кроме этого есть небольшой минимум на половине периода. Такие переменные звезды на самом деле являются системами нескольких неразличимых близких звёзд. Если плоскость вращения звёзд ориентирована «ребром» к земному наблюдателю, наблюдатель видит колебания яркости. Когда менее яркая звезда проходит перед более яркой, происходит «затмение» и яркость уменьшается. Когда обе звезды не перекрываются, мы видим суммарную яркость. Когда менее яркая звезда уходит за яркую, опять возникает затмение, но его амплитуда меньше. Период колебания яркости затменных переменных звёзд составляет от 3.5 часов до 27 лет. Характерной чертой такой переменной является резкое уменьшение яркости и столь же резкое восстановление. В каталоге переменных звёзд 2003 года содержится около 3500 переменных типа Алголя, что составляет около 9% от общего числа переменных звёзд.
2. Переменные типа Миры. Звезда Мира (Омикрон Кита) меняет свою яркость с периодом 332 дня (примерно 11 месяцев). Звёзды с таким большим периодом называют также длинопериодными переменными. Яркость в максимуме достигает 2.0^m а в минимуме падает до 10.1^m: то есть от довольно яркой и видимой невооруженным глазом звезды до звезды, видимой не во всякий любительский телескоп. Типичные представители этого класса являются красными гигантами, период колебаний типично больше 100 дней, а колебания яркости превышают одну звездную величину. Причина этих колебаний не ясна. Предположительно, это связано с циклическими колебаниями радиуса и температуры звезды. При сжатии звезда разогревается. Разогрев внутренних областей звезды приводит к увеличению радиационного давления, а в некоторых случаях и вспышкой термоядерной реакции в оболочке вокруг ядра. Когда радиационное давление превосходит гравитационные силы, начинается расширение и охлаждение звезды. Всего известно несколько тысяч звёзд этого класса.

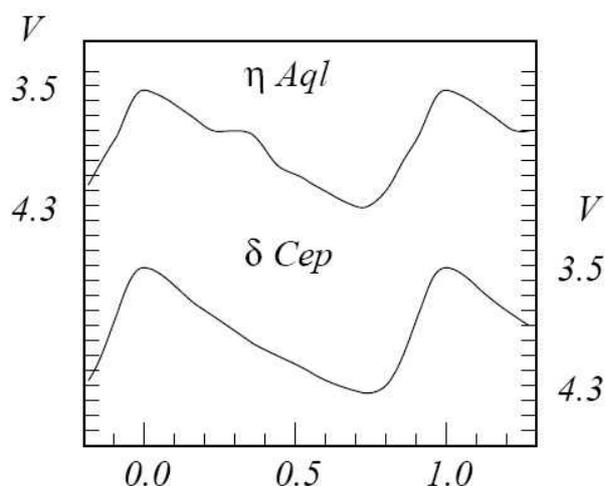


Рисунок 205: Кривые блеска цефеид Эта Орла (сверху) и Дельта Цефея (снизу). По оси абсцисс отложена фаза колебаний (нормированная на период колебаний). (с сайта <http://www.astronet.ru/db/msg/1212392>)

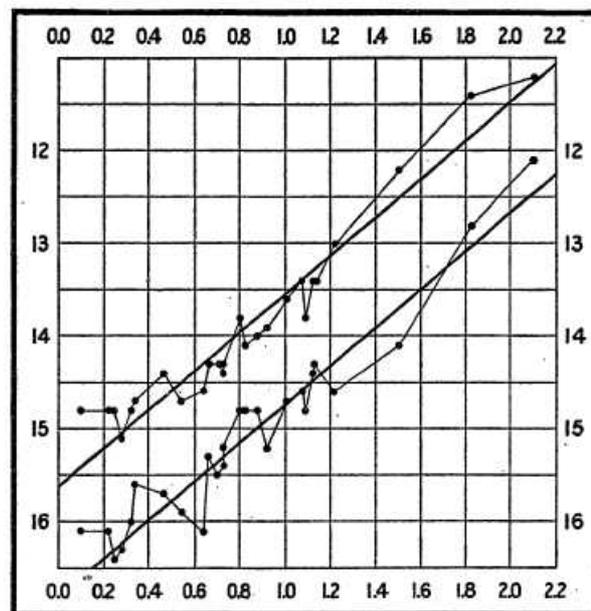


Рисунок 204: Зависимость период-светимость для цефеид Малого Магелланова облака (из работы Ливитт, 1912). По оси абсцисс - логарифм периода, по оси ординат - видимая звездная величина. Верхняя кривая — цефеиды типа I, нижняя — типа II. (с сайта <http://www.astronet.ru/db/msg/1212392>)

3. Цефеиды. Важный класс переменных звёзд назван в честь первой звезды такого типа: Дельты Цефея (рисунок 205). Полярная звезда также является переменной этого класса. Колебания яркости Дельты Цефея происходят от звездной величины 3.6 до 4.3, они происходят с быстрым нарастанием яркости и плавным спаданием. Период колебаний составляет для Дельта Цефея 5.4 дня. При этом спектральный класс звезды меняется в ходе цикла от G2 в минимуме (как у Солнца) до F5 в максимуме. В отличие от красных гигантов — переменных типа Миры, цефеиды являются более горячими желтыми гигантами с типичной массой 3-12 солнечной. Колебания яркости цефеид связаны с изменением их радиуса и температуры. Изменения радиуса цефеид непосредственно детектировались по эффекту Доплера для некоторых линий поглощения: при расширении звезды ее поверхность приближается к нам и наблюдается синий сдвиг, при сжатии — поверхность удаляется и наблюдается красный сдвиг. Для этих звёзд понятен механизм колебаний. При сжатии звезды и её разогреве формируется слой, в котором гелий оказывается ионизован и непрозрачен для электромагнитного излучения, переносящего энергию от ядра. Этот слой «запирает» излучение внутри звезды, приводит к увеличению радиационного давления и к расширению звезды. При расширении происходит охлаждение, восстанавливается прозрачность звезды и гравитационное сжатие становится сильнее радиационного давления. В соответствии с этим механизмом максимум светимости цефеиды достигается на фазе расширения, когда вырвавшаяся из-под этого «одеяла» энергия разогревает поверхность звезды. Так как и скорость сжатия, и параметры «одеяла» связаны с размером и массой звезды можно ожидать, что период колебаний будет связан с массой (как, например, в механике период колебаний пружинного

маятника связан с массой). Количество вырабатываемой энергии — светимость звезды, также связана с массой. Поэтому не является удивительным, что светимость звезды и период колебаний связаны. Эта связь оказалась довольно простой — степенной (рисунок 204). При этом выделяется две популяции цефеид, соответствующие звездам первого поколения (содержащим тяжелые элементы) и звездам второго поколения. Эти популяции различимы по спектрам. Наличие такой связи между светимостью и периодом позволяет использовать цефеиды для определения расстояний: если измерить период цефеиды, мы можем определить ее полную светимость, измерив видимую звездную величину и зная светимость можно вычислить расстояние. Всего известно около 700 цефеид с периодами от 1 до 70 дней.

Новая звезда.

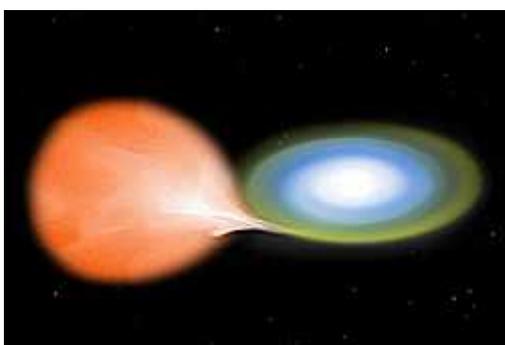


Рисунок 206: Представление художника о формировании новой. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Nova>)

Обсуждая умирание звёзд мы говорили о сверхновой звезде — вспышке, в которой исчезает массивная звезда. Есть другое явление с похожим названием — новая звезда. Это явление тоже связано с возникновением на небе яркой звезды, однако в отличие от сверхновой это не вспышка, а достаточно длительный процесс: снижение яркости на две звездных величины происходит обычно за 20-80 дней.

Новые возникают в системах двойных звёзд, состоящих из не слишком массивных звёзд. Более массивная компонента завершает свое развитие раньше и, если её масса недостаточна для взрыва сверхновой, становится белым карликом. Когда

вторая звезда проходит цикл жизни на главной последовательности, она начинает превращаться в красный гигант и расширяться.

Если обе звезды достаточно близко друг к другу, вещество расширяющейся звезды начинает перетекать на белый карлик (рисунок 206). В некоторых случаях этот процесс может приводить к потере стабильности белого карлика и взрыву сверхновой, для этого масса карлика должна быть достаточно близка к лимиту в 1.4 солнечных массы. Здесь мы этот сценарий не рассматриваем.

Водород, попадающий на горячую поверхность белого карлика сжимается гравитацией — и оказывается в условиях, подходящих для запуска термоядерных реакций. Быстро разгоняющаяся термоядерная реакция приводит к быстрому увеличению температуры и яркости. При этом активно выдувается вещество из окрестности белого карлика и с выгоранием всего водорода вспышка затухает. В отличие от сверхновой, уничтожающей звезду, после вспышки новой звёзды остаются. В принципе, возможно возникновение повторных новых в одной и той же паре (RS Змееносца дает вспышки с периодом примерно 20-30 лет). Некоторые новые во время вспышки видны невооруженным глазом. Например, новая в созвездии Лебедя в августе 1975 года достигала звездной величины 2.0 и оставалась видимой невооруженным глазом примерно неделю, за два года после вспышки звезда потускнела на 12.5 звездных величин. Считается, что в нашей Галактике вспыхивает несколько десятков новых ежегодно.

Нейтронные звезды, пульсары.

Нейтронная звезда образуется после взрыва сверхновой — в момент коллапса ядра достигаются условия при которых протоны захватывают электроны, образуя нейтроны. Теория говорит, что масса нейтронной звезды составляет 1.4-2.1 солнечных, а размер около 10-20 километров. Как наблюдаются такие необычные объекты?

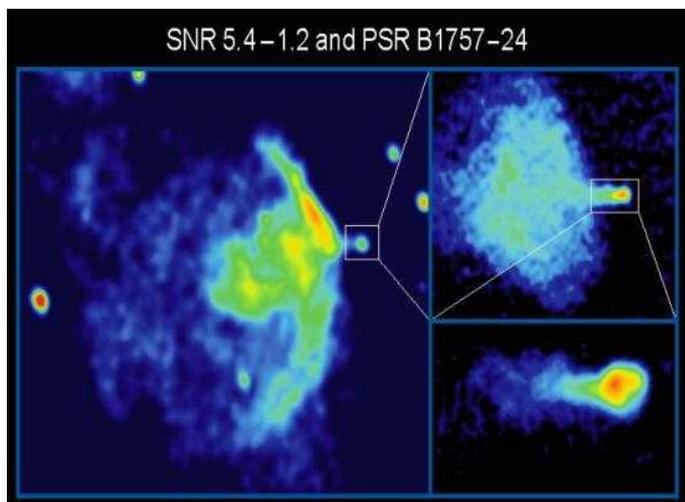


Рисунок 207: Быстро движущийся пульсар PSR 1757-24 и остатки сверхновой, его породившей. Изображение в радиодиапазоне. (с сайта <http://images.nrao.edu/54>)

В 1967 году Джослин Белл Бурнер и Энтони Хэвиш в Кэмбридже обнаружили на небе источник периодических импульсов радиоизлучения. Импульсы этого источника повторялись с регулярностью примерно 1 раз в секунду, так что некоторое время даже полушутливо обсуждалась возможность неестественного происхождения этого сигнала. Временное обозначение этого источника было LGM-1 от «Little Green Men» (маленькие зеленые человечки). Позднее Хэвишу была присуждена Нобелевская премия по физике с формулировкой «в том числе за открытие пульсаров¹». Происхождение такого сигнала не

может быть связано с двойными звездами, так как для периодичности в секунды и менее эти звезды должны быть нереально близко друг к другу.

Связь пульсаров со сверхновыми была установлена чуть позже, когда в 1968 году был обнаружен еще один пульсар в Крабовидной туманности, положение которого совпадало с положением зафиксированной в исторических хрониках сверхновой 1054 года. С того времени сделано много наблюдений, подтверждающих такую связь. Например на рисунке 207 приведено изображение пульсара в созвездии Стрельца PSR1754-24. Из-за какой-то неоднородности в момент взрыва ядро сверхновой было «выстрелено» в сторону со скоростью около 600 км/сек, так что оно обогнало ударную волну, вызванную взрывом.

Пульсары типично имеют периоды импульсов от нескольких секунд до нескольких миллисекунд, пульсации излучения обнаруживаются и в видимом, и в радио, и в рентгеновском диапазонах. При этом спектральный состав излучения совершенно не соответствует спектру чёрного тела.

Маленький период пульсаций соответствует маленькому ожидаемому периоду вращения нейтронной звезды. По закону сохранения момента импульса при коллапсе ядра должна увеличиваться скорость его вращения (момент инерции уменьшается при уменьшении радиуса). При формировании нейтронной звезды ожидается также, что магнитное поле сжавшейся звезды окажется гораздо сильнее поля исходной звезды и достигнет величин $10^8 - 10^{11}$ Т. В результате, заряженные частицы плазмы (остатки звезды, или вещество звезды-компаньона в бинарной системе) движутся по спирали вокруг силовых линий, собираясь к магнитным полюсам нейтронной звезды. Тут действует та же физика, что

¹ Слово «пульсар» происходит от английского pulsar = pulsating star, «пульсирующая звезда».

заставляет частицы солнечного ветра дрейфовать к магнитным полюсам Земли и вызывает полярные сияния. Вблизи полюсов ионы и электроны движутся по очень сильно сжатым спиральям. Такое движение ускоренное, поэтому заряженные частицы должны излучать. Дополнительной особенностью такого (называемого синхротронным) излучения является его четкая пространственная направленность в направлении прямой, соединяющей магнитные полюса. Если магнитная ось не совпадает с осью вращения (а нет никаких причин для такого совпадения, примером чего является наша Земля), то из-за быстрого вращения звезды пучок излучения также быстро вращается, и когда он попадает на наблюдателя — наблюдатель видит вспышку. Так как излучение уносит энергию, источником которой является вращение звезды, период пульсаров медленно увеличивается, что наблюдалось экспериментально.

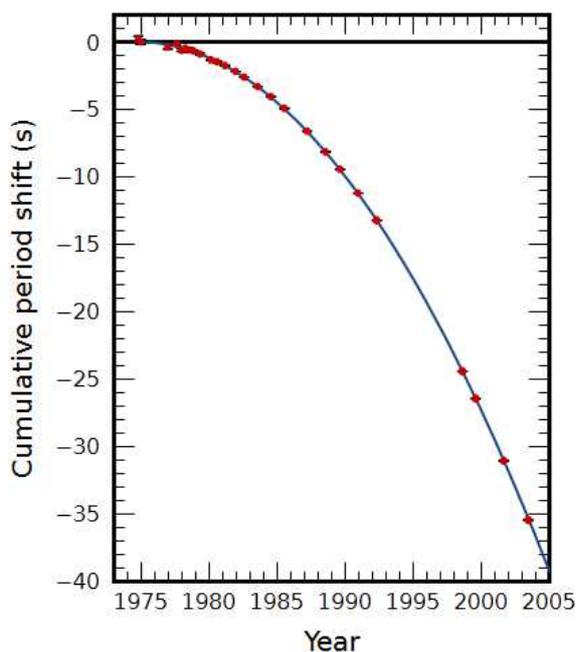


Рисунок 208: Изменение периода орбитального движения пульсара в системе двойной звезды PSR B1913+16. С сайта

http://en.wikipedia.org/wiki/PSR_B1913+16

ускоренно движущийся заряд). Это должно приводить к потере энергии и к уменьшению периода орбитального движения. Пара массивных, близко расположенных звёзд является идеальным объектом для проверки этого предположения. И действительно, наблюдается изменение периода, находящееся в точном соответствии с предсказаниями теории относительности (рисунок 208).

Таким образом, модель нейтронной звезды позволяет описать характерные свойства пульсаров: связь со сверхновыми, малый период повторения, необычный спектральный состав.

В настоящий момент обнаружено около 2000 нейтронных звёзд в Млечном пути и Магеллановых облаках.

С пульсарами связана еще одна Нобелевская премия (1993, Халс и Тэйлор). В 1973 году в созвездии Орла была обнаружена двойная система нейтронных звёзд PSR B1913+16. Одна из звёзд этой бинарной системы является пульсаром с периодом 59 миллисекунд. В излучении были отмечены модуляции периода с периодом 7.75 часа, свидетельствующие об орбитальном движении вокруг другой звезды. Согласно общей теории относительности, ускоренно движущаяся масса должна излучать гравитационные волны (в не точной аналогии с тем, как излучает электромагнитные волны

Чёрные дыры.

Если масса остатков звезды достаточно велика (от примерно 3-5 солнечных масс и выше), то начинают сказываться эффекты общей теории относительности, из-за которых эта звезда превращается в черную дыру — своеобразный, необычный и сильно мифологизированный объект. Об этом мы поговорим чуть подробнее, в интересах же этой секции отметим еще раз, что чёрная дыра является конечным этапом эволюции массивных звёзд (хотя это и не единственный способ образования черных дыр в астрофизических процессах).

Чёрные дыры с некоторыми подробностями.

Гравитация и общая теория относительности.

С понятием гравитации мы уже сталкивались при обсуждении законов небесной механики. При этом нам было достаточно классического представления о силе тяготения, как некоторой силе, связанной с массой тела и зависящей (для точечного тела) от расстояния по закону обратных квадратов. Этот классический подход хорошо работает при малых скоростях и малой напряжённости гравитационного поля. Однако, при рассмотрении сильных гравитационных полей оказывается необходимым учитывать эффекты общей теории относительности, выходящие за рамки ньютоновской теории гравитации. При обсуждении этих эффектов необходимо понимать, что в рамках данного курса мы принципиально не в состоянии дать сколь либо строгое их рассмотрение. Строгое обсуждение общей теории относительности требует владения достаточно своеобразным математическим аппаратом и, кроме того, практики работы в неевклидовой геометрии. При этом выводы теории кажутся порой противоречащими нашему «здравому смыслу» и вызывают «интуитивное» неприятие, что, конечно же, отражает лишь ограниченность нашего повседневного жизненного опыта, служащего основой для формирования «здравого смысла». Красивые же геометрические аналогии оказываются достаточно условны — так как оперировать их результатами можно лишь зная, насколько строгими эти аналогии. Таким образом, не владея строгим знанием об этой области, следует крайне осторожно подходить к попыткам «популярно объяснить» что-либо, и следует всегда помнить высказывание, приписываемое Л.Д.Ландау: «Человеческий разум в состоянии понять то, чего не в силах вообразить».

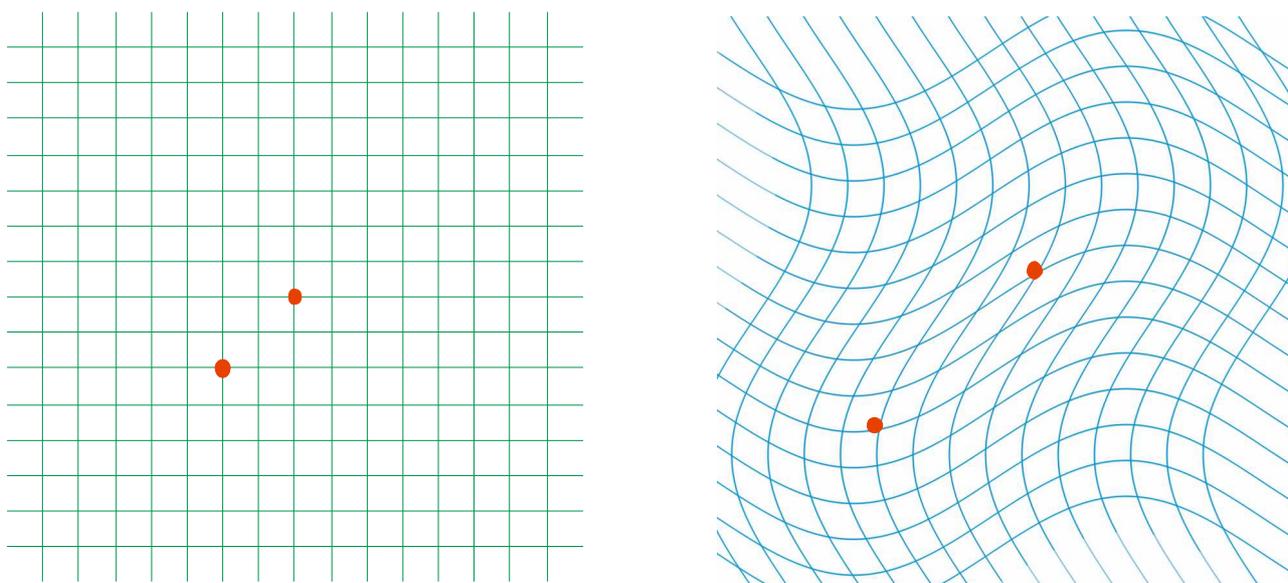


Рисунок 209: Искажение двумерной пленки приводит к изменению локальных координат и изменению расстояния между точками с теми же координатами.

Специальная теория относительности Эйнштейна рассматривала специальный случай однородного пространства-времени. Общая теория относительности рассматривает произвольно искажённое пространство-время. Концепция искажения пространства-времени для непривычного человека звучит странно. Наш «житейский опыт» подсказывает нам, что об искажениях чего-либо можно говорить только по отношению к абстрактному «абсолютному» пространству. Например, изгибая лист бумаги, мы искажаем его в пространстве. Искажения, о которых идет речь, можно проиллюстрировать примером резиновой плоской пленки (рисунок 209), которая неоднородно растягивается, оставаясь плоской. Если до деформации нанести на пленку координатную сетку, ячейки этой сетки исказятся. И если в недеформированных районах локальные системы координат останутся декартовыми, в деформированных районах они станут какими-то другими (не обязательно ортогональными, с необязательно равными базисными векторами). Таким образом, расстояния между точками, координаты которых в локальных системах координат отличаются на dx и dy будут разными в деформированных и недеформированных районах пленки. В недеформированных областях по теореме Пифагора $(dl)^2 = (dx)^2 + (dy)^2$, в деформированных эта связь имеет общий вид $(dl)^2 = a_{11}(dx)^2 + (a_{12} + a_{21})dx dy + a_{22}(dy)^2$. Коэффициенты a_{ij} определяют локальную метрику пространства, они доступны для измерения — достаточно измерить координаты двух близких точек в локальной системе координат и измерить расстояние между точками.

В специальной теории относительности вводится понятие интервала между событиями $ds^2 = c^2(dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2$. Важно, что этот интервал является инвариантом относительно преобразований Лоренца¹ — то есть при переходе из одной инерциальной системы в другую он не изменяется. По виду он похож на выписанный выше элемент длины на плоскости, определяемый теоремой Пифагора, но временная координата входит с другим знаком. Такая геометрия соответствует так называемому пространству Минковского. Подчеркнем еще раз, что для физиков понятие интервала важно в силу его инвариантности

¹ Автор предполагает, что читатель уже сталкивался с преобразованиями Лоренца: преобразованиями координат, скоростей и интервала времени, возникающими в специальной теории относительности. Нам для нашего обзорного рассуждения не требуется четкое владение этим формализмом.

при преобразованиях Лоренца. Пространственный элемент длины dl является инвариантом только для нерелятивистских преобразований Галилея. Искажение пространства-времени означает, что интервал между близкими событиями непредставим более в таком простом виде — изменяется локальная метрика пространства. При этом метрика описывается матрицей 4×4 , в которой часть элементов совпадают, но 10 элементов могут быть разными (в двумерном геометрическом примере выше метрика представима в виде матрицы 2×2 с 3 независимыми параметрами так как $a_{12} = a_{21}$). Описание неоднородности пространства-времени — это описание изменения метрики в пространстве-времени.

Одним из основных утверждений общей теории относительности является принцип эквивалентности — утверждение о принципиальной неразличимости сил гравитации и сил инерции. В частности, это означает абсолютное равенство гравитационной и инертной масс.

Принцип эквивалентности позволяет проиллюстрировать измерение метрики пространства под действием сил гравитации. Рассмотрим для иллюстрации неподвижную систему координат K и неинерциальную систему координат K' , равномерно вращающуюся вокруг некоторой точки O . Построим окружность вокруг точки O и измерим при помощи линейки радиус окружности и длину окружности в неподвижной системе K . Естественно, получим для длины окружности значение $2\pi R$. Понаблюдаем теперь из системы K , как производится измерение длины окружности линейкой, покоящейся в системе K' . При измерении радиуса линейка приложена перпендикулярно к скорости и сокращения длины нет. При измерении длины окружности линейка движется и возникает лоренцево сокращение длины. В результате, соотношение диаметра и длины окружности отлично от π ! Это можно описать как некоторое изменение метрики. А тогда, в силу эквивалентности сил инерции во вращающейся системе координат и сил тяготения, и гравитационные поля описываются, как некоторые искажения метрики. Это и есть то, что часто называют гравитационным искривлением пространства.

Отметим, что несмотря на кажущуюся простоту формулировки задачи, математически задача оказывается очень сложной. Например, задачу двух тел с учётом эффектов общей теории относительности (реализующуюся, например, в системах похожих на двойные звезды — двойных черных дырах) удалось численно решать только относительно недавно (Reviews of Modern Physics **82**, 3069 (2010)).

Некоторые предсказания и экспериментальные проверки общей теории относительности.

1. Искривление хода световых лучей. Свет распространяется по прямой. Точнее, по принципу Ферма, свет распространяется от источника к наблюдателю по пути, требующему минимального времени. В однородном пространстве, таким путем является геометрическая прямая. Если же на пути светового луча оказывается область пространства с искаженной метрикой — происходит отклонение светового луча. Такое отклонение луча далекой звезды в гравитационном поле Солнца было обнаружено в 1919 году во время полного затмения, когда удалось обнаружить звезду, которая нормально должна бы быть скрыта на $1.75''$ за диском Солнца. На этом же эффекте основано использование «гравитационных линз» - массивный объект искажает ход лучей от более далеких объектов, что, в удачных случаях, приводит к усилению яркости далеких объектов. Эффект «гравитационной линзы» наблюдался многократно в астрономических наблюдениях.

2. Прецессия орбиты Меркурия. Общая теория относительности дала полное описание прецессии перигелия Меркурия на 43" в столетие.
3. Гравитационное замедление времени и гравитационное красное смещение. Из-за искажения пространства-времени локальные часы в точках с разным значением гравитационного потенциала идут с разной скоростью. В слабом гравитационном поле этот эффект описывается как $\tau = \tau_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right)$, где $\Phi = -G \frac{M}{r}$ - потенциал гравитационного поля. То есть, часы на поверхности тяготеющего тела идут медленнее, чем часы вдали от него. Этот эффект наблюдается непосредственно — из-за него часы на спутниках системы GPS идут на 38 мксек в сутки быстрее наземных (эффект общей теории относительности 45 мксек/сутки, частично компенсируется лоренцевым сокращением на 7 мксек/сутки). Кроме того, из-за этого же эффекта луч света, распространяющийся от тяготеющего тела меняет свой цвет: при удалении от тела период колебаний («скорость хода» локальных часов) увеличивается, а цвет испытывает красное смещение. Этот эффект наблюдался как в астрономии (смещение спектральных линий массивных звёзд, например для белого карлика Сириуса-B он составляет $\Delta \lambda / \lambda = 3.0 \cdot 10^{-4}$), так и в лаборатории (смещение в гравитационном поле Земли на пути в 20 метров в опытах Паунда и Ребки (1960) составляет $\Delta \lambda / \lambda = 2.5 \cdot 10^{-15}$).
4. Гравитационные волны. Одно из предсказаний общей теории относительности — это существование гравитационных волн, волн искажения геометрии пространства. Астрономическим доказательством излучения гравитационных волн является уже упоминавшаяся система близких нейтронных звёзд Халса и Тэйлора. Ожидаемым источником сильных гравитационных волн являются двойные системы чёрных дыр. Лабораторное обнаружение гравитационных волн пока не осуществлено, но в этом направлении ведутся активные исследования.

Возможность существования не излучающих массивных объектов — чёрных дыр.

Как мы уже сказали, общая теория относительности предсказывает изменение скорости хода локальных часов. В слабых гравитационных полях связь локальных интервалов времени задается выражением $\tau = \tau_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right)$. Видно, что так как $\Phi = -G \frac{M}{r} < 0$, то выражение в скобках может обратиться в ноль на некотором расстоянии от точечного тяготеющего тела. В терминах гравитационного красного смещения это означает, что луч света, распространяющийся с этого расстояния от тела на бесконечности должен иметь нулевую частоту. Другими словами, начиная с некоторого расстояния от точечного тяготеющего тела, свет не может убежать на бесконечность.

Это расстояние, называемое радиусом Шварцшильда определяется уравнением $r = \frac{2GM}{c^2}$

(множитель 2 возникает в точном рассмотрении задачи, более ранние формулы получены в приближении слабого поля, конечно же неверном в таких условиях). Для массы, равной массе Солнца, радиус Шварцшильда равен 3 километрам.

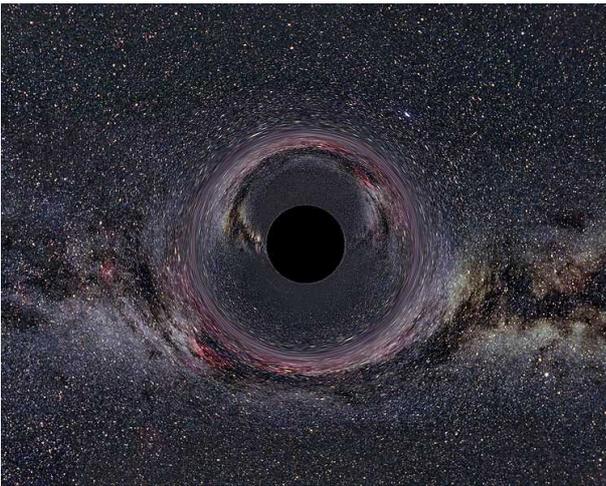


Рисунок 210: Симуляция чёрной дыры с массой, равной 10 солнечным, наблюдаемой с расстояния 600 км с Млечным Путём на заднем плане. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity

Таким образом, если некий объект окажется достаточно сжат, чтобы оказаться внутри своего радиуса Шварцшильда, никакая информация от этого объекта не может выйти во внешнее пространство, а всякий внешний объект или луч света, пересекший некоторую черту, называемую *горизонтом событий*, не может более выйти во внешнее пространство. Однако, несмотря на то, что сама чёрная дыра не излучает ничего, она влияет на окружающие объекты. Чёрная дыра оказывает гравитационное воздействие на другие тела, причем на достаточно большом расстоянии (порядка 10 радиусов Шварцшильда) это воздействие ничем не отличается от гравитационного поля «нормального» объекта той же массы. Кроме этого, ускоряющееся при падении в

чёрную дыру вещество может являться источником характерного излучения, что позволяет обнаруживать такие объекты. Интересно отметить, что для наблюдателя на бесконечности падение пробного тела к чёрной дыре будет длиться бесконечно долго, так как при приближении к горизонту событий малый интервал времени для падающего тела является большим интервалом для внешнего наблюдателя.

Для внешнего наблюдателя чёрная дыра оказывается при этом объектом может даже более простым, чем обычная звезда. У чёрной дыры есть всего три характеристики: ее масса, момент вращения и электрический заряд. Причём заряд в большинстве случаев можно считать скомпенсированным.

Внутреннее устройство чёрной дыры нашему наблюдению в принципе недоступно. Теоретическая модель предсказывает, что в невращающихся черных дырах в центре находится точечная сингулярность, содержащая всю массу чёрной дыры. Всякий объект, пересекший горизонт событий оказывается поглощен сингулярностью. Во вращающихся черных дырах сингулярность имеет форму кольца. Теоретически, у объекта, пересекшего горизонт событий вращающейся чёрной дыры, есть возможность избежать сингулярности. С этим связана гипотетическая возможность связи двух черных дыр через «червоточину» в пространстве. Однако другие теории полагают, что учет квантовых эффектов гравитации должен быть необходим при рассмотрении сингулярностей, и ожидают что квантовое рассмотрение запретит возникновение «червоточин». Подчеркнем еще раз, что внутренность чёрной дыры нашему наблюдению недоступна. Поэтому, несмотря на их «раздутость» в прессе к теориям о «червоточинах» и связанных с этим возможностях перемещения в пространстве и во времени стоит относиться осторожно, предоставив пока физикам развивать эти теории и выяснять их справедливость.

Классификация черных дыр и их наблюдение.

Существует несколько способов формирования черных дыр. Для возникновения чёрной дыры необходимо, чтобы вся масса тяготеющего объекта оказалась внутри радиуса Шварцшильда. Такое возможно для достаточно массивных нейтронных звёзд, образующихся в результате завершения эволюции тяжелых звёзд. Расчёты показывают, что критическая

масса для формирования чёрной дыры из нейтронной звезды равна примерно 3 массам Солнца. Такие черные дыры с массой в 3-10-100 солнечных называют черными дырами звездной массы.

Предполагается, что на ранних этапах развития Вселенной вещество было более плотным. Соответственно, могли формироваться звезды большего размера. Эти звезды могли дать рождение чёрным дырам промежуточной массы с массой порядка 1000 солнечных.

В центрах галактик обнаруживаются сверхмассивные чёрные дыры с массой в $10^5 - 10^9$ солнечной.

Наконец, в момент Большого взрыва могли возникать микро-чёрные дыры с почти произвольной массой. В частности, некоторые теории предсказывают возможность возникновения черных дыр с микромассой в результате высокоэнергетичных столкновений частиц в ускорителях. Для таких, легких черных дыр, однако, существенную роль играет процесс испарения, предсказанный в 1974 году Стивеном Хокингом. Эффект испарения

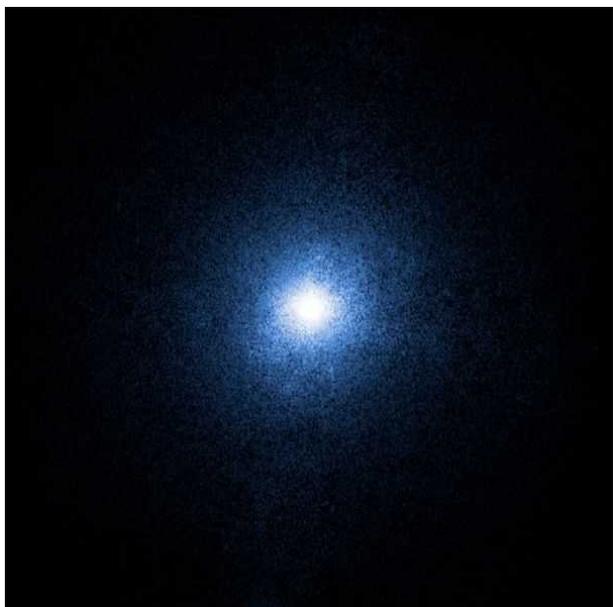


Рисунок 211: Изображение рентгеновского источника Лебедь X-1, полученное орбитальной обсерваторией "Чандра" (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_X-1)

связан с возможностью образования виртуальных электрон-позитронных пар в электромагнитном поле. Если такая пара образуется на границе горизонта событий, одна из частиц будет поглощена чёрной дырой, а другая может уйти на бесконечность, унося с собой часть энергии. Расчеты показывают, что микро-дыра с массой меньше массы Луны теряет таким образом больше энергии, чем поглощает за счёт реликтового излучения. Следовательно, такие микро-дыры нестабильны на астрономических масштабах времени. Для микро-дыр с массами «человеческого» масштаба времена испарения оказываются очень малы. Микро-дыра массой в тонну испаряется за наносекунду, микро-дыра с энергией 1ТэВ — за 10^{-88} секунды. Таким образом, можно ожидать существование реликтовых легких чёрных дыр с массой больше лунной, но все страхи о получении чёрной дыры в Большом

адронном коллайдере безосновательны.

Экспериментальных наблюдений, подтверждающих существование реликтовых лёгких чёрных дыр нет. Такими доказательствами могли бы быть сильные вспышки излучения в последние моменты испарения таких чёрных дыр, однако их пока не зафиксировано.

Доказательством того, что некоторый объект является чёрной дырой, часто является излучение от частиц вещества, падающих на черную дыру по спиральной траектории. Такие частицы должны формировать диск вокруг чёрной дыры, называемый аккреационным диском. Вблизи горизонта событий частички вещества аккреационного диска настолько разогреваются трением, что становятся источником интенсивного рентгеновского излучения. Источником вещества для формирования аккреационного диска иногда является вторая

звезда бинарной системы. В этом случае анализ движения «обычной» звезды этой бинарной системы позволяет определить и массу чёрной дыры.

Примером такого объекта, вероятно являющегося чёрной дырой является Лебедь X-1, являющийся одним из самых ярких источников рентгеновского излучения на звёздном небе (рисунок 211). Эта звезда входит в состав двойной системы, вторым компонентом которой является голубой сверхгигант с переменным блеском HDE226868. Бинарная система находится на расстоянии около 6000 световых лет от Земли. Анализ данных показывает, что расстояние между звездами системы составляет 0.2 а.е., а период обращения, определённый по колебаниям доплеровского сдвига спектральных линий яркой звезды, составляет 5.6 дня. Масса невидимой компоненты системы оценивается в 7-8 солнечных (текущая оценка 8.7 солнечных масс), что по современным представлениям превосходит максимально возможную массу нейтронной звезды. Интенсивность рентгеновского излучения испытывает пульсации с различными временными масштабами, вплоть до миллисекунд. Наличие миллисекундных пульсаций означает, что размер источника этого излучения составляет около 300 км (из-за конечности скорости света никакой объект не может быть источником пульсаций на временном масштабе меньше, чем требуется свету для пересечения этого объекта).

Обнаружены ещё несколько систем двойных звёзд, одной из компонент которых вероятно являются чёрные дыры: Лебедь V404, предположительно содержит чёрную дыру массой 7-15 солнечных и звезду спектрального класса G или K примерно солнечной массы; A0620-00 в созвездии Единорога содержит, предположительно, чёрную дыру массой 10-12 солнечных и звезду спектрального класса K с массой в 1.5 солнечной. Характерными признаками таких кандидатов в чёрные дыры является, повторим, наличие рентгеновского излучения от достаточно массивной, невидимой в других диапазонах, компоненты бинарной системы близко расположенных звёзд.

Чёрная дыра в двойной системе не обязательно формируется из массивной звезды: существуют сценарии, когда белый карлик или нейтронная звезда набирают достаточную массу путем поглощения вещества от второй звезды.

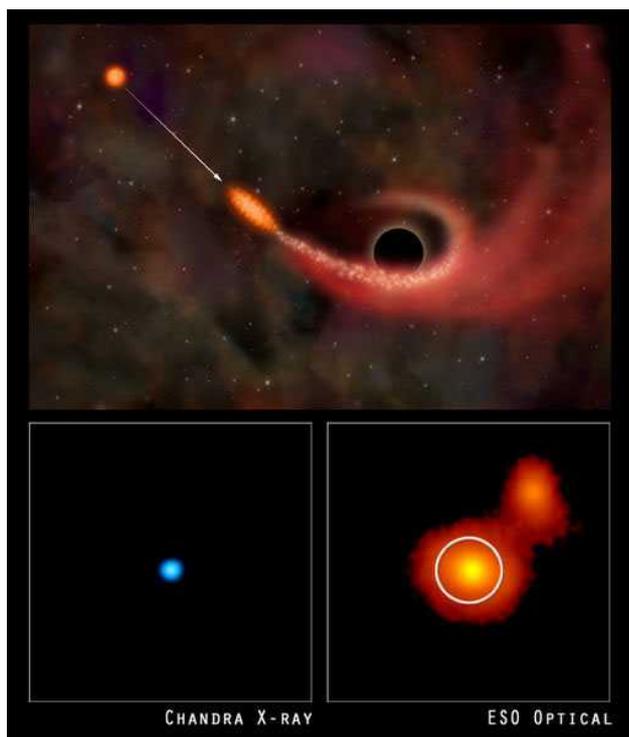


Рисунок 212: Поглощение звезды сверхмассивной чёрной дырой в центре галактики RXJ 1242-11. Сверху: представление художника. Снизу: рентгеновское изображение с орбитальной обсерватории "Чандра", справа - изображение в оптическом диапазоне с Европейской космической обсерватории. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Supermassive_black_hole)

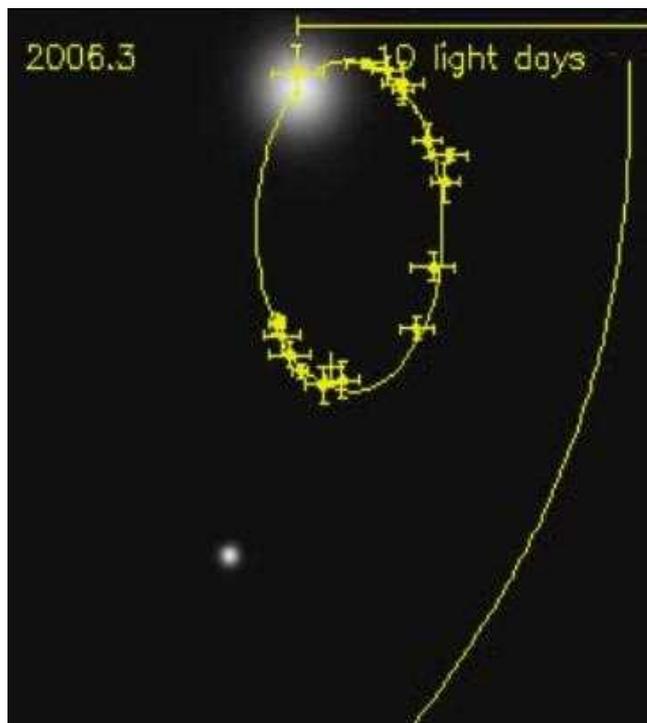


Рисунок 213: Наблюдение движения звезды S2 вокруг центра галактики Млечный Путь. (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/S2_\(star\)](http://en.wikipedia.org/wiki/S2_(star)))

Другим видом чёрных дыр являются сверхмассивные черные дыры, являющиеся по современным представлениям типичными объектами в центрах спиральных галактик. Масса таких чёрных дыр часто измеряется миллионами солнечных масс. Для таких массивных чёрных дыр радиус Шварцшильда оказывается также велик, поэтому, в отличие от «звёздных» черных дыр для формирования сверхмассивных черных дыр не требуется большая плотность вещества: для очень больших сверхмассивных черных дыр плотность вещества в момент начала формирования чёрной дыры может оказаться сравнимой с плотностью воды. Доказательствами существования сверхмассивных черных дыр является, в частности, наблюдение очень сильного доплеровского сдвига от центральных областей галактик, свидетельствующее о быстром движении в центральной области. От центров галактик часто обнаруживается рентгеновское излучение, природа которого считается связанной с аккреационным диском этой сверхмассивной чёрной дыры (рисунок 212).

В галактике нашей Млечный Путь также существует сверхмассивная чёрная дыра, называемая Стрелец A*. Этот объект является интенсивным источником рентгеновского и радио излучений. Он находится на расстоянии около 26000 световых лет от Земли. Масса этого объекта оценивается по скорости движения близких к нему звёзд на расстоянии до 1

парсека от этого объекта. Этот анализ дает оценку для массы в 4000000 солнечных масс. Одна из таких близких звезд известна как S2, её орбитальный период вокруг центра галактики составляет 15.5 лет, минимальное расстояние до объекта Стрелец А* 17 световых часов (рисунок 213). Это в частности ограничивает размер сверхмассивного объекта. Более точные наблюдения дают верхнюю оценку для размера сверхмассивного объекта (4 миллиона солнечных масс!) не более 6 световых часов (примерно размер орбиты Урана).

Интересным примером является галактика 0402+379 в созвездии Персея, находящаяся на расстоянии 750 миллионов световых лет от нас. По данным наблюдений, в этой галактике существуют две сверхмассивных чёрных дыры, расстояние между которыми составляет 7 парсек, а период обращения оценивается в 1500000 лет. Одной из моделей формирования двух сверхмассивных чёрных дыр является соударение и объединение двух галактик.

Чёрные дыры промежуточной массы (порядка тысяч солнечных масс) обнаруживаются гораздо реже и абсолютно принятых доказательств их существования пока нет. Впрочем, это не удивительно, так как формирование таких чёрных дыр может происходить либо слиянием более мелких звезд и черных дыр, либо рядом с сверхмассивными черными дырами в центре галактик, где плотность вещества достаточно велика. В первом случае этот процесс долгов, во втором — вероятно поглощение сверхмассивной чёрной дырой.

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

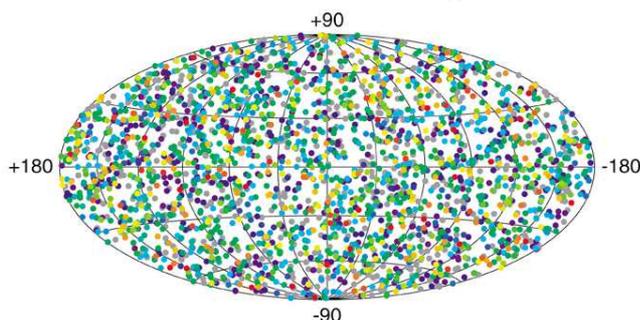


Рисунок 214: Карта обнаруженных гамма-вспышек. С сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray_burst.

Другим астрономическим явлением, возможно связанным с формированием чёрных дыр являются гамма-вспышки. Это иногда обнаруживаемые вспышки жёсткого рентгеновского излучения. Источники этих вспышек равномерно распределены по небу — то есть они не привязаны к плоскости нашей Галактики (рисунок 214). Если эти источники находятся в других галактиках, то выбросы энергии в таких вспышках являются огромными. Одна из моделей связывает гамма-вспышки с катастрофическими выбросами энергии при образовании чёрной дыры.

Лекция 7. Галактики и Вселенная. Современные представления об устройстве и эволюции Вселенной.

На предыдущей лекции мы обсудили вопросы эволюции звёзд. Мы увидели как рождаются и умирают звезды. Мы увидели, что в процессе формирования звёзд типичным является появление звездных скоплений.

Эта, последняя, лекция, посвящена более крупным формам организации вещества во Вселенной, а также обсуждению общих космологических вопросах возникновения и развития нашей Вселенной.

Наша Галактика — Млечный Путь.

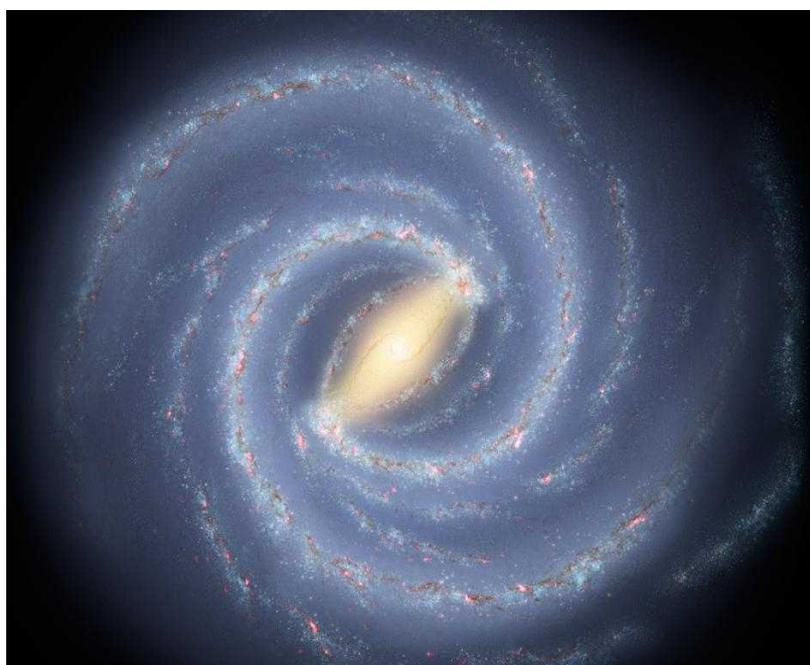


Рисунок 215: Галактика Млечный путь. Рисунок художника, учитывающий последние результаты наблюдений. (с сайта http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/multimedia/20080603a.html)

Галактики являются крупными группировками звёзд, в которых насчитываются $10^7 - 10^{14}$ звёзд, вращающихся вокруг общего центра масс. Типичный размер галактик меняется от 1000 до 100000 парсек, в наблюдаемой Вселенной по оценкам астрономов содержится более 100 миллиардов галактик.

Наша Солнечная система является частью галактики Млечный путь. Основная часть звёзд нашей галактики сосредоточена в галактическом диске. С Земли эти звезды видны как светлая полоса на небе.

Как мы можем получить информацию о размерах и форме нашей галактики ведя наблюдения из диска? В частности, как определить наше положение в галактике?



Рисунок 216: Млечный путь, видимый с поверхности Земли. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way)

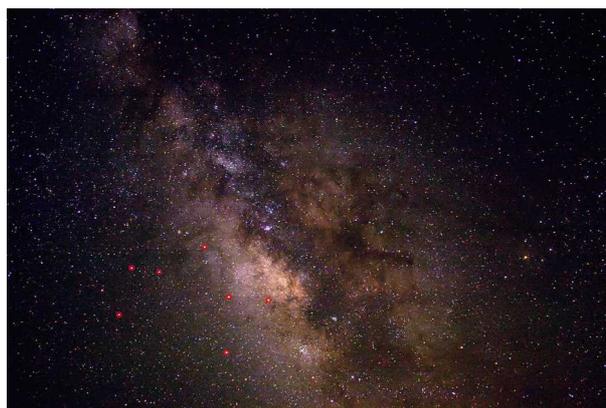


Рисунок 217: Вид на Млечный путь в направлении центра галактики (направление на созвездие Стрельца, основные звезды созвездия выделены красным). (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way)



Рисунок 218: Панорамная фотография (360°) Млечного пути с платформы Очень большого телескопа Европейской южной обсерватории (пустыня Атокама, Чили). Видны башни четырех 8.2-метровых рефлекторов, которые могут объединяться в интерферометрическую схему. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way)

Одним из первых астрономов, пытавшихся установить положение Солнечной системы в галактике был Вильям Гершель. В 1785 году он попытался посчитать количество видимых звёзд в разных направлениях. Его результаты показали, что количество звёзд в разных направлениях в диске примерно одинаково, из чего следовало, что Солнце находится близко к

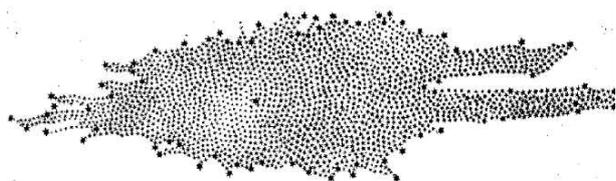


Рисунок 219: Карта нашей галактики по данным Гершеля, 1785 год. (с сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy>)

центру галактики. Однако эти рассуждения страдали от систематической ошибки — из-за того, что вещество нашей галактики, в том числе и пыль, сосредоточено в диске далекие звезды оказываются скрыты от наблюдения поглощением в этих пылевых облаках (межзвездное поглощение).

Устранить эту проблему позволяет наблюдение за источниками вне

галактического диска. К счастью, у нашей галактики есть объекты, лежащие вне диска — это шаровые звездные скопления — компактные образования, содержащие миллионы звёзд в объеме с характерным размером в сотни световых лет. Однако расстояние до этих скоплений измеряется тысячами световых лет — возможно ли его измерить? Опять же, к счастью, такие измерения возможны. Измерения методом параллакса на таких расстояниях уже невозможны (достигнутая на данный момент точность составляет 1 миллисекунду дуги, что ограничивает возможность этого метода 1000 парсек, а реально примерно 500 световыми годами). Но существуют характерные переменные звёзды (цефеиды и близкие к ним переменные типа RR Лиры), полная светимость которых связана с периодом пульсаций (для цефеид) или примерно постоянна (для переменных типа RR Лиры). Переменные звёзды могут быть идентифицированы по характерным изменениям яркости. Обнаружение таких переменных звёзд в шаровых скоплениях позволяет определить расстояние до них из измерения видимой звездной величины и определения светимости из диаграммы период-светимость.

Шаровые скопления оказываются неравномерно распределены по нашему небу — большая часть наблюдаемых шаровых скоплений оказывается сосредоточена в направлении созвездия Стрельца. Уже это качественное наблюдение показывает, что вероятно Солнце не лежит в центре галактического диска. Анализ положения шаровых скоплений, впервые произведенный в 1920-х годах Харлоу Шэпли, показал, что до некоторых из них расстояние достигает 100000 световых лет. При этом распределение скоплений в пространстве оказывается сферически симметричным с центром находящимся на расстоянии в несколько килопарсек в направлении созвездия Стрельца. Современная оценка расстояния от Солнца до центра галактики составляет 8 ± 1 кпк (примерно 26000 ± 3000 св. лет), а смещение Солнца от центральной плоскости галактического диска составляет 5-30 парсек.

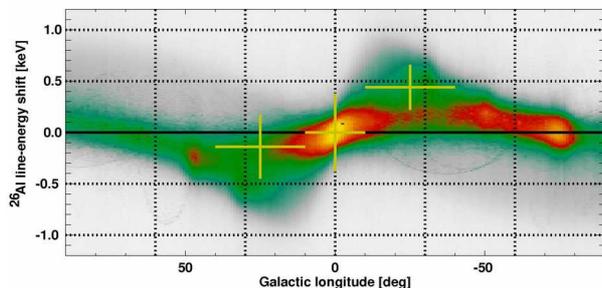


Рисунок 220: Доплеровский сдвиг гамма-лучей, испускаемых при распаде алюминия-26, измеренный орбитальной гамма-обсерваторией Комптон (CGRO) (с сайта <http://www.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/26Al/26Al.html>)

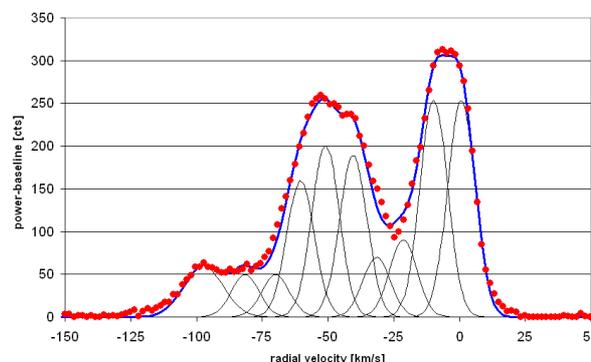


Рисунок 221: Пример доплеровского сдвига 21-сантиметровой линии водорода в некотором направлении в плоскости галактического диска, демонстрирующей наличие нескольких значений радиальной скорости движения нейтрального водорода в выбранном направлении (с сайта <http://astro.u-strasbg.fr/~koppen/Haystack/spectro.html>)

Наблюдение за спектром звёзд в галактическом диске позволяет обнаружить наличие доплеровского сдвига характерных линий спектра, свидетельствующего о движении этих звёзд — то есть о вращении галактики вокруг центра. Этот доплеровский сдвиг наблюдается во всех диапазонах электромагнитного излучения (рисунки 220, 221).

Отдельный интерес представляет наблюдение излучения на длине волны 21 сантиметр (рисунок 221). Это излучение связано с атомарным неионизированным водородом. Эта линия излучения возникает не из-за перехода между боровскими уровнями энергии (дающими линии в видимом и близких к видимому диапазонах), а с переходом между двумя состояниями атома, в которых спины (собственные магнитные моменты) протона и электрона параллельны и антипараллельны. Интересным оказывается то, что доплеровский сдвиг этой линии состоит из нескольких дискретных линий. Это наблюдение свидетельствует о том, что атомарный водород (составляющий основную массу вещества в галактике) распределён по диску неоднородно. Точный анализ этих данных, полученных в разных направлениях галактического диска позволяет определить, что вещество в диске галактики собрано в спиральные рукава и определить параметры движения этих рукавов.



Рисунок 222: Изображение центра галактики (Стрелец A*) в рентгеновском диапазоне, полученное рентгеновской обсерваторией Чандра) (с сайта http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1559.html)

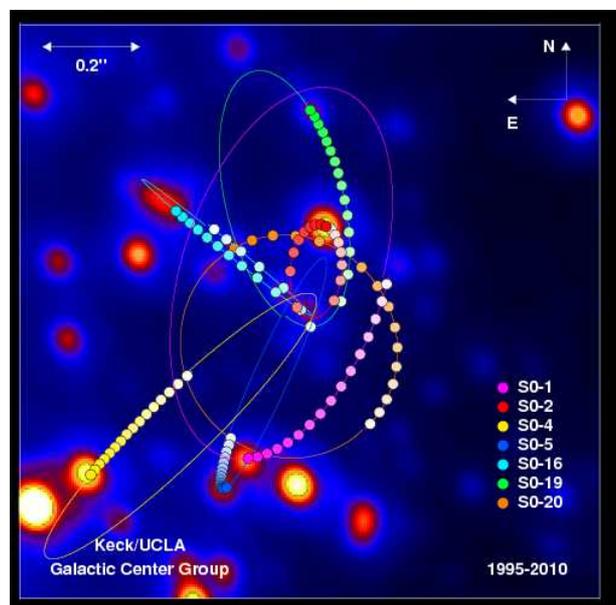


Рисунок 223: Орбиты звёзд вблизи галактического центра. Символы показывают среднегодовое положение звезды в последние годы, насыщение цвета соответствует ходу времени. Фоновое изображение - ограниченное дифракцией изображение 2010 года. (с сайта <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/>)

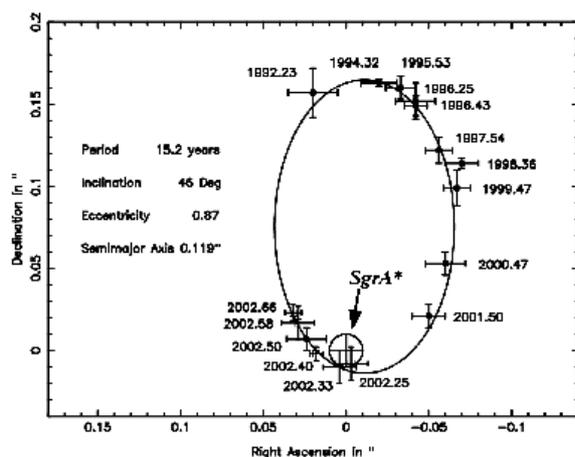


Рисунок 224: Орбита звезды S2 вокруг центра галактики (с сайта http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/res_s2orbit.php?lang=en)

Область галактического центра (центральное вздутие) выделяется на фоне диска, расширяясь от плоскости диска. В галактическом центре обнаружено существование сверхмассивной чёрной дыры массой примерно в 4 миллиона солнечных. Существование этой чёрной дыры подтверждается как наблюдением характерного рентгеновского излучения от поглощаемого вещества (рисунок 222), так и по анализу орбит звёзд, близких к центру (рисунки 223, 224). Эти звёзды движутся очень быстро — период звезды S2 составляет около 15 лет с минимальным расстоянием до центра галактики в 17 световых часов (сравнимо с размером Солнечной системы). Такое орбитальное движение требует наличия в фокусе орбиты очень массивного тела ограниченных размеров, каковым по современным представлениям может являться только сверхмассивная чёрная дыра.

Помимо диска у галактики имеется гало звёзд, частью которого являются шаровые скопления (содержащие около 1% всех звёзд гало). В сферическом гало нет газовых и пылевых облаков, имеющих в спиральных рукавах галактики.

Анализ состава звёзд в нашей галактике также позволяет определить некоторые закономерности. В шаровых звездных скоплениях находятся старые звёзды с малым содержанием тяжёлых элементов (звёзды второй популяции). Изолированные звёзды гало также являются звёздами второй популяции, они движутся по различным орбитам, не привязанным к плоскости галактического диска. Центральное вздутие содержит много старых звёзд первой популяции (красных и голубых гигантов), а также звёзды второй популяции, но не содержит молодых горячих короткоживущих звёзд. Горячие молодые звёзды содержатся в рукавах галактики, являющихся областями формирования звёзд.

Таким образом, наблюдения позволяют установить некоторые параметры нашей галактики:

- в Млечном пути содержится 100-400 миллиардов звёзд.
- структура галактики: спиральная, в центре галактики находится сверхмассивная чёрная дыра.
- самая старая звезда имеет возраст 13.2 миллиарда лет, средний возраст звёзд диска 8 миллиардов лет.
- диаметр галактики около 100-150 тысяч световых лет, толщина галактического диска около 1000 световых лет.

Другие Галактики.

Классификация Галактик.

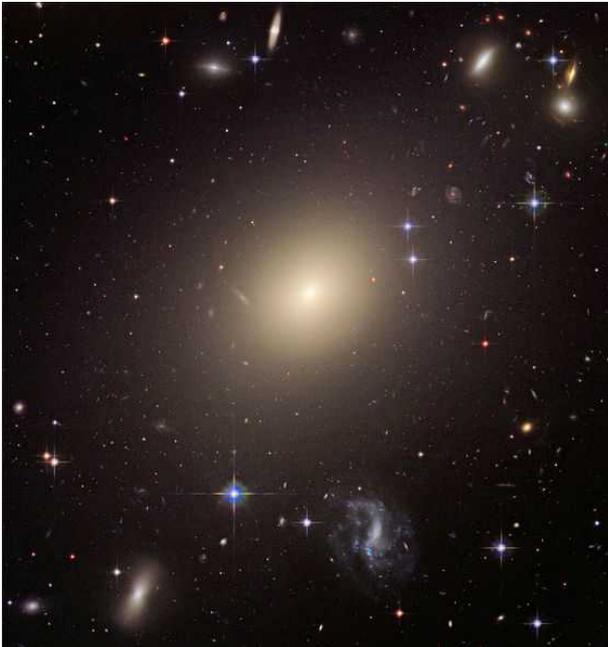


Рисунок 225: Эллиптическая галактика ESO 325-G004. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Elliptical_galaxy)

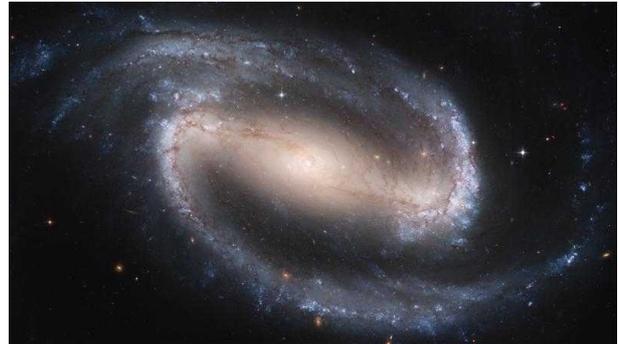


Рисунок 226: Спиральная галактика NGC1300, изображение телескопа Хаббл. (с сайта <http://hubblesite.org/gallery/album/pr2005001a/>)



Рисунок 227: Линзовидная галактика Веретено. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Lenticular_galaxies)

Как мы уже упомянули, количество галактик в наблюдаемой вселенной огромно — образование галактик является таким образом нормальным, обычным физическим процессом. Можно отдельно здесь отметить галерею фотографий телескопа Хаббл <http://hubblesite.org/gallery/album/galaxy>, содержащую множество красочных изображений различных галактик.

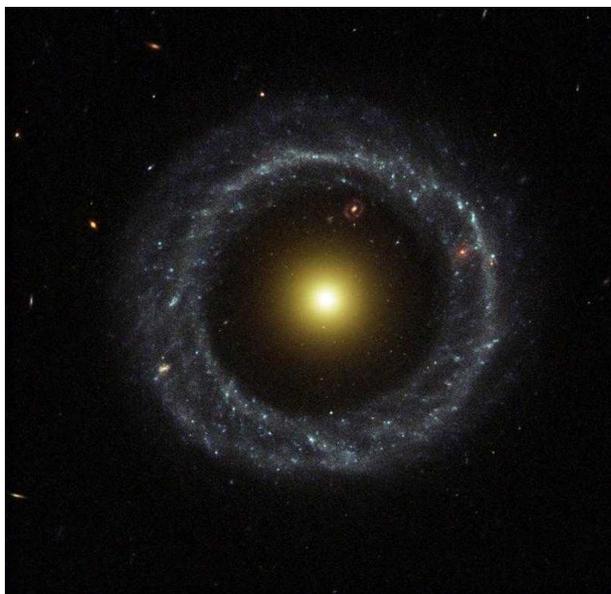


Рисунок 228: Кольцевая галактика "Объект Хога". Фотография телескопа Хаббл (с сайта <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2002/21/image/a/>)



Рисунок 229: Слияние галактик. "Галактики антенн" NGC4038, изображение получено телескопом Хаббл. (с сайта http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1086.html)

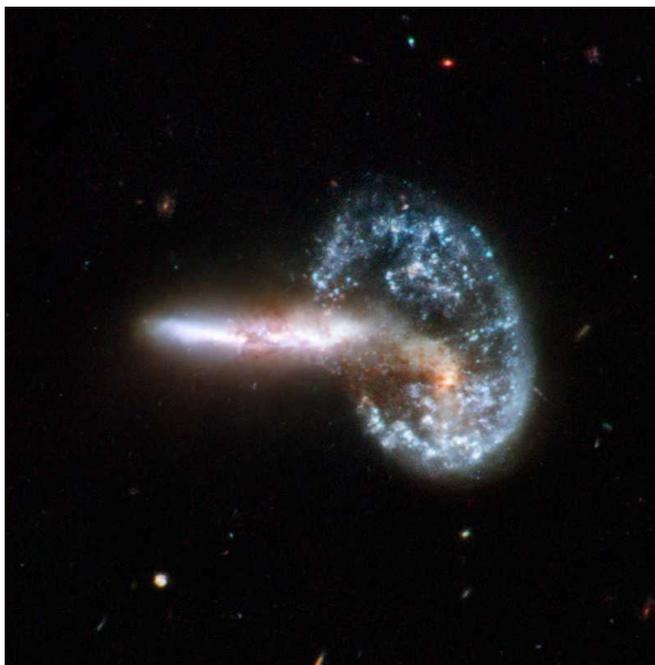


Рисунок 230: Взаимодействующие галактики Arp148. Фотография получена телескопом Хаббл. (с сайта <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2008/16/image/aa/>)

Выделяют три основных класса галактик: спиральные (рисунок 226), эллиптические (рисунок 225) и линзовидные (рисунок 227). Кроме этого есть более редкие виды, например представленная на рисунке 228 кольцевая галактика.

Типичными чертами спиральных галактик (к которым относится и Млечный путь) являются: наличие плоского вращающегося диска из звёзд и газо-пылевых облаков, наличие центрального вздутия из старых звёзд, наличие сферического гало звёзд и наличие сверхмассивной чёрной дыры в центре. В рукавах спиральных галактик идет активное звездообразование, поэтому там существуют горячие короткоживущие звёзды, дающие рукавам характерный яркий голубоватый цвет.

Для эллиптических галактик характерными чертами является: в основном радиальное движение звёзд к центру, малое количество межзвездного вещества и преобладание старых звёзд. Звездообразование в эллиптических галактиках практически не идёт. В центре эллиптических галактик также есть сверхмассивная чёрная дыра.

Линзовидные галактики отличаются тем, что в них имеется диск из звёзд, но межзвездного вещества почти нет, поэтому в них также не идет активное звездообразование. По своим свойствам они близки к эллиптическим.

Галактики движутся друг относительно друга, некоторые галактики являются спутниками других. Столкновения галактик (рисунок 230) являются достаточно частыми по астрономическим меркам явления.

Определение расстояний до далеких галактик.

Так как даже собственные размеры галактик измеряются сотнями тысяч световых лет, то и расстояния до галактик должны быть не меньшего масштаба. Это требует построение лестницы методов измерения расстояний до далеких объектов. Перечислим имеющиеся в распоряжении астрофизиков методы:

- Метод параллакса. Ограничен точностью измерения положения объектов и базой измерения. Интересно отметить, что для далеких галактик база измерения существенно увеличивается за счет собственного движения Солнечной системы и нашей Галактики. Верхний предел метода около 500 пск.
- Метод спектроскопического параллакса. Определив спектральный класс звезды главной последовательности можно оценить ее светимость и найти расстояние из видимой звездной величины. Метод работает от 40 пск до 10 кпск.
- Использование переменных звёзд (цефеид и RR Лиры). Светимость некоторых переменных звёзд может быть определена независимо. Это позволяет определять расстояния от 5 до 100 кпск по переменным типа RR Лиры и от 1 кпск до 30 Мпск по цефеидам.
- Связь между светимостью спиральных галактик и шириной 21-сантиметровой линии водорода (соотношение Тулли-Фишера), корреляция между размером эллиптической галактики, движением её звёзд и светимостью. Эти полуэмпирические соотношения позволяют определять расстояния от 700 кпск до 100 Мпск.
- Сверхновые типа Ia. Эти сверхновые возникают в двойных системах, когда белый карлик с массой близкой к пределу Чандрасекара поглощает слишком много вещества от звезды-компаньона, так что состояние белого карлика становится более

неустойчивым. Характерные параметры спектра сверхновой позволяют определить ее тип. Так как все такие сверхновые оказываются примерно одной массы, их светимость можно считать примерно одинаковой. Этот метод позволяет определять расстояния от 1 до более чем 1000 Мпск.

Важно отметить, что разные методы определения расстояния перекрываются, что позволяет обеспечивать надёжность измерения. В то же время, косвенные методы используют существенное философское допущение, что законы физики и физические постоянные неизменны на астрономических масштабах времени: например, калибровка по сверхновым предполагает, что миллиарды лет назад (1000 Мпск соответствует примерно 3 миллиардам световых лет) выброс энергии при взрыве сверхновой был ровно таким же, как и относительно недавние взрывы сверхновых.

Для сравнения отметим (список ближайших галактик доступен по адресу http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nearest_galaxies), что расстояние до ближайшей к нам крупной галактики Андромеды составляет около 780 кпск. Несколько карликовых галактик, являющихся спутниками Млечного пути (в том числе Магеллановы облака), находятся от нас на расстоянии менее 100 кпск. Около 100 ближайших галактик находятся от нас на расстоянии до 3.5 Мпск.

Формирование эллиптических, линзовидных и спиральных галактик.

Галактики формируются из больших протогалактик — случайно образовывавшихся на ранних этапах развития вселенной областей с большей концентрацией вещества. Дальнейшая судьба протогалактики напоминает уже рассмотренный нами сценарий формирования планетной системы. В этом нет ничего удивительного, так как основной силой является все та же сила тяготения. Критическими оказываются два фактора: наличие у протогалактики заметного момента вращения и интенсивность процесса звездообразования, связанная с плотностью вещества в протогалактике.

В отсутствие собственного момента формируется эллиптическая галактика. При этом все вещество поглощается в процессе формирования звёзд, так как нет центробежных сил, «размазывающих» межзвёздное вещество.

При наличии собственного момента вращения формируется галактический диск. Если скорость звездообразования небольшая, то часть вещества остается и формирует спиральные рукава. Если же изначальная плотность вещества достаточно велика для быстрого поглощения вещества в процессах звездообразования, то образуется линзовидная галактика.

Природа возникновения спиральных рукавов простого объяснения не имеет. Существует две основные модели: модель волн плотности и модель самораспространяющегося формирования звёзд. По первой модели вращение центральной части галактики (имеющей вытянутую, нецентральносимметричную форму) порождает в веществе диска волны плотности, приводящие к сжатию газа в рукава. Это повышение плотности приводит к тому, что новые звезды формируются в рукавах галактики. По второй модели, формирование звёзд само вызывает дальнейшее сжатие вещества в галактическом диске (за счет звёздного ветра и взрывов сверхновых), так что образуется расходящийся сектор образующихся звёзд, закручиваемый вращением вокруг центра в спиральные рукава.

Кластеры и суперкластеры галактик.

Наблюдение показывает, что галактики образуют связанные группы. Самым мелким уровнем такой группировки являются галактики-спутники, вращающиеся вокруг крупных галактик под действием сил тяготения. Например и у Млечного пути, и у Андромеды есть около 10 карликовых галактик-спутников.

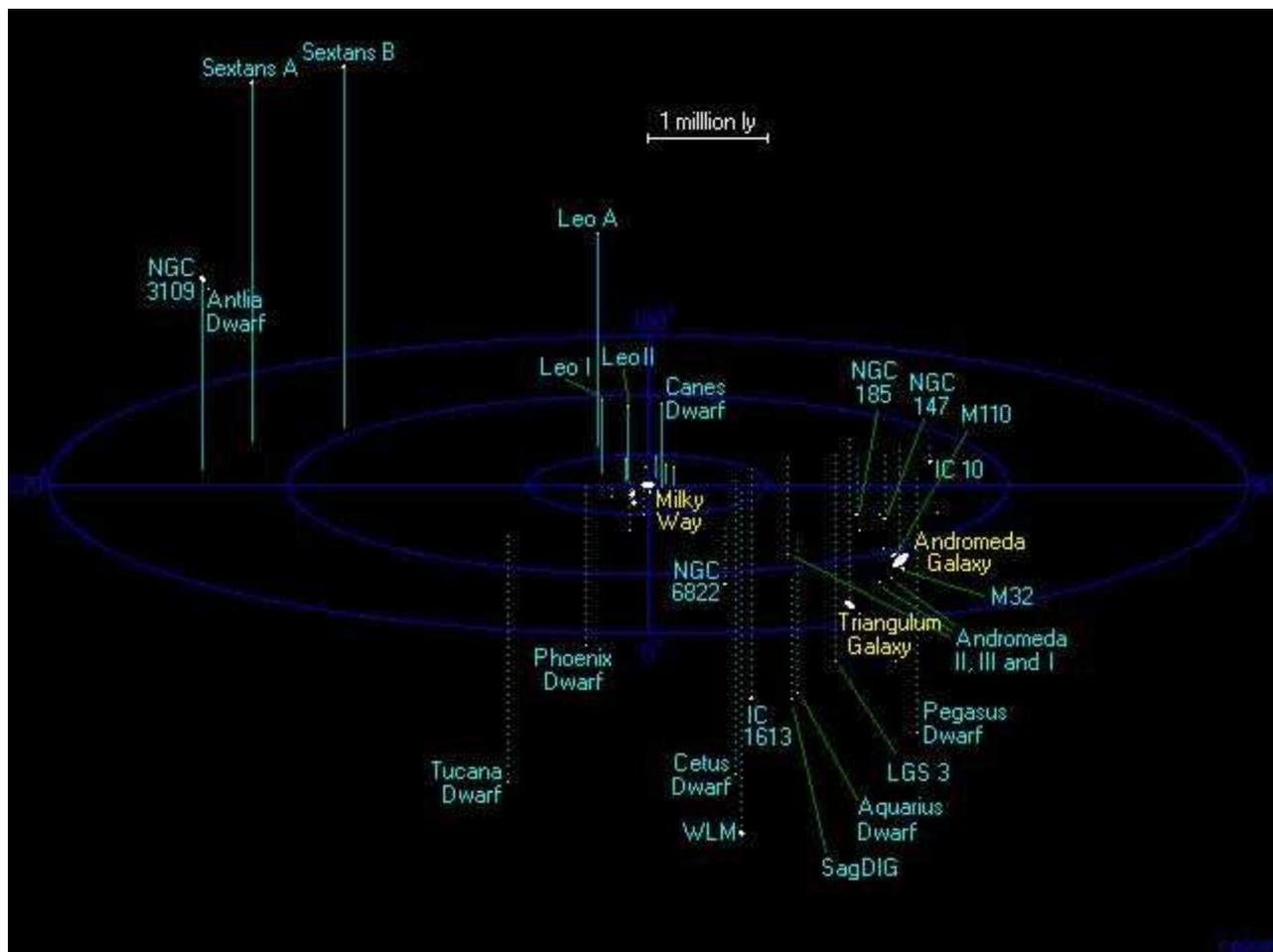


Рисунок 231: Галактики Местной группы. (с сайта http://en.wikipedia.org/wiki/Local_Group)

Гравитационно-связанные галактики образуют группы галактик, насчитывающие обычно несколько десятков галактик. Например Местная группа, включающая Млечный путь относительно невелик, масштаба 100 км/сек (для сравнения, скорость движения Млечного пути относительно реликтового излучения составляет около 500 км/сек). Размер группы галактик обычно несколько мегапарсек.

Кластер галактик включает до нескольких тысяч галактик, взаимодействующих гравитационно. Близкими к нам кластерами являются Скопление Волос Вероники, Скопление Девы и кластер в созвездии Печи (рисунок 232). Размер кластера порядка 10 Мпск. Разброс скоростей движения галактик в кластере достигает 1000 км/сек.



Рисунок 232: Кластер галактик в созвездии Печи. Изображение получено в инфракрасном спектре, голубой цвет на рисунке соответствует длинам волн 3.4 и 4.6 мкм, зеленый - 12 мкм, красный - 24 мкм. (с сайта http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/multimedia/pia12835d.html)

Кластеры в свою очередь объединяются в суперкластеры, разделенные относительно пустым пространством (рисунок 233).

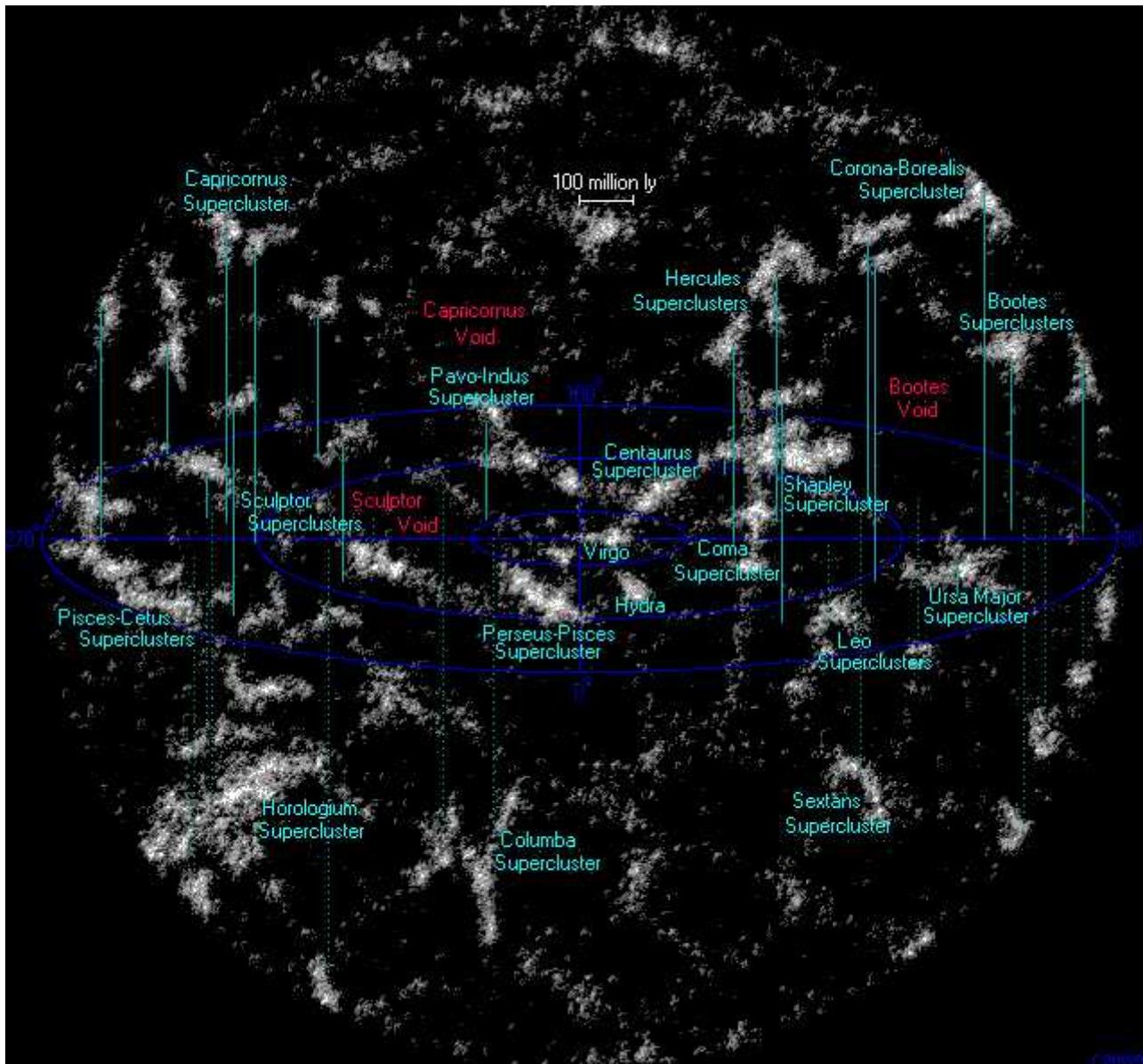
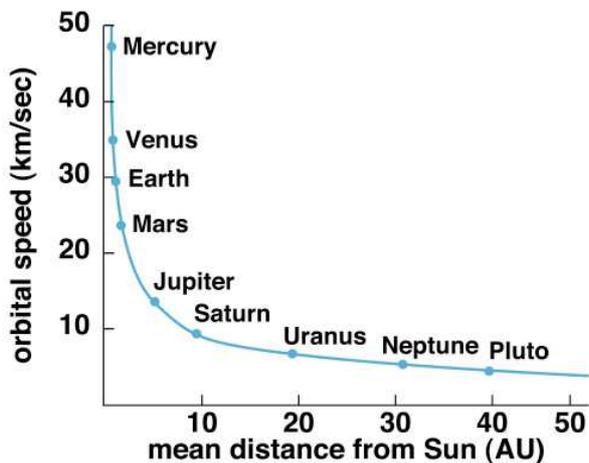


Рисунок 233: Вселенная на расстоянии 1 миллиона световых лет от Земли. (с сайта [http://en.wikipedia.org/wiki/Void_\(astronomy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Void_(astronomy)))

Тёмное вещество.

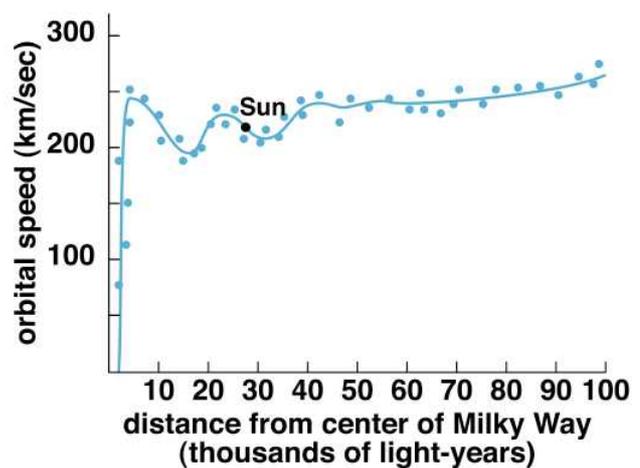
Как мы уже отметили, существует много достаточно близких галактик. Вращение галактик может быть измерено по доплеровскому сдвигу. Какую картину вращения можно наивно ожидать? Если предполагать, что во вращении галактики доминирует сверхмассивная чёрная дыра, то естественно ожидать картину, совпадающую с распределением орбитальных скоростей в Солнечной системе: чем дальше от центра, тем меньше скорость $V^2 = G \frac{M}{R}$.

С учётом того, что на более далекие от центра звезды дополнительно действуют внутренние по отношению к рассматриваемой звезде (теорема Гаусса, как и в электростатике, позволяет исключить из рассмотрения внешние звезды), эффективная масса должна немного увеличиваться, что приведет к некоторому росту ожидаемой в этой наивной картине скорости вращения. При этом все параметры в общем-то измеримы: зная распределение звезд по галактике, можно посчитать, какая должна быть в такой наивной модели скорость движения звезд вокруг центра галактики.



(b)
Copyright © Addison Wesley

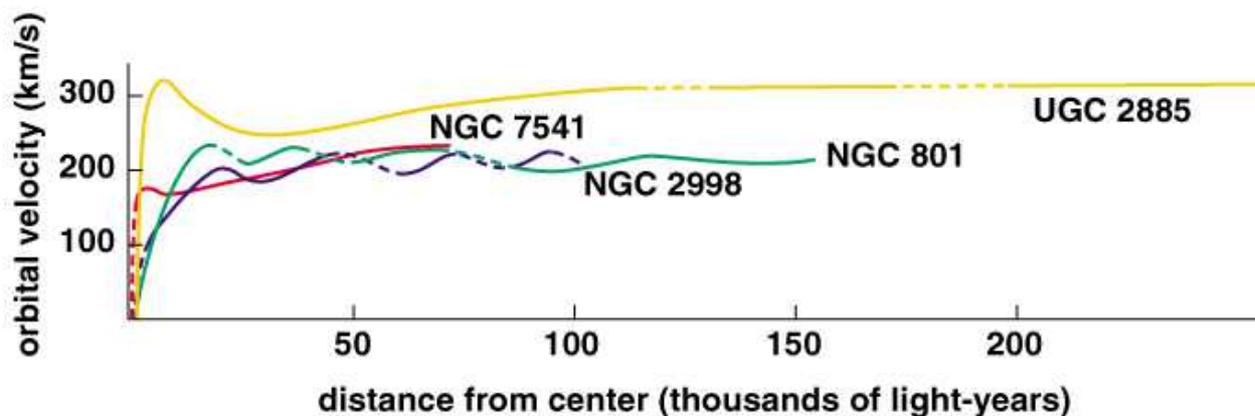
Рисунок 234: Орбитальные скорости планет Солнечной системы (с сайта <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/darkmatter.htm>)



(c)
Copyright © Addison Wesley

Рисунок 235: Скорости орбитального движения звезд в Млечном пути (с сайта <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/darkmatter.htm>)

Однако анализ данных наблюдения показывает, что как для нашей галактики, так и для других галактик наблюдается совсем другая картина (сравните рисунки 234 и 235). На достаточно большом удалении от центра галактики скорость движения звезд по их орбитам практически перестает зависеть от расстояния до центра галактики (рисунок 236). Учет всей видимой массы не позволяет описать такую зависимость.



Copyright © Addison Wesley.

Рисунок 236: Скорости орбитального движения звезд в различных галактиках. (с сайта <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/darkmatter.htm>)

Для объяснения этих зависимостей предлагается существование в галактиках так называемой «тёмной материи». Под тёмной материей подразумевается вещество, присутствие которого обнаруживается только по гравитационным эффектам, а других (например электромагнитного) излучений это вещество не порождает. Что удивительно, количество тёмной материи оказывается огромным — лишь около 10% полной массы галактики оказывается связанным со звездами и газо-пылевыми образованиями. То есть около 90% вещества оказывается скрыто в виде тёмной материи.

Конкретная природа тёмной материи пока не ясна. Предлагаются различные кандидаты на роль тёмной материи:

- Массивные объекты гало галактик. Эти объекты включают в себя маленькие неяркие белые карлики, черные дыры и коричневые карлики (незажегшиеся из-за малой массы звезды). Такие объекты активно ищут, в частности по эффектам гравитационной микролинзы, проявляющимся при прохождении такого объекта на фоне далекой звезды. Однако их недостаточно для объяснения всей тёмной материи.
- Нейтрино. Нейтрино имеет массу (из-за чего в частности происходят нейтринные осцилляции), поэтому дают вклад и в гравитационное взаимодействие.
- Неизвестные еще тяжелые слабо взаимодействующие частицы. Ведутся исследования по поиску таких частиц, по свойствам близких к нейтрино, но взаимодействующих с электромагнитным излучением, но существенно более тяжелых.

В целом же можно только подчеркнуть, что на данный момент мы не знаем точно природы 90% вещества в нашей Вселенной.

Закон Хаббла. Связь скорости движения галактик с расстоянием до них.

Расстояние до галактик может быть определено с использованием подходящего метода, о чем мы говорили ранее. Кроме этого непосредственному измерению поддается красное смещение линий поглощения в спектрах галактик. Трактовкой такого смещения можно пока считать доплеровский сдвиг, связанный с удалением от нас источника излучения. Причём все удаленные галактики демонстрируют именно красное смещение, то есть все галактики

удаляются от нас.

Оказалось, что связь скорости убегания галактик и расстояния до них линейная: $V = H_0 d$ (рисунок 237), постоянную H_0 называют постоянной Хаббла в честь астрофизика Эдвина Хаббла впервые отметившего эту связь в 1920-х годах. Определение этой постоянной является важной задачей, так как разбегание галактик является важным космологическим процессом. Отметим еще раз, что непосредственно измеряется именно красное смещение

$$z = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \text{ если связать его с эффектом Доплера, то } z = \frac{V}{c} \text{ в нерелятивистском}$$

случае и $z = \sqrt{\frac{c+V}{c-V}} - 1$ в релятивистском.

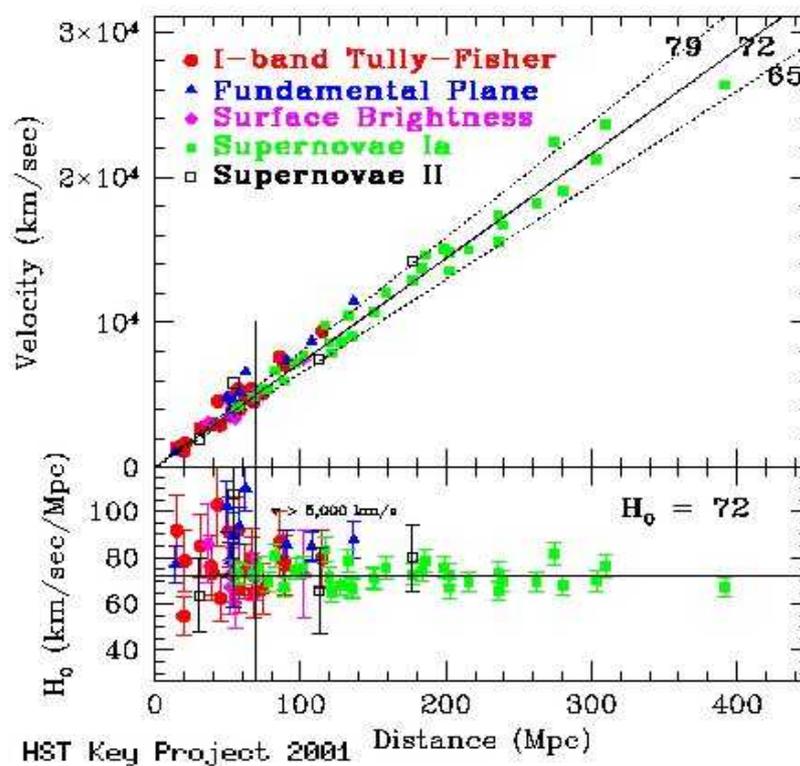


Рисунок 237: Определение постоянной Хаббла по данным телескопа Хаббл. Разным цветом показаны данные для разных методов определения расстояния до галактик. (с сайта <https://www.cfa.harvard.edu/~huchra/hubble/>)

Величина постоянной Хаббла уточнялась за время наблюдений (рисунок 238). Современное значение для постоянной Хаббла $71 \pm 3 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{Мпс}}$.

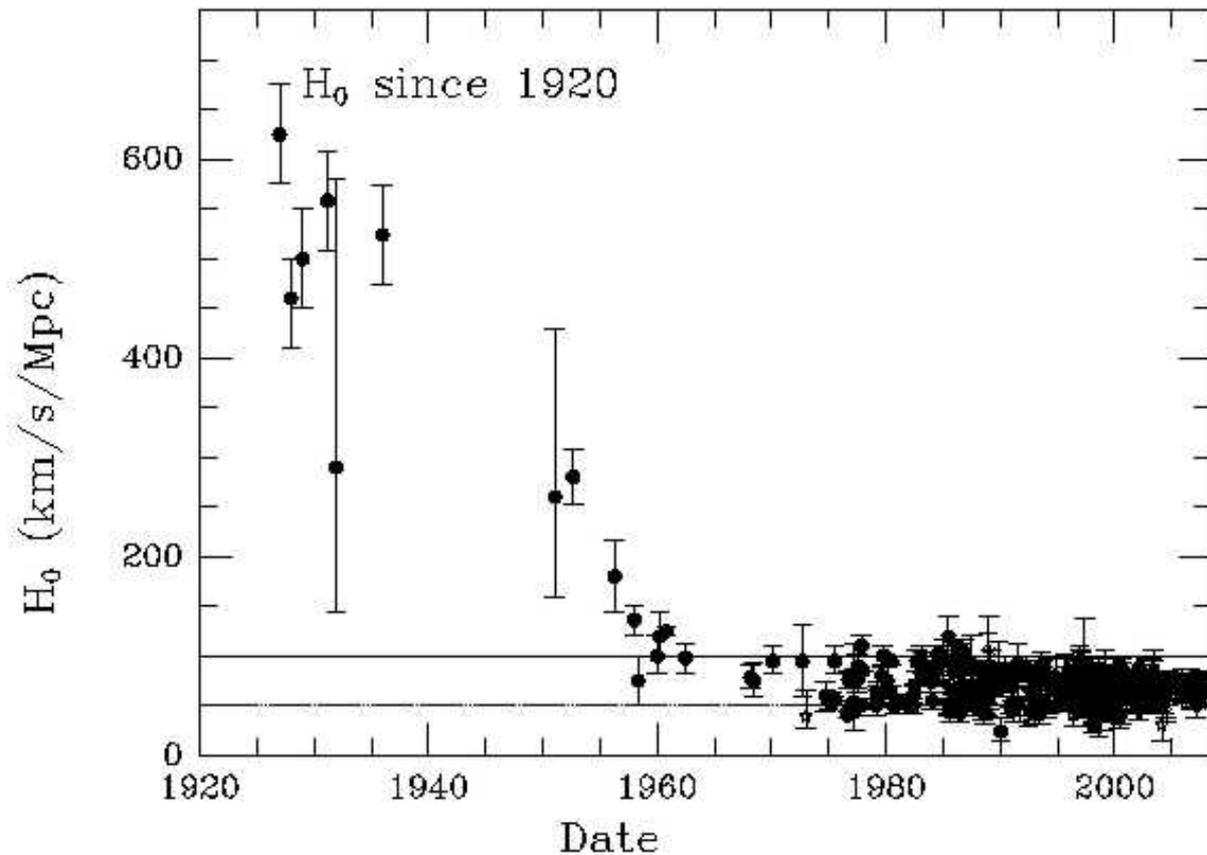


Рисунок 238: Изменение оценок величины постоянной Хаббла со временем. (с сайта <https://www.cfa.harvard.edu/~huchra/hubble/>)

Большой Взрыв и ранние этапы развития Вселенной.

Космология.

Космология это раздел физики, рассматривающий вопросы структуры и эволюции Вселенной как целого. Вопросы возникновения Вселенной и другие космологические вопросы оказываются часто очень далеки от нашего повседневного опыта. Кроме того, последовательный анализ этих вопросов требует достаточно специальной подготовки. Поэтому необходимо очень осторожно применять «простые соображения» к этим задачам. Примером такого неосторожного применения привычных понятий является попытка разнести понятия Вселенной и пространства, например при рассмотрении расширения Вселенной: представление о расширении составных частей Вселенной в «абсолютном» внешнем пространстве некорректно, так как наше пространство и есть наша Вселенная.

Расширение Вселенной.

Закон Хаббла следует из экспериментальных наблюдений. Наблюдается красное смещение в спектрах далеких галактик, которое оказывается пропорционально удалению этих галактик от нас.

Космология трактует наблюдаемое разбегание галактик не как движение галактик от нас, а как расширение пространства между галактиками. При этом нет выделенной точки, от которой «разбегаются» галактики. Пропорциональность скорости изменения расстояния между галактиками расстоянию оказывается естественным следствием однородного расширения пространства (рисунок 239).

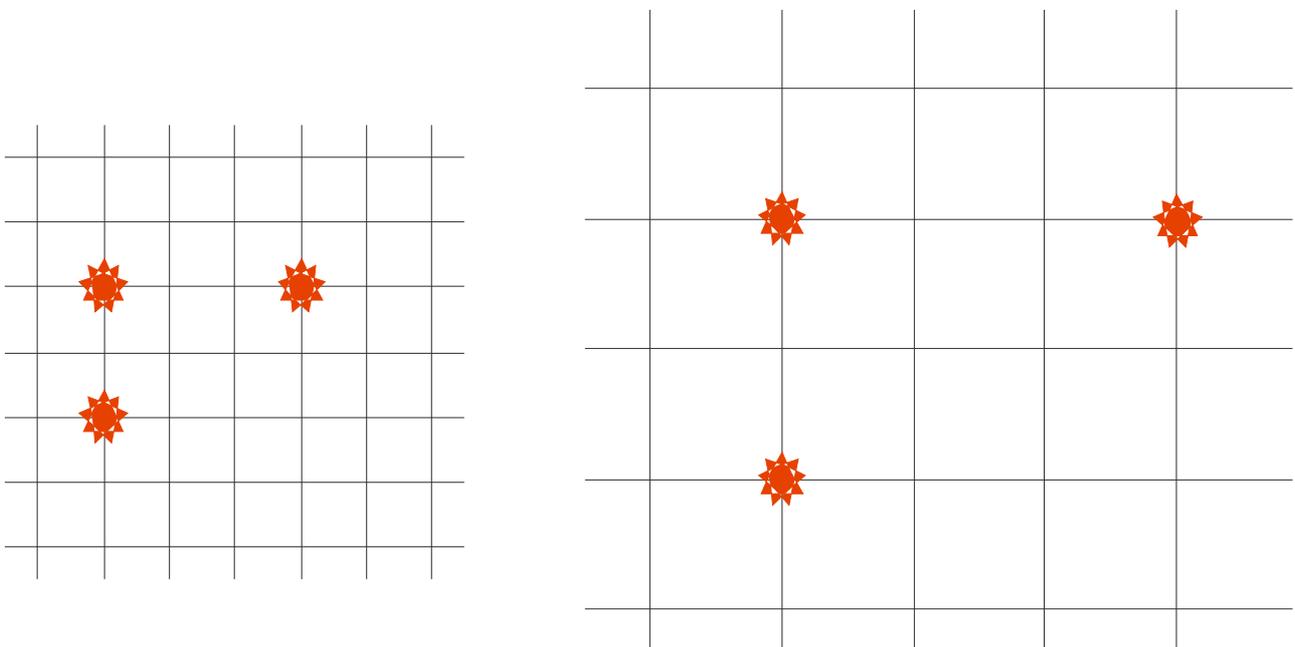


Рисунок 239: Однородное расширение пространства между "галактиками" приводит к тому, что изменение расстояния между "галактиками" пропорционально расстоянию между ними.

Как мы обсуждали при рассмотрении чёрных дыр, свойства пространства связаны с гравитацией. В частности, оказывается, что гравитационное притяжение в кластере галактик может противодействовать расширению пространства между галактиками кластера. Поэтому расширяется только «пустое» пространство между кластерами. Это также означает, что формирование структуры Вселенной с большими пустотами и кластерами и суперкластерами галактик довольно естественно с точки зрения модели расширяющейся Вселенной: если в силу случайных причин на ранних стадиях расширения Вселенной образовались области с большей плотностью вещества, то эти области расширялись слабее, чем более разреженные области. В результате разреженные области становятся разреженнее, а более плотные области служат зародышами будущих кластеров галактик.

Красное смещение света от далеких галактик оказывается в этой интерпретации не связанным с эффектом Доплера. Ответственным за него оказывается космологическое красное смещение: электромагнитная волна, распространяющаяся в межгалактическом пространстве «растягивается» вместе с расширяющимся пространством. При этом длина волны увеличивается (волна краснеет) независимо от направления распространения волны. Таким образом, наблюдение красного смещения для всех галактик естественно сочетается с представлением о невыделенности положения Земли во Вселенной.

При этом сохраняется наше представление о том, что свет от более далеких звёзд «древнее» - он несет нам информацию о ранних этапах развития Вселенной. Однако для характеристики таких очень далеких звёзд и галактик иногда используют просто относительное красное смещение

$$z = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} .$$

Оценка возраста Вселенной.

Современные измерения показывают, что в соответствии с законом Хаббла Вселенная расширяется. Естественно попытаться заглянуть в прошлое расширяющейся Вселенной чтобы понять, из чего все появилось. Насколько глубоко надо заглядывать?

Ответ на этот вопрос даёт тот же закон Хаббла. Для грубой оценки можно воспользоваться следующими рассуждениями. Если на расстоянии d скорость удаляющейся от наблюдателя галактики равна V , то можно оценить время, когда галактика была близка к наблюдателю как $T_0 = \frac{d}{V}$. Далее, применяя закон Хаббла, получаем

$$T_0 = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} = 13.4 \text{ млрд. лет} .$$

Интересно отметить, что эта оценка не зависит от расстояния между галактиками d . То есть всё вещество Вселенной за время T_0 (при движении «в прошлое») должно собраться вместе. Такая грубая оценка указывает на то, что наблюдаемая скорость расширения Вселенной соответствует возрасту Вселенной около 10-15 миллиардов лет. Эта оценка не противоречит имеющимся у нас данным о возрасте различных объектов во Вселенной: Солнечная система существенно моложе этой оценки (около 4.5 миллиардов лет), возраст самых старых известных звёзд оценивается в чуть более 13 млрд. лет.

Большой Взрыв.

Таким образом, наблюдаемое нами расширение Вселенной указывает на то, что 10-15 миллиардов лет назад всё вещество Вселенной было собрано компактно. Современные

представления говорят, что примерно 13.7 миллиарда лет назад произошло событие, называемое Большой Взрыв. Из сингулярности начало появляться ВСЁ. Ещё раз подчеркнём, что анализ этих этапов развития Вселенной требует специальных знаний и кроме того условия, реализовывавшиеся в это время, лежат далеко за рамками нашего повседневного опыта.

Формальный язык, на котором описывается развитие и расширение пространства-времени нашей Вселенной — это язык общей теории относительности. Математическая формулировка уравнения Эйнштейна: $G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$. Здесь фигурируют тензоры (матрицы 4 на 4) связанные в левой части с кривизной пространства, а в правой — так называемый тензор энергии-импульса. Коэффициент Λ при метрике — это так называемая космологическая постоянная, имеющая важную роль в характере решения этого уравнения, о чем мы упомянем позже. Отметим, что несмотря на кажущуюся простоту записи — это уравнение для матриц, оно распадается на 10 скалярных уравнений. Кроме того, представление о устройстве тензоров кривизны и метрики пространства требует достаточно специальной математической подготовки. Поэтому никакое строгое рассмотрение этой задачи нам не под силу и придется принимать на веру результаты, полученные специалистами в этой области.

В дальнейшем мы постараемся проиллюстрировать некоторые вопросы возникновения современной Вселенной из Большого Взрыва, постепенно приближаясь к этому событию.

Соотношение между веществом и излучением во Вселенной.

Весь комплекс знаний о распределении вещества во Вселенной (данные о параметрах звёзд, галактик, кластерах галактик позволяют оценить среднюю плотность вещества во вселенной (включая тёмное вещество) с точностью в 15% как $\rho_m = 2.4 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3$. Это примерно соответствует полтора атомам водорода на кубический метр.

Излучение во Вселенной в основном представлено реликтовым излучением. Интенсивность излучения чёрного тела с единицы поверхности $I = \sigma T^4$. Для того, чтобы определить плотность энергии, надо поделить это на скорость света. Для сравнения с плотностью вещества можно воспользоваться знаменитой связью между массой и энергией. Итого получаем: $\rho_r = \frac{\sigma T^4}{c^3} = 4.6 \cdot 10^{-31} \text{ кг/м}^3$ (вычисление сделано для современной температуры реликтового излучения 2.7К). То есть в современной Вселенной вещество доминирует.

Если пересчитать эту плотность энергии в количество квантов реликтового излучения (по закону смещения Вина максимум интенсивности излучения черного тела соответствует энергии кванта $h\nu = 2.8 k_B T$), то получится результат $4 \cdot 10^8$ квантов излучения на кубический метр. То есть «в штуках» квантов реликтового излучения гораздо больше, чем атомов водорода во Вселенной.

Если начать двигаться в прошлое нашей Вселенной, то по мере сжатия Вселенной количество квантов излучения и атомов водорода в единице объема возрастает одинаково. Однако при этом происходит «синее смещение» излучения — длина волны реликтового излучения сжимается вместе с пространством. Поэтому энергия кванта увеличивается и соотношение между плотностью вещества и излучения будет изменяться — на ранних этапах развития Вселенной излучение доминировало. По оценкам момент перехода от

доминирования излучения к доминированию вещества произошел около 24000 лет после Большого Взрыва. При этом температура излучения была примерно в 5000 раз выше чем сейчас (отношение современных плотностей вещества и излучения), то есть около 14000К.

Момент формирования атомов. Эра рекомбинации.

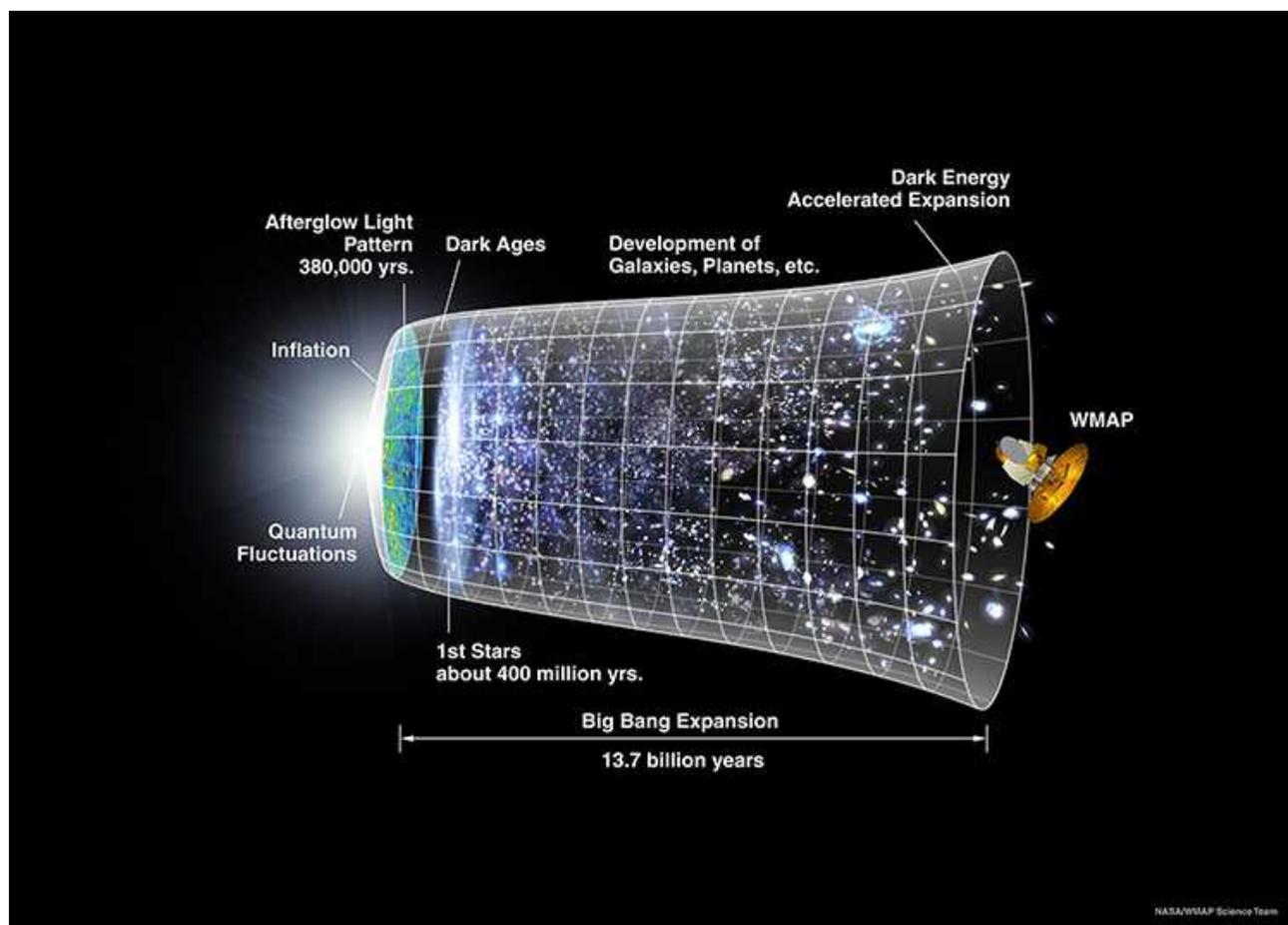


Рисунок 240: История возникновения реликтового излучения. (с сайта <http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>)

Таким образом, на ранних этапах реликтовое излучение было очень горячим. При этом энергия квантов оказывается достаточной для ионизации атомов водорода. Поэтому в эти первые моменты стабильных атомов существовать не могло: случайно сформировавшийся атом быстро поглощает квант излучения и ионизируется. При рекомбинации электрона и протона квант выделяется. Таким образом в этот, горячий, этап жизни Вселенной вещество и излучение находятся в термодинамическом равновесии при одной температуре. Кроме того, Вселенная в этот момент непрозрачна — квант света, пытающийся пересечь горячую Вселенную будет поглощён и переизлучён.

При расширении Вселенной излучение остывает и в тот момент, когда энергия квантов снизится примерно до 3000К ионизация прекратится и смогут существовать стабильные атомы. Этот момент датируется примерно 380000 лет от момента Большого Взрыва. Самые старые кванты излучения, которые мы можем видеть относятся к этому моменту. Величина красного смещения, относящаяся к этому моменту $z=1100$. Никакое наблюдение за очень далекими Галактиками не даст нам возможность заглянуть за предел 380000 лет от Большого

Взрыва. Единственным отпечатком этого момента, доступным нам для наблюдения является реликтовое излучение, которое как раз в этот момент «освободилось» от связи с веществом Вселенной (рисунок 240).

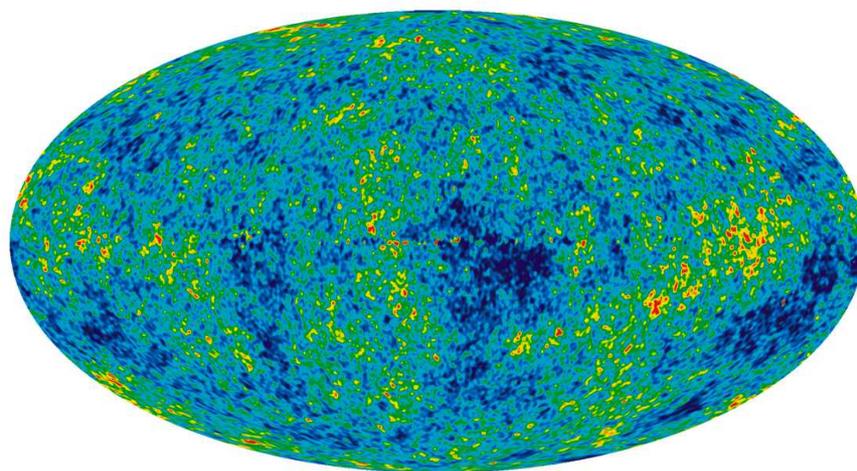


Рисунок 241: Карта анизотропии реликтового излучения. Вариация цвета соответствует ± 200 мК. (с сайта <http://map.gsfc.nasa.gov/media/101080/index.html>)

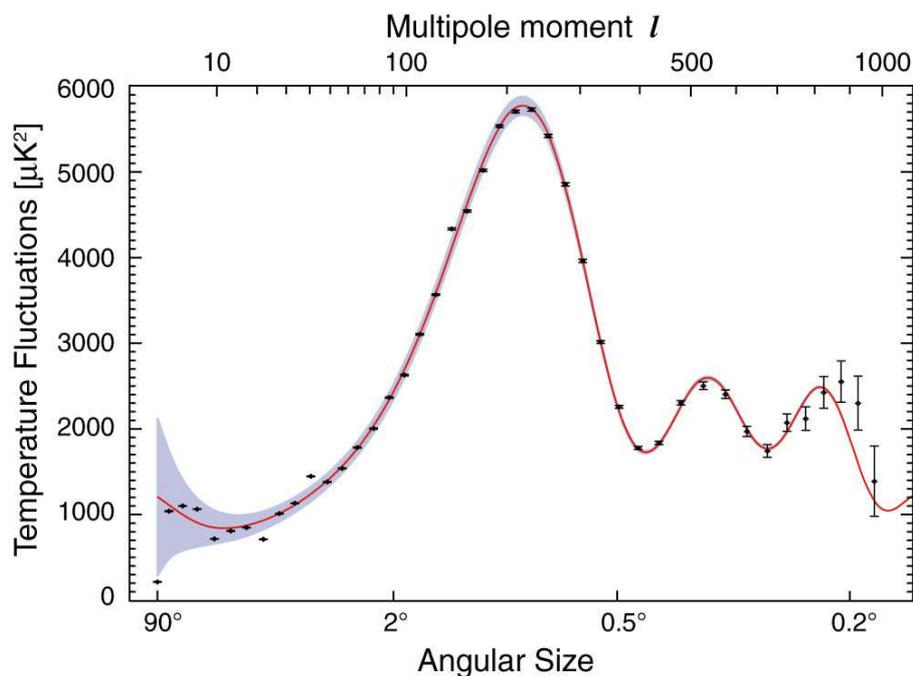


Рисунок 242: Распределение угловых размеров особенностей на карте анизотропии реликтового излучения. (с сайта <http://map.gsfc.nasa.gov/media/080999/index.html>)

Реликтовое излучение было обнаружено в 1960-х годах в наземных экспериментах. Его первооткрыватели, Пенциас и Вильсон, были удостоены Нобелевской премии 1978 года. Недавно были запущены спутники для исследования реликтового излучения с орбиты (в

частности, зонды НАСА COBE и WMAP. Результаты этих точных измерений позволили определить наличие у реликтового излучения слабой анизотропии (рисунки 241, 242). Анизотропия реликтового излучения очень мала: при средней температуре излучения 2.7К анизотропия имеет масштаб 200 мкК. Однако анизотропия реликтового излучения отражает флуктуации температуры и плотности в горячей Вселенной в момент разделения вещества и излучения — является самым ранним свидетельством о формировании нашей Вселенной и о её структуре. Поэтому этот результат был удостоен Нобелевской премии в 2006 году.

Определение кривизны пространства.

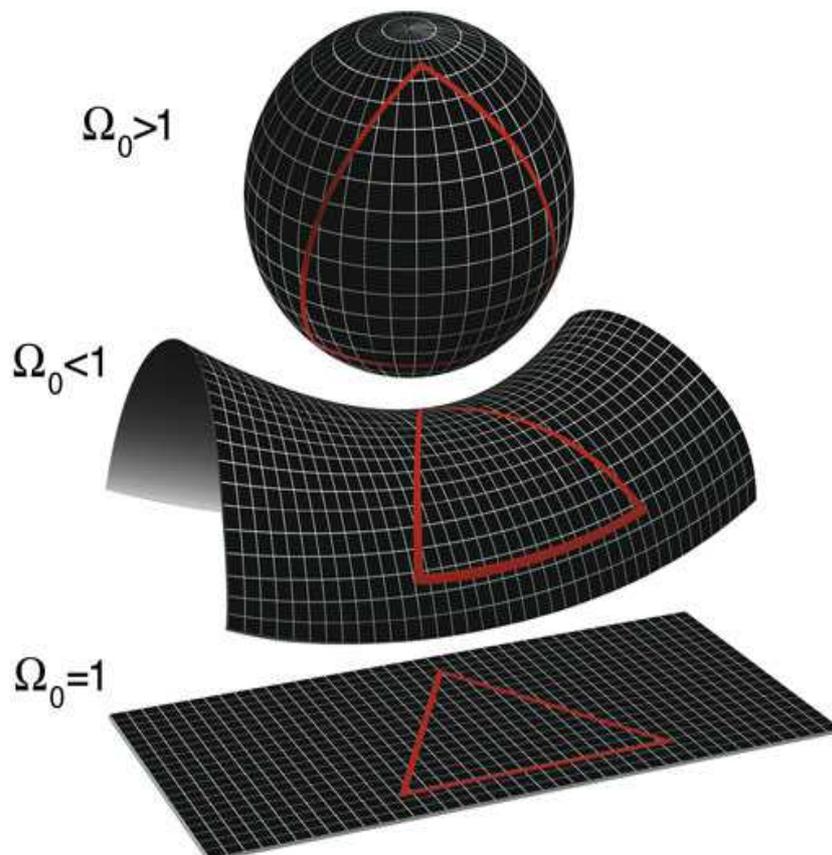


Рисунок 243: Схематическое изображение пространств разной кривизны: закрытое (сферическое), открытое (гиперболическое) и плоское. (с сайта http://map.gsfc.nasa.gov/universe/uni_shape.html)

Обнаружение анизотропии реликтового излучения позволило ответить экспериментально на принципиальный для космологии вопрос: какова кривизна пространства нашей Вселенной.

Идея экспериментальной проверки связана с тем, что «горячая» Вселенная в момент разделения вещества и излучения (380000 лет от Большого Взрыва) является достаточно понятным для анализа объектом. В очень грубом приближении это огромный шар плазмы. В нем еще нет никаких структур (звёзд, галактик). В частности, анализу поддается вопрос о том, каков характерный размер областей флуктуаций температуры.

В зависимости от кривизны пространства, наблюдаемый угловой размер этих флуктуаций может отличаться. Для иллюстрации рассмотрим двумерные поверхности различной кривизны (рисунок 243) на которых наблюдатель в одной из вершин треугольника рассматривает противоположную сторону треугольника. Действительно, на сферической

поверхности лучи сходятся быстрее, что приводит к увеличению видимого углового размера «предмета», на гиперболической — позднее, что приводит к уменьшению видимого углового размера.

Расчёт показывает, что в случае сферической кривизны пространства угловой размер ярких пятен на картине анизотропии реликтового излучения был бы около 1.5° , в случае гиперболической кривизны — около 0.5° , в случае плоского пространства — около 1° . Экспериментальные данные, представленные на рисунке 242, показывают, что с точностью в несколько процентов пространство нашей Вселенной можно считать плоским.

Тёмная энергия.

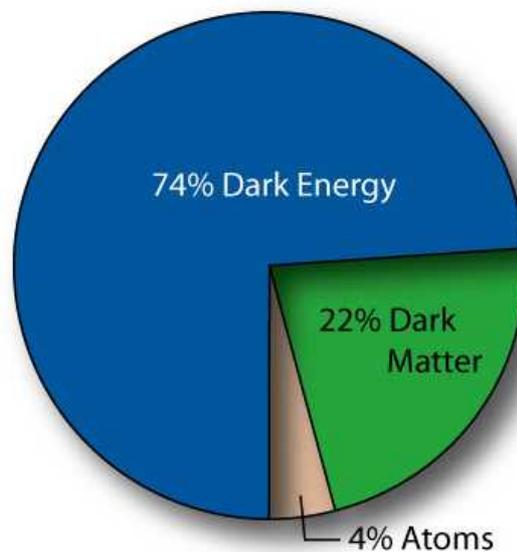


Рисунок 244: Соотношение между обычной материей, тёмной материей и тёмной энергией в современной Вселенной. (с сайта <http://www.solstation.com/x-objects/first.htm>)

Как мы уже упоминали, эволюция пространства-времени (и, соответственно, Вселенной) описывается уравнением Эйнштейна. Оно связывает кривизну пространства с гравитационными силами. В результате экспериментальный факт того, что пространство плоское накладывает вполне определенное ограничение на среднюю плотность массы и энергии $\rho_0 = \rho_m + \rho_r$. Кривизна пространства характеризуется безразмерным параметром плотности $\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_c}$, где критическая плотность $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.0 \cdot 10^{-26} \text{ кг/м}^3$.

Сферическому пространству соответствует параметр плотности больший 1, гиперболическому — параметр плотности меньший 1, плоскому — равный 1.

В современной Вселенной плотность всего вещества (включая темное вещество) составляет около 25% от критической. Таким образом, для объяснения плоской кривизны нашего пространства необходимо предположить, что 75% нашей вселенной состоит из субстанции, которая не проявляет себя ни в виде тяготеющей материи (это учтено в обычной и тёмной материи), ни в виде обнаружимого излучения.

По аналогии с тёмной материей эту субстанцию называют тёмной энергией (рисунок 244). С точки зрения уравнения Эйнштейна она оказывается связана с космологической константой

Λ. Эта константа описывает некоторую форму энергии, заставляющую Вселенную расширяться и противостоящую гравитации.

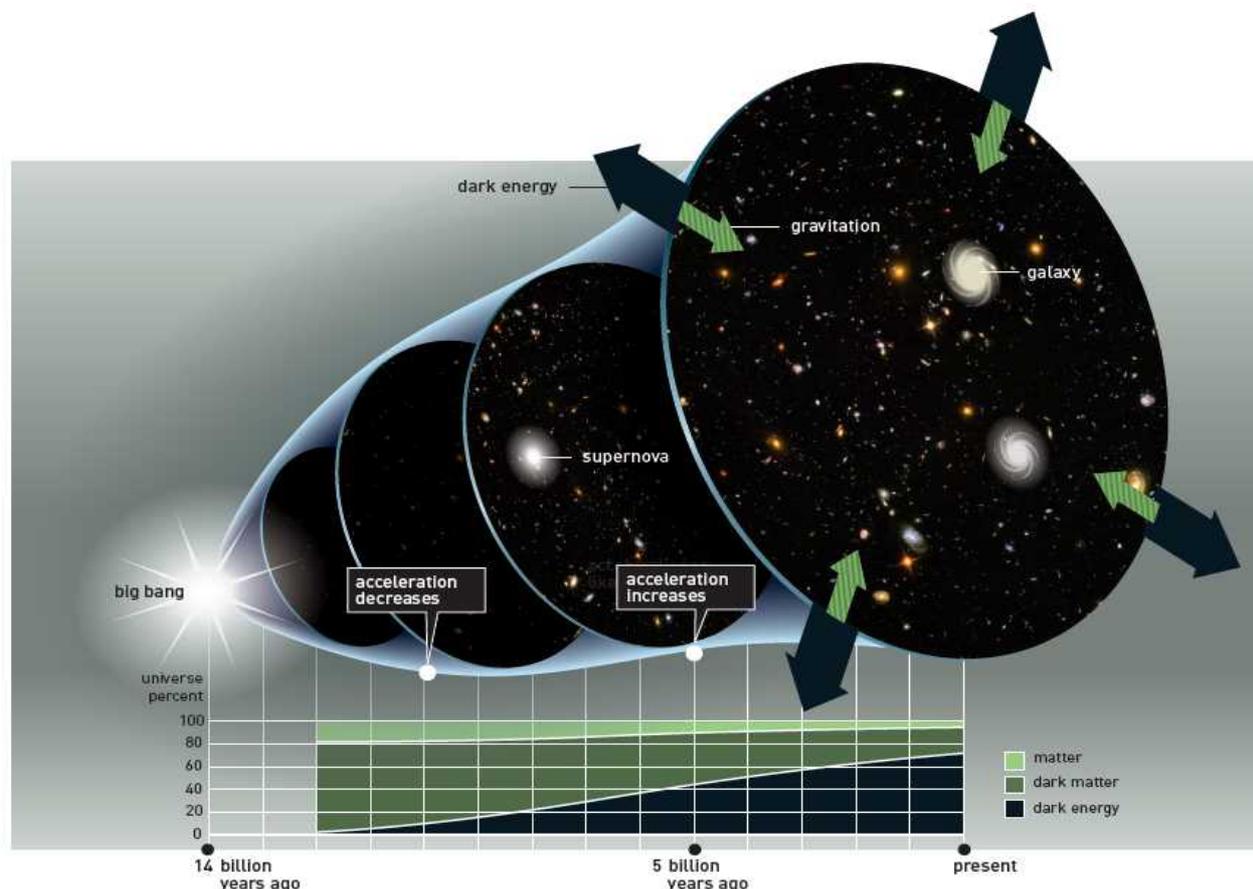


Рисунок 245: Изменение соотношения между материей, тёмной материей и тёмной энергией в ходе развития Вселенной. Рисунок из пресс-релиза Нобелевского комитета http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/popular-physicsprize2011.pdf

Баланс между тёмной энергией и материей определяет судьбу Вселенной. Если бы тёмной энергии не было, Вселенная начала бы сжиматься и коллапсировать. В зависимости от количества тёмной энергии скорость расширения Вселенной может изменяться — если плотность тёмной энергии мала, то расширение Вселенной должно замедляться, если плотность тёмной энергии велика, то расширение Вселенной должно ускоряться. Это изменение скорости расширения можно проверить сравнивая скорости разбегания относительно близких и далеких галактик (рисунок 245). Такая работа ведется, например в рамках проекта Supernova Cosmology Project, ее результаты подтверждают ускорение расширения Вселенной со временем.¹

Эти измерения также позволяют наложить дополнительные экспериментально наблюдаемые ограничения на плотность тёмной энергии и материи во Вселенной. Совокупность данных, полученных разными методами представлена на рисунке 246. Видно, что всем данным удовлетворяет достаточно малая область параметров. Поэтому, несмотря на отсутствие прямого наблюдения тёмной энергии, её существование можно считать хорошо подтвержденным.

¹ За подтверждение ускоряющегося расширения Вселенной присуждена Нобелевская премия 2011 года.

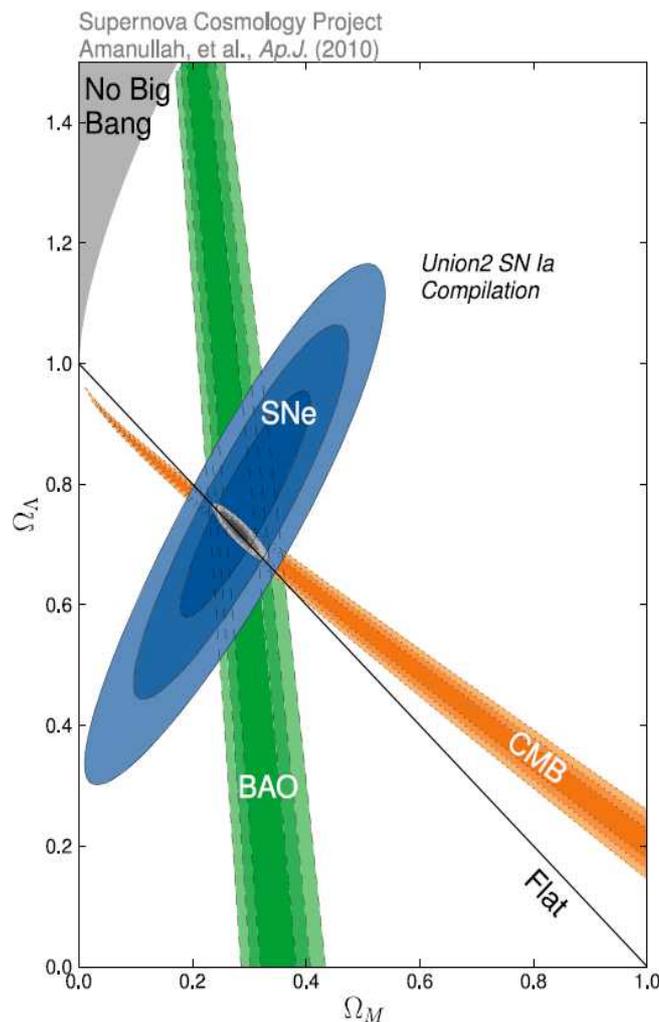


Рисунок 246: Сравнение различных экспериментально наблюдаемых ограничений на космологические параметры. По осям отложены параметры плотности тёмной энергии и материи (Ω_Λ и Ω_M , соответственно). SNe - область данных, полученных из анализа изменения скорости расширения Вселенной по измерениям далеких сверхновых. CMB - данные по реликтовому излучению. BAO (barionic acoustic oscillations) - данные по крупномасштабным флуктуациям плотности вещества во Вселенной, отражающим звуковые волны в плазме горячей Вселенной. (с сайта <http://supernova.lbl.gov/Union/>)

Интересно отметить, что плотность тёмной энергии излучения и материи по разному менялись с расширением Вселенной. Плотность тёмной энергии оказывается неизменной. Поэтому, хотя в современной Вселенной темная энергия доминирует и обуславливает ускорение расширения Вселенной, в прошлом, с большей плотностью вещества, это было не так. Переход от доминирования вещества к доминированию тёмной энергии произошел около 5 миллиардов лет назад (9 млрд. лет от Большого Взрыва). До этого момента расширение Вселенной замедлялось под действием гравитационных сил, после этого момента — стало ускоряться (рисунок 245).

Природа тёмной энергии не ясна. Она проявляет себя, как и темная материя, только через гравитационные эффекты. Считается, что тёмная энергия очень однородно распределена в пространстве — то есть её характерная плотность оказывается эквивалентна нескольким атомам водорода на кубический метр. Это делает проблематичным её прямое обнаружение.

От горячей плазмы к современной Вселенной.

Развитие Вселенной от момента термодинамического «отделения» излучения от вещества ($z=1100$, 380000 лет от Большого Взрыва) относительно понятно. По крайней мере на словах это развитие хорошо сочетается с уже обсужденными нами понятиями. Над точным описанием и моделированием этих процессов работают различные группы специалистов.

Итак, к моменту 380000 лет от Большого Взрыва вещество и излучение было уже достаточно холодным (3000К). Поэтому с дальнейшим расширением Вселенной происходило остывание реликтового излучения и материи. Из-за случайных неоднородностей материя группировалась. Как мы уже говорили, сила гравитации препятствует расширению пространства, поэтому более активно расширялись более пустые участки, что в конечном итоге привело к формированию современной крупномасштабной структуры Вселенной с большими пустотами и кластеризацией галактик. Результаты одного из самых масштабных на сегодняшний день моделирований, в котором участвовало 10 миллиардов частиц представлены на рисунке 247. Это моделирование показывает, что под действием физических законов действительно формируется крупномасштабная структура качественно похожая на структуру Вселенной.

Вопрос о том какой величины должна быть флуктуация при заданной температуре и средней плотности среды, чтобы гравитационное взаимодействие удержало это сгущение среды от дальнейшего размытия является разрешимым. Более того, этот вопрос был решен более 100 лет назад, еще до появления теории относительности. Эта задача восходит еще к Исааку Ньютону. Она была решена в 1902 году Джеймсом Джинсом, который показал, что гравитационные силы стабилизируют формирование объекта из флуктуации плотности, если размер этой флуктуации превосходит джинсовскую длину $L_J = \sqrt{\frac{\pi k_B T}{m G \rho_m}}$ (здесь m - масса частицы газа).

Если подставить в это уравнение предполагаемые условия, существовавшие при температуре Вселенной в 3000К, то получится размер в 100 световых лет с критической массой такой флуктуации в 500000 солнечных. Эти параметры хорошо согласуются с характерными массами и размерами шаровых скоплений, которые, как следует из наших знаний о процессах эволюции звёзд, являются одними из старейших образований. Таким образом возникает еще одна привязка космологической модели рождения и расширения Вселенной к наблюдаемым данным.

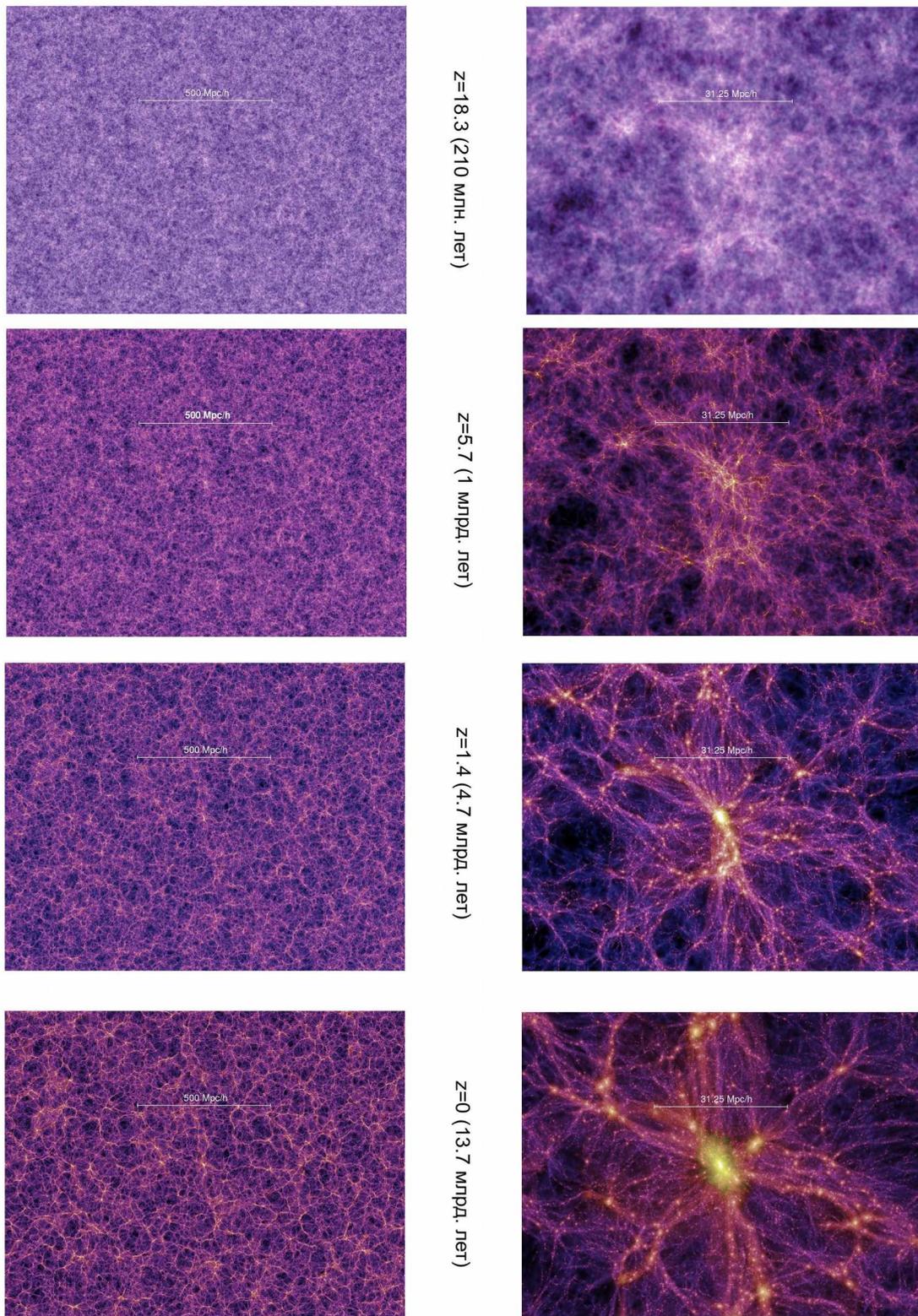


Рисунок 247: Моделирование перераспределения вещества во Вселенной. Численное моделирование выполнено для 10 миллиардов частиц. (с сайта <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>)

Плазма горячей Вселенной состояла из водорода и гелия. Как мы обсуждали при рассмотрении формирования звёзд и планетных систем, собирающееся под действием тяготения вещество приводит к «зажиганию звезды». До момента формирования первых звёзд остывающая Вселенная была довольно мрачным местом, лишенным источников света. Первые формирующиеся звезды должны принадлежать к классу звёзд третьей популяции, полностью лишенных тяжелых элементов. Таких звёзд в настоящий момент не обнаружено, но есть некоторые косвенные доказательства их прошлого существования. (Напомним, что самые старые звезды сейчас принадлежат к так называемой второй популяции и содержат небольшое количество тяжелых элементов, а более молодые (включая Солнце) являются звездами первой популяции, содержащими большее количество тяжелых элементов.)

Моделирование, расчёты и анализ данных показывают, что первые звезды сформировались к моменту времени около 400 миллионов лет после Большого Взрыва. Период времени от эры рекомбинации до появления первых звёзд иногда называют «тёмными веками» Вселенной. Первые звёзды формировались в более плотной Вселенной, поэтому они могли достигать больших размеров чем современные звезды. Предполагается, что звезды третьей популяции могли иметь массы от 30 до 1000 солнечных масс (современные звезды имеют массы от 0.4 до 120 солнечных). Такие большие звёзды должны быть и очень горячими — их излучение должно вызвать повторную ионизацию вещества во Вселенной. Из-за этого момент возникновения первых очень ярких звёзд в относительно плотной Вселенной называют также эрой реионизации. Последствия реионизации обнаруживаются в деталях спектров очень далеких квазаров и в деталях анизотропии и поляризации реликтового излучения. Эти наблюдаемые явления и позволяют установить время реионизации как примерно 400 миллионов лет от Большого Взрыва.

Эти сверхмассивные звезды должны были быстро пройти свой жизненный цикл, согласно некоторым расчётам их умирание может происходить без образования белых карликов, нейтронных звёзд или черных дыр — эти звезды могли просто активно выбросить все свое переработанное (и впервые в истории Вселенной обогащённое тяжёлыми элементами вещество) в пространство.

Дальнейшее развитие Вселенной происходит как мы уже обсуждали: возникают новые звезды, отживают свой век, формируют галактики, планетные системы. И в конце концов на неяркой третьей планете довольно ординарной планетной системы появляемся мы.

От горячей плазмы к Большому Взрыву.

Наше представление о процессах более ранних, чем 380000 лет от Большого Взрыва основано на теоретических представлениях. Из-за непрозрачности плазмы излучение со столь ранних этапов развития Вселенной принципиально отсутствует. Теория предсказывает наличие реликтовых нейтрино, относящихся к этим ранним этапам — однако обнаружение холодных нейтрино является очень сложной задачей из-за слабого взаимодействия нейтрино с веществом. Проверкой этих теоретических построений является только то, что они приводят к проверяемым результатам в последствии.

По мере приближения к моменту Большого Взрыва Вселенная сжимается (в наших рассуждениях мы сейчас движемся в прошлое) и её температура растет. В какой-то момент эта температура достигает значений, при которых может идти термоядерный синтез. Вся Вселенная становится термоядерным реактором, часть первично образовавшегося водорода превращается в гелий. Этот момент окончания нуклеосинтеза соответствует примерно 15 минутам от Большого Взрыва.

Принципиальным ограничением в нашем приближении к моменту Большого Взрыва является масштаб планковского времени¹ $t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.39 \cdot 10^{-44} \text{ сек}$. На меньших масштабах времени считается, что наши современные представления о законах физики и свойствах пространства-времени оказываются неверны. После же этого интервала считается, что пространство-время эволюционирует нормальным (с точки зрения общей теории относительности) образом и поддается анализу.

Для понимания того, что происходило в эти первые секунды и ничтожные доли секунды необходимо ненадолго отвлечься и вспомнить (или узнать) как осуществляются взаимодействия в физике. Физика знает о четырех фундаментальных взаимодействиях:

- сильное взаимодействие связывает кварки друг с другом и формирует протоны и нейтроны, а также ядра атомов.
- электромагнитное взаимодействие действует на заряженные частицы.
- слабое взаимодействие отвечает за процессы радиоактивного распада, взаимодействие нейтрино, кварков, электронов.
- гравитационное взаимодействие действует на все частицы.

Согласно выдвинутой в 1940-х годах модели Фейнмана, Швингера и Томогавы (Нобелевские лауреаты 1965 года) взаимодействие передается от одной взаимодействующей частицы к другой посредством обмена виртуальными частицами, являющимися переносчиками взаимодействия. Эта модель была изначально высказана для электромагнитного взаимодействия, но с другими фундаментальными взаимодействиями применима та же логика. Этими частицами-переносчиками являются: глюоны для сильного взаимодействия, фотоны для электромагнитного, векторные бозоны для слабого и гравитоны для гравитационного. Частицы-переносчики называют виртуальными, потому что они возникают на очень короткое время, определяемое квантовыми флуктуациями и соотношением неопределенности.

Появление концепции виртуальных частиц изменило наши представления о физическом вакууме. Квантовая электродинамика описывает вакуум как «кипящий суп», в котором постоянно рождаются и уничтожаются электрон-позитронные пары и другие пары частица-античастица. Время жизни пары определяется соотношением неопределенности $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar$. Для рождения электрон-позитронной пары время существования пары оказывается порядка 10^{-22} сек, для более тяжелых частиц это время будет пропорционально меньше. Виртуальные электрон-позитронные пары вызывают вполне обнаруживаемые эффекты: лэмбовский сдвиг (маленькое расщепление 2s и 2p уровня атома водорода), аномальный магнитный момент электрона (отличие собственного магнитного момента электрона от предсказываемого теорией Дирака значения).

Таким образом, физический вакуум не пуст — это состояние в котором в полном соответствии с законами квантовой физики постоянно возникают и уничтожаются частицы и

¹ Планковское время $t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.39 \cdot 10^{-44} \text{ сек}$ и планковская длина $l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.62 \cdot 10^{-35} \text{ м}$

являются комбинациями фундаментальных констант (гравитационной постоянной, постоянной Планка и скорости света) с размерностью времени и длины, соответственно. Согласно современным представлениям эти величины задают масштабы на которых перестаёт быть применимо представление о стабильном пространстве и времени.

античастицы, а также рождаются и уничтожаются частицы-переносчики взаимодействий.

Интересным является то, что с ростом энергии частиц-переносчиков взаимодействия некоторые частицы становятся по своим свойствам неотличимы друг от друга. Ультрарелятивистские промежуточные бозоны с энергиями более 100 Гэв становятся неотличимы от фотонов — и как следствие слабое и электромагнитное взаимодействия описываются одинаково, «объединяются». За это открытие, объединенную теорию поля, Глашов, Салам и Вайнберг стали лауреатами Нобелевской премии 1979 года.

Вернёмся теперь к нашей очень горячей Вселенной в первые моменты её существования. Так как температура и энергия растут по мере приближения к Большому Взрыву, все фундаментальные взаимодействия «объединяются» в этом смысле. Считается, что практически сразу, в момент 10^{-43} секунды (температура Вселенной 10^{32} К) отделилось гравитационное взаимодействие, позднее в момент 10^{-35} секунды (10^{27} К) отделилось сильное взаимодействие, и наконец последними в момент 10^{-12} секунды (10^{15} К) отделилось слабое взаимодействие.

Считается, что одновременно с моментом отделения сильного взаимодействия произошел процесс скачкообразного увеличения (инфляции) Вселенной. Модель инфляции была предложена советским физиком Старобинским. Инфляция Вселенной продолжалась примерно 10^{-32} секунды, за это время Вселенная увеличилась в размере в $10^{30}–10^{50}$ раз. Важно отметить, что такое мгновенное увеличение Вселенной не противоречит постулату о предельности скорости света — при этом не происходит перемещения объектов в пространстве, а расширяется само пространство.

Время инфляционной эпохи мало по сравнению со временем существования виртуальной пары. Это означает, что виртуальные пары частица-античастица, образовавшиеся в это время, окажутся разделенными расширяющимся пространством и в нашей Вселенной образуется набор частиц и античастиц.

Часть этих пар частиц и античастиц в течение первой секунды жизни Вселенной аннигилирует. Образующиеся при этом гамма-кванты в будущем станут реликтовым излучением. Вспоминая соотношение количества квантов излучения и атомов во Вселенной, мы приходим к выводу, что была какая-то причина по которой частиц должно было рождаться на одну на миллиард больше чем античастиц. Существуют и разрабатываются теории, которые действительно предсказывают такую асимметрию формирования вещества и антивещества. Однако этот вопрос далёк от окончательного решения.

Заключение.

На этом мы заканчиваем изучение астрономии. В заключение необходимо подчеркнуть еще раз, что несмотря на особенность предмета астрономии, астрофизики и космологии, связанную с изучением процессов, проходивших на огромных масштабах в пространстве и времени, эти науки опираются на очень богатый наблюдательный материал и результаты других разделов физики.

Задачи¹ к курсу лекций «Астрономия».

1. Наблюдатель смотрит на небо со дна глубокого колодца диаметром $d=0.5\text{м}$ и глубиной $H=100\text{м}$. Сможет ли он различить днем какие-либо небесные тела? Сможет ли тот же наблюдатель увидеть какие-либо небесные тела с поверхности Земли в телескоп с угловым увеличением 50? В обоих случаях наблюдатель находится на уровне моря. Принять разрешающую способность глаза равной $1'$, яркость дневного неба -5^m на квадратную минуту дуги.
2. Далекий наблюдатель, находящийся на расстоянии 1псв в плоскости эклиптики, смотрит на Солнце. Какую точность должны иметь его приборы чтобы определить наличие у Солнца планет? Оценить эффекты связанные с наличием планеты: изменение видимого положения Солнца, изменение яркости в видимом диапазоне при прохождении Юпитера, доплеровский сдвиг γ -линии водорода. Масса Юпитера 10^{-3} солнечной, радиус Юпитера 70000 км , радиус Солнца 700000 км , орбитальный радиус Юпитера принять равным 5.2 а.ед. , период обращения 11.9 года .
3. Оценить размер астероида с которого астронавт может «выпрыгнуть» в космос. Для оценки принять, что скафандр не ограничивает движений и его масса для оценки пренебрежимо мала.

¹ Задачи предлагались на письменной контрольной для слушателей курса.

Решение задач.

Задача 1.

Наблюдатель смотрит на небо со дна глубокого колодца диаметром $d=0.5\text{ м}$ и глубиной $H=100\text{ м}$. Сможет ли он различить днем какие-либо небесные тела? Сможет ли тот же наблюдатель увидеть какие-либо небесные тела с поверхности Земли в телескоп с угловым увеличением 50? В обоих случаях наблюдатель находится на уровне моря. Принять разрешающую способность глаза равной $1'$, яркость дневного неба -5^m на квадратную минуту дуги.

Поле зрения наблюдателя на дне колодца составляет $\alpha = d/H = 5 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 17'$, что больше чем предел разрешения глаза. В глазе изображение этого участка неба будет распределяться на несколько чувствительных элементов (палочек и колбочек). Изображение звезды точечное и можно считать, что оно попадает на единственный чувствительный элемент.

Поэтому для ответа на первый вопрос задачи необходимо сравнить поток света на один чувствительный элемент от неба и от небесного тела. Дневное небо с участка, приходящегося на один элемент создает засветку, соответствующую яркости -5^m . Примем для оценки, что наш глаз способен заметить изменение яркости в одной из точек поля наблюдения на 10% (что является оптимистичной оценкой). Яркость звезды, соответствующая 10% от фоновой засветки на

$\Delta m = -2.512 \lg \frac{b_1}{b_2} \approx -2.5^m$ меньше чем яркость фоновой засветки. Таким

образом, на фоне неба будут видны объекты звездной величины 2.5^m . Это Солнце, Луна, Венера, МКС, Марс и Юпитер в максимальной яркости. Ярчайшая из звёзд — Сириус, имеет яркость 1.4^m , заведомо вне пределов наблюдения. Поэтому утверждение о том, что из глубокого колодца видны звезды — миф.

При наблюдении в телескоп изображение звезды по-прежнему точечное (угловое увеличение 50 оставляет размытие звезды из-за атмосферных неоднородностей в пределах разрешения глаза). Однако участок неба распределится на площадь в $50^2=2500$ раз большую. Увеличение светового потока за счет большего диаметра объектива одинаково и для звезды и для фоновой засветки, поэтому его можно не учитывать. Итого, фоновая засветка будет уменьшится на

$\Delta m = -2.512 \lg 2500 \approx -8.5^m$ и будет соответствовать -3.5^m . Используя ту же оценку чувствительности в 10% от фона, получим предельную наблюдаемую величину звезды в -6^m , что почти соответствует пределу чувствительности невооруженного глаза. То есть, в телескоп днем звезды наблюдаются без труда.

Отметим, что в условиях высокогорья фоновая засветка неба становится меньше и оценки становятся более оптимистичными. (Подробности об этих оценках в статье Сурдин В. Видны ли звезды днем из глубокого колодца? //Квант. — 1994. — № 1. — С. 11-13.)

Задача 2

Далёкий наблюдатель, находящийся на расстоянии 1 пс в плоскости эклиптики, смотрит на Солнце. Какую точность должны иметь его приборы чтобы определить наличие у Солнца планет? Оценить эффекты связанные с наличием планеты: изменение видимого положения Солнца, изменение яркости в видимом диапазоне при прохождении Юпитера, доплеровский сдвиг γ -линии водорода (434 нм). Масса Юпитера 10^{-3} солнечной, радиус Юпитера 70000 км, радиус Солнца 700000 км, орбитальный радиус Юпитера принять равным 5.2 а.е., период обращения 11.9 года.

Все рассматриваемые эффекты связаны с орбитальным движением. И Солнце, и Юпитер движутся вокруг их общего центра масс, поэтому для далекого наблюдателя возникает периодическое смещение Солнца. При прохождении по диску более холодный Юпитер блокирует часть излучения. Из-за того, что Солнце движется, возникает доплеровский сдвиг, максимальный, когда Солнце движется к наблюдателю или от наблюдателя.

Оценим изменение положения Солнца. Радиусы орбит Солнца и Юпитера связаны как $RM = rm$, поэтому радиус орбиты Солнца составляет 0.0052 а.е. (примерно совпадает с радиусом Солнца). Максимальное смещение (правое и левое положение для наблюдателя) составляет 0.0104 а.е. Вспоминаем определение парсека: расстояние с которого 1 а.е. видна под углом в 1 секунду дуги. Отсюда максимальное смещение Солнца для наблюдателя составит 0.01". Это соответствует дифракционному пределу больших земных рефракторов.

Оценим измерение яркости. Для наблюдателя уменьшится видимая площадь диска Солнца.

Изменение видимой звездной величины $\Delta m = -2.512 \lg \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \approx 2.512 \frac{d^2}{D^2} = 0.025^m$,

яркость изменится на 1%. Инструментально достижимо.

Оценим доплеровский сдвиг. Орбитальные скорости соотносятся с массами также, как и радиусы орбит. (Их кроме того легко вычислить, зная радиус орбиты и период). Из справочника, орбитальная скорость Юпитера 13 км/сек. Соответственно, орбитальная

скорость Солнца 13 м/сек. Доплеровский сдвиг $\frac{\delta \lambda}{\lambda} = \frac{V}{c} \approx 4 \cdot 10^{-8}$.

Задача 3

Оценить размер астероида с которого астронавт может «выпрыгнуть» в космос. Для оценки принять, что скафандр не ограничивает движений и его масса для оценки пренебрежимо мала.

Примем для оценки, что в земных условиях тренированный человек в состоянии прыгнуть на высоту 2 метра.¹ Таким образом, скорость в момент прыжка равна $V = \sqrt{2gh} = 6.3 \text{ м/сек}$.

Скорость убегания с поверхности сферического тела заданной плотности легко находится из закона сохранения энергии:

$$\frac{mV_{убег}^2}{2} = G \frac{Mm}{R} = \frac{4}{3} \pi G \rho R^2 m$$

$$V_{убег} = R \sqrt{\frac{8\pi}{3} G \rho}$$

Плотность астероида зависит от его состава, можно принять значения от 2 г/см^3 (для каменного) до 5 г/см^3 (для железного). Так как плотность стоит под корнем, это не очень сильно влияет на итоговую оценку. Для вычисления здесь используем 5 г/см^3 . Приравняв скорость убегания к найденной скорости в прыжке, получаем

$$R = \frac{V}{\sqrt{\frac{8\pi}{3} G \rho}} = 3700 \text{ м}$$

Таким образом, если радиус астероида меньше нескольких километров, то тренированный человек может «выпрыгнуть» в космос с этого астероида.

1 Оценка является завышенной: мировой рекорд прыжков в высоту составляет 2 метра 45 сантиметров, но по технике прыжка центр масс атлета проходит под планкой и в момент толчка центр масс находится на высоте около 1 метра от земли. Но так как в оценку для скорости высота прыжка входит под корнем, это не приводит к большой погрешности. Сравнимую погрешность вносит и неопределённость плотности астероида.