



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# АСТРОФИЗИКА

ПОПОВ  
СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ

---

ФИЗФАК МГУ

---

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН  
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ  
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ  
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.  
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ  
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ  
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,  
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,  
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ  
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

## Содержание

<b>Лекция 1. История становления астрономии.</b>	<b>6</b>
1.1. 10 фактов об астрономии. . . . .	6
1.2. Разделы астрономии. . . . .	9
1.3. Астрометрия. . . . .	9
1.4. Небесная механика. . . . .	10
1.5. Девятая планета. . . . .	11
1.6. Астрономия. . . . .	11
1.7. Телескопы. . . . .	12
1.8. Собирающая площадь . . . . .	14
1.9. Звёздная величина . . . . .	14
1.10. Абсолютная звёздная величина . . . . .	15
1.11. Показатели цвета . . . . .	17
1.12. Угловое разрешение . . . . .	19
1.13. Рефракторы и рефлекторы . . . . .	20
1.14. Университетские обсерватории . . . . .	21
1.15. Оптические телескопы в начале 20 века . . . . .	21
1.16. Система Кассегрена и Ричи-Кретьена . . . . .	22
1.17. Неподвижные фокусы . . . . .	23
1.18. Активная оптика . . . . .	23
1.19. Спектроскопия . . . . .	25
1.20. Всеволновая астрономия . . . . .	27
<b>Лекция 2. Гравитационные волны. Нейтрино.</b>	<b>28</b>
2.1. Звездные величины и абсолютные звездные величины . . . . .	28
2.2. Спектр космических лучей . . . . .	30
2.3. Происхождение космических лучей . . . . .	31
2.4. Регистрация космических лучей . . . . .	33
2.5. Нейтринные эксперименты . . . . .	35
2.6. Гравитационные волны . . . . .	39
2.7. Астрономические наблюдения из космоса . . . . .	42
<b>Лекция 3. Солнце.</b>	<b>48</b>
3.1. Основные параметры . . . . .	48
3.2. Строение Солнца . . . . .	48
3.3. Устойчивость Солнца . . . . .	49
3.4. Внешняя структура Солнца . . . . .	51
3.4.1. Солнечные пятна . . . . .	52
3.4.2. Факельные поля . . . . .	54
3.4.3. Протуберанцы . . . . .	54
3.4.4. Солнечная грануляция . . . . .	54
3.5. Гелиосейсмология . . . . .	56
3.6. Солнечный цикл . . . . .	56
3.7. Эволюция Солнца . . . . .	57
3.8. Зона обитаемости . . . . .	58

3.9. Вспышки на Солнце . . . . .	60
3.10. Солнечные нейтрино . . . . .	60
<b>Лекция 4. Экзопланеты.</b>	<b>62</b>
4.1. Как открывают? . . . . .	62
4.1.1. Лучевые скорости . . . . .	62
4.1.2. Транзитные экзопланеты . . . . .	63
4.1.3. Как не перепутать с пятнами? . . . . .	64
4.2. Микролинзирование . . . . .	65
4.3. Тайминг . . . . .	65
4.4. Астрометрическое детектирование . . . . .	65
4.5. Изменение суммарного блеска . . . . .	66
4.6. Прямой метод . . . . .	66
4.7. Планеты у двойных звезд . . . . .	66
<b>Лекция 5. Солнечная система.</b>	<b>68</b>
5.1. Размеры солнечной системы и ее структура . . . . .	68
5.2. Астероиды . . . . .	70
5.3. Законы Кеплера . . . . .	70
5.4. Межпланетная среда и гелиосфера . . . . .	73
5.5. Образование планетной системы . . . . .	73
5.6. Структура планет . . . . .	77
<b>Лекция 6. Звезды.</b>	<b>79</b>
6.1. Звездные параллаксы . . . . .	79
6.1.1. Параллакс . . . . .	79
6.2. Парадокс Ольберса . . . . .	81
6.3. Образование звезд . . . . .	82
6.4. Первые звезды . . . . .	84
6.5. Устойчивость звезды . . . . .	86
6.6. Эволюция звезд . . . . .	88
<b>Лекция 7. Объекты во Вселенной.</b>	<b>97</b>
7.1. Двойные звезды . . . . .	97
7.1.1. Обмен масс . . . . .	97
7.1.2. Парадокс Алголя . . . . .	98
7.1.3. Гелиевые белые карлики . . . . .	99
7.1.4. Сверхновые типа Ia . . . . .	100
7.1.5. Сверхновая 1987A . . . . .	100
7.1.6. Изображения двойных звезд . . . . .	101
7.1.7. Тесные двойные . . . . .	103
7.1.8. Новые звезды . . . . .	103
7.2. Измерение масс . . . . .	104
7.3. Убегающие звезды . . . . .	105
7.4. Звезды гало . . . . .	107
7.5. Белые карлики . . . . .	109

<b>Лекция 8. Нейтронные звезды.</b>	<b>111</b>
8.1. Внутреннее строение . . . . .	115
8.2. Остывание нейтронных звезд . . . . .	118
<b>Лекция 9. Черные дыры.</b>	<b>120</b>
9.1. Основные типы черных дыр . . . . .	121
9.2. Черные дыры в двойных системах . . . . .	122
9.2.1. Рентгеновский барстер . . . . .	123
9.3. Сверхмассивные черные дыры в центрах галактики . . . . .	125
9.3.1. Мазеры . . . . .	126
9.3.2. Кинематика газа . . . . .	126
9.3.3. Соотношение между массами черной дыры и балджа . . . . .	126
<b>Лекция 10. Структура галактик.</b>	<b>129</b>
10.1. Млечный путь . . . . .	129
10.2. Квазары . . . . .	132
10.3. Пузыри Ферми . . . . .	133
10.4. Темное вещество . . . . .	134
<b>Лекция 11. Вселенная и космология.</b>	<b>136</b>
11.1. Реликтовое излучение . . . . .	136
11.2. Первичный нуклеосинтез . . . . .	137
11.3. Космология . . . . .	142
<b>Лекция 12. Космология.</b>	<b>147</b>
12.1. Фотометрическое расстояние. Угловое расстояние . . . . .	147
12.2. Красное смещение . . . . .	147
12.3. Формулы для расширения . . . . .	148
12.4. Расстояние по собственному движению. Время путешествия фотона . . . . .	149
12.5. Формулы для расширения. Космологический калькулятор . . . . .	150
12.6. Парадокс Ольберса . . . . .	151
12.7. Космическое время. Скорость измерения расстояния . . . . .	152
12.8. Космические горизонты . . . . .	153
12.9. Изменение красного смещения . . . . .	154



# Лекция 1. История становления астрономии.

## 1.1. 10 фактов об астрономии.

### Факт 1. Астрономия - наблюдательная наука.

Астрономия - наблюдательная наука. Именно поэтому мы начинаем с обсуждения астрономических наблюдений. То, что эта наука наблюдательная, принципиально отличает ее от всех естественных наук.

В астрономии невозможны прямые эксперименты, мы можем только дистанционно, пассивно наблюдать и это меняет методологию работы и акценты развития (например, изобретение телескопов).

### Факт 2. В телескоп не смотрят глазами.

В телескоп глазом не смотрят. Во-первых, потому что появились приемники излучения, в том числе цифровые, а во-вторых, потому что есть наблюдения не в оптическом диапазоне.

### Факт 3. Важнейшей составляющей работы астронома является обработка данных.

Поскольку наблюдения - это самое главное, то наугад выхваченный астроном занимается обработкой наблюдений. Сами наблюдения могут проходить быстро: цифровые источники позволяют за секунды получить изображение, но после его нужно обработать, что требует очень сложных алгоритмов и много времени.

Далее представлены две картинки, доказывающие почему это важно и сложно. На рисунке (Рис. 1) показан единственный случай, когда на прямом изображении мы видим сразу четыре экзопланеты.

Это четыре гигантских планеты, примерно такие как Юпитер, которые вращаются вокруг другой звезды HR 8799. Мы их видим, так как это молодые планеты, они еще продолжают сжиматься и еще много светят в ИК-диапазоне. Звезды не так много светят в ИК-диапазоне, и если вы снимаете в этой части спектра, то вы с большей вероятностью можете вытащить планету. Планету трудно увидеть, не только потому что они сами слабые, а потому что находятся близко от яркой звезды. Клякса по середине - это то, что осталось от звезды даже после обработки изображения и "аура" вокруг это то, что было вычтено. Это реальное изображение звезды, то что она засветила на фотодетекторе.

На рисунке (Рис. 2) виден остаток сверхновой, т.е. взорвалась звезда и мы сейчас видим красивую туманность. Очень часто, когда люди видят такие картинки, возникает вопрос: а это правда или неправда. Безусловно так нельзя увидеть. Эта картинка была получена в результате сложения трех изображений, полученных в рентгеновском, ИК и видимых диапазонах. Но зато мы видим детали. Эти волокна действительно есть, то что они светят в разном диапазоне отражает разную физику. Чтобы получить такую картинку нужна серьезная работа с данными и это именно то, чем занимаются большинство астрономов.

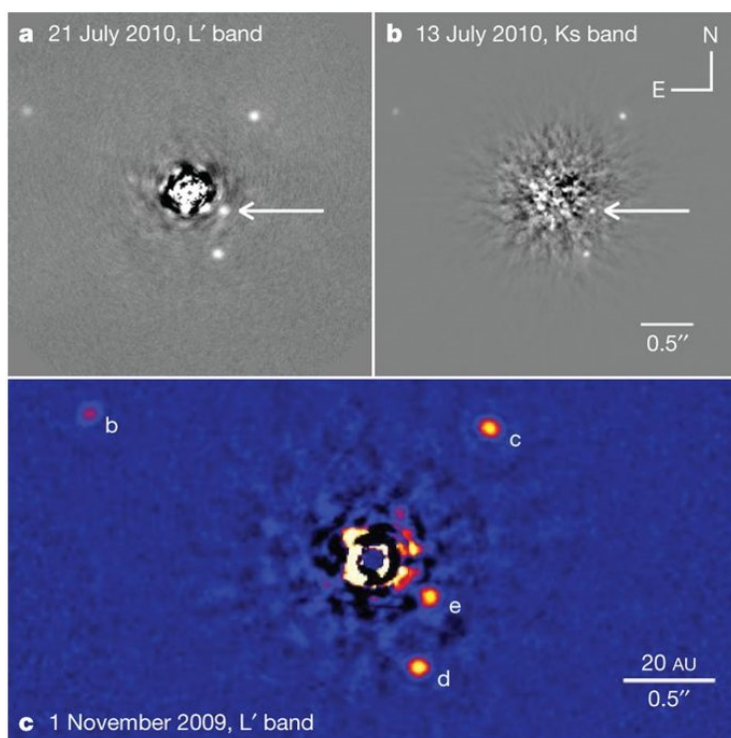


Рис. 1.

#### Факт 4.

Наблюдения ведутся в разных диапазонах спектра и говорят, что астрономия стала всеволновой, т.е. от радио до гамма. А также есть нейтринная астрономия, изучение космических лучей.

#### Факт 5.

Наблюдатели не всегда сидят у телескопа. Разумеется, космические эксперименты управляются дистанционно. Но и наземные все чаще управляются издалека. Кроме того, часто инструментом управляет команда инженеров, а астроном лишь описывает в заявке что и как наблюдать.

#### Факт 6.

У астрономии есть много составных частей, но современная астрономия это в основном астрофизика. Формально астрофизика это подмножество, тем не менее это главная часть астрономии, т.е. мы интересуемся как это работает в применении к небесным объектам, а в остальном это обычная физика. Нам интересно, что внутри Солнца, как идут реакции, как энергия переносится наружу, как она излучается, как Солнце пульсирует.

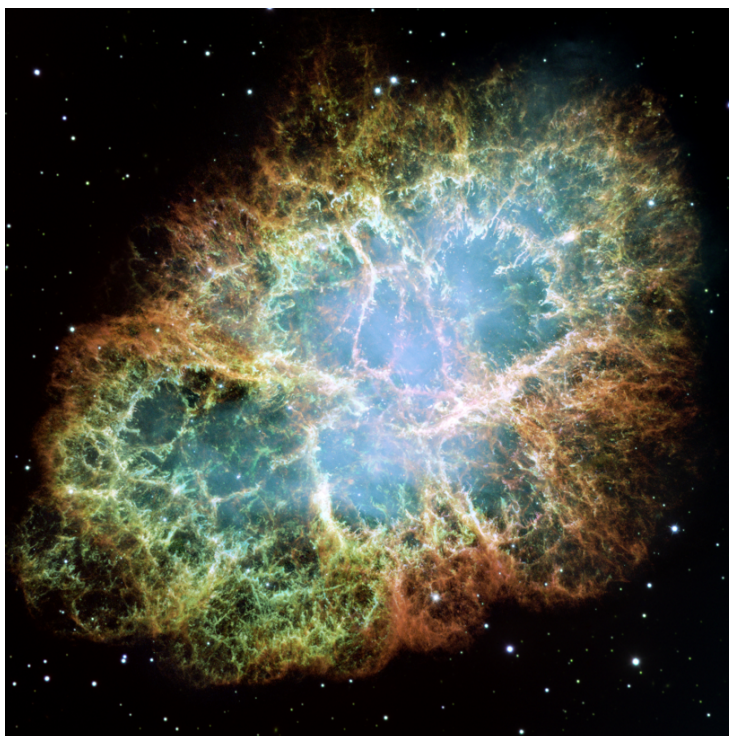


Рис. 2.

#### **Факт 7.**

В силу невозможности прямого эксперимента очень активно используется численное моделирование. И поэтому астрономы - одни из самых активных потребителей суперкомпьютерного времени, потому что есть много сложных задач, таких как слияние нейтронных звезд, взрывы сверхновых, где одновременно нужно учитывать эффекты ОТО, элементарные частицы, магнитогидродинамику.

#### **Факт 8.**

Телескопы бывают разные. Бывают большие и маленькие телескопы. В целом нам нужны большие новые телескопы, потому что всё, что можно было открыть предыдущими телескопами уже открыли. И поэтому основное развитие астрономии действительно связано с созданием больших инструментов.

#### **Факт 9.**

Данных много. И важная тенденция в современной астрофизике состоит в том, что данные делают открытыми.

#### **Факт 10.**

Публикуется более 2000 оригинальных статей в месяц. Это отражает, что астрофизика - это бурно развивающаяся наука.

## 1.2. Разделы астрономии.

Основные разделы астрономии:

- 1) Астрометрия  
Измерение координат и времени. Расцвет: 19 век. Новое: пульсарная астрометрия, спутники.
- 2) Небесная механика  
Движение небесных тел. Расцвет: 18 век - первая половина 19 века. Новое: теория относительности, хаос.
- 3) Астрофизика  
Физика небесных тел. Расцвет: сейчас. Новое: инструменты

Астрономия возникла из практических надобностей: или вести счет времени, или ориентироваться в пространстве. С пространством более-менее всё ясно. Вы понимаете, что если вы в пустыне или в море, то астрономические объекты это единственный способ ориентироваться. Со счетом возможно менее понятно, но действительно все базовые временные интервалы - астрономические: год - это период обращения Земли вокруг Солнца, месяц - это период смены лунных фаз, день - это период обращения Земли вокруг своей оси и даже неделя - это примерно четверть лунного месяца (смена от полной Луны до четверти, или от четверти до новой Луны), а кроме того, если вспомнить названия дней недели на романских языках, то это семь движущихся небесных тел, видимых невооруженным глазом. Астрометрия - это древняя часть астрономии, но она пережила несколько периодов расцвета. Расцвет был в 19 веке, он был связан с тем, что научились делать хорошие, качественные телескопы и хронометры.

Небесная механика - это движение небесных тел, и это, по большому счету, математика. Расцвет начался, когда Ньютон записал Закон Всемирного Тяготения.

## 1.3. Астрометрия.

Всегда были важны измерительные приборы. И естественно приборы прогрессировали. Сейчас самое передовое, что есть в астрометрии - это астрометрические спутники, их было всего два.

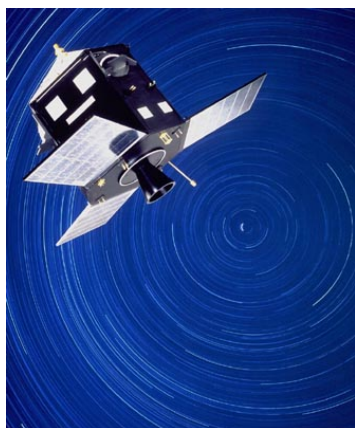
Первым летал Hipparcos, сейчас летает Gaia (Рис. 3), который в 2016 году выдал первый релиз данных. Задача этого спутника: впервые построить трехмерную карту Галактики (Рис. 5). Сейчас мы можем наземными методами хорошо измерять расстояние до звезд с расстоянием примерно в сотни световых лет.

1 световой год  $\approx 10^{18}$  см

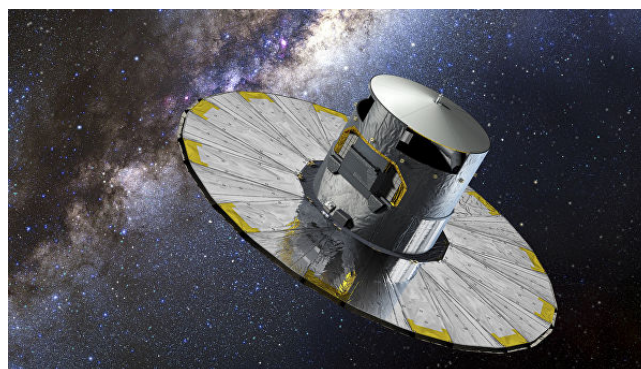
1 пк = 3,26 св. год

Прогресс в точности измерений связан с развитием техники. Для измерения времени астрономические стандарты сейчас не используются, но в будущем ситуация может измениться благодаря наблюдениям радиопульсаров.





а) Hubble



б) Gaia

Рис. 3. Космические телескопы.



Рис. 4. Астролябия.

## 1.4. Небесная механика.

В 20 веке новым ключевым моментом стал расчет орбит спутников. Появились новые интересные небесно-механические задачи и появилась еще одна важная составная часть: изменился Всемирный закон тяготения. Появилась общая теория относительности и для спутниковой навигации, даже на околоземных орбитах, если вам нужна высокая точность, нужно закладывать эффекты общей теории относительности.

Сейчас для расчета траекторий в Солнечной системе уже приходится использовать теорию относительности.

Появляются более интересные задачи.

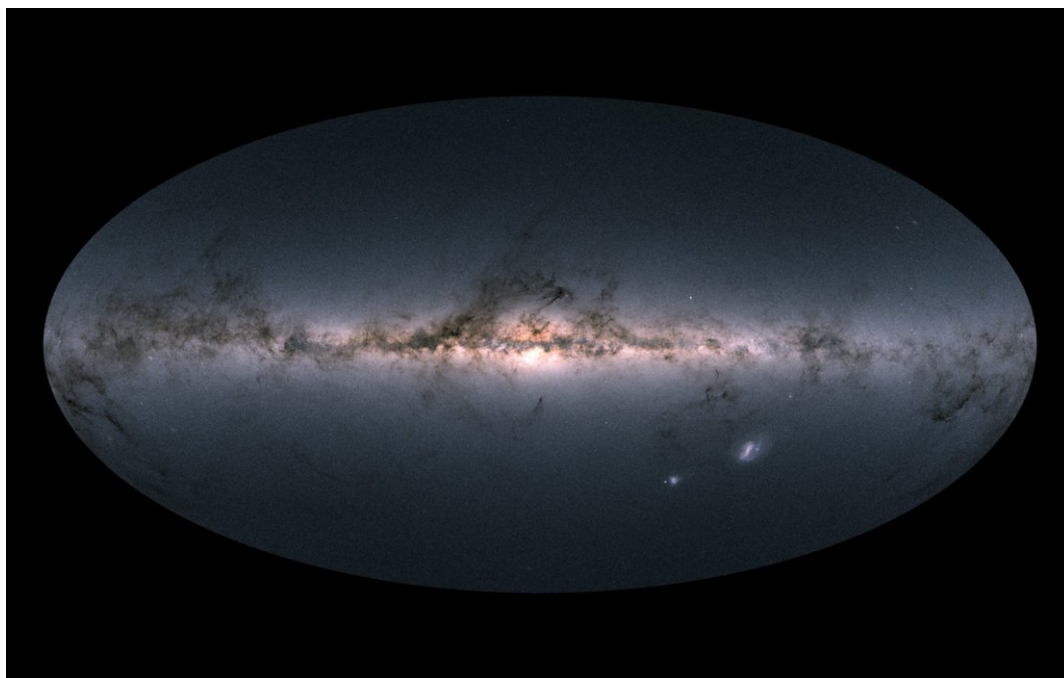


Рис. 5. Трехмерная карта половины Галактики.

## 1.5. Девятая планета.

В течении нескольких лет накапливаются данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в Солнечной системе может быть еще одна массивная планета.

На рисунке изображено Солнце в центре, и нарисованы орбиты далеких небольших тел, размером с крупный астероид. Эти тела заплутоновые, вращаются по вытянутым орбитам. И мы видим, что они распределены неким регулярным образом. Это легко объясняется, если предположить, что есть одно массивное тело, которое вращается по вытянутой орбите, и оно своей гравитацией выстраивает орбиты более мелких тел. И тогда возникает интересная небесномеханическая задача.

В январе 2016 г. появилась работа Батыгина и Брауна, которая вывела обсуждение на новый уровень. И с этого момента начались активные поиски девятой планеты.

Орбиты далеких малых тел оказываются особым способом "выстроены". Чтобы объяснить это можно привлечь гипотезу о существовании планеты с массой в несколько земных и  $>10$  раз дальше Плутона.

## 1.6. Астрономия.

Астрономия - наука наблюдательная и поэтому самое главное это телескопы. Телескопы бывают разные: работающие в видимом диапазоне, в других электромагнитных диапазонах, на Земле или в космосе.

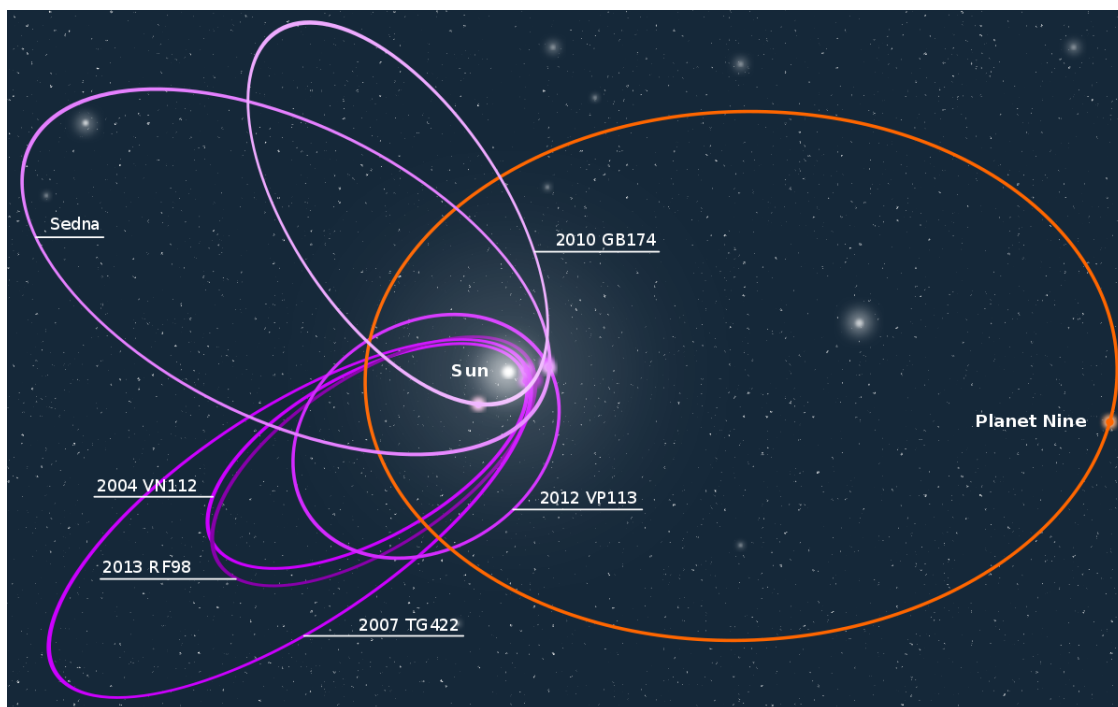


Рис. 6. Предположительная орбита планеты вместе с орбитами обособленных транс-нептуновых объектов известных на конец 2015 года.

## Древняя астрономия.

Начиная с самых древних времен требовались большие инструменты. И сейчас требуются большие телескопы, потому что они имеют свои преимущества. В до-телескопическую эпоху, когда наблюдения были в основном позиционные, использовались астролябии (рис. 4). И даже если вы измеряете положение звезд на небе таким условным транспортом, то чем больше транспорт, тем лучше будут ваши измерения.

## 1.7. Телескопы.

### Первые телескопы.

Появились телескопы. Они появились одновременно в разных частях Европы. Трудно даже сказать кто первым изобрел подзорную трубу. Так что Галилей не был изобретателем телескопа, но он вносил важные конструктивные новшества. Он сам делал свои инструменты. Его первые наблюдения привели к ряду очень важных открытий.

Телескопы бывают разные. Проще всего вначале думать о телескопах, работающих в видимом диапазоне. Такие телескопы делятся на два класса: рефракторы и рефлекторы.

Рефракторы, в качестве главного элемента, имеют линзу, либо систему линз, а рефлекторы - зеркало.

## Телескопы-рефракторы.

Самая главная часть телескопа - это его объектив. В телескопах-рефракторах объективом является собирающая линза (или система линз). Линза собирает (фокусирует) свет, дальше вы можете его рассматривать глазом, фотографировать, направлять в спектрограф, поляриметр.

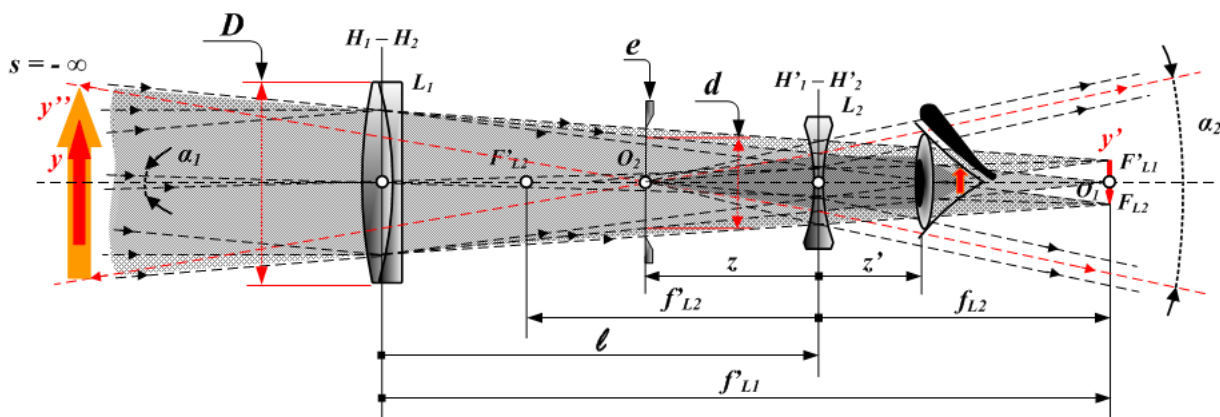


Рис. 7. Схема рефрактора Галилея.

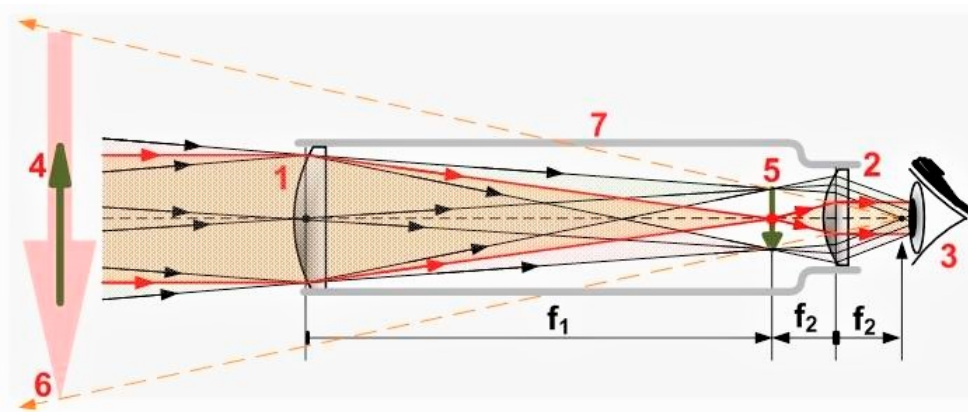


Рис. 8. Схема рефрактора Кеплера.

## Телескопы-рефлекторы.

Рефлекторы тоже начали придумывать одновременно несколько людей в конце 17 века. Естественно, были люди, которые теоретически описали возможность создания телескопа-рефлектора. Развитие телескопов-рефлекторов связывают с Ньютоном. Он сделал сам первый телескоп. Объективом является вогнутое зеркало.

## Зачем нужен телескоп?

У телескопа есть две главные задачи.



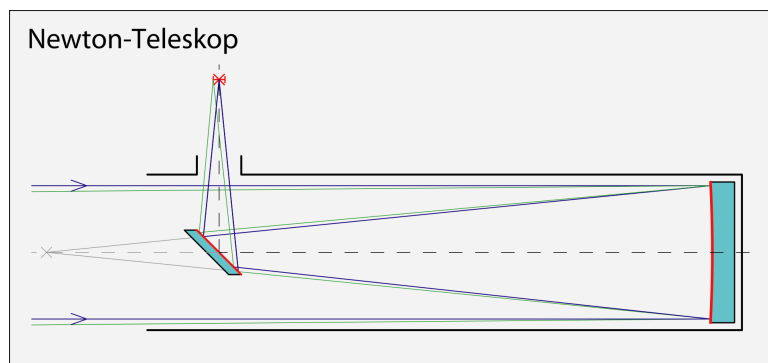


Рис. 9. Оптическая схема телескопа Ньютона.

- 1) Собрать больше света. Т.е. задача увидеть более слабые объекты. Свет собирается с большой площади и собирается на маленькой площадке.
- 2) Объективы с большими диаметрами позволяют потом рассмотреть мелкие детали. Предельное увеличение зависит от диаметра объектива.

## 1.8. Собирающая площадь

У нас есть изотропный источник света и появляется важная величина - поток:

$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (1)$$

[ Энергия / площадь / время ]

Поток - это светимость объекта, а светимость - это мощность. Чтобы увидеть слабые источники - нам надо собирать энергию с большой площади. Больше энергии - больше фотонов.

$$E = h\nu, \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота фотона.

$$\begin{aligned} 1 \text{ эрг} &= 10^{-7} \text{ Дж} \\ 1 \text{ эВ} &= 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \end{aligned}$$

## 1.9. Звёздная величина

От небесных источников мы получаем излучение и по своему блеску они очень сильно отличаются. Для блеска астрономических источников была придумана отдельная внесистемная единица: звездная величина.

Блеск звезд выражается в звездных величинах и они устроены следующим образом: это логарифмическая величина, что позволяет в рамках разумной шкалы характеризовать большие изменения блеска.

Если блеск двух объектов отличается на 5 величин, то это соответствует тому, что поток излучения от одного объекта в 100 раз больше, чем от другого.

$$\Delta m = 5 \rightarrow 100 : 1$$

$$\Delta m = 1 \rightarrow (100)^{\frac{1}{5}} : 1$$

Формулы для перевода отношения потоков в разность звездных величин и наоборот:

$$\frac{f_2}{f_1} = 100^{(m_1 - m_2)/5} \quad (3)$$

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \left( \frac{f_1}{f_2} \right) \quad (4)$$

Откуда берется точка отсчета? Нужно было выбрать какую-то звезду и сказать, что эта звезда нулевой величины. Звездные величины могут быть положительные и отрицательные. В качестве стандарта принимается звезда Vega. Солнце имеет величину примерно -26, полная луна имеет величину -12, Венера -4, самая яркая звезда ночного неба Сириус примерно минус полтора.

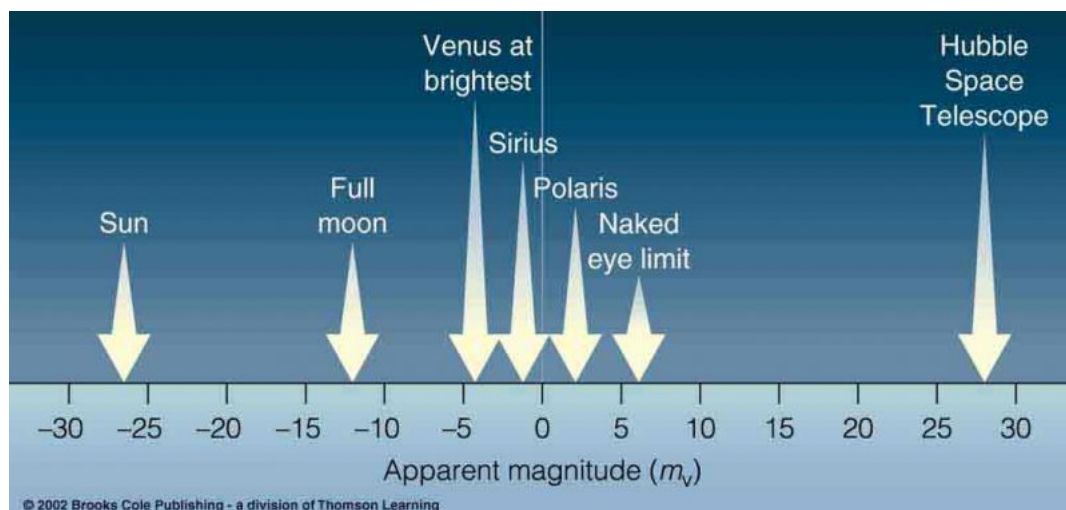


Рис. 10. Звездная величина.

Звездные величины можно перевести во что-то другое. Например, от звезды нулевой величины мы получаем примерно 1000 квантов в секунду на кв. см на ангстрем.

## 1.10. Абсолютная звёздная величина

Звездная величина характеризует как звезда выглядит на небе, но она может выглядеть слабой или яркой: или потому что она на самом деле слабая или яркая, или потому что она близко или далеко находится. И поэтому введено понятие абсолютной звездной величины.

Абсолютная звездная величина - звездная величина, которую звезда имела бы на расстоянии 10 пк.

Абсолютная звездная величина Солнца  $+4.^m8$

$$m - M = -2.5 \log \left( \frac{f}{f(10pc)} \right)$$

$$f = \frac{L}{4\pi d^2} f(10pc) = \frac{L}{4\pi (10pc)^2}$$

$$m - M = -2.5 \log \left( \left( \frac{10}{d} \right)^2 \right)$$

$$m - M = -5 \log \left( \frac{10}{d} \right) = 5 \log d - 5$$

$m$  — видимая звездная величина,

$M$  — абсолютная звездная величина.

Вы будто сравниваете две звезды. Физически это один и тот же объект, но один находится на расстоянии  $d$ , а второй (копия первого) находится на расстоянии 10 парсек. Это опять-таки оказалось очень удобным в астрофизике с технической точки зрения, потому что так устроены астрономические наблюдения, что именно звёздные величины и абсолютные звездные величины являются очень удобным способом измерять блеск звезд и измерять их светимость. Соответственно если вы знаете, например, видимую абсолютную звездную величину, вы можете легко определить расстояние до звезды. Абсолютную звездную величину вы можете узнать разными способами, например, по её спектру. Вы знаете как выглядит Солнце, вы знаете спектр Солнца и если увидите звезду с совершенно аналогичными спектральными характеристиками, то почти наверняка это звезда очень похожая на Солнце. У Солнца абсолютная Звездная величина  $4.^m8$  со знаком плюс, соответственно теперь для вашей звезды вы знаете и звездную величину и абсолютную звездную величину, то можно определить расстояние. т. е. вы просто смотрите на небо и, грубо говоря, говорите какое расстояние до этой звезды, не проводя сложных астрометрических электрических измерений, получаете его, зная исключительно абсолютную звездную величину.

## Absolute Magnitude

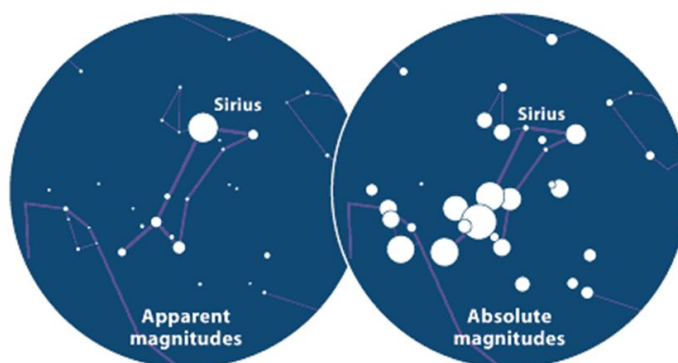


Рис. 11. Абсолютная звездная величина.

На рисунке (Рис. 11) это реальный кусочек звездного неба вблизи созвездия Большого Пса. Например, видно Сириус - самую яркую звезду неба. А теперь если для всех звезд на этой карте мы нарисуем не их видимые звездные величины (размер кружка соответствует звездной величине), а абсолютные, то всё окажется наоборот: т.е. Сириус является самой яркой звездой на ночном небе, не потому что он на самом деле такой яркий, а просто потому что это близкая звезда. Он правда чуть-чуть поярче Солнца, но на общем фоне звезд не выдающаяся звезда и просто ее близость к нам делает ее яркой на ночном небе.

## 1.11. Показатели цвета

Измерение звездных величин позволяет узнать ещё кое-что про звезду, потому что на самом деле мы можем измерять цвета звезд причем, естественно, нам это нужно измерять, нам нужно это как-то конкретизировать. И конечно же, получая изображение, фотоизображение, или на каком-нибудь электронном носителе, или глядя глазом, мы получаем, фиксируем изображение в определенном спектральном диапазоне. И эти спектральные диапазоны разные даже у разных людей. Вы можете столкнуться с тем, что вам что-то кажется более синим, кому-то кажется более зелёным.

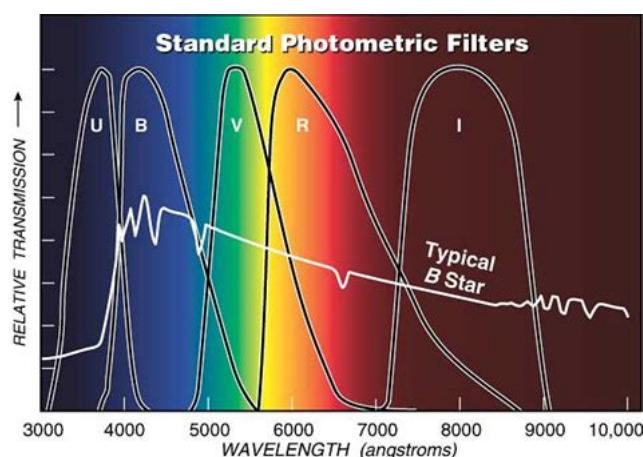


Рис. 12.

Реальность устроена так, что есть строгое определение того, что является видимым диапазоном (Рис. 12). Когда использовали фотоприёмники и фотопластинки, то для них была характерна кривая чувствительности и, естественно, visual обозначается буквой V, а для фотопластинок появилась величина, обозначаемая буквой B, потому что синий - blue, и она сдвинута в эту область. Соответственно даже просто разность двух этих величин позволяет вам оценить цвет объекта.

Звездная величина тем больше, чем слабее объект. Значит, если мы смотрим на одну звезду, фиксируем ее видимую звездную величину и величину в фильтре B, и в фильтре V звездная величина больше, то есть в этом диапазоне она слабее. Значит она менее синяя и более зелёная. Более зелёная может означать, что она желтая, красная, но тем не менее это показатель цвета, это дает нам спектральную

характеристику. Трудно получить спектр для огромного количества звезд. В последние годы это стало более-менее легко, а 100 лет назад это было очень тяжелым занятием, и поэтому активно использовали показатели цвета и можно построить вот такую диаграмму - Рис. 13.

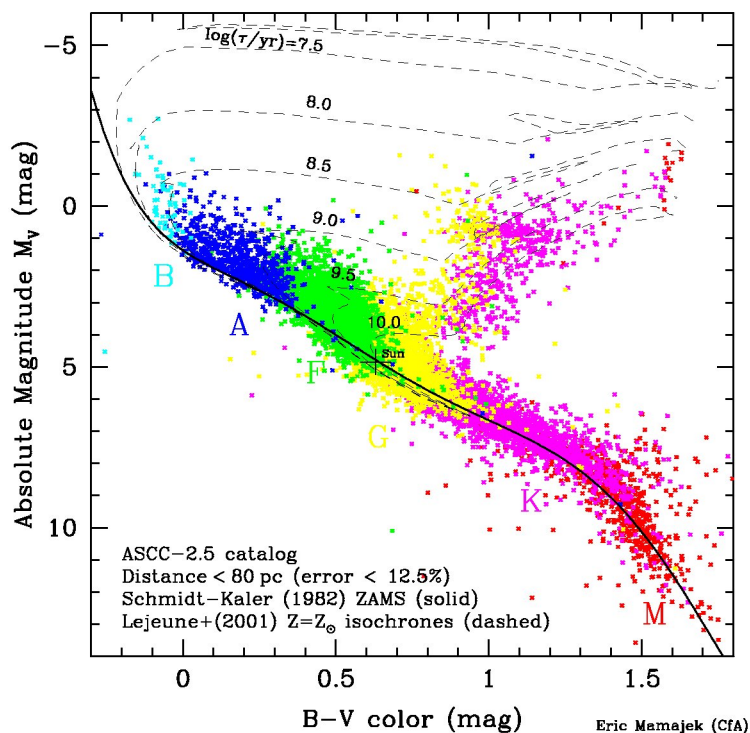


Рис. 13.

Она будет нам ещё встречаться. Это фактически знаменитая диаграмма Герцшпрунга — Рессела, где по вертикальной оси откладывается насколько звёзды мощные, насколько много они излучают, здесь отложена абсолютная звездная величина (у Солнца 4.8). По горизонтальной оси отложен показатель цвета, а именно В - V - самый часто встречающийся показатель цвета, соответственно, если он положительный, то звезда не синяя, она сдвинута от синей части и чем больше эта разность, тем более красной является звезда.

По вертикали у отметки 10 находятся красные карлики звезды, с низкой светимостью. У Солнца примерно пять, у звезд с абсолютной величиной 10 во сколько раз меньше светимость? В 100 раз. Разность для абсолютных звездных величин 5, значит разность потоков 100, светимость 100. Красные карлики в 100 раз меньше светят, это нам важно. Например, почему у Проксима Центавра, у самой близкой звезды - красного карлика, есть планета, которая потенциально обитаемая. Это означает, что там температура может быть такая же как и на Земле, но это красный карлик, он светит примерно в 100 раз слабее, чем Солнце, значит во сколько раз ближе вам нужно подойти к звезде? В 10 раз.

## 1.12. Угловое разрешение

Итак, мы поняли, что телескоп нужен для того, чтобы собрать как можно больше света. Чем больше диаметр, тем больше площадь. Площадь, как диаметр в квадрате, растет и вы видите более слабые объекты или более далекие, при той же самой светимости. Второе это рассмотреть детали, если у вас телескоп работает идеально и условия у вас идеальные, что означает, что вы в космосе, то, естественно, изображение точечного источника будет давать дифракционную картину. И есть предел, где вы ещё на изображении можете рассмотреть две звезды по отдельности (Рис. 14).

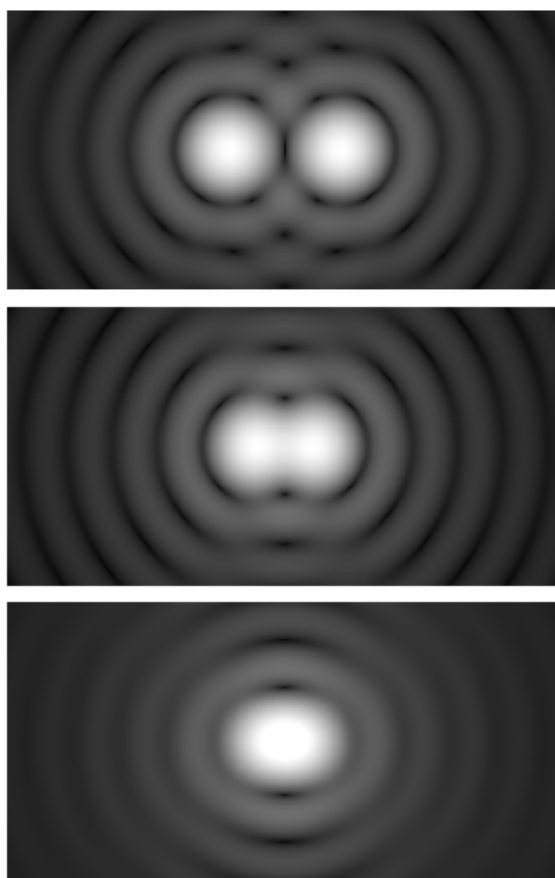


Рис. 14. Дифракционные картины Эйри, генерируемые светом от двух точечных источников, проходящих через круглую апертуру, например, зрачок глаза. Точки далеко друг от друга (вверху) или отвечающие критерию Рэлея (в центре) можно различить. Точки ближе, чем критерий Рэлея (внизу), трудно различить.

Вводится критерий Рэлея, который позволяет вам определить угол. Он тем меньше, чем больше диаметр  $D$  вашего телескопа, он зависит от волновых свойств света, то есть обязательно должна войти длина волны, и этот угол прямо пропорционален длине волны, таким образом если вы хотите увидеть больше деталей (кратеры на Луне, антенны на МКС), вам нужно увеличивать диаметр телескопа и, если есть возможность, нужно двигаться в сторону более коротких волн. Потому что,



когда волны у вас более длинные, это нужно компенсировать увеличением размера телескопа.

$$\theta = 1.220 \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

Технически это не реализуется, поэтому это очень важное соотношение. Но реально нам мешает земная атмосфера, она портит изображение и предел земной атмосферы соответствует примерно одной угловой секунде. Крупные обсерватории строят в всяких экзотических местах, например, в горах Чили, в первую очередь ради того, что там чуть-чуть получше качество атмосферы, там качество изображения не 2-3 секунды как у нас здесь, а 0.3 секунды. Очень важно, что для телескопов размером около метра, их параметры уже начинают ограничиваться атмосферой.

Что ещё нам даёт большой объектив, в смысле углового разрешения? Он позволяет вам в фокальной плоскости построить большое изображение. Это очень важно, потому что вы туда вставляете конкретную матрицу с реальным размером пикселей. У вас матрица может быть 100 мегапикселей - это неважно. Она имеет размер в сантиметрах, и если вы хотите, чтобы она соответствовала вашему телескопу, нужно, чтобы изображение строилась соответствующе. Нет смысла делать высокое разрешение, если вы не сможете его сфотографировать и, наоборот, нет смысла добиваться высокого качества матрицы, если вам ничего ей фотографировать. Поэтому очень важен такой параметр как масштаб изображения. Он показывает какому углу соответствует единичная длина фокальной плоскости и возникают простое отношение:

$$L[\text{сек. дуги/мм}] = 206265/F[\text{мм}]$$

$F$  - фокусное расстояние.  $L$  - масштаб изображения.

Параметры вашего детектора всегда должны соответствовать параметрам вашей установки, иначе мы что-то сделали зря или очень хороший детектор или очень не хорошую установку.

### 1.13. Рефракторы и рефлекторы

Возвращаемся к нашим двум типам телескопов: рефракторы и рефлекторы (Рис. 15).

Рефракторы не обладают большим диапазоном разных схем устройств, но есть конечно разные схемы объективов. А у рефлекторов, где вроде бы все понятно, сзади стоит главное зеркало, которое является объективом, потом где-то стоит вспомогательный, и есть всякие интересные хитрости, о которых мы немножко поговорим.

### Оптические телескопы 17-19 вв.

В начале про историю телескопов. Началось все все с оптических телескопов, их сделали первыми, но в том же самом 17 веке сделали рефлекторы. Тем не менее, первое время всегда выигрывали рефракторы. Почему? Потому что линзу выточили один раз, это сложно, но тем не менее, вы это сделали и она вам будет служить вечно, пока не разобьете. Если вы в 17 веке сделали параболическое зеркало, единственный способ его сделать - сделать его металлическим, его нужно отшлифовать

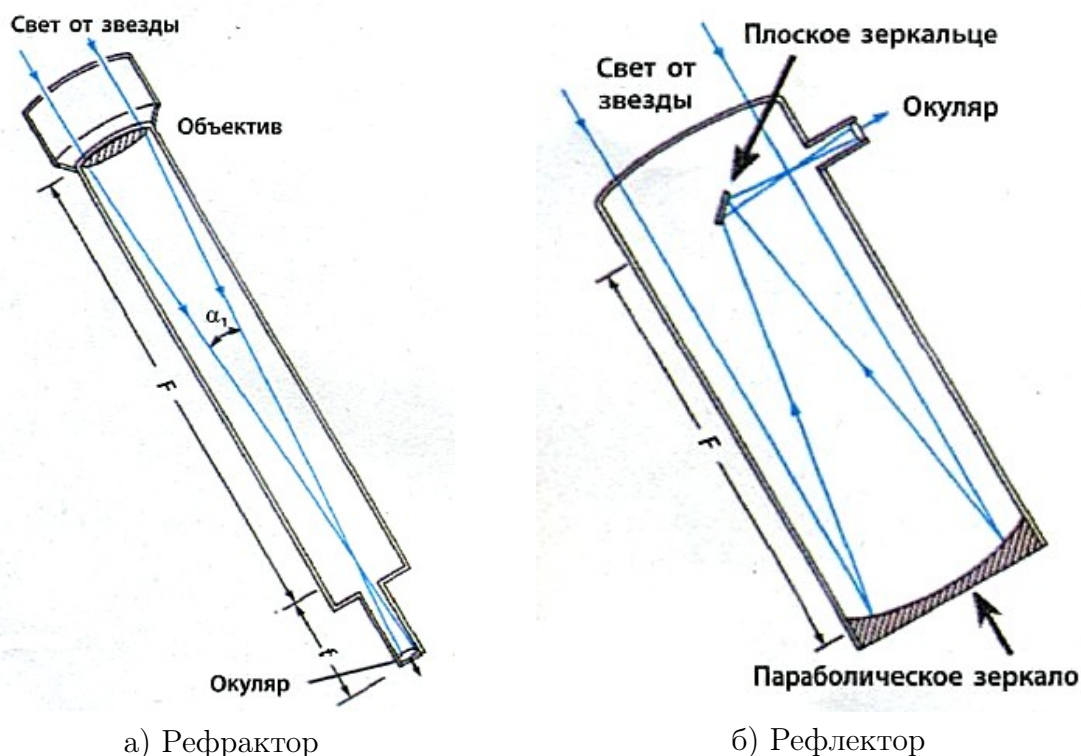


Рис. 15.

и он немедленно начинает окисляться и вам нужно постоянно, каждый год делать новые зеркала.

Это большой труд, довольно тяжелый, тогда еще не автоматизированный, там нельзя прерваться и шлифовка зеркала занимала 16 часов непрерывно, поэтому всё-таки первые телескопы - были телескопы-рефракторы. Технически они оказывались более выигрышными, но у них есть предел по диаметру линзы. Линза тяжелая, стеклянная и сделать линзу диаметром более 1 метра, трудно, но главное, что она будет деформироваться под собственным весом, а вам нужна оптическая точность и поэтому самый большой телескоп-рефрактор имеет диаметр 1 метр 4 сантиметра. Поэтому большие рефлекторы делали ещё с металлическими зеркалами, они быстро тускнели и поэтому потом нужно было их выкидывать. Это было не очень удобно.

### 1.14. Университетские обсерватории

Эпоха таких университетских обсерваторий - это эпоха телескопов-рефракторов и, как правило, если в каком-нибудь городе Европейском в центре города видите такие башенки (рис. 17), то скорее всего там изначально в 19 веке был поставлен какой-нибудь телескоп-рефрактор.

### 1.15. Оптические телескопы в начале 20 века

В начале 20 века был построен самый большой Йеркский рефрактор и чуть позже его окончательно обогнали рефлекторы, потому что научились делать стеклянные





Рис. 16. Левиафан (6-футовый телескоп Росса) — оптический телескоп, построенный ирландским астрономом Уильямом Парсонсом в 1845 в его родовом поместье, в замке Бирр. До 1917 года считался крупнейшим в мире. С помощью данного инструмента Парсонс смог наблюдать спиралевидную структуру галактик.

зеркала и такое зеркало уже служит десятки лет. Все современные крупные телескопы - это телескопы - рефлекторы (Рис. 18).

У рефлектора нет проблемы с тем, что объектив тяжёлый. У зеркала вам важна только поверхность, а у линзы вам важен весь объем. Вы не можете сократить объем линзы, т.к. она вся важна, а зеркало вы можете начать делать все более и более тонким, и люди именно к этому и пришли, и поэтому зеркала могут быть большие. Современный крупный телескоп имеет размеры около 10 метров, а нашей стране самый большой телескоп - это БТА на Северном Кавказе, он был построен 70-71 году, его диаметр 6 метров.

Что будут строить в будущем? Самое большое современное крупное цельное зеркало - это зеркало большого бинокулярного телескопа (8 метров). Существует проект 30 метрового телескопа, который состоит из семи таких зеркал, собранных вместе. Несколько десятилетий назад люди научились делать сегментированное зеркало, что очень удобно, их можно сделать действительно очень тонкими, кроме того, если у вас есть отдельные сегменты, то вы можете ими управлять. Все крупные современные телескопы составные.

## 1.16. Система Кассегрена и Ричи-Кретьена

Итак, есть разные схемы телескопов-рефлекторов. Чем они отличаются? Деталью формы главного зеркала и вторичного зеркала. У телескопа-рефлектора самый главный элемент - это главное зеркало, которое является объективом, но вторичное



Рис. 17. Обсерватории.

зеркало тоже важно.

Например, космический телескоп имени Хаббла сделан по системе Ричи-Кретьена.

### 1.17. Неподвижные фокусы

Были придуманы специальные оптические схемы, где пучок входящего света был бы зафиксирован в одном месте. И поэтому были придуманы фокусы: фокус Кудэ и фокус Нэсмита.

### 1.18. Активная оптика

Большое зеркало тоже деформируется, когда вы его крутите, но за счет того, что сзади вы его можете поддерживать, оно будет сохранять свою форму. Это называется активная оптика. Ее придумали в Европейской южной обсерватории несколько десятилетий назад и начали активно применять.

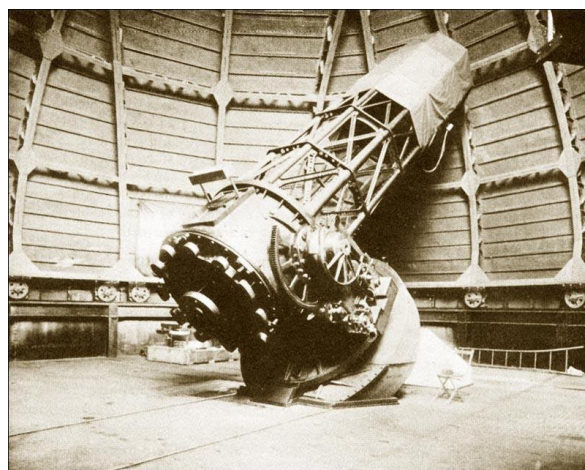
Мы помним, что самое сложное - это избавиться от атмосферы. Все знают, что звёзды мерцают. От этого мерцания надо избавиться и для этого была придумана система адаптивной оптики. Она должна прямо отслеживать это мерцание и убирать его.

На самом деле, вы не знаете свойства вашего объекта. Вам нужно убрать только свойства атмосферы, поэтому делается довольно сложная схема, где создается





а) Йеркский рефрактор (402 см) 1897  
год.



б) Маунт Вилсон. Рефлектор (152 см).  
1908 год.

Рис. 18.

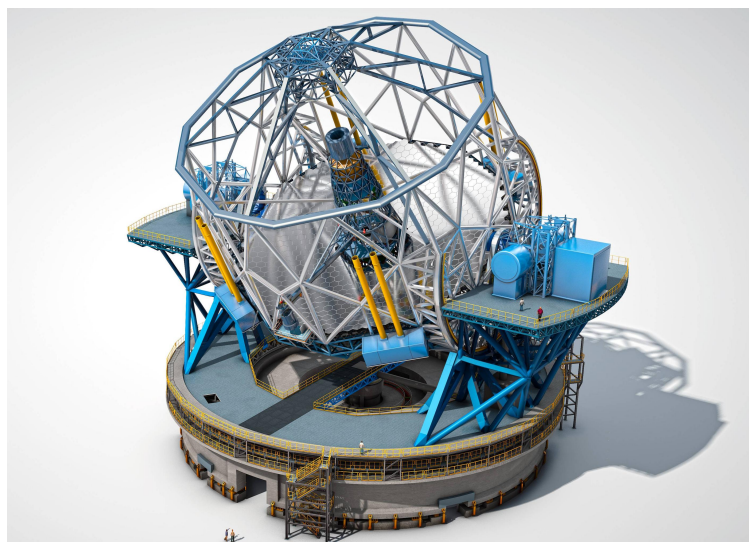


Рис. 19. Проект строящегося большого европейского телескопа с диаметром около 40 метров.

искусственная звезда. Она создается довольно просто: вы лазерным лучом светите вверх и получаете яркую точку.

Свет от астрономического объекта у вас делится: основная его часть идет на детектор, а маленькая идёт на анализатор, где сравнивается с идеальным изображением и у вас стоит отдельный подвижный элемент, отдельное деформируемое зеркало, которое вы деформируете так, чтобы полностью убрать эти искажения. И в итоге на научный инструмент, на телескоп, вы получаете исправленный волновой фронт света и вы убираете мерцание.

Это не удавалось долгое время реализовать. Не потому что механика сложная, а потому что нужны были мощные компьютеры, которые очень быстро обрабатывают

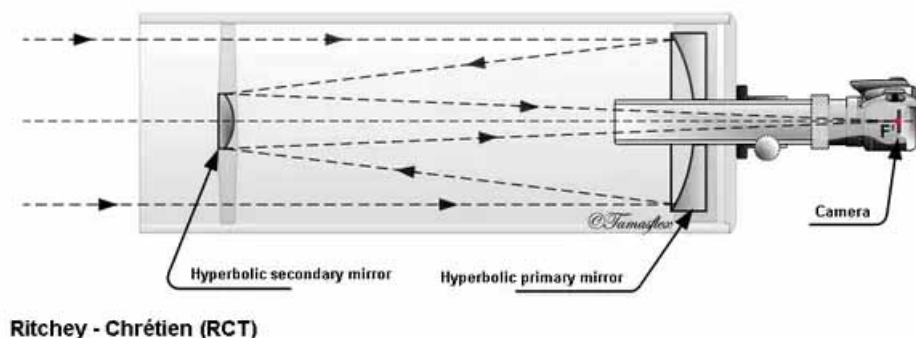


Рис. 20. Система Ричи-Кретьена.

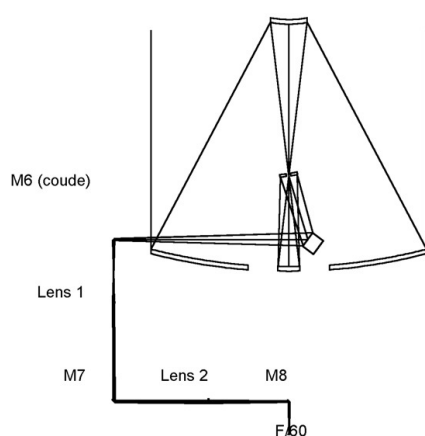


Рис. 21. Фокус Кудэ.

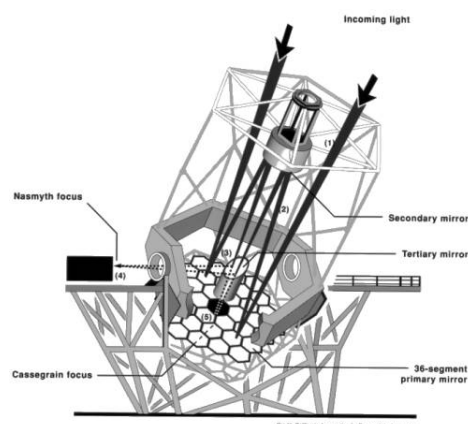


Рис. 22. Фокус Нэсмита.

изображение и очень быстро рассчитывают какие коррективы в волновой фронт нужно вносить.

## 1.19. Спектроскопия

Львиная доля астрономической информации получается именно благодаря спектрам. Современные спектрографы работают с дифракционными решетками, как правило, с не пропускающими, а отражающими дифракционными решетками.

Есть разные спектрографы с разными задачами: где-то вам нужно с очень высокой точностью изучать спектральные линии в узком диапазоне, где-то нужно строить широкий спектр с меньшим разрешением, где-то нужно измерять поляризацию или вы хотите открывать экзопланеты.

## Телескопы-роботы и обзоры неба

Существенное новшество, которое появилось в последние годы, - это роботизированные телескопы. Работа телескопа-робота - это вы ему один раз отправляете программу, а дальше он работает сам. Он определяет, например, что наступает

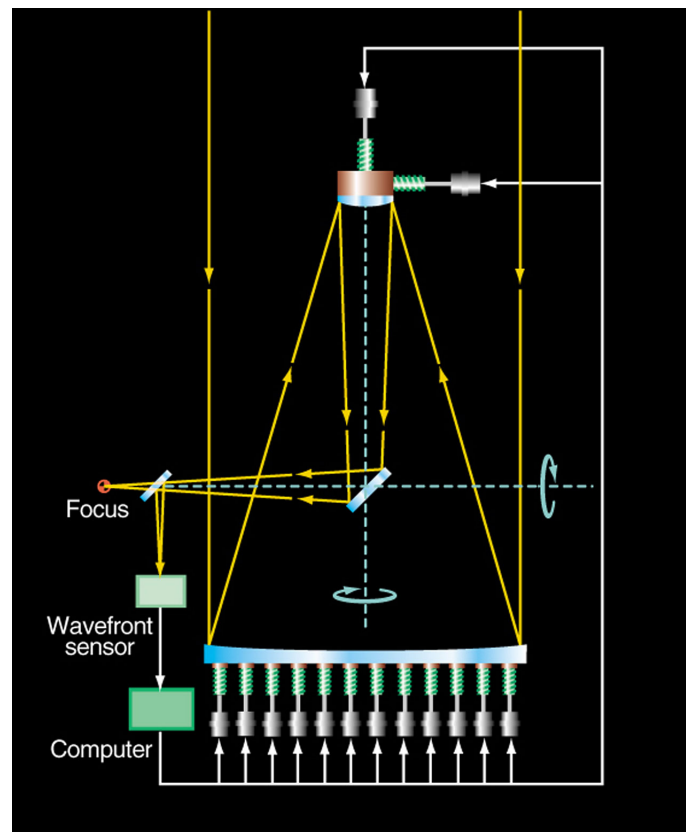


Рис. 23. Разработана инженером ESO Raymond Wilson.

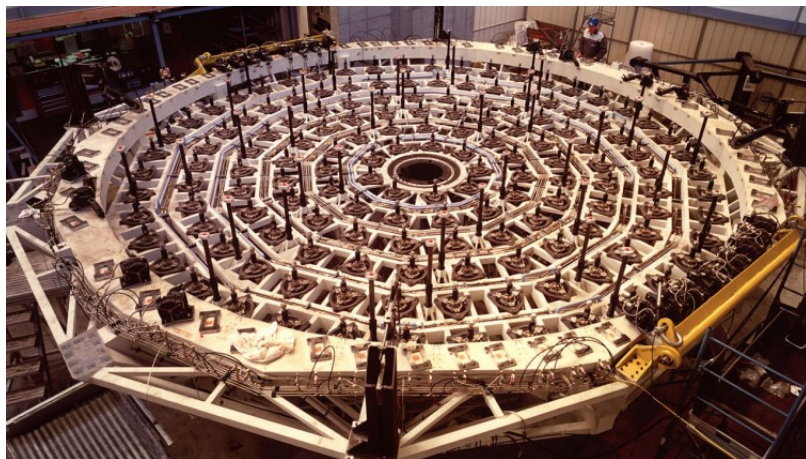


Рис. 24. Активное зеркало.

ночь, т.к. у него стоит детектор освещенности, также у него стоит погодный детектор. Т.е. он распознает что стемнело и нет дождя, то можно открывать крышу и работать, и это все делает софт.

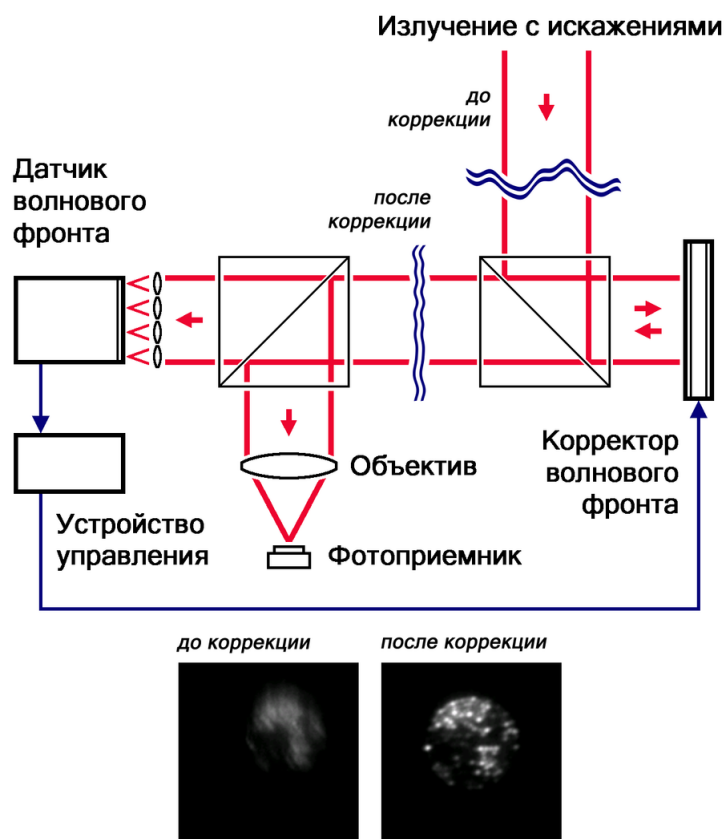


Рис. 25. Схема.

## 1.20. Всеволновая астрономия

Более существенно то, что астрономия стала всеволновой. Есть большой диапазон спектра от огромных энергий, от коротких волн, гамма лучей до длинных волн. Вселенная и чёрные дыры, нейтронной звезды не обязаны излучать в том диапазоне, в котором видят наш глаз. К концу 20 века удавалось проводить наблюдения во всем диапазоне электромагнитных волн. Наблюдения в радио диапазоне начались в начале 30-х годов, они были не очень систематические, серьёзно радио-астрономия начала развиваться после Второй Мировой Войны, что было связано с прогрессом техники и многие важные открытия сразу же были сделаны: были открыты квазары и пульсары.

Радиотелескопы бывают двух видов. Радиотелескоп - это антенна и поэтому бывают радиотелескопы, у которых есть собирающая антенна и есть радиотелескопы, которые являются системой диполей.



## Лекция 2. Гравитационные волны. Нейтрино.

### 2.1. Звездные величины и абсолютные звездные величины

Звездная величина позволяет довольно хорошо, в одной шкале, описывать блеск небесных объектов, поскольку шкала логарифмическая. Блеск меняется очень сильно. Самое главное, что разность звездных величин соответствует логарифму отношения потоков и подобрано все так, чтобы пятерка давалась при разности потоков в 100 раз. Полезно это представлять в механистических образах. Например, разность в одну звездную величину соответствует изменению потока в 2.5 раза. Это означает, что если вы возьмете звезду и добавите ещё одну звезду, то у них поток, естественно, станет в 2 раза больше, и это будет соответствовать тому, что звездная величина изменится чуть-чуть меньше, чем на единицу. Чтобы получить 5 звездных величин, вам нужно собрать 100 идентичных звезд, тогда у такого скопления звездная величина будет в 5 раз больше.

Мы ввели еще понятие абсолютной звездной величины:

$$m - M = 5 \log \frac{r}{\text{пк}} - 5 + A(\lambda) \quad (6)$$

Видимая звездная величина минус абсолютная звездная величина - это логарифм расстояния, которое выражено в парсеках.

$A(\lambda)$  - величина, которая зависит от длины волны света, и это величина, которая соответствует поглощению.

Видимая звездная величина Солнца  $m_{\odot} \approx -26^m.8$ . Буква  $m$  означает магнитуду и, соответственно, нужна нам для обозначения того, что это именно звездная величина. Если мы Солнце отодвигаем, мы увеличиваем расстояние, Солнце становится слабее и абсолютная звездная величина Солнца это:

$$M_{\odot} = 4^m.8 \quad (7)$$

Только в абсолютной пустоте мы получим такую звездную величину, а в реальности из-за поглощения она будет гораздо меньше, и поэтому, например, мы не видим в видимом диапазоне центр нашей галактики. Центр Галактики не сияет, потому что он закрыт от нас пылью. Если бы вы наблюдали в инфракрасном диапазоне, то вы бы увидели, т. к. коэффициент  $A$  зависит от длины волны и обычно он велик в ультрафиолете, чуть поменьше в видимом свете и ещё меньше в инфракрасном диапазоне, поэтому наблюдение центра нашей галактики возможно в инфракрасном диапазоне, в миллиметровом диапазоне длин волн, и рентгеновском.

Вспомним, что телескопы нужны для того, чтобы увидеть более слабые объекты. Решим простую показательную задачу. Представим себе идеальный телескоп, который:

- 1) летает в космосе, чтобы нам атмосфера не мешала,
- 2) мы будем пренебрегать поглощением, поскольку оно может быть от 0 до почти бесконечности.

У телескопа самый главный параметр - диаметр, с какой площади собирается свет, который потом будет фокусироваться и на этом месте у нас будет стоять приемник излучения, практически идеальный приемник излучения. Если мы хотим увидеть звезду, со звездой проще, потому что это точечный объект, и у нас мы будем считать, что для достоверной регистрации нам нужно, чтобы телескоп захватывал  $N_f = 100$  фотонов.

100 фотонов - это хорошая оценка и мы с вами зададимся простым вопросом: если у нас есть какой-то реальный телескоп в космосе, пусть у него диаметр будет  $D = 2.4$  метра, как у Хаббла, с какого расстояния он увидит самую яркую звезду?

Несколько позже мы с вами выясним, что самые яркие звезды имеют светимость в несколько миллионов раз больше, чем у Солнца.

$$L = 10^6 L_{\odot} \quad (8)$$

Возьмём миллион, чтобы считать было удобно. Нам нужно сопрячь величины.

$$L_{\odot} \simeq 3.86 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с} \quad (9)$$

Энергия фотона в видимом диапазоне:

$$E_f \simeq 1 \text{ эВ} \simeq 10^{-12} \text{ эрг} \quad (10)$$

Поэтому светимость можно перевести в штуки, т.е. сколько фотонов звезда излучает в секунду. Соответственно фотонная светимость Солнца примерно будет равна:  $L_{\odot} \simeq 3/86 \cdot 10^{45} 1/\text{с}$

Мы на Земле принимаем поток. Поток - это светимость, деленная на квадрат расстояния:

$$f = \frac{L}{4\pi d^2} \quad (11)$$

Соответственно у нас фотоны просто размазываются по сфере все большего и большего размера.

Нас интересует расстояние:

$$d = \left( \frac{L}{4\pi f} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Давайте посмотрим какой у нас минимальный поток, который может регистрировать данный телескоп. Любой прибор, в отличие от глаза, может накапливать излучение.

Чтобы посчитать предельный поток, нам нужно задать какую-то экспозицию, какой-то интервал времени, в течение которого наблюдают. Давайте для простоты возьмем, например,  $\delta t \approx 10^4$  секунд, примерно 3 часа. Это довольно длинная экспозиция для телескопа Хаббла, но вполне приемлемая.

Итак, у нас есть площадь телескопа  $S = \pi R^2 = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^2$ . Нам нужно 100 фотонов. Мы хотим посчитать поток в штуках. Интересующий нас предельный поток нужен в следующих единицах:

$$f_{lim} = \frac{\text{фотоны}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \quad (13)$$



Значит предельный поток:

$$f_{lim} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \quad (14)$$

Теперь мы можем посчитать расстояние:

$$d = \left( \frac{3.86 \cdot 10^{45} \cdot 10^6}{4\pi \cdot 5 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} \simeq 10^{29} \text{см} \quad (15)$$

Получается довольно много, если мы это переведем в парсек, то получится больше видимого размера Вселенной. Хороший космический телескоп может видеть очень яркие звёзды с очень большого расстояния. Таким образом, при идеальной чувствительности вы можете видеть действительно далекие объекты.

Для Хаббловского телескопа реальный предел наблюдения:

$$m_{Hubble} \simeq 31^m \quad (16)$$

Это соответствует не очень большому числу фотонов.

## Не только электромагнитные волны

На Землю прилетают не только кванты электромагнитных волн разной энергии, но и всякие другие частицы, которые тоже интересно ловить и исследовать. Начнём мы, естественно, с космических лучей. Космические лучи - это что-то на грани физики и астрофизики. Нас интересует происхождение и эволюция космических лучей. Космические лучи важны динамически в галактике: их давление не является пренебрежимо малым (их плотность энергии не является пренебрежимо малой) и для некоторых процессов они очень важны.

### 2.2. Спектр космических лучей

На рисунке 26 изображен спектр космических лучей. Энергия отложена в эВ, вы легко можете перевести в эрг. Самые энергичные частицы имеют макроскопическую энергию 10 Джоулей. 10 Джоулей это много: тряпка летящая имеет энергию меньше Джоуля, поскольку весит примерно 100 грамм и летит со скоростью пару метров в секунду.

Частицы с энергией  $10^{15}$  эВ пролетают на площадь равную одному квадратному метру раз в год. На Большом Адронном Коллайдере у нас  $10^{13}$  эВ, соответственно, такие частицы можно мерить прямо на космическом аппарате, т.е. вы ставите детекторы и он с какой-то разумной частотой регистрирует частицы. Если вы хотите ловить космические лучи больших энергий, то они прилетают гораздо реже: раз в год на площадь, соответствующую десяткам, иногда сотням квадратных километров. И, соответственно, вы уже не можете построить детектор, который будет перехватывать этот поток и, как мы увидим, в этом нет никакой необходимости. Первичные космические лучи практически никогда не достигают поверхности Земли, влетая в атмосферу, они порождают каскад частиц и, в основном, регистрируют эти вторичные частицы.

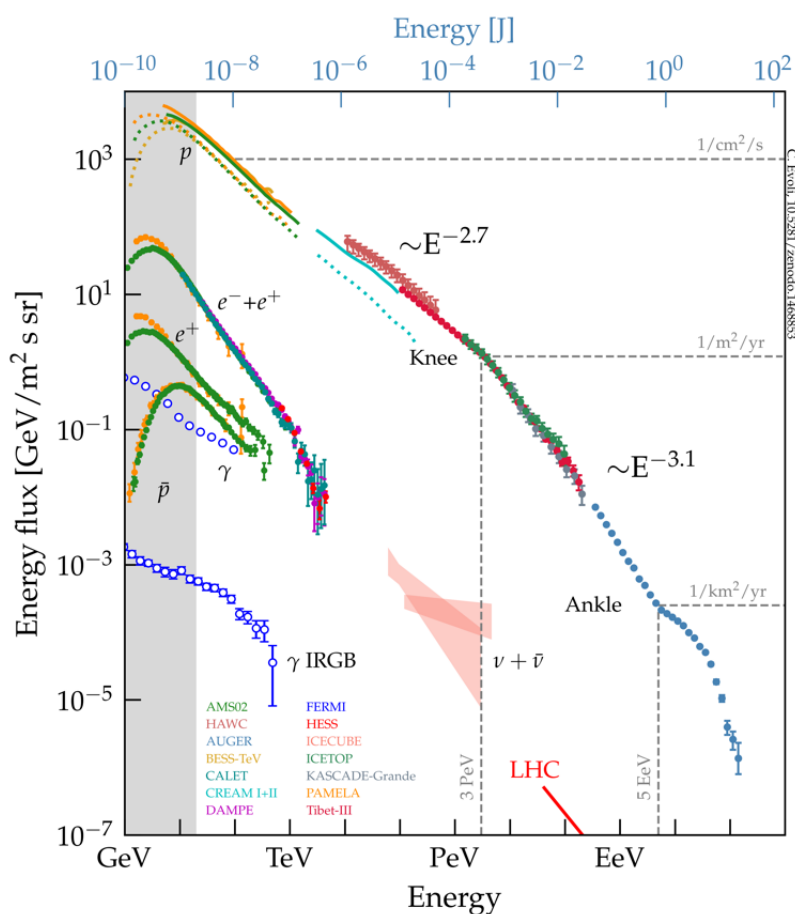


Рис. 26. Спектр космических лучей.

### 2.3. Происхождение космических лучей

Откуда берутся космические лучи? Мы знаем только половину ответа. Нужно обратиться к рисунку 26, виден излом в спектре, называемый коленом. Такое ощущение, что спектр состоит из двух компонентов энергии: меньше, чем  $10^{15-16}$  эВ и больше. Про происхождение космических лучей низких энергий мы знаем. Они производятся у нас в Галактике, процесс ускорения связан с существованием ударных волн. Частицы могут бегать туда-сюда через ударную волну и приобретать энергию. Т.к. частиц много и поэтому какие-то успевают совершить несколько таких пробежек и ускориться до больших энергий. Естественными ускорителями являются ударные волны в остатках сверхновых: разрывается ядро массивной звезды, наружу со сверхзвуковой скоростью двигается большой поток газа, он двигается не в пустоту, он врезается в реальную межзвёздную среду и где-то возникает ударная волна.

Рентгеновские наблюдения (рентгеновская картинка на рисунках (27,28), полученная на спутнике Аска) показывают, что в остатках сверхновых есть мощное размытое диффузное рентгеновское излучение, которое можно связать с наличием электронов с энергиями до сотен ТэВ, что в общем-то и нужно. Это показывает, что там есть частицы высоких энергий. Нас интересуют космические лучи, которые

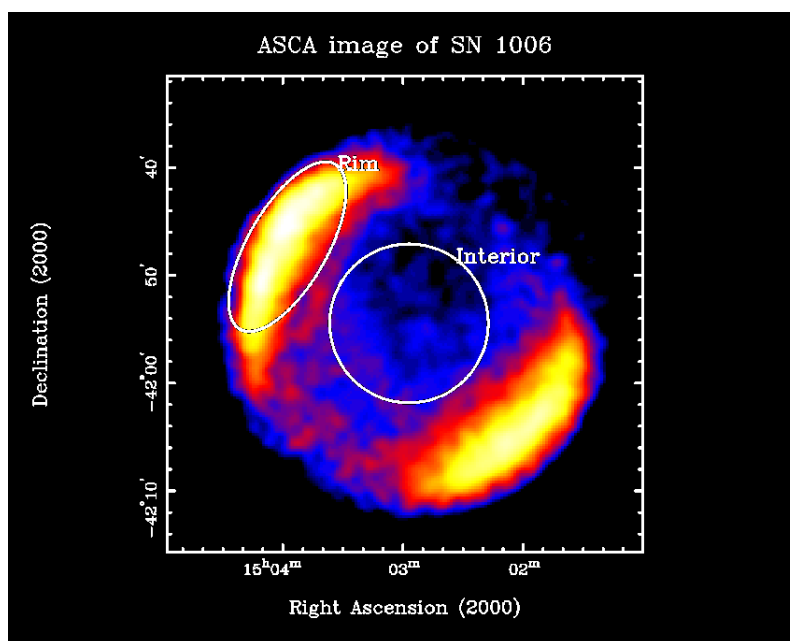


Рис. 27.

являются в основном ядрами, т.е. протонами.

Есть электроны высоких энергий, значит есть и протоны высоких энергий. Происхождение космических лучей с энергиями до колена известно достаточно хорошо. А с большими энергиями уже проблема, мы на самом деле не знаем откуда они берутся, их нельзя делать в Галактике, потому что космические лучи высокой энергии быстро Галактику будут покидать. Почему они могут в ней задерживаться? Потому что в Галактике есть магнитные поля. Эти магнитные поля имеют довольно сложную структуру, они уложены в диск. Заряженная частица, естественно, не может двигаться поперёк магнитных силовых линий, а движется вдоль. Лишь до некоторых пор магнитное поле говорит частице куда двигаться, пока энергия частицы не слишком велика. Если для любого заданного магнитного поля энергия частицы будет больше, то она уже не будет слушать это магнитное поле.

Галактика, её диск, довольно плоский. Именно там сосредоточено магнитное поле. Минимальный характерный размер - толщина диска Галактики:  $300 \text{ пк} \sim 10^{21} \text{ см}$ .

Кривизна траектории заряженной частицы в магнитном поле считается по формуле:

$$r_H \sim \frac{E}{eH} \quad (17)$$

$$r_H = 3.3 \cdot 10^{12} \text{ см } E_{\text{GeV}} H_{\mu\text{G}}^{-1} \quad (18)$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-12}$$

$E$  - это энергия электрона,  $H$  - магнитное поле

И нам нужно посмотреть для какой энергии, кривизна траектории будет больше, чем эта величина.

При  $E > 3 \cdot 10^{18} \text{ eV}$  частица сразу покидает диск Галактики. Она будет это делать постепенно, но все равно за какое-то конечное время из основной части диска уйдёт,

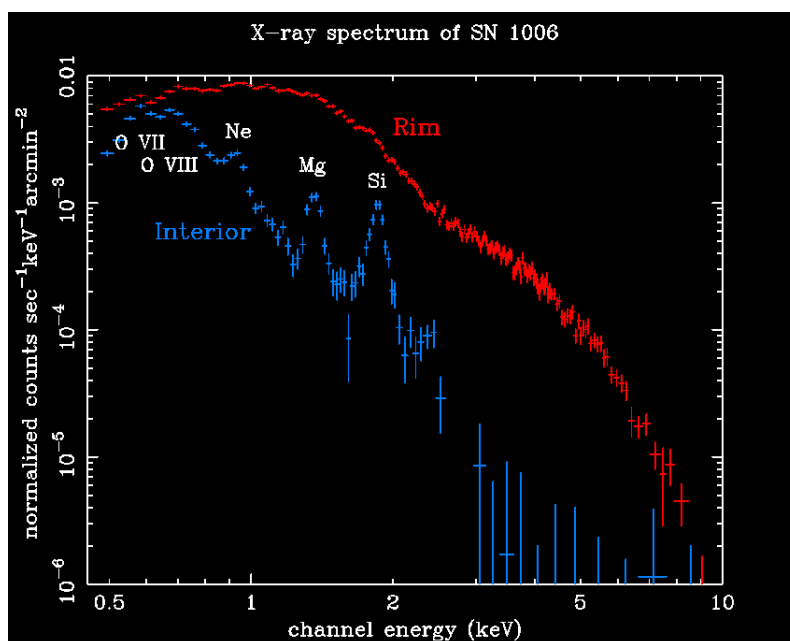


Рис. 28.

дальше магнитного поля нет и частицы свободно отправятся странствовать по Галактике. Поэтому частицы высоких энергий  $E > 10^{15}$  eV вы не можете удерживать в Галактике, даже если вы их будете в Галактике создавать, их количество будет очень мало и не сможет объяснить наблюдение. Поэтому такие частицы нужно рождаться где-то ещё и их источников мы не знаем.

До 2006 года рассматривали совсем разные модели: т.е. то ли где-то есть источники космических лучей, лучей сверхвысоких энергий, то ли нет собственной источников, нет ускорителей, а есть, например, какие-нибудь массивные частицы, которые могут жить в таком сферическом гала окружающим нашу Галактику. Они не стабильны и при распаде могут появляться космические лучи очень высоких энергий. Но эту идею удалось опровергнуть, но, тем не менее, мы до сих пор не знаем, что является источниками частиц сверхвысоких энергий.

## 2.4. Регистрация космических лучей

Как регистрируют космические лучи?

Вплоть до энергии порядка 100 ГэВ довольно эффективно можно ловить частицы прямо космическими аппаратами. Дальше проблема будет просто в том, что аппарат не может с большой вероятностью наловить много частиц, потому что они становятся очень редкими. Зато частицы взаимодействуют с веществом атмосферы и порождают поток вторичных частиц и вы можете ставить на земле детекторы ловить эти мюоны, кроме всего прочего, у вас рождается световой импульс, у вас вторичные частицы движутся со скоростью большей скорости света в атмосфере и поэтому испускают черенковское излучение. Оно попадает в видимый диапазон и вы можете ставить наземные телескопы, большие по площади, но невысококачественные с точки зрения требований к зеркалам и, таким образом, обнаруживать

эту вспышку и определять направление на источник.

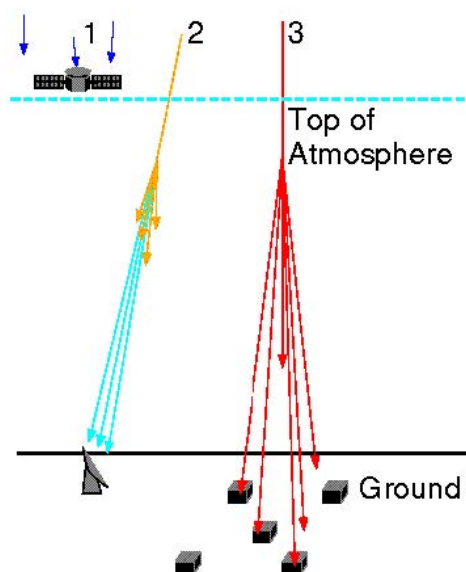


Рис. 29. Регистрация космических лучей.

Космические лучи открыл Гесс в эксперименте: он поднимался на воздушном шаре, у него были счетчики Гейгера и темп счета рос по мере подъема, т. е. стало ясно, что не радиоактивность Земли является источником этих частиц, а прилетают они сверху, потому что их становится все больше и больше.

Могут быть маленькие приборы, вроде Памела, которая была установлена, как дополнительная нагрузка на спутнике Ресурс и вы напрямую регистрируете частицы.

Но вы не можете ловить так частицы высокой энергии, вам нужно ставить установки на Земле и они должны быть большими, они должны охватывать большую территорию. Самая большая такая установка - это обсерватория имени Оже, которая находится в Аргентине.

Каждая точка - это наземный детектор, их там больше 1000. Кроме того, стоят четыре наблюдательные станции, на каждой из которых по шесть телескопов, которые просматривают небо надо этой сетью. Используются два независимых метода регистрации частиц: в одном случае регистрируются вторичные частицы, а в другом регистрируются вспышки черенковского излучения, т. е. двумя независимыми методами определяется энергия вылетевшей частицы. Наличие этих двух методов очень сильно помогает повысить точность измерения энергии частиц.

С помощью установки Оже был доказан красивый эффект Грейзена — Зацепина — Кузьмина, который говорит о том, что частицы прилетают откуда-то издалека с расстояния в десятки миллионов световых лет. Т. е. действительно где-то есть мощные ускорители частиц, которые могут ускорять частицы до энергии в сотни миллионов раз больше, чем на Большом Адронном Коллайдере, но что это за астрономические объекты мы до сих пор не знаем.

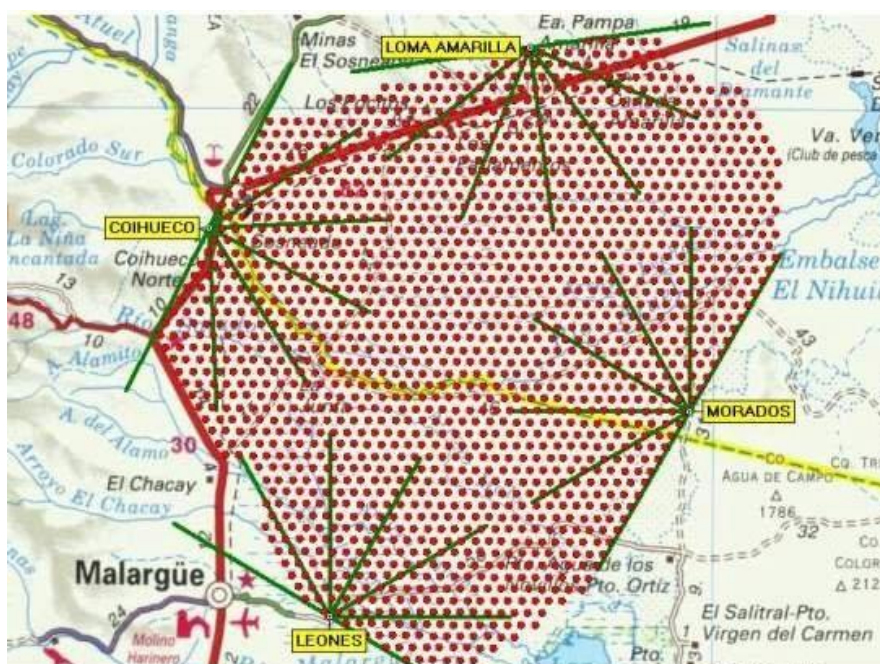


Рис. 30. Обсерватория имени Оже.

## 2.5. Нейтринные эксперименты

Из космоса пролетают другие частицы и в первую очередь для нас важны нейтрино. Нейтрино, как вы знаете, очень слабо взаимодействует с веществом. Это имеет свою положительную и отрицательную сторону. Отрицательная сторона: их трудно регистрировать, зато, с другой стороны, они могут выбираться из таких мест, откуда больше никакие частицы не выбираются. Например, происходит взрыв сверхновой и нам интересно, что происходит внутри. Единственный источник знания об этом - это прямая регистрация нейтрино. То же самое относится к термоядерным реакциям звезд, о чем мы с вами и поговорим.

Существует много типов нейтринных детекторов. Они нужны как для регистрации нейтрино от атомных реакторов или от ускорительных экспериментов, так и для регистрации астрономических нейтрино, в первую очередь, от Солнца, но также от других источников, например, от вспышек сверхновых.

Есть два основных метода регистрации. Первый основан на превращении одних элементов в другие в результате реакции с нейтрино. Например, самый первый нейтринный эксперимент был основан на том, что хлор  $^{37}\text{Cl}$ , при взаимодействии с нейтрино, может превращаться в аргон  $^{37}\text{Ar}$  (Рис 31).

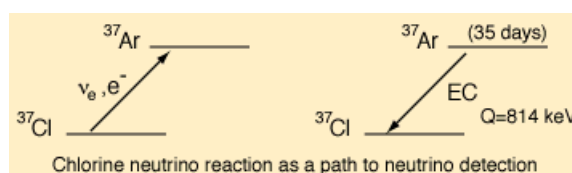


Рис. 31.



Вы ставите цистерну, в которой несколько тонн жидкости, содержащей хлор и за месяц экспозиции набираются несколько десятков лишних атомов аргона, и их нужно оттуда вытащить. Технология была разработана примерно полвека назад и успешно реализована. Вы можете использовать другие материалы, например галлий, у вас уже более компактный детектор с более плотным веществом, в итоге вы определяете поток. Недостатком является то, что вы не знаете направление, вы не знаете откуда нейтрино прилетели, но основным источником нейтрино на Земле все-таки является Солнце в реалистичном диапазоне энергий и поэтому задача определения направления особенно не стояла, особенно при низкой чувствительности детектора.

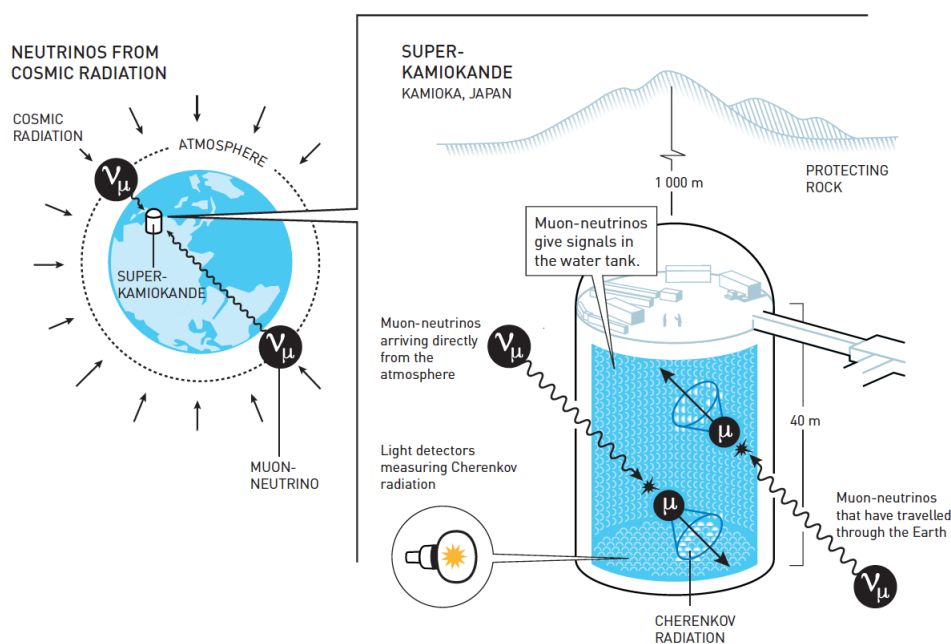


Рис. 32.

Другая идея состоит в том, что вы регистрируете вторичные частицы по их черенковскому излучению. Ставится большая цистерна с водой глубоко под землей, чтобы было меньше частиц космических лучей и может происходить следующее: нейтрино летит через землю с другой стороны и в процессе своего полета с какой-то очень низкой вероятностью рождает мюон и этот мюон вы сможете зарегистрировать в вашем детекторе (Рис 32), измерить его свойства и направление.

Такие детекторы, как Камиоканде и Супер-Камиоканде, они могут определять направление не очень хорошо, но направление на солнце они определяют прекрасно и это позволяет получать красивый результат.

На картинке (Рис 33) нейтринная фотография Солнца. Сейчас мы имеем прямые доказательства, что в Солнце идут термоядерные реакции, мы знаем какие, знаем в каком темпе, потому что мы прямо видим нейтрино, которые прилетают из недр Солнца. Если у вас произошла термоядерная реакция в центре Солнца, выделилась какая-то энергия, она будет наружу идти больше 100000 лет и поэтому световое излучение с поверхности приносит очень косвенную информацию о том,

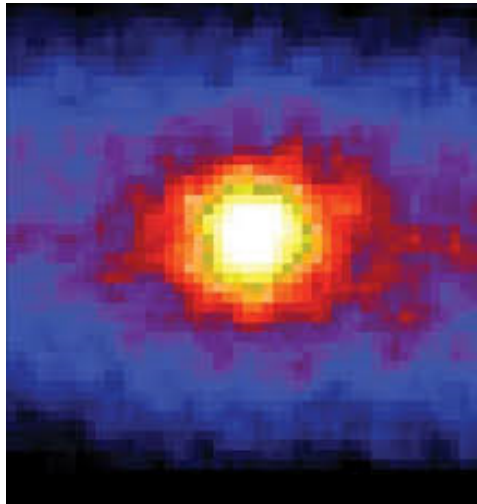


Рис. 33.



Рис. 34.

что происходит в недрах.

В одном единственном случае были зарегистрированы нейтрино от взрыва сверхновой. Это произошло в 87 году, когда сверхновая вспыхнула в большом магеллановом облаке карликовом спутники нашей Галактике (Рис 34). Это естественное оптическое изображение: звёздочка до взрыва, звёздочка вблизи максимум блеска сверхновой. Сверхновые в максимум блеска могут становиться ярче, чем Галактики типа большого магелланова облака и несколько детекторов более или менее одновременно зарегистрировали несколько штук нейтрино этой сверхновой.

Сейчас строятся более крупные детекторы, более крупные детекторы вы можете делать только черенковскими, их основная задача: регистрация нейтрино именно от сверхновых.

Большую цистерну размером километр на километр сделать нельзя, поэтому



нужно использовать естественные объемы воды. Это может быть жидкая вода, может быть лёд. Исследования показали, что лёд при довольно высоком давлении становится прозрачным, поэтому если вы забуретесь глубоко под лёд, то он у вас будет довольно прозрачный и вы сможете видеть черенковское излучение.

Первым детектором была Аманда. Вокруг Аманды сейчас построен детектор IceCube.

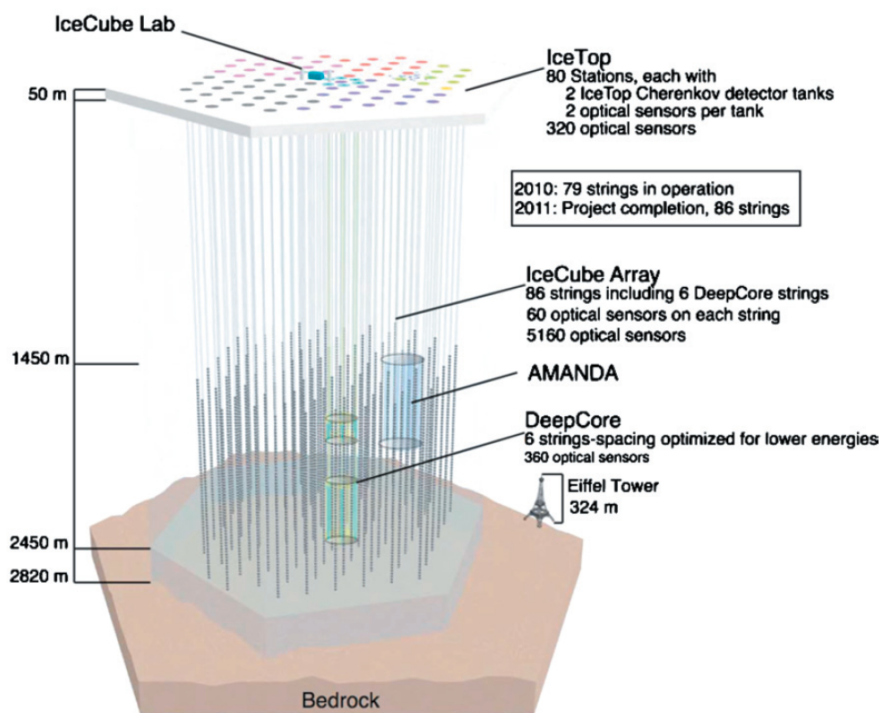


Рис. 35. IceCube

В Антарктиде работающий детектор. Вы бурите кипятком много скважин во льду глубиной почти 3 километра и на кабелях опускаете туда фотодетекторы. Общий объем детектора получается примерно километр на километр: первые полтора километра у вас просто кабеля, а дальше висят детекторы и площадь вот этой сетки составляет примерно один квадратный километр.

Если в нашей Галактике взорвется сверхновая, то такой детектор зарегистрирует много нейтрино от этого события, но пока самым интересным результатом работы это регистрация нейтрино очень высоких энергий и мы снова не знаем откуда они приходят. Их надежно известно несколько десятков штук, но, также как с космическими лучами сверхвысоких энергий, мы не знаем, что является источником.

Можно пробовать делать детекторы в океане. В океане есть проблема, которая связана с тем, что там всегда есть течение от этого трудно избавиться, и в солёной воде не очень хорошо все работает, кроме того, в реальном море есть постоянные источники света связанные с какими-нибудь микроорганизмами. Люди пытаются с этим бороться. В Средиземном море пытаются построить такой детектор, но пока без такого успеха, как IceCube.

Наиболее крупный водный детектор в естественном водоеме - это Байкальский детектор, который находится в более выгодных условиях вода пресная, сильных течений нет, светящихся микроорганизмов мало. И они получают довольно интересные результаты. Но идея примерно та же. У вас влетает нейтрино, двигается, как правило, снизу вверх. Нейтрино от солнца рождает вторичную частицу и выведете черенковское излучение. У вас разные детектор видят излучения в разное время, поэтому они очень точно могут построить траекторию и вы можете определить энергию этой самой частицы.

## 2.6. Гравитационные волны

Первый детектор гравитационных волн начали строить почти полвека назад, в начале 70-х годов. Гравитационная волна (Рис. 36) проходя через какую-то область действует как приливная сила. Если вы ставите просто твердотельный предмет, то он, под действием гравитационной волны, начинает осциллировать и, естественно, у каждого предмета есть свои резонансные частоты, и на этих частотах он имеет очень высокую чувствительность к гравитационным волнам.

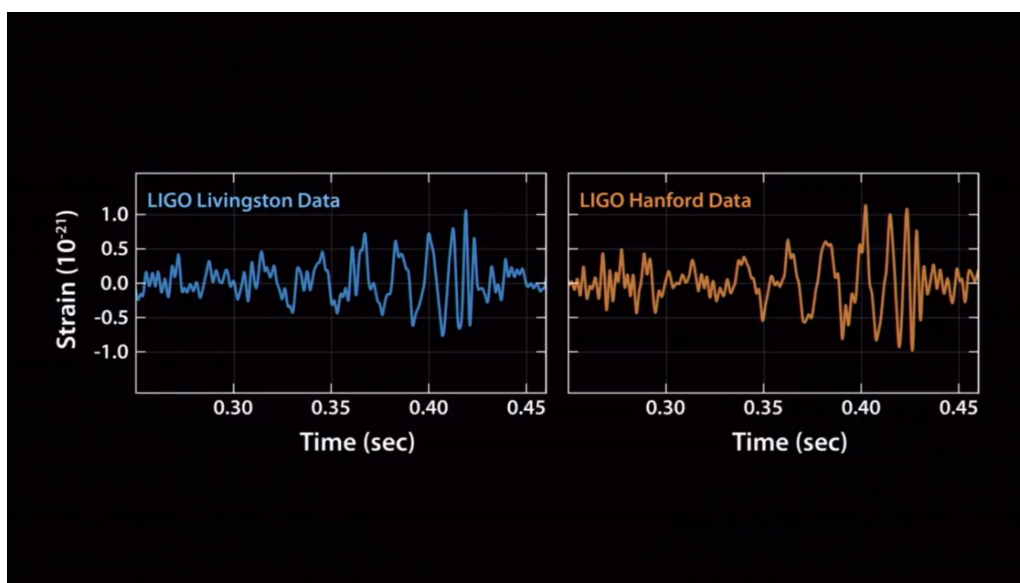


Рис. 36. Открытие гравитационных волн. Официальное объявление 11 февраля 2016 года.

Первые веберовские детекторы (Рис. 37) - это металлическая болванка, обычно алюминий, с пьезодатчиком и если болванка начинает колебаться, то можете это зарегистрировать. Проблема в том, что это высокие частоты.

Например, при слиянии двух черных дыр, гравитационная волна по порядку величины имеет размер как расстояние между этими черными дырами. Для чёрной дыры есть простая формула для ее радиуса:

$$R_{BH} = 3 \text{ км} \frac{M}{M_{\odot}} \quad (19)$$

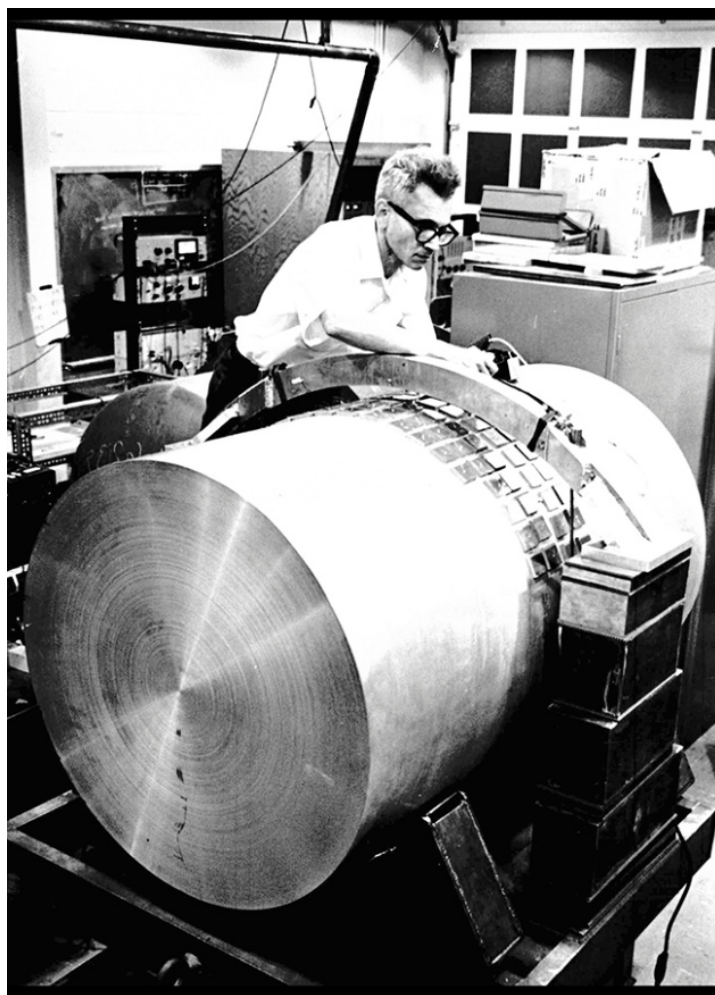


Рис. 37. Первый детектор Вебера

У зарегистрированных слившихся черных дыр массы были где-то по 30 масс солнца, то есть размеры по 100 километров и поэтому при слиянии характерный масштаб - это сотни километров и, если вы посчитаете какой это соответствует частоте, то частота окажется десятков герц до 200 герц.

Веберовский детектор, кроме того что он не суперчувствительный, он чувствителен скорее на 2 килогерцах, на 3 килогерцах, на высоких частотах, поэтому было принято решение, что можно построить более чувствительный детектор совсем другой конструкции, но более дорогой, лазерный интерферометр, и сейчас построено три больших лазерных интерферометра: это два интерферометра LIGO и итальянский VIRGO (Рис. 38).

Идея работы следующая: у вас есть источник когерентного излучения, лазер, лазерный пучок делится и попадает в два плеча интерферометра. Свет очень долго гуляет между этими зеркалами (это нужно для эффективного увеличения размера), потом собирается, попадает на фотодетектор, интерферируют. Если у вас пришла гравитационная волна, значит изменился размер плеч, причем при прохождении волны, одно будет растягиваться, другое сжиматься и соответственно у вас интер-



Рис. 38. Эксперимент VIRGO

ференционная картинка изменится, вы увидите этот сигнал.

Сигнал был зарегистрирован обсерваторией LIGO (Рис. 39).

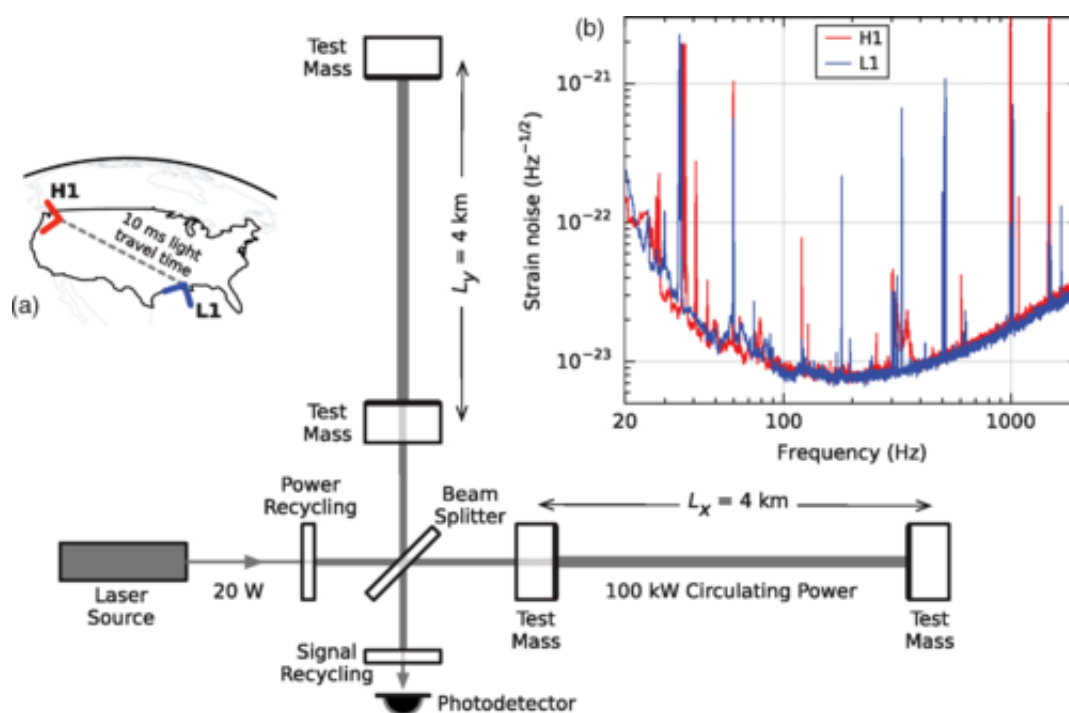


Рис. 39.

Как вы видите, максимум чувствительности находится в области 100-300 герц и это специально подобранная область для эффективной регистрации слияния черных дыр и слияние нейтронных звезд.

Больше всего эффективно регистрировать сигнал мешает шум (Рис. 40).

Шумы бывают разные: на низких частотах самым главным является сейсмический шум и он становится определяющим, т. е. вы не можете на Земле сделать хороший детектор на 1 Гц, на высоких частотах мешает квантовый шум.



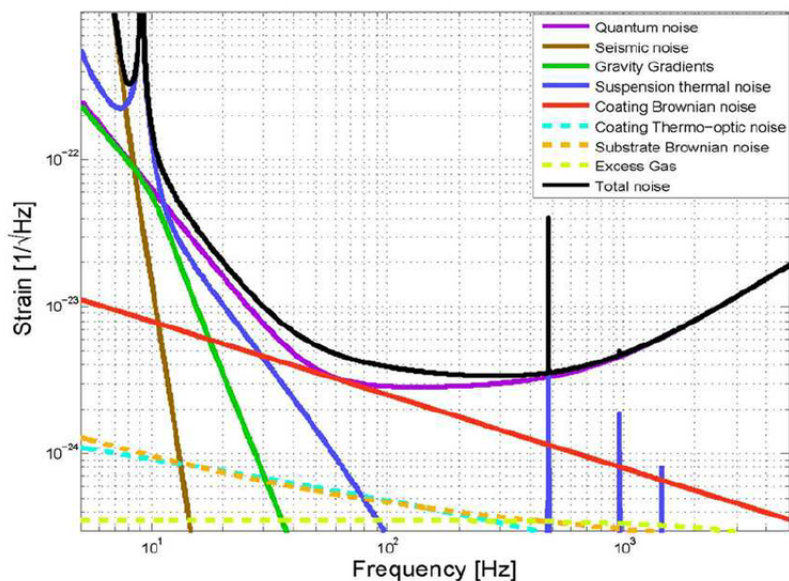


Рис. 40.

## 2.7. Астрономические наблюдения из космоса

Зачем нужны наблюдения из космоса?

- 1) Наблюдения в диапазонах спектра, в которых земная атмосфера непрозрачна. Рентгеновские телескопы обязательно нужно вводить в космос
- 2) Всегда хорошая погода
- 3) Высокое качество изображения: картинка "не дрожит" и звезды "не мерцают"
- 4) Доступно все небо
- 5) Возможно создание установок большого размера

Атмосфера неоднородна и в случае астрономических изображений не позволяет получить четкую картинку.

В ультрафиолете все полностью поглощается, в ультрафиолете наблюдения только космические. За 10 Микронами все поглощается и в инфракрасном диапазоне, посередине есть полосы прозрачности и поглощение, в основном, определяется парами воды. Поэтому можно выбирать хорошие места для наблюдений, где мало воздухе воды (Антарктида, пустыня Атакама).

### Гамма-астрономия в космосе

Современным большим гамма-детектором является спутник Ферми, который гораздо лучше своего предшественника - комптоновской гамма-обсерватории.



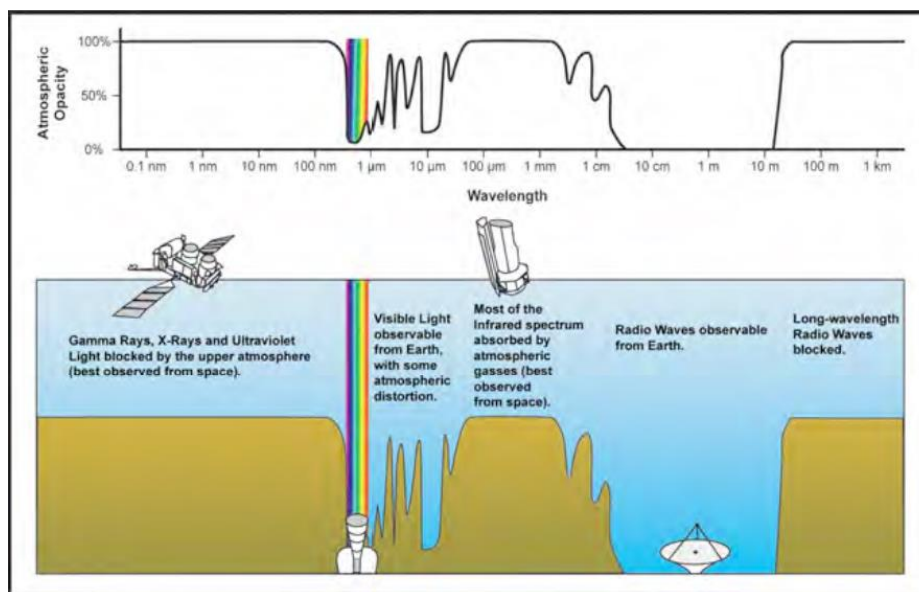


Рис. 41. Поглощение в атмосфере

Как устроена регистрация на нем?

Регистрируются гамма кванты очень высокой энергии, поэтому там нельзя ставить фокусирующую оптику. Это проблема жёсткого диапазона. До сих пор непонятно как обойти, в гамма диапазоне фокусировать ничего нельзя, вы не можете преломить гамма лучи или отразить. Если вы ставите любые зеркала, они просто поглощаются этими зеркалами, отражение не происходит, поэтому детектор устроен внешне очень просто: влетает гамма-квант, детектор состоит из слоев металлической фольги и слоев кремниевых детекторов, в фольге, в случае большого телескопа на Ферми - это вольфрамовая фольга, гамма-квант может превратиться в электрон-позитронную пару и дальше у вас полетят электрон и позитрон. Кремниевые детекторы позволяют отслеживать траектории этих частиц, потому что пролетая через слой кремния, электрон и позитрон будут рождать ионны и вы можете заметить где и когда это произошло, таким образом, вы прямо отследите траектории и той и другой частицы из пары, а в конце стоит калориметр, где это частицы будут поглощены и будет измерена их энергия. В результате этих двух измерений вы получаете полную энергию влетевшего гамма-кванта и проанализировав треки электроны и позитроны вы определяете направление на источник.

## Рентгеновская астрономия

Рентгеновский диапазон - очень интересный диапазон. Например, если мы рассмотрим тепловое излучение, рентген соответствует температуре в несколько миллионов градусов - это температура, которая возникает в аккреационных потоках вокруг нейтронных звезд и черных дыр звездных масс. Первым рентгеновским спутником был Ухуру, который был запущен в семидесятом году.

В рентгеновском диапазоне вы видите часто совсем не те источники, что в оптике. На рисунке 46 представлена одна и та же область - это созвездие Орион.

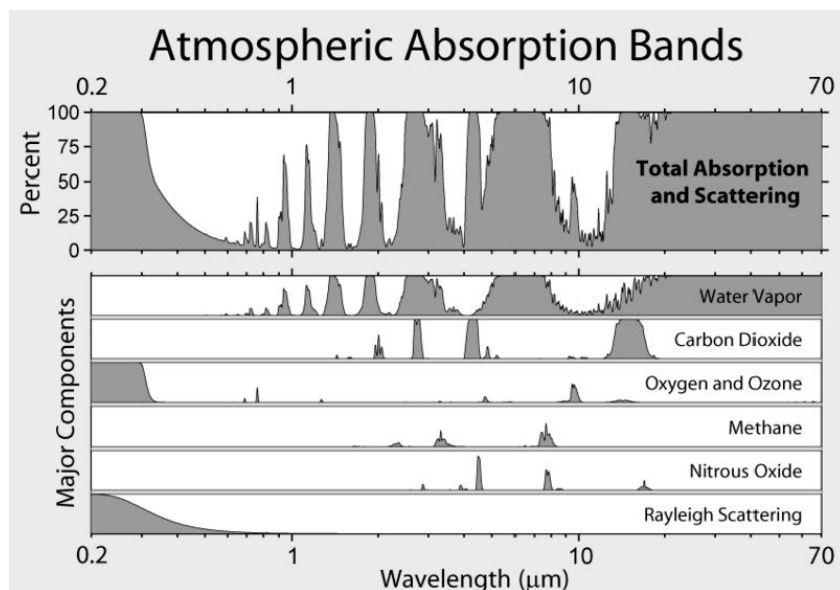


Рис. 42. Поглощение в УФ и ИК



Рис. 43. Fermi

Справа - изображение в видимом диапазоне, слева изображение той же области в рентгеновском диапазоне и видно что много всяких не совпадений.

### Пропорциональные счетчики

Пропорциональный счетчик устроен таким образом (Рис. 47): в газовой камере летит частица и ионизует атом этого газа, соответственно, атомы или ионы и электроны начинают дрейфовать к плюсу или минусу и близко, в данном случае, от

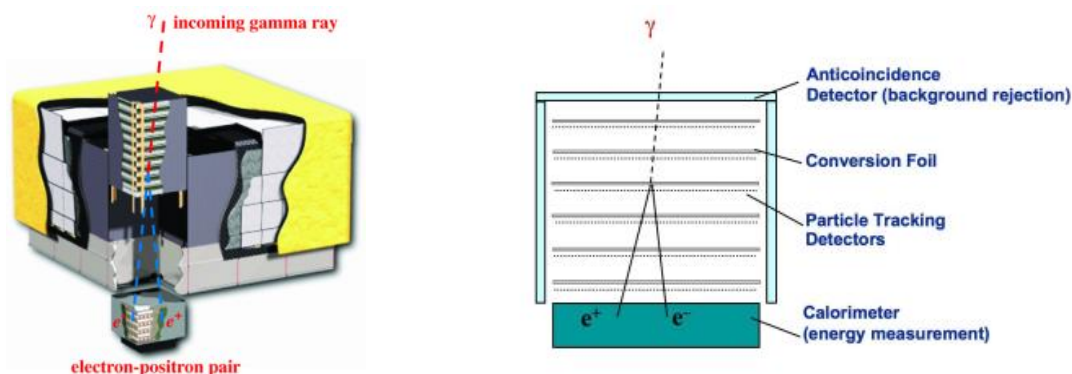


Рис. 44. Устройство детектора Ферми LAT

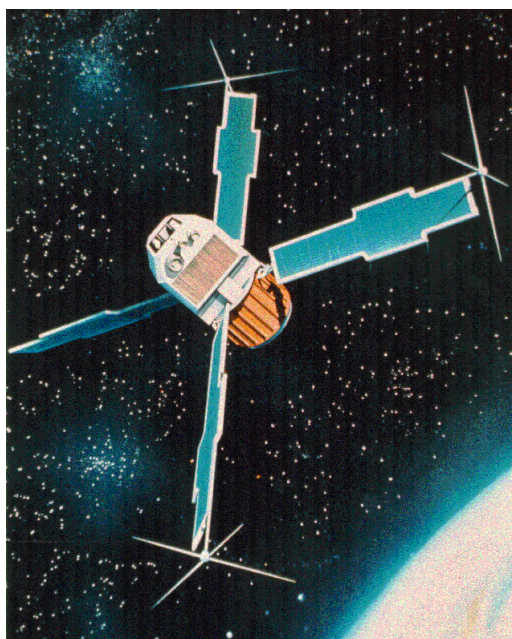


Рис. 45. Uhuru (1970)

анода возникает лавина, частицы ускоряются, ионизуют следующие атомы, снова рождаются заряженные частицы, эта лавина развивается и это позволяет в первую очередь определить, с довольно высокой точностью, энергию того рентгеновского пикета, который влетел и вызвал первичную ионизацию. Направление определяется гораздо хуже и поэтому очень часто ставят просто коллиматоры.

Чтобы построить карты без фокусирующей оптики используют кодирующие маски, с помощью которой можно довольно точно определить направление на источник без применения фокусирующей оптики, которую на энергиях в десятки килоэлектронвольт применять очень трудно.

### Современная рентгеновская астрономия

Тем не менее в рентгене можно применять фокусирующую оптику, на спутниках Чандра и XMM-Newton стоят фокусирующие рентгеновские телескопы, устроены

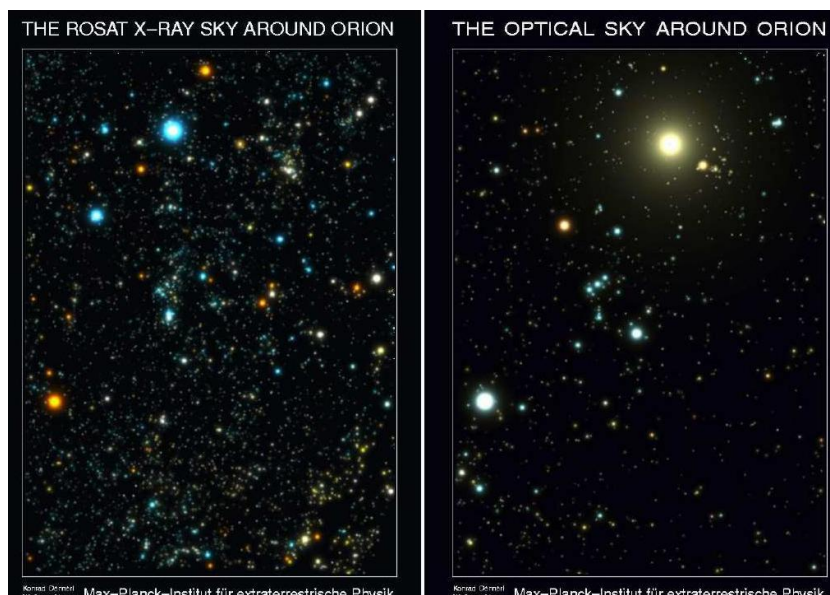


Рис. 46. Рентген vs Оптика

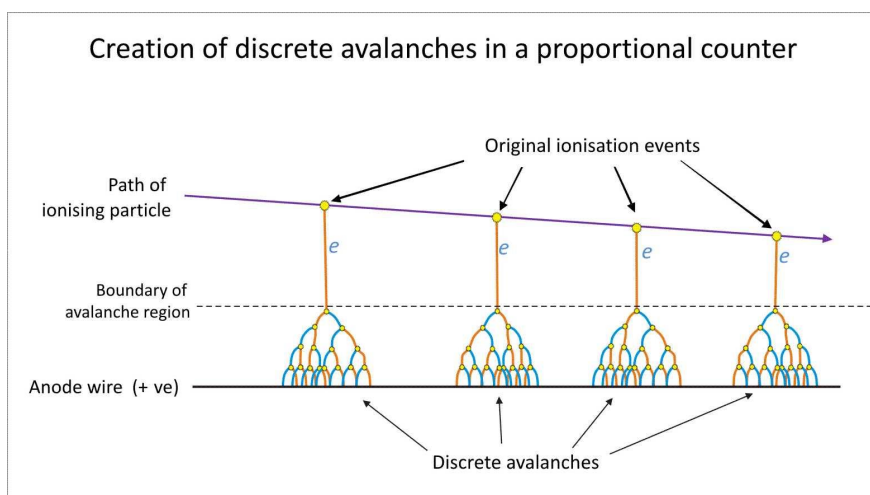


Рис. 47.

они не так как в оптике. Там используют зеркала косою падения (Рис. 48).

Есть несколько усеченных конусов и фотон отражается, попадая под очень маленьким углом к зеркалу. Стоит 2 набора зеркал, чтобы собрать фотон с большой площади, складываете много конусов один в другой.

## Инфракрасная астрономия

В инфракрасном диапазоне можно использовать отражающее зеркало. Там есть другая проблема. Инфракрасное излучение соответствует низкой температуре, соответственно, все нужно охлаждать. Охлаждать, как правило, жидким гелием и он расходуется, вы не можете привести туда ещё один сосуд Дьюара и подлить жидкого гелия. Разработаны системы генерации жидкого гелия на спутнике, но они до-



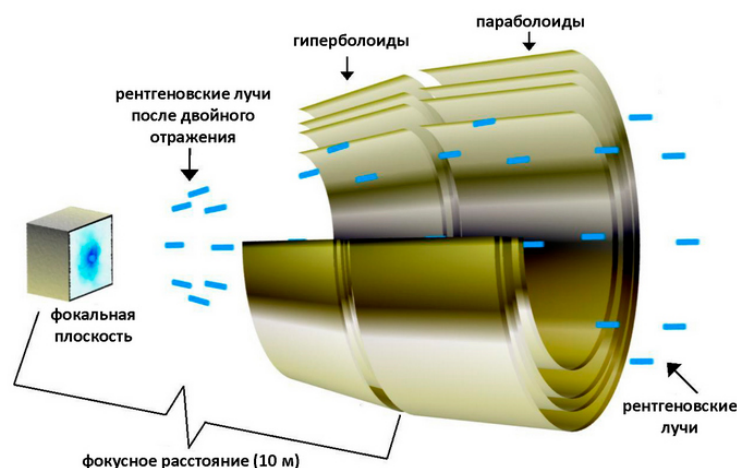


Рис. 48.

рогие, сложные и никогда еще не были опробованы на реальном аппарате, поэтому очень часто инфракрасная спутники работают по году, по два-три, после чего там заканчивается хладагент и аппарат становится практически бесполезным. Некоторые из них продолжают эксплуатироваться, в так называемом, тёплом режиме, но их эффективность сильно падает.

Один из самых известных аппаратов это инфракрасная космическая обсерватория имени Спитцера, которой принадлежит такой результат, как первая карта экзопланеты.

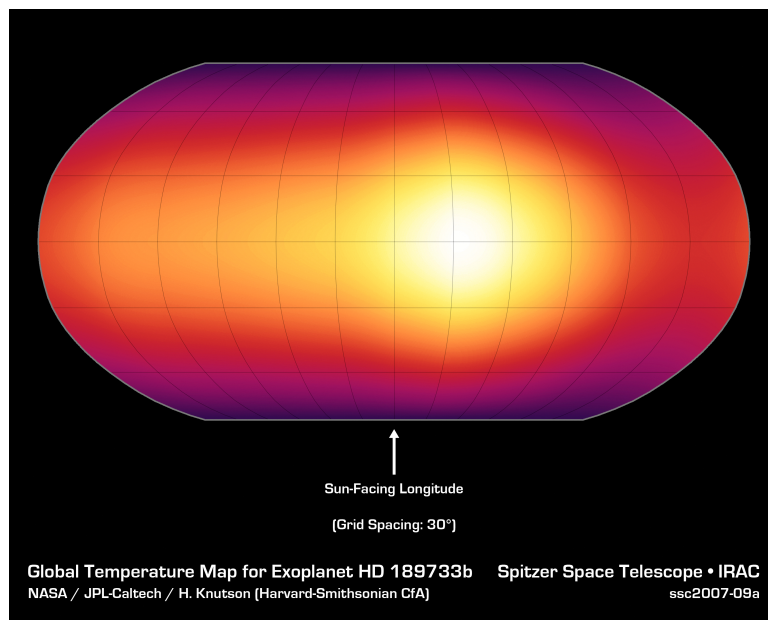


Рис. 49. Карта экзопланеты HD 189733b



## Лекция 3. Солнце.

### 3.1. Основные параметры

Масса  $1.99 \cdot 10^{33} \text{ г}$   
Светимость  $3.86 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$   
Радиус 690000 км  
Средняя плотность  $1.4 \text{ г/см}^3$   
Плотность в центре  $\sim 100 \text{ г/см}^3$   
Температура поверхности 6000 К  
Температура в центре  $10^7 \text{ К}$   
Период вращения 25 - 38 дней  
Состав: 70% водород, 28% гелий  
Возраст  $5 \cdot 10^9 \text{ лет}$   
Время жизни  $\sim 10^{10} \text{ лет}$

### 3.2. Строение Солнца



Рис. 50. Строение Солнца

Внутреннюю часть, примерно 25% по радиусу, занимает ядро, именно там идут термоядерные реакции. Весь водород Солнца не выгорит: от поверхности до поверхности ядра оно плохо перемешивается и поэтому закончится водород именно в ядре, но по массе это заметная часть и тут идет термоядерная реакция. Выделяется энергия, дальше энергию нужно перегонять наружу. Есть три способа передачи энергии: теплопроводность, излучение и конвекция. Поскольку Солнце - газовый шар теплопроводность у него маленькая.

В начале работает излучение, во-первых, потому что Солнце не мощная звезда и поэтому живёт достаточно долго, во-вторых, потому что вещество очень горячее,

поэтому очень прозрачное и поэтому половину радиуса Солнца примерно от 0,25 до 0,75 занимает зона лучистого переноса энергии.

Фотон, испущенный в недрах Солнца в результате реакции, после ряда перерождений будет испущен с поверхности через 170 000 лет. Эта величина показывает насколько Солнце устойчиво. Его устойчивость связана с выделением энергии, она медленно просачивается наружу.

Температура падает к поверхности и с падением температуры растёт непрозрачность в веществе и излучение перестаёт работать, как хороший механизм переноса энергии по той причине, что просто вещество стало не достаточно прозрачно и тогда запускается конвекция и внешние примерно 25% солнечного радиуса - конвективная зона.

Так как внешние слои Солнца - конвективные, возникают очень сложные структуры, связанные с магнитным полем вблизи поверхности. Магнитное поле может быть достаточно сильным, и благодаря этому, Солнце является относительно активной звездой, но общее правило состоит в том, что чем больше конвективная зона, тем активнее звезда.

### 3.3. Устойчивость Солнца

Солнце очень устойчивый объект. Действуют две основные силы (Рис. 51): гравитация, естественно, всегда стремится сжать и силы давления, которые этому противостоят. Сила давления существует, потому что Солнце, в первую очередь, внутри горячее, идет процесс выделения энергии, и поэтому давление - это просто давление газа плюс давление излучения. Соответственно силы давления уравнивают гравитацию и возникает красивый эффект саморегуляции.

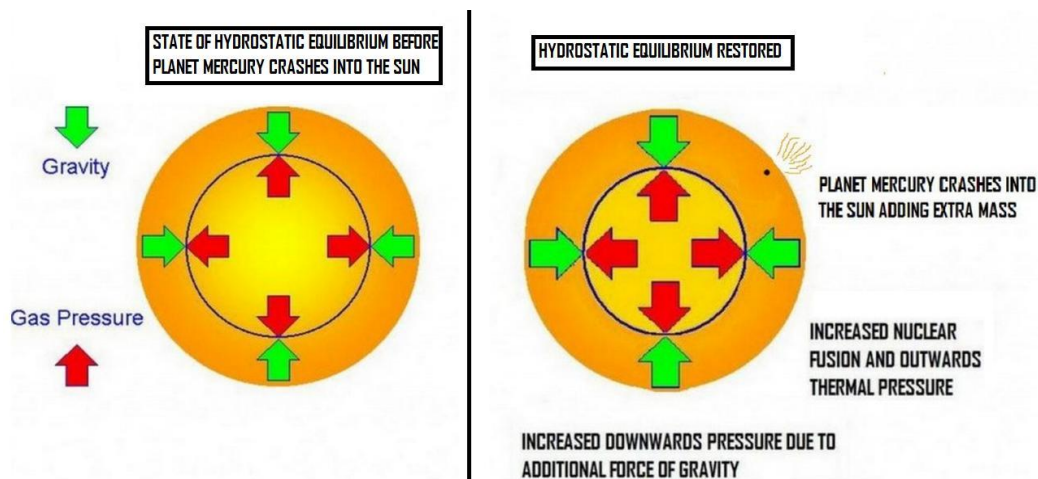


Рис. 51. Строение Солнца

Если под каким-то внешним воздействием Солнце поджалось, значит в центре возросла температура, поскольку вы сжимаете газовый шар, он нагревается. Возросла температура, возросла плотность, пошли термоядерные реакции. Но это хороший реактор, выделяется больше энергии, увеличивается давление и звезда начи-

нает расширяться, она сама регулируется, вырастают силы давления, звезда расширяется, остывает, при этом падает плотность и снова устанавливается равновесие.

Звезды очень стабильные объекты, находящиеся в гидростатическом равновесии, которое очень трудно нарушить.

Для таких объектов, устойчивых под действием гравитации, выполняется теорема вириала, связанная с существованием минимума энергии:

$$E_p < 0, \quad E = E_p + E_k < 0$$

$$|E_p| = 2E_k \quad (20)$$

Можно записать уравнение для внутреннего устройства и попробовать оценить термодинамические величины в солнечных недрах, например, можно оценить давление и температуру.

$$F_{gr} + F_p = 0$$

$$F_p = F(r) - F(r + dr) = P(r)dS - F(r + dr)dS = -\frac{dP}{dr}drdS$$

Сила гравитации:

$$F_g = \frac{GM(r)m}{r^2}, \quad m = \rho dV \quad (21)$$

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{GM}{r^2}\rho$$

Последнюю формулу можно немного упростить:

$$\frac{dP}{dr} \sim \frac{P}{R} \quad (22)$$

Уже отсюда получаем давление:

$$P = \frac{GM}{r}\rho \quad (23)$$

$$P = \frac{GM^2}{R^4} \quad (24)$$

Эту же оценку можно получить совсем простым способом, называемым методом размерности.

Солнце излучает почти как абсолютно черное тело и поэтому для Солнца выполняется закон Стефана-Больцмана:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (25)$$

СГС:  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-5}$

И вы можете оценить температуру поверхности и действительно получите что-нибудь порядка 6000 Кельвин.

### 3.4. Внешняя структура Солнца

Внешнюю структуру Солнца, естественно, изучали дольше всего, потому что ее видно. Выделяют три основных слоя: первый - это фотосфера, видимая поверхность Солнца, далее хромосфера - не плотная оболочка, но хорошо видимая во время затмений и самая внешняя часть - корона, самая внешняя часть атмосферы Солнца может тянуться на несколько солнечных дисков, зависит от состояния активности Солнца, от контраста с фоном.

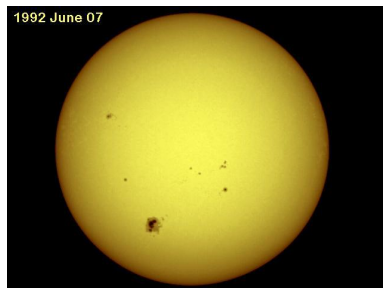


Рис. 52. Фотосфера

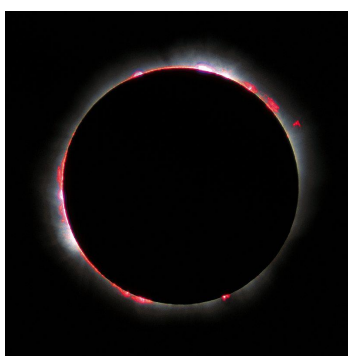


Рис. 53. Хромосфера



Рис. 54. Корона

Большой скачок происходит как раз на границе фотосферы. В хромосфере резко начинает падать плотность, поэтому есть видимый солнечный диск. Также в

хромосфере резко возрастает температура, доходя там до 50000 градусов, а потом начинается корона с температурой пару миллионов градусов и с очень низкой плотностью.

Будем двигаться по разным типом солнечной активности. Начнем с самого известного типа фотосферной активности: солнечных пятен.

### 3.4.1. Солнечные пятна

Пятна видны как очень темное образование, потому что оно холоднее. Образование пятна связано с магнитным полем. Температура пятен  $\sim 4500$  К. Пятно - это область активности на Солнце и, если вы получаете изображение не в видимом диапазоне, где темное соответствует более холодному, а получаете изображение в ультрафиолетовом диапазоне или в отдельных спектральных линиях, в оптическом диапазоне, вы видите обратную картину.

Пятна были открыты как только появился телескоп.

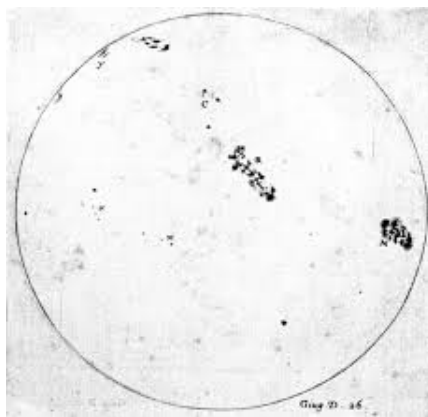


Рис. 55. Солнечные пятна

Галилей проецировал изображение Солнца и зарисовывал, что видел (Рис. 55). Томас Гарриот и Галилео Галилей одновременно открыли пятна, но нам известен Галилео Галилей.

Именно обнаружение солнечных пятен позволило впервые измерить период вращения Солнца, причем увидеть, что на экваторе они быстрее вращаются, на полюсах медленнее. Пятна могут жить неделями, особенно если это крупные пятна.

Откуда берутся пятна? Почему у каких-то областей на Солнце температура меньше? Это связано с магнитными полями. Магнитное поле имеет энергию, соответственно магнитное поле оказывает давление. Энергия подводится к поверхности конвекцией, идёт перемешивание: горячее вещество поднимается вверх, нагревает поверхность, потом более холодное опускается. Если магнитное давление становится сравнимым с газовым, то перемешивания здесь нет и поэтому к области пятен снизу подводится меньше тепла. Естественно, эти области остывают и возникает видимый контраст.

На рисунке 56 показано как выглядит поверхность. Под темным пятном холодная область, потому что здесь не идёт конвекция, будет также горячая область, потому что энергия не уходит, она задерживается, она вынуждена огибать эту область и



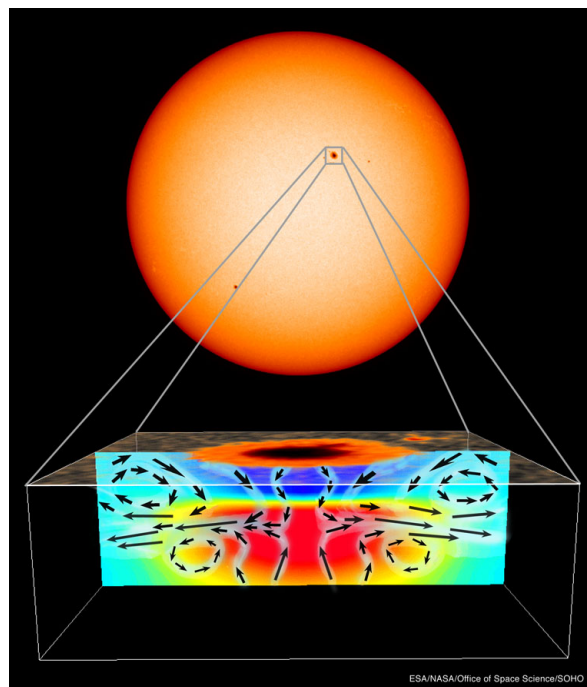


Рис. 56. Устройство солнечных пятен

пятна возникают, когда у вас всплывает магнитная арка (рис. 57), поэтому пятна появляются парами.

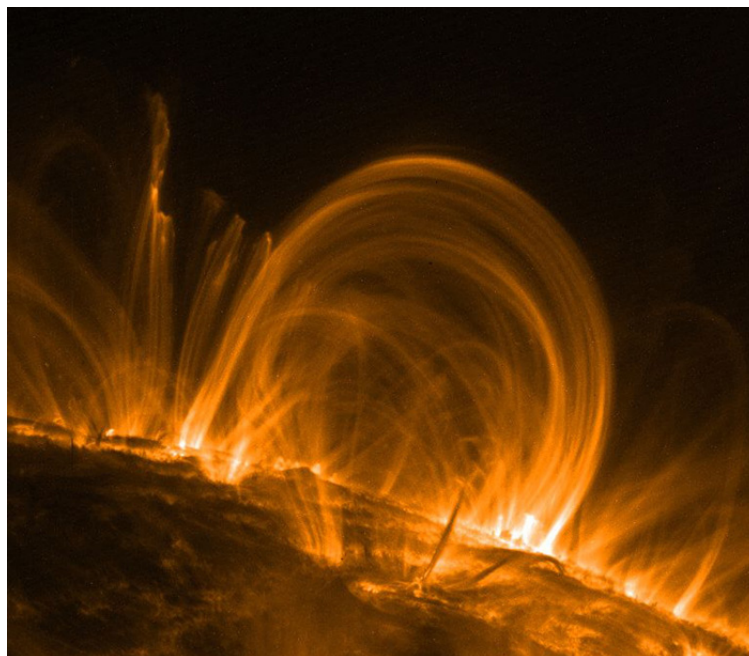


Рис. 57. Магнитная арка

Снимок иллюстрирует две группы пятен и они соединены магнитной аркой.

### 3.4.2. Факельные поля

Когда пятен на Солнце много, становится ли Солнце слабее?

Пятно - это не просто твердая поверхность, это структура и энергия снизу подается. Возникают структуры, которые называют факельные поля (рис. 58). У них температура больше, чем в среднем у поверхности.

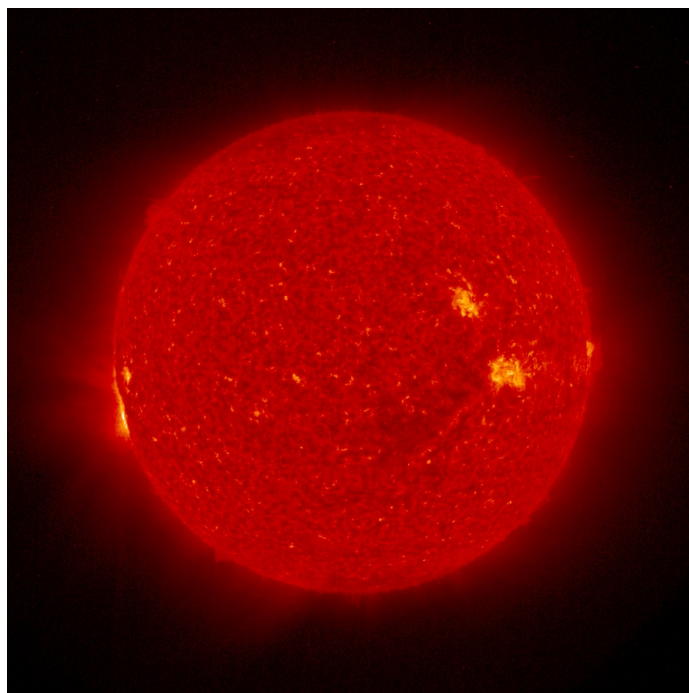


Рис. 58. Факельные поля

Наличие факельных полей компенсирует негативный вклад солнечных пятен в полную оптическую светимость Солнца.

### 3.4.3. Протуберанцы

С активностью, с магнитными полями связано самое известное активное образование на Солнце - это протуберанцы (рис. 59).

Они снова связаны с магнитным полем, аркообразная структура отражает именно структуру магнитных силовых линий. Как правило в основаниях протуберанца будут пятна.

Силовые линии могут пересоединиться и часть протуберанца улетит наружу, произойдет выброс вещества, который полетит в межпланетную среду. Если нам не очень повезёт, попадает на Землю, вызывая магнитные бури.

### 3.4.4. Солнечная грануляция

Есть очень красивая структура: солнечная грануляция. Энергия подводится конвекцией и яркие области - это места, где происходит подъём горячего вещества

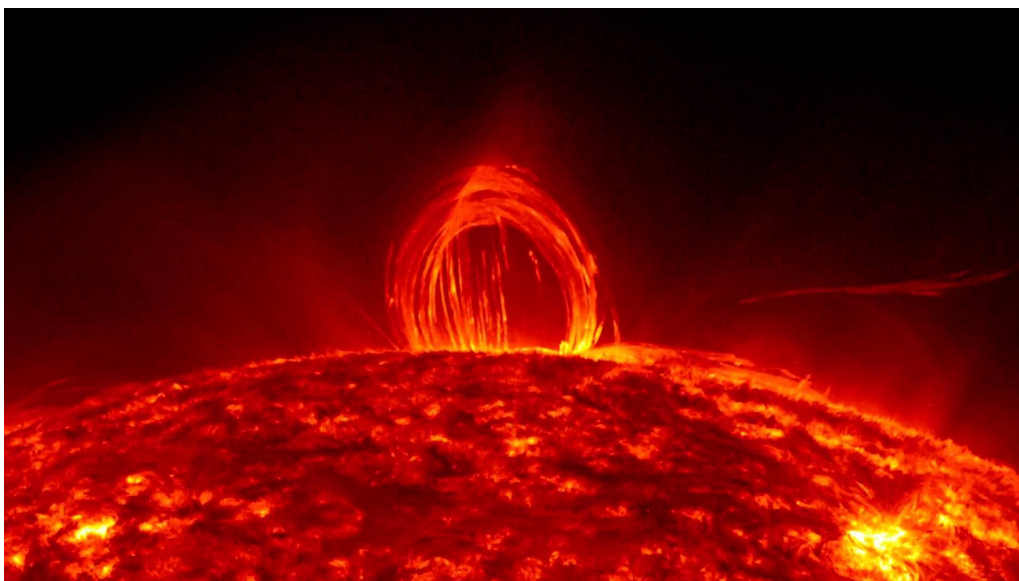


Рис. 59. Протуберанец

из недр, а дальше она остывает, излучает, поскольку остывает - опускается. Темные прожилки между гранулами - это более холодное вещество, которое опускается вниз.

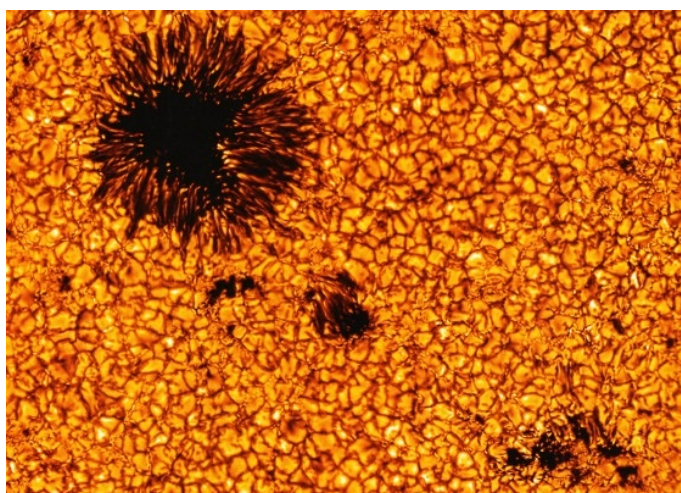


Рис. 60. Солнечная грануляция

Гранулы живут несколько минут, что отражает скорость перемешивания. Размер порядка 700 километров.

### Супергрануляция в хромосфере

Есть и более крупные структуры: супергранулы. Супергрануляция существует в хромосфере. Конвективное движение продолжается. Существуют они дольше, существуют порядка суток.

### 3.5. Гелиосейсмология

Есть замечательный метод исследования Солнца, так называемая гелиосейсмология. Солнце - это газовый шар, тем более с конвекцией, конвекция приводит к существованию турбулентности, и поэтому по Солнцу все время ходят звуковые волны.

Мы можем оценить период пульсации. Если у вас газовый шар устойчивый под действием гравитации, то параметров будет входить всего три: ньютоновская постоянная, масса и радиус.

Период пульсации:

$$P = \frac{1}{\sqrt{6\rho}}, \quad (26)$$

где  $\rho$  - средняя плотность.

И для Солнца такой период даёт время порядка минут.

Анализ этих колебаний позволяют узнать много о структуре Солнце, причём очень глубоко, а не только о поверхностных слоях.

Как это удастся сделать? Пульсации возникают благодаря турбулентции во внешних частях Солнца. Всё время возникают волны, которые начинают распространяться вовнутрь, но двигаясь внутрь, естественно, со скоростью звука, они сталкиваются с тем, что скорость звука идет вглубь, растёт плотность, растёт температура и волны отражаются и начинает идти читайте обратно. Если наоборот, волны генерируются внутри, идут вверх, отражаются и тоже идут внутрь, оказываются запертыми во внутренних областях и их очень трудно наблюдать.

Вы будете наблюдать много разных частот колебаний, которые можете измерять просто по колебаниям поверхности Солнца, по эффекту Доплера вы меряете, что какие-то части поверхности двигаются к вам, какие-то от вас и на разных масштабах вы будете видеть разные колебания и это позволяет вам зондировать Солнце на разную глубину, узнавать как оно внутри устроено.

Это применяется не только для Солнца, но и для звезд: есть астросейсмология. Астросейсмология помогла измерить магнитное поле в недрах красных гигантов. Потому что там тоже возбуждаются пульсации, оболочки конвективны, волны начинают идти внутрь, но поскольку внутри есть магнитное поле, то колебания звуковые вещества начинают взаимодействовать с этими волнами появляются магнитные магниты звуковые колебания другого вида, которые не могут выйти наружу.

В звездах "гуляют" волны, проявление которых мы можем наблюдать, изучая кривые блеска.

### 3.6. Солнечный цикл

Пятна, вспышки, протуберанцы - это проявление солнечной активности и солнечная активность не постоянна. Существует 11-летний цикл активности, который очень хорошо описан. Начиная с начала 17 века, за последние 400 лет, начиная с Галилео Галилея, мы знаем как ведёт себя Солнце с периодом примерно 11 лет, но он может сбиваться на год-полтора. Но никто не умеет предсказывать следующий цикл.

Цикл активности связан с изменением магнитного поля.



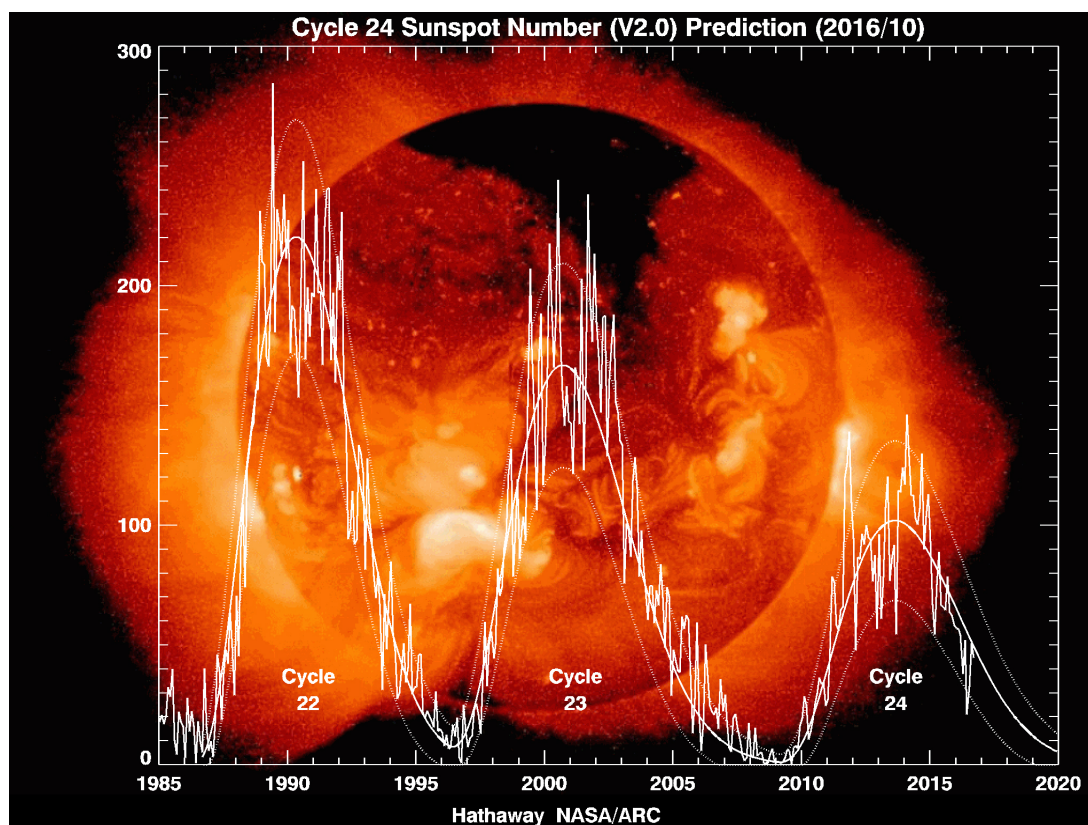


Рис. 61. Солнечная цикличность

На самом деле цикл длится 22 года, то есть за 11 лет северный полюс меняется с южным и ещё за 11 лет они возвращаются обратно. Но на активность это не сказывается, поэтому говорят об 11-тилетнем цикле.

У есть данные за 400 лет и был период, который называется маундеровским минимум: в течение примерно 100 лет на солнце не было пятен. Причин мы не знаем.

Меняется содержание некоторых изотопов из-за солнечной активности. Некоторые изотопы рождаются в атмосфере Земли, когда она бомбардируется частицами космических лучей. Поток вещества от Солнца, солнечный ветер мешает проникновению галактических космических лучей во внутреннюю часть, где Земля крутится и соответственно в годы активного Солнца, поток галактических космических лучей меньше и получается меньше соответствующих изотопов.

### 3.7. Эволюция Солнца

Солнце эволюционирует на большом масштабе времени и это связано с поведением термоядерных реакций в его недрах.

Жизнь на Земле исчезнет через миллиард лет, потому что светимость Солнца возрастет за это время на 10%, этого достаточно для того, чтобы температура на Земле повысилась на несколько градусов, запустится необратимый парниковый эффект, и Земля довольно быстро станет непригодной для жизни.



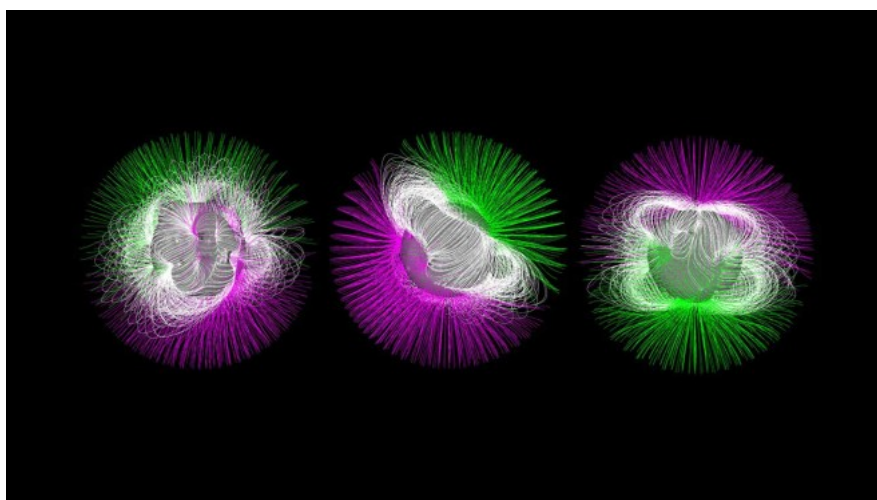


Рис. 62. Переворачивание магнитного поля

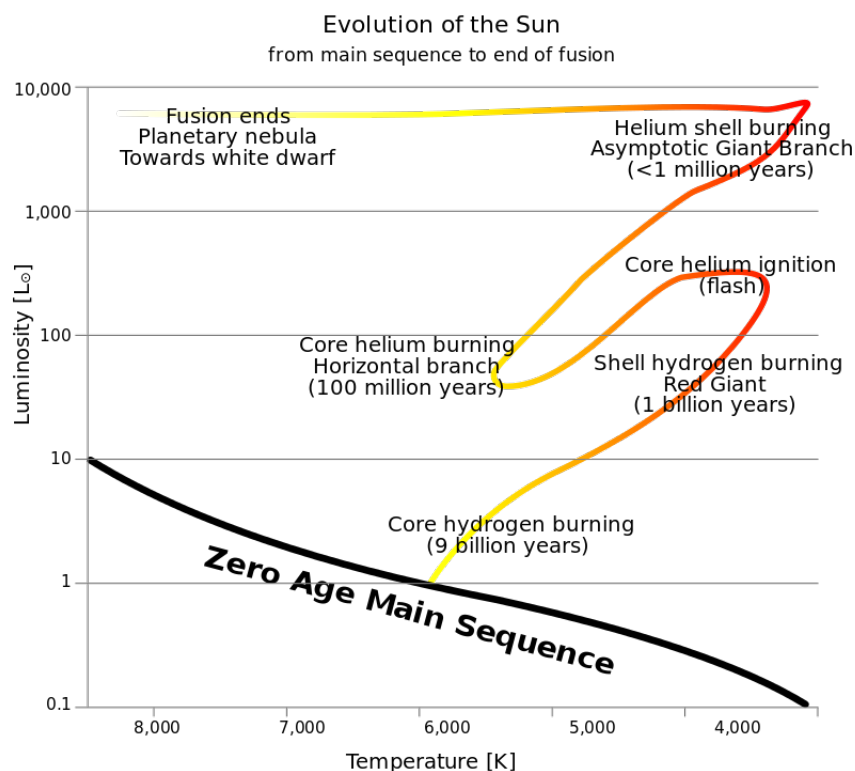


Рис. 63. Эволюция Солнца

### 3.8. Зона обитаемости

Зона обитаемости - это область вокруг звезды, где на планете при атмосфере типа земной, может существовать жидкая вода на поверхности. Чем мощнее звезда, тем дальше простирается зона обитаемости, чем слабее звезда, тем ближе.

Параметры зоны обитаемости зависят от светимости звезды.

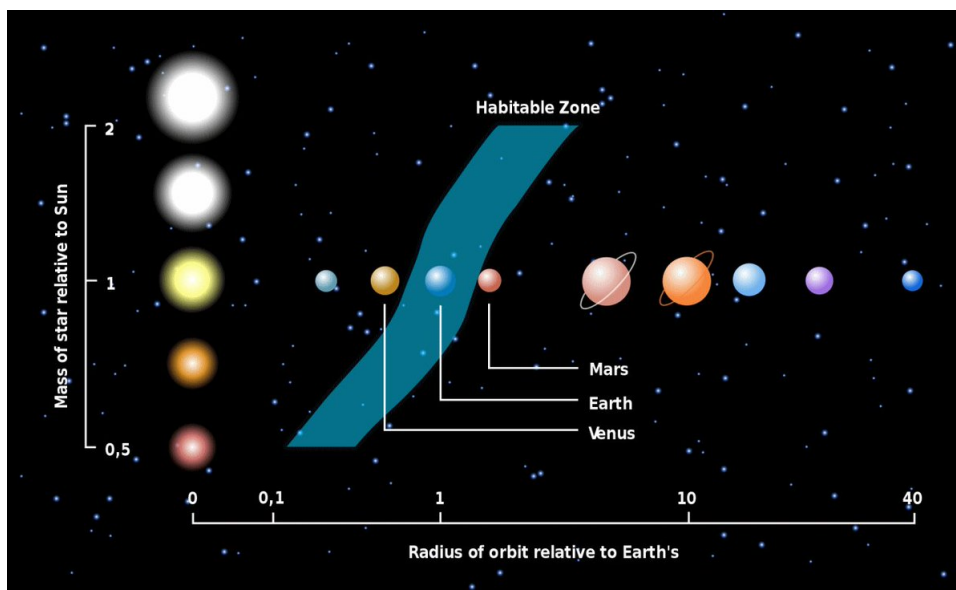


Рис. 64. Зона обитаемости

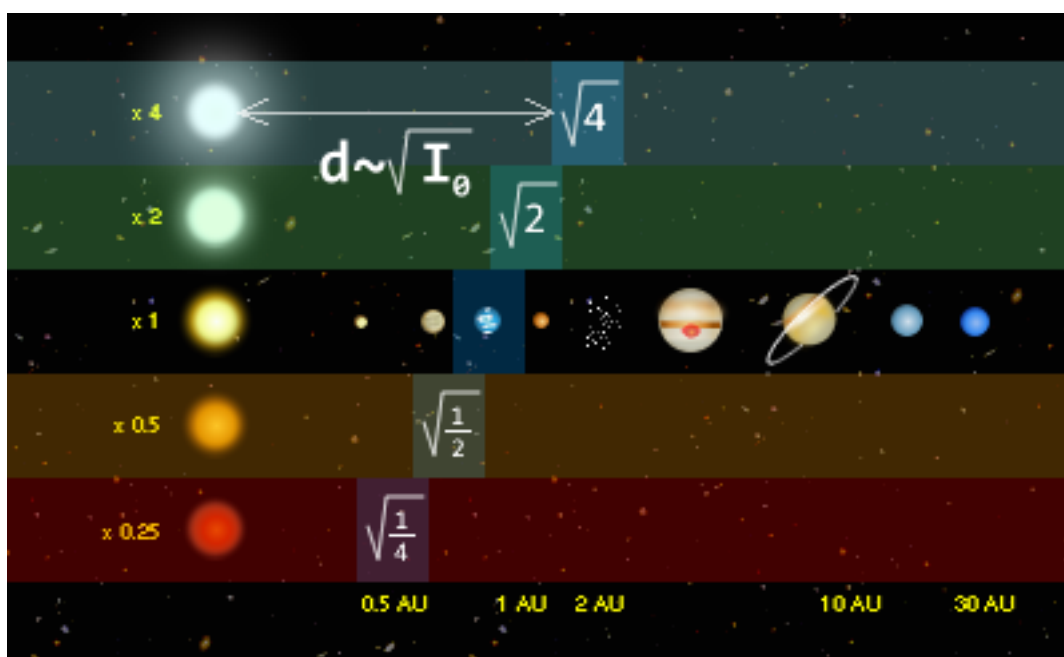


Рис. 65. Зона обитаемости, в зависимости от светимости

Землеподобных планет в зоне обитаемости в галактике должно быть много, речь идёт о десятках миллиардов таких планет.

Зону обитаемости нужно рассчитывать очень аккуратно: в деталях нужно рассчитывать свойства звезд, зоны обитаемости связаны с свойствами планет, с свойствами их атмосфер.

Земля оказывается на границе зоны обитаемости, и, действительно, если Солнце станет чуть-чуть поярче, то граница зона обитаемости сдвинется дальше и Земля

окажется вне зоны обитаемости.

Солнце в прошлом светило слабее. Жизнь на Земле появилась примерно четыре миллиарда лет назад, это довольно удивительно, потому что климат был в это время совсем другим, светимость Солнца была на 30% меньше, на Земле должно было быть гораздо холоднее, Земля должна была быть покрыта льдами, а мы знаем, что это не так. Это и называют парадоксом тусклого Солнца.

Однозначного решения парадокса нет, но, по всей видимости, это связано со свойствами атмосферы Земли.

### 3.9. Вспышки на Солнце

Вспышки на Солнце, действительно, потенциально опасные. За последние 150 лет видимых в белом свете вспышек на Солнце не происходило, они бывают но крайне редко.

Вспышки очень часто сопровождаются корональными выбросами. Это раздувшийся протуберанец до следующей своей эволюционной стадии. Если это попадает на Землю, то происходят сильные магнитные бури, полярные сияния, которые могут быть видны в довольно южных широтах и происходят такие события в максимуме активности.

Самая мощная из известных вспышек произошла в 1859 году, так называемое событие Каррингтона. Это первая и единственная вспышка, которую видели в белом свете. Несколько астрономов-любителей заметили яркую вспышку и через несколько дней начались серьезные проблемы на Земле. Уже были телеграфные линии, это значит, что были длинные провода. Если у вас изменяется магнитное поле, то наводится индукционный ток, который тем больше чем длиннее проводник. Телеграфистов било током, горела телеграфная бумага. Всё это было связано с солнечной активностью.

Чтобы сделать мощную вспышку нужна большая группа солнечных пятен. На Солнце никогда не наблюдалось таких больших групп пятен, которые должны были бы вызывать супервспышки, поэтому Солнце спокойная звезда и не случайно эволюция спокойно проходила на земле и не испытывала мощного влияния.

Есть указания на то, что мощные вспышки на Солнце происходили и это снова по изотопному составу. Есть серьёзные указания на то, что в восьмом веке была очень мощная вспышка на солнце, потому что там есть скачок в содержании сразу нескольких изотопов.

### 3.10. Солнечные нейтрино

Солнечная светимость обеспечивается реакциями термоядерного синтеза. Лёгкие элементы превращаются в тяжёлые.

Возникает целая цепочка реакций, которая начинается с протонов и заканчивается синтезом гелия. В начале взаимодействуют два протона, образуется дейтерий, потом добавляется протон, образуется гелий-3, потом два гелия-3 взаимодействуют друг с другом и образуется уже стабильный гелий-4, выделяется энергия: в виде кинетической энергии частиц, в виде излучения гамма квантов и в виде нейтрино.

Для нейтрино Солнце прозрачно и нейтрино фактически двигаясь со скоростью света, мгновенно покидает солнечные недра, достигает земли и здесь их можно ловить и от каждой цепочки реакции приходят нейтрино, имеющие разную энергию.

Первый директор заработал в 60-е годы и возникла проблема: регистрировали меньше в 3 раза нейтрино от Солнца, чем должно было быть. Оказалось, что проблема в нейтрино: существуют нейтринные осцилляции.

## Лекция 4. Экзопланеты.

### 4.1. Как открывают?

Одним из самых важных открытий последних 20 лет стало обнаружение экзопланет. На настоящий момент открыто примерно три с половиной тысячи планет.

В 1995 году была открыта первая экзопланета около нормальной звезды. Нормальная звезда - это звезда такая же как наше Солнце, но с другими параметрами находящаяся на такой же эволюционной стадии. Этой планете присвоено название Димидий.

Методы открытия экзопланет лишь косвенные.

1. Изменение лучевой скорости звезды. Лучевая скорость - это проекция скорости звезды на наш луч зрения.

2. Прохождение планеты по диску звезды.

3. Микролинзирование.

4. По таймингу. В данном случае мы исследуем пульсары, белые карлики, двойные и планетные системы.

5. Прямые изображения.

6. Выделение света планеты из суммарного света.

7. Астрометрия.

Самый плодотворный метод - это метод прохождений.

#### 4.1.1. Лучевые скорости

Видим только яркую звезду. Будет заметно, что она движется то к нам, то от нас. Мы можем измерить период и массу.

Первая надежная экзопланета была открыта этим методом.

Рассмотрим систему Земля-Солнце.

Масса Солнца:  $2 \cdot 10^{30}$  кг. Масса Земли:  $6 \cdot 10^{24}$  кг В системе центра масс:

$$M_{\odot} \vec{v}_{\odot} + M_{\oplus} \vec{v}_{\oplus} = 0$$

$$\frac{v_{\odot}}{v_{\oplus}} = \frac{M_{\oplus}}{M_{\odot}} = 3 \cdot 10^{-6}$$

Орбитальная скорость Земли вокруг Солнца:  $v_{\oplus} = 30$  км/с, а скорость Солнца:  $v_{\odot} = 10^{-4}$  км/с

Измеряется лучевая скорость по линиям, по эффекту Доплера. Когда тело движется от нас, то все линии сдвигаются в красную область, когда тело движется к нам, то линии сдвигаются в синюю область.

Возьмем Юпитер. Радиус орбиты:  $a = 5.2a.e.$ , где астрономическая единица - это расстояние от Земли до Солнца. Скорость орбитального движения равна:

$$v_j = \frac{v_{\oplus}}{\sqrt{a}} \approx 13 \text{ км/с}$$

Масса Юпитера:  $2 \cdot 10^{27}$  кг  $= 10^{-3} M_{\odot}$

Эффект, который оказывает Юпитер на Солнце это примерно 13 метров в секунду.



Первые планеты, которые были открыты, с амплитудами примерно 50, 100 и больше метров в секунду и это соответствует горячим Юпитерам - это условный термин. Легче всего открывать планеты, которые массивны как Юпитер и находятся очень близко к звезде.

Возьмем Юпитер с периодом  $P$ , равным трем дням, то чему будет равна большая полуось его орбиты? По закону Кеплера, большая полуось пропорциональна периоду в степени  $2/3$ , то большая полуось будет  $a = 0.04 \text{ а.е.}$ . Для такой планеты уже амплитуда скорости звезды будет равна 150 метров в секунду.

На HARPS открывают и планетные системы, около звезды с номером HD 10180 было обнаружено 7 планет на орбитах от 0.06 до 1.4 а.е. Позднее обработали эти же данные и появились выводы, что в этой системе может быть даже девять планет.

Открыта планета у звезды Проксима Центавра. Там также по скоростям обнаружена планета, причем она земного типа, массой 1,3 земных и расположена в зоне обитаемости.

Период обращения: 11 дней, это с тем, что звезда, около которой она обращается, красный карлик.

#### 4.1.2. Транзитные экзопланеты

Следующий метод - транзитные измерения, т. е. про прохождению планеты по диску звезды.

Существует условие, что луч зрения лежит в плоскости орбиты. Это накладывает большие ограничения на обнаружение планет, но мы можем строить статистику и вводя какие-то веса каждой планеты определять какая встречаемость планет среди всех звезд и не только среди тех, у которых планеты системы повернуты в сторону нашего луча зрения.

Если, при измерении лучевой скорости звезды, масса планеты влияла на величину эффекта, то тут мы измеряем потемнение звезды и поэтому для нас играет роль радиус планеты. Получается два метода, один из которых дает массу, а другой радиус.

Если мы знаем оба параметра, то можем определить плотность планеты и можем узнать из чего она создана.

Сейчас транзитный метод дал наибольшее число кандидатов в планеты и подтвержденных планет и это связано с работой двух спутников: Kepler и CoRoT.

Почему мы запускаем в космос телескопы? Чтобы открывать планеты этим методом, потому что нам нужно выделить очень маленькие вариации блеска звезды, т. к. атмосферная турбулентность заставляет звезду дрожать и чуть-чуть изменять яркость и почти невозможно выделить такие маленькие флуктуации из атмосферного дрожания, а в космосе атмосферы нет и чувствительность определяется только прибором.

Kepler-22b - это первая надежная открытая планета типа земли в зоне обитаемости, но на сегодняшний день уже открыта много таких планет.

Орбитальный период 290 дней, но радиус 2.25-2.5 земных.

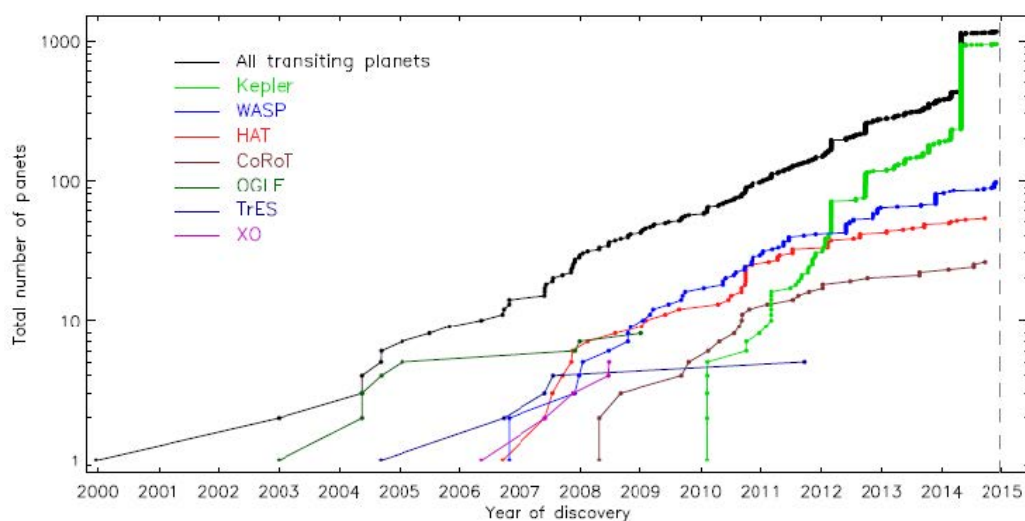


Рис. 66. Темп открытия транзитных планет

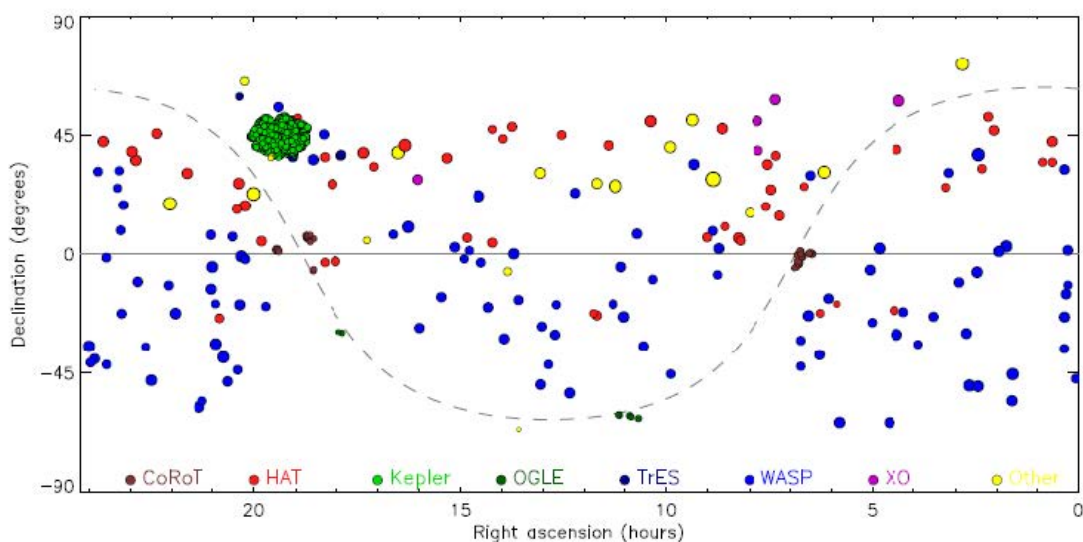


Рис. 67. Развертка небесной сферы и распределение открытых транзитных планет

#### 4.1.3. Как не перепутать с пятнами?

При поисках транзитных планет, особенно самых маленьких, сигнал от транзита можно перепутать с пятном. Поэтому важна повторяемость событий и форма кривой блеска.

Наблюдение транзитов позволяют изучать пятна на других звездах, по кривым блеска транзитов мы можем их увидеть. Кроме вывода о наличии пятна, мы можем ещё сделать вывод о периоде вращения звезды, потому что пятно относительно поверхности зафиксировано, а мы можем видеть как оно движется.

Как производится проверка кандидатов на экзопланету? Самый надежный способ - это обнаружить планету другим методом. Например, Кеплер открыл какой-то

транзит, на эту звезду навели телескоп, изучающий лучевой скорости и подтвердили, что такая планета существует. Используются так же методы статистической обработки данных.

## 4.2. Микролинзирование

Переходим к следующему методу, который называется микролинзирование - это неожиданное приложение общей теории относительности Эйнштейна к открытию экзопланет. Он основан на эффекте корреляционного лицензирования, когда лучи света проходят мимо какого-то массивного тела, путь искривляется и если это симметричное тело, то искривления происходят одним способом, а если это система звезда и планета, то появляется некая несимметричность.

Точно также, как и для транзитов, телескоп фиксирует изменения блеска звезды и ситуацию, когда какая-то планетная система пройдет перед какой-то другой звездой, тогда планетная система будет выступать в роли гравитационной линзы, будет фокусировать в наш телескоп свет от звезды, которая расположена дальше.

Планету мы находим следующим образом: сначала яркость более далёкой звезды возрастает, потом убывает, а когда планета проходит по этой более далекой звезде, возникает дополнительные маленький пик и он нам говорит, что планета была.

Плюс этого метода в том, что ему не критично, чтобы планета была близка к звезде.

## 4.3. Тайминг

Слово тайминг обобщает целый класс методов, когда у нас есть какой-то периодический процесс и планеты его модулируют. Например, у нас есть пульсар. Если у пульсара есть планета, то возникает аналогичная ситуация как с лучевыми скоростями. Пульсар начинает колебаться то удаляясь от нас, то приближаясь и поэтому, хотя он все равно излучает через равные промежутки времени, для нас они приходят с большим интервалом, когда удаляется от нас и с меньшим интервалом, когда приближается. После добавления планеты, мы видим то удлинение периода пульсара, то его сокращение. По этим изменениям можно с большой точностью искать даже лёгкие планеты.

## 4.4. Астрометрическое детектирование

Раньше всех предложенный метод исследования открытия экзопланет - это астрометрическое обнаружение. Однако затем все открытия были закрыты более точными наблюдениями.

Сделаем простую оценку. Возьмём систему Солнце-Юпитер.

Юпитер вращается вокруг центра масс и Солнце тоже вращается по своей орбите вокруг центра масс.  $r$  - расстояние от центра масс.

$$\frac{r_j}{r_\odot} = \frac{M_\odot}{M_j}$$

$$\frac{r_{\odot}}{a_j} = \frac{M_{\odot}}{M_j} \simeq 10^{-3}$$
$$r = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ a.e.}$$

Получилось, что центр масс должен находиться вне Солнца, но так было бы если бы в солнечной системе был только лишь Юпитер.

Теперь оценим угол, под которым видно это расстояние, допустим с одного парсека.

$$\alpha = \frac{r}{a} = \frac{5.2 \cdot 10^{-3} \text{ a.e.}}{206265 \text{ a.e.}} \cdot 206265'' = 5.2 \cdot 10^{-3}''$$

Видно, что трудно заметить такие вариации и поэтому до сих пор надёжных планет таким методом не обнаружено.

Уже начал свою работу спутник GAIA, который должен проводить именно астрономические измерения, с очень высокой точностью измерять положения огромного числа звезд.

## 4.5. Изменение суммарного блеска

Этот метод похож на метод транзитом. Но чтобы использовать транзит, нам нужно точное совпадение луча зрения и плоскости орбиты, а если есть какой-то небольшой угол, то можно всё равно заметить планету по отраженному свету, который она излучает.

## 4.6. Прямой метод

Для того чтобы увидеть планеты, проводится специальная обработка данных, то есть строятся специальные коронограф, где уже в самом телескопе загораживается механически центральная звезда и исследуется свет только от ее окрестностей, но это не всегда работает, потому что появляются различные блики. Тогда используют компьютерную обработку самих кадров и помимо этого нужно использовать адаптивную оптику.

Чем дальше планета, тем легче ее обнаружить.

## Спектр экзопланеты

В методе лучевых скоростей мы измеряем спектр звезды и по смещению линий находится планету, в данном случае удастся выделить именно свет планеты и снять его, а спектр говорит о химическом составе.

## 4.7. Планеты у двойных звезд

Могут ли планеты существовать в двойной системе, ведь задача трех тел не решена полностью. Только моделированием посмотреть стабильна ли орбита планеты вокруг двойной звезды и оказалось, что стабильны две конфигурации: это либо планета обращается вокруг одного компонента двойной по маленькой орбите, а второй компонент двойной далеко и оказывает лишь слабые возмущения, либо же

наоборот двойная звезда в центре, планета где то далеко и для планеты двойная звезда уже слабо отличаются от одиночных.

Изучение затмений двойных звезд может нам сказать о том, что в этой системе есть ещё планета.



## Лекция 5. Солнечная система.

### 5.1. Размеры солнечной системы и ее структура

Солнечная система - довольно большое образование, основная часть массивных тел, то есть планеты, сконцентрированы в ее внутренней части и это связано с процессом образования.

Размеры солнечной системы определяются гравитационным влиянием Солнца. Ближайшие звезды находятся на расстоянии нескольких световых лет и в среднем они примерно такие же как Солнце, соответственно, область, где Солнце своим гравитационным полем контролирует движение тел, сопоставима с этим масштабом.

В солнечной системе принятый масштаб - это астрономическая единица, т.е. расстояние от Земли до Солнца, 150 миллионов километров с большой точностью и в этом смысле размеры Солнечной системы (радиус Солнечной системы) составляет примерно 100000 астрономических единиц.

Большие планеты располагаются на типичных расстояниях в несколько астрономических единиц. Самая далёкая крупная планета Нептун находится на расстоянии примерно 30 астрономических единиц от Солнца.

Структура солнечной системы (в порядке удаления от солнца):

- 1) Планеты земной группы
- 2) Пояс астероидов
- 3) Планеты - гиганты
- 4) Пояс Койпера
- 5) Облако Оорта

Основная масса существенно больше чем 99% находится в Солнце, вся масса сидит в центральной звезде, после этого самый большой вклад вносит Юпитер, который весит больше, чем все остальные планеты вместе взятые.

Планеты делят на две группы: планеты земной группы (Меркурий Венера Земля Марс), дальше идёт пояс астероидов, потом идут планеты-гиганты (Юпитер Сатурн Уран Нептун), затем идёт пояс Койпера и всякие родственные объекты Плутон Плутина, какие-то ещё транснептуновые небольшие тела и облако Оорта.

### Параметры планет

Показаны на рисунке 68.

### Спутники планет

Не все планеты имеют спутники. Меркурий Венера спутников не имеют. Земля имеет один спутник, Марс имеет два очень маленьких спутника: Фобос и Деймос. Все планеты-гиганты имеют спутники и карликовые планеты, транснептуновые тоже имеют спутники.

Спутники можно разделить на три основные группы:

Планета (карликовая планета)	Диаметр, относительно	Масса, относительно	Орбитальный радиус, а. е.	Период обращения, земных лет	Сутки, относительно	Плотность, кг/м³
Меркурий	0,382	0,055	0,38	0,241	58,6	5427
Венера	0,949	0,815	0,72	0,615	243 <sup>[130]</sup>	5243
Земля <sup>[131]</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5515
Марс	0,53	0,107	1,52	1,88	1,03	3933
Церера	0,074	0,00015	2,76	4,6	0,378	2161
Юпитер	11,2	318	5,20	11,86	0,414	1326
Сатурн	9,41	95	9,54	29,46	0,426	687
Уран	3,98	14,6	19,22	84,01	0,718 <sup>[130]</sup>	1270
Нептун	3,81	17,2	30,06	164,79	0,671	1638
Плутон	0,186	0,0022	39,2 <sup>[132]</sup>	248,09	6,387 <sup>[130]</sup>	1860
Хаумеа	~0,11 <sup>[133]</sup>	0,00066	43 <sup>[132]</sup>	281,1	0,163	~2600
Макемаке	0,116	~0,0005 <sup>[134]</sup>	45,4 <sup>[132]</sup>	306,28	0,324	~1700 <sup>[135]</sup>
Эрида	0,182	0,0028	67,8 <sup>[132]</sup>	558,04	1,1	2520

Рис. 68. Параметры планет

- 1) Регулярные
- 2) Иррегулярные
- 3) "Особые"(Луна)

Регулярные, очевидно, образовывались вместе с планетой, они вращаются в ту же сторону что и планета, их орбиты, как правило, лежат в плоскости экватора или очень близко к этому. Иррегулярные спутники, в основном, - это спутники захваченные на каких этапах жизни Солнечной системы, они могут иметь сильно наклоненную орбиту, они могут вращаться в другие стороны. Примером среди крупных спутников является Тритон, спутник Нептуна, - нерегулярный спутник, по всей видимости, захваченный. Есть совсем особые категории, которые хочется выделить отдельно. Самый яркий известный пример это Луна. Базовый механизм формирования Луны - это импактный механизм, спустя 6000000 лет после начала формирования Солнечной системы. Земля, которая тогда ещё была относительно рыхлым горячим телом, столкнулась с крупным объектом, размером примерно как Марс, и в результате этого столкновения, произошло такое перемешивание вещества, естественно заметная часть сталкивающихся тела улетела от Земли, но оказалось гравитационно связанной и образовалась Луна.

Луна необычно крупный спутник для Земли, масса Луны составляет более 1%, а масса Земли в 81 раз меньше, что нетипично, обычно спутники в 1000 раз легче своих планет.

## Спутник Макемаке

У карликовых планет тоже есть спутники.

Эти спутники очевидно захвачены, Они интенсивно взаимодействуют друг с другом и происходит в результате четверных взаимодействий происходит захват спутников.

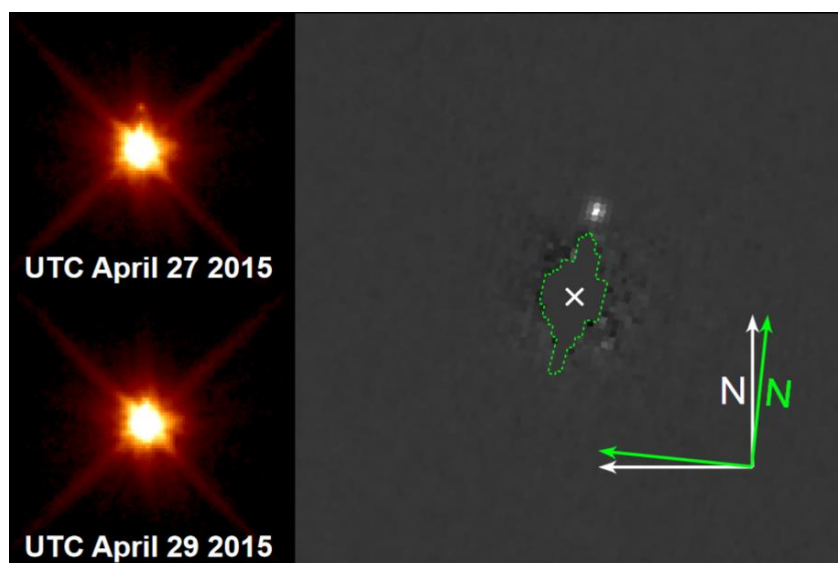


Рис. 69. Все четыре занептуновые карликовые планеты имеют спутники

## 5.2. Астероиды

Суммарная масса пояса астероидов - несколько процентов от массы Луны.

Астероиды - это тела которые в таком виде существует с момента формирования Солнечной системы, никакой крупный объект не разрушался. Астероиды имеют диаметры менее 500 км, это не большие тела, но 500 километров уже хватает для того, чтобы собственная гравитация сделала объект достаточно сферичным. Мелкие астероиды могут иметь самую удивительную форму, по причине что это твердые тела, причем в основном железно каменные, бывают с примесью, но все равно имеющие каменную основу и собственной гравитации не хватает для того, чтобы придать им круглую форму. Известно чуть больше, чем полмиллиона астероидов всех размеров.

## 5.3. Законы Кеплера

Первые два закона сформулируем не строго. Первый закон: если орбита замкнута то тело движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которого находится Солнце. Второй закон: так называемый закон площадей, состоит в том, что за единицу времени, двигаясь по эллиптической орбите, тело "заметает" равную площадь, что сводится к понятному интуитивному утверждению: что чем дальше находится объект на своей орбите, тем медленнее он движется а вблизи.

Третий закон Кеплера (Рис. 70), в простейшем виде формулируется так, что квадраты периодов прямо пропорциональны отношению кубов полуосей.

Если несколько тел вращается вокруг одного тяготеющих центра, то, естественно, в солнечной системе выполняется соотношение, что квадраты периодов относятся как кубы больших полуосей.

## Derivation of Kepler's 3rd Law

When something is in orbit, Centripetal Force is caused by Gravitational Force.

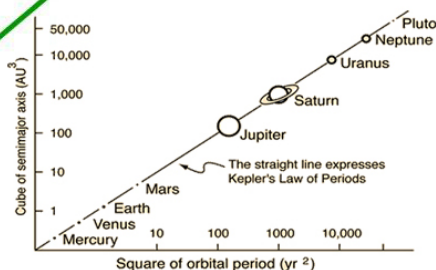
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} + v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$m \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 r = G \frac{Mm}{r^2}$$

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

$$T^2 \propto r^3$$

**The 3<sup>rd</sup> Law:** The square of the orbital period of a planet is directly proportional to the cube of the semi-major axis of its orbit



Learn This!!

Рис. 70.

## Kepler's 3 Laws of Planetary Motion

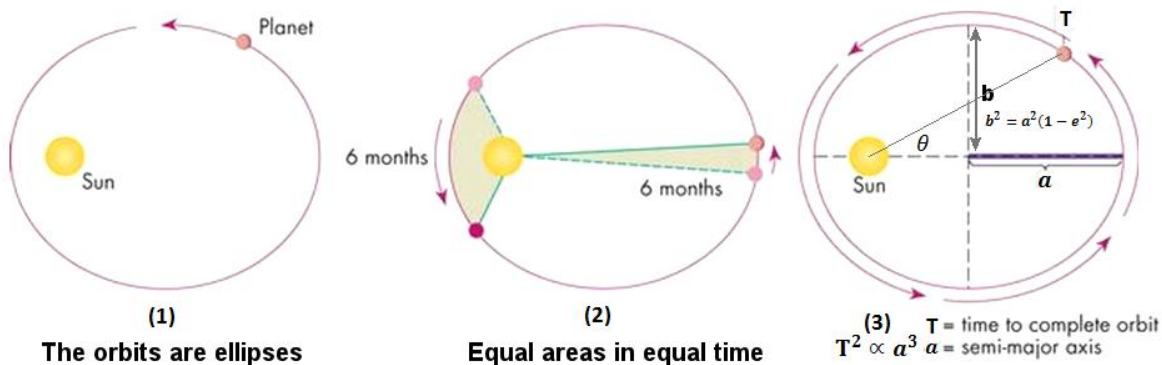


Рис. 71. Законы Кеплера

### Уточнение третьего закона Кеплера

Если все-таки вокруг центрального тела крутятся достаточно массивные тела, то нужно уточнить и формулу:

$$P^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{G(M+m)} \right] a^3 \quad (27)$$

Мы знаем точно, что в солнечной системе нет планет-гигантов, больше нет аналогов Юпитера. Могут быть более мелкие тела, в том числе планетных размеров, планетных масс, но не гигантских.

В течение нескольких лет накапливаются данные, которые свидетельствуют в пользу того, что в Солнечной системе может быть еще одна массивная планета. В

январе шестнадцатого года в работе Батыгина и Брауна были получены очень детальные аргументы, были исследованы разные элементы орбит. В этой статье было выделено 6 крупных тел, которые вращаются на более далеких орбитах, довольно вытянутых и они явно группируются в достаточно узкой полосе. Это говорит о том, что они группируются действительно в пространстве и соответственно кажется, что их Орбиты распределены не случайным образом.

Моделирование показывает, что сейчас девятая находится вблизи афелия своей орбиты, т. е. далеко от Солнца, это плохо, потому что она соответственно слабая и медленно движущаяся и поэтому найти ее будет сложно.

Создать крупный объект за 100 астрономическими единицами тяжело, поэтому никто не верит, что крупное тело было создано в Солнечной системе, но его можно было туда забросить. Можно забросить планету на достаточно высокую орбиту, если она не слишком тяжелая, то она не сползет вниз.

Плутон долгое время оставался самым не доисследованным объектом, потому что аппараты там не пролетали. Плутон находился в неудобном месте, полететь было нельзя, поэтому была создана специальная миссия. И только недавно впервые получили детальные изображения поверхности Плутона и его крупных спутников. Были построены подробные карты поверхности и было получено в том числе несколько неожиданных результатов: в частности, кажется, что Плутон - это планета без сложных геологических процессов, идущих сейчас. Казалось, что это должен быть совсем такой замёрзший мир, который полностью не изменен последние четыре с половиной миллиарда лет. Оказалось, что это не так, что там есть молодые области поверхности и была обнаружена сложная геология.

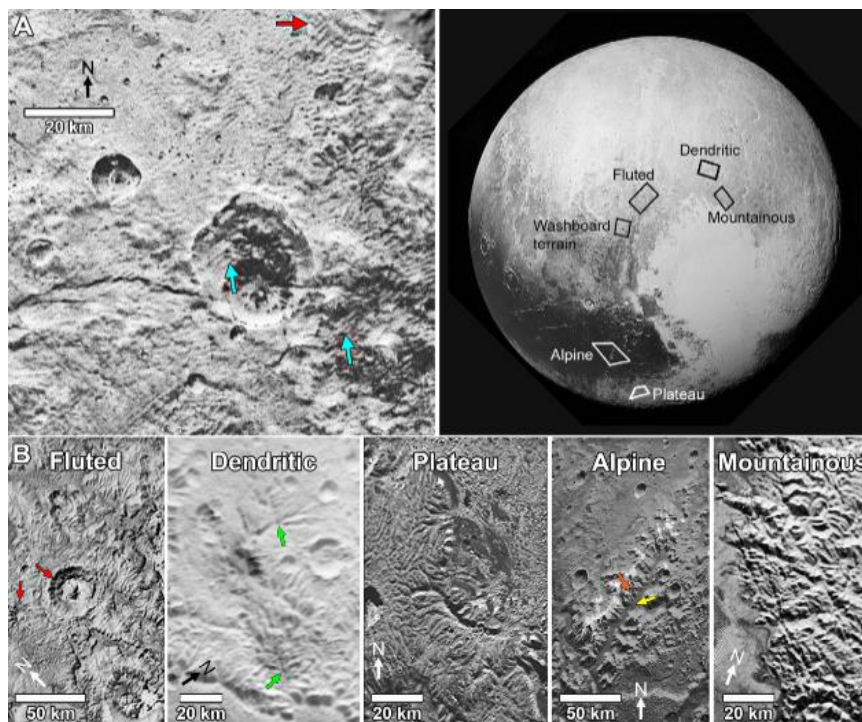


Рис. 72. Геология



## 5.4. Межпланетная среда и гелиосфера

Важным компонентом Солнечной системы является межпланетная среда. Во многом ее свойства определяются потоком вещества от Солнца. Но также важны пыль и галактические космические лучи.

Мы знаем возраст Солнечной системы с высокой точностью. Солнце, имея возраст примерно четыре с половиной миллиарда лет, не является звездой первого поколения, Солнце образовывалось из межзвездной среды, которая уже была обогащена тяжелыми элементами, тяжелее гелия, поэтому когда вокруг Солнца возник протопланетный диск в нем было уже достаточное количество тяжелых элементов.

Солнечная система, как и все другие планетные системы, возникает в протопланетном диске. Есть еще так называемая остаточные диски, чтобы диск был виден, там должно быть много мелкой пыли, именно она видна в инфракрасном диапазоне и пыль надо постоянно создавать новую. Поэтому должен быть диск из достаточно крупных тел, которые продолжают сталкиваться друг с другом, которых достаточно много для того чтобы обеспечить большое количество столкновений.

## 5.5. Образование планетной системы

Вокруг звезды, которая образуется быстро, возникает протопланетный диск. он состоит из смеси газа и пыли, пыли по массе гораздо меньше. Состав диска, его свойства определяются свойствами протозвездной туманности, то есть свойствами межзвездной среды. Большие планеты всегда обязаны быть газовыми, потому что только водорода и гелия много. Итак, у вас возникает диск: смесь газа и пыли, пыль оседает в качестве диска и, в результате слияний, пылевые частицы начинают расти, вырастают в более крупные объекты с размером несколько километров, десятки километров, сотни километров. Если вокруг много газа, то эти объекты начинают притягивать газ. Большие планеты растут из-за аккреции газа, а маленькие планеты растут слабо только за счет поглощения твердых объектов. Вблизи солнца образуются маленькие каменные планеты. Маленькие, потому что тяжелых элементов мало, а дальше, где газа много, образуются газовые гиганты.

Можно выделить несколько областей вокруг формирующейся звезды. Вблизи звезды начинает плавиться даже пыль, можно всегда посчитать как падает температура при удалении от звезды. По закону стейфана-больцмана температура уменьшается, когда вы двигаетесь наружу. При температуре примерно 1300 Кельвин плавится пыль.

Дальше есть место, оно называется снеговой линией. Многие газы могут замерзать, образовывать ледяные пылинки, ледяные объекты. Снеговая линия, для звезды типа Солнца, находится примерно на расстоянии 3 астрономических единиц, соответственно, внутри 3 астрономических единиц не могут существовать и расти ледяные тела.

Если у вас возник достаточно тяжелый ледяной объект, он тоже начинает на себя корректировать газ и возникает ледяной гигант. Уран и Нептун - это ледяные гиганты. Соответственно внутри снеговой линии формировались все планеты земной группы и основная часть астероидов, которые мы знаем.

Основным путем образования планет считается путь снизу вверх, когда Вы начинаете с пылинок и доходите до планет.

В результате столкновений пылинки слипаются друг с другом и соответственно происходит их рост.

Дальше возникают проблемы:

- 1) Сантиметровые тела при столкновении начинают разрушаться, а не расти
- 2) Из-за взаимодействия с газом, такие частицы быстро тормозятся и выпадают на звезду.

От нескольких километров до Земли ситуация гораздо проще, потому что при столкновении двух массивных тел будет приводить к дальнейшему росту и таким образом довольно легко добраться до размеров планет земной группы.

Как только вы добрались до некой критической массы порядка 10-20 масс Земли, вы можете корректировать газ и в этот момент начинают расти планеты-гиганты.

Компьютерное моделирование стадии, так называемого, олигархического роста (рис. 73), когда начинают сталкиваться тела размером в километр, десятки километров, сотни километров и естественно у вас количество тел уменьшается и крупные тела растут.

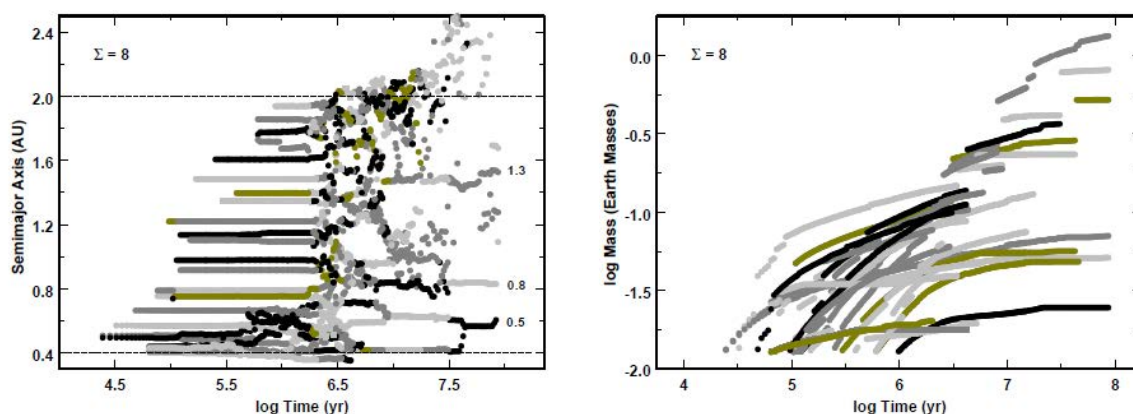


Рис. 73.

Газовый диск довольно быстро рассеивается и для роста у массивных планет есть не так много времени. Образование Луны произошло в 60 миллионов лет после формирования Солнечной системы, планеты гиганты к этому времени уже давно должны были сформироваться, потому что газовый диск рассеивается за 10 раз более короткое время и все планеты-гиганты должны формироваться быстро пока в диске существует газ.

Формирование Солнечной системы:

- 1) Формирование планет-гигантов - миллионы лет
- 2) Формирование планет типа Земли - десятки миллионов лет
- 3) "Поздняя тяжелая бомбардировка около 600 млн лет после формирования

По анализу микроскопических включений в метеоритах определяется возраст Солнечной системы.

В упрощенной схеме планеты не двигались. Очень важным элементом формирования любой системы является миграция планет. Планеты в стадии формирования меняют свое положение, потому что им есть с чем взаимодействовать: с газовым диском, с формирующимися телами в этом диске.

Ранний этап перестройки планет.

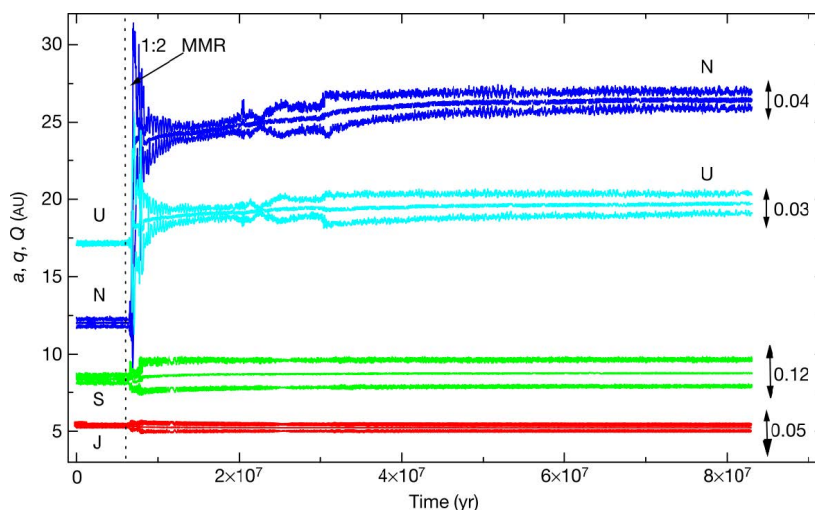


Рис. 74. Nice model

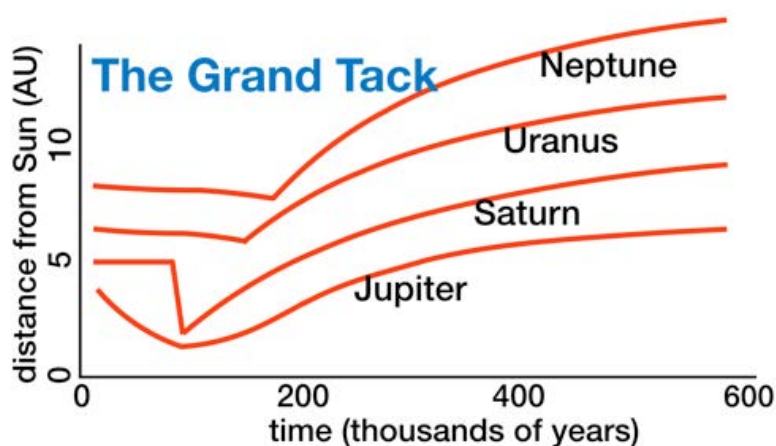


Рис. 75. Grand Tack

## Пояс Койпера

Первые объекты в поясе Койпера начали открывать только в 1992 году. Суммарная масса около 0.001 земной. Пояс сформирован телами с почти круговыми орбитами.

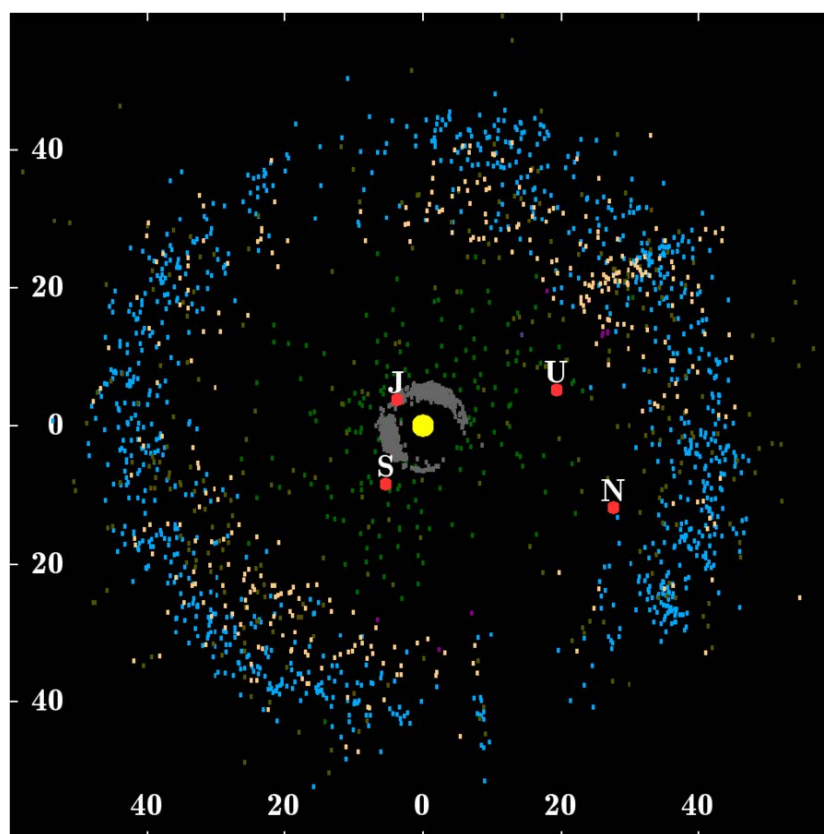


Рис. 76. Пояс Койпера

### Кометы. Облако Оорта

Кометы - относительно мелкие тела, с размером меньше 10 км. Возникает так называемая голова кометы и возникает хвост, хвост связан с тем что его выдувает солнечным ветром, поэтому хвост направлен, если это газовый хвост, строго от Солнца.

Типичная масса кометы небольшая:  $10^{16} - 10^{18}$  г. Голова, у рекордных комет, имеет размер в 1000000 километров, это как солнце по размеру, хвост до сотен миллионов километров, то есть порядка уже астрономических единиц. Хвост очень разреженное образование. Comet много, к Солнцу прилетает в год несколько десятков комет.

Размер облака Оорта очерчивает границы Солнечной системы. Современная масса облака Оорта составляет примерно 1-10 масс Земли.

### Эффект Ярковского

У нас вращается твёрдое тело по орбите, Солнце нагревает его и в итоге эта нагретая часть в среднем оказывается сзади, возникает как бы маленький фотонный двигатель. И он разгоняет, орбита повышается, если тело крутится в другую сторону, то наоборот тормозит и переходит на более низкую орбиту.

Посчитаем насколько может быть эффективен такой эффект. Возьмём тело с площадью  $S = 1 \text{ км}^2 = 10^{10} \text{ см}^2$ . Тело вращается примерно на земной орбите и

температура тела соответственно примерно 300 Кельвин. Будем считать, что одна сторона нагрета, а другая нет. Считаем, что тело имеет фотонный двигатель со светимостью:

$$L = S \cdot \sigma \cdot T^4 = 10^{10} \cdot 5.67 \cdot 10^{-5} \cdot (300)^4 = 4 \cdot 10^{15} \text{ эрг/с} \quad (28)$$

Теперь узнаем какой передается импульс. Для релятивистской частицы импульс:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (29)$$

Итоговый импульс, передаваемый в секунду:  $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 10^5$ .

Давайте посмотрим какой может быть импульсу тела километрового размера:

$$p = mv = \frac{4}{3}\pi R^3 \cdot 4\text{г/см}^3 \cdot 30 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{22} \quad (30)$$

$$\Delta t = \frac{5 \cdot 10^{22}}{10^5} = 5 \cdot 10^{17} \text{ с} \sim 10^{10} \text{ лет} \quad (31)$$

За время существования Солнца тело целиком гасит импульс за счет эффекта Ярковского и падает на солнце. Чем меньше объем тела, тем существеннее будет эффект Ярковского.

## Эффект Лидова-Козаи

Эффект был впервые описан Михаилом Лидовым для спутников в 1961 году, а затем в 1962 году был описан Козаи для астероидов.

Эффект состоит вот у вас есть массивное тело, например, Земля вокруг которой крутится легкое тело - искусственный спутник, есть ещё одно массивное тело - Луна. Тогда влияние внешнего тела будет менять форму и ориентацию орбиты. У орбиты могут одновременно меняться наклонение и эксцентриситет.

$$e_{max} = \sqrt{1 - (5/3) \cos^2 i_0} \quad (32)$$

## 5.6. Структура планет

Планеты, с точки зрения строения, сильно отличаются. Даже изучая структуру нашей планеты, мы не имеем прямых данных.

Марс более-менее похож на Землю: ядро, мантия, кора, но он легче и параметры ядра, очевидно, другие. У Марса очень слабое магнитное поле, магнитное поле создается ядром.

Нептун - ледяной гигант. Можно выделить три слоя: ядро, оболочка из газов, где доминируют элементы тяжелее гелия и внешняя оболочка из легких газов.

У Меркурия большое железное ядро, он в этом смысле отличается от других планет земной группы.

Характерный состав планет (рис. 77).

Юпитер и Сатурн состоят в основном из легких элементов, а уже Уран и Нептун в основном состоят из элементов тяжелее гелия, но эти элементы скорее кислород



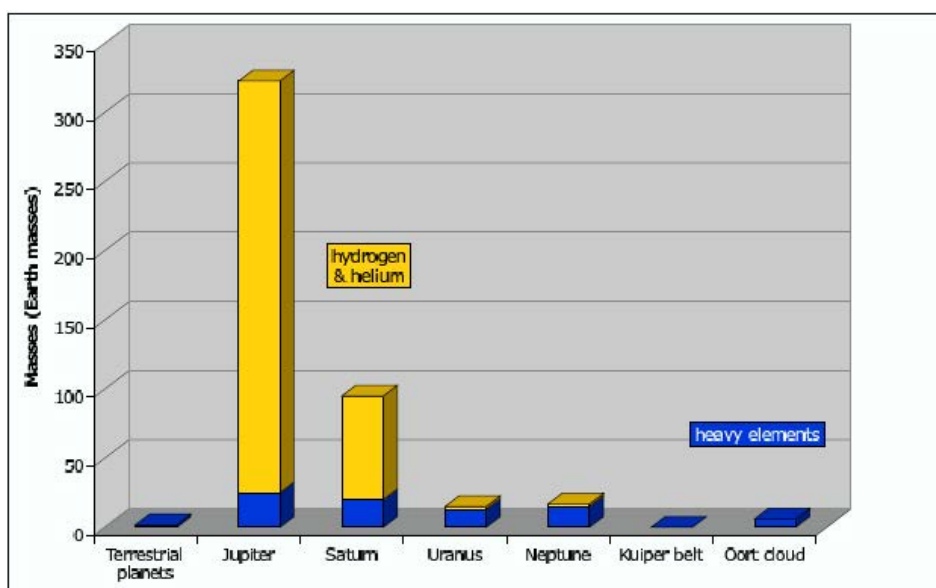


Рис. 77. Состав планет

и углерод. Как мы увидим, структуры их включает жидкие льды и эти льды это метан. Снаружи молекулярный водород, металлический водород дальше и ядро из льдов и камней.

## Лекция 6. Звезды.

Нормальные звезды - это объекты, в которых идут термоядерные реакции. Минимальная масса для звезды:  $M_{min} = 0.08M_{\odot}$

В недрах достигается критическая температура и плотность, которая соответствует началу водородной реакции. Водород начинает превращаться в гелий с выделением энергии.

Максимальная масса у звезды:  $M_{max} = 100 \div 200M_{\odot}$ .

Нужно научиться определять расстояние до звезд. Существует несколько способов определения расстояния до звезд, должен быть какой-то первый базовый, который не зависел бы от физики этих объектов, который позволил бы сразу непосредственно геометрическим методом определить расстояние хотя бы до нескольких звезд.

### 6.1. Звездные параллаксы

Метод звездных параллаксов. Если Земля крутится вокруг Солнца то, наблюдая близкие звезды на фоне более далеких, вы будете видеть, что их положение сместилось, когда вы переместились в другую точку земной орбиты. Вы точно измерили координаты звезд сегодня, точно измерили через полгода, сравнили и вы должны увидеть сдвиг, который ещё через полгода исчезнет. Все вернется в первоначальное состояние. И тогда, если вы знаете этот угол, знаете расстояние от Земли до Солнца, можно определить расстояние до звезд.

#### 6.1.1. Параллакс

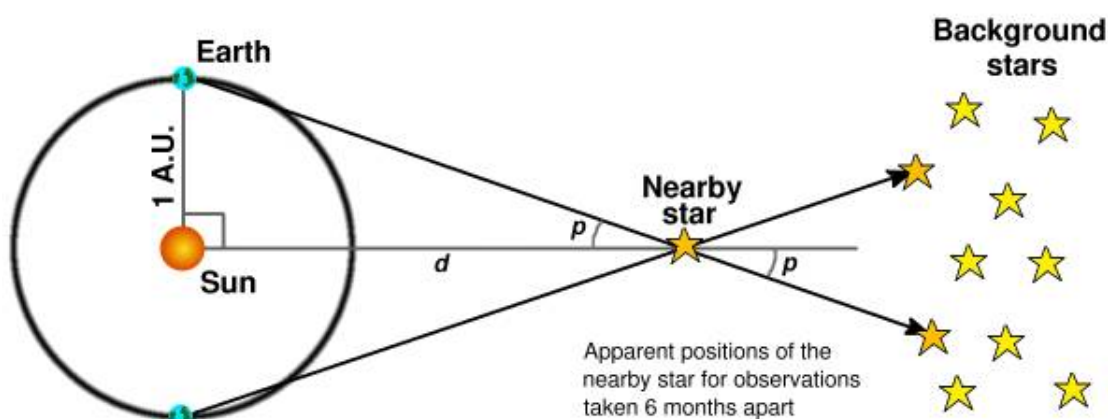


Рис. 78. Параллакс

Угол мал, поэтому удобно вести специальную единицу измерения, внесистемную, парсек. Парсек - это расстояние до звезды, параллакс которой равен 1 угловой секунде.

Один парсек это одна астрономическая единица, умноженная на 206265.

Поскольку важен был технический прогресс, для того чтобы стало возможным измерение звёздных параллаксов, то неудивительно, что сразу несколько человек сумели это сделать, когда точность аппаратуры доросла до соответствующего уровня и поэтому сказать кто первым точно измерил расстояние до звезд невозможно. Есть три кандидата (В. Я. Струве, Ф. Бессель, Томас Хендерсон), формально первым правильно померил параллакс Томас Хендерсон.

## Измерения расстояний до звезд

Это позволило строить трехмерные карты солнечной окрестности (79). Впервые

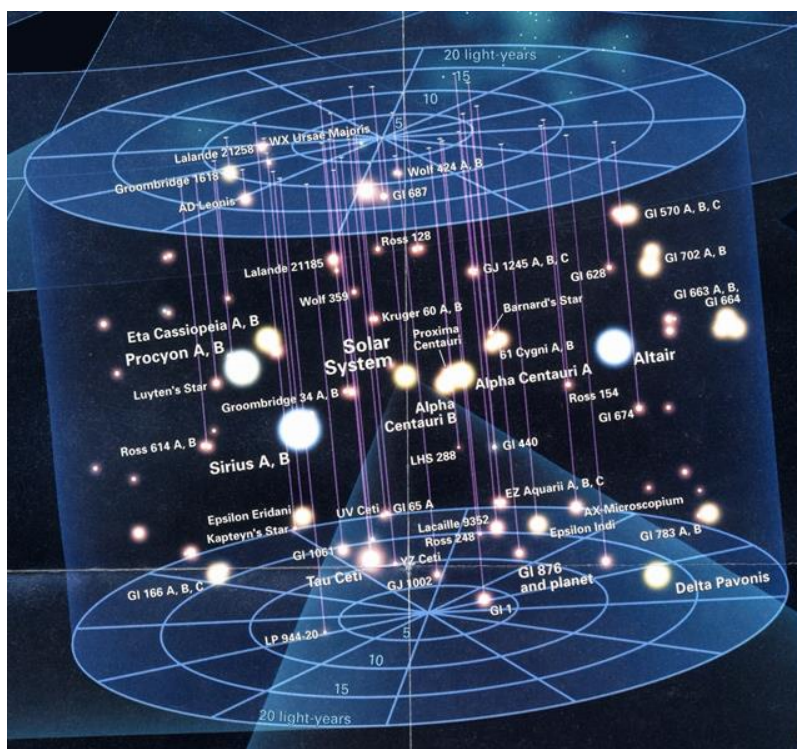


Рис. 79.

был надежно задан масштаб межзвездных расстояний.

В течение долгого времени параллактическое измерение расстояний было единственным хорошим способом, измерение происходит с помощью наземных телескопов, а земная атмосфера сильно мешает это делать.

## Пределы точного измерения расстояний

На рисунке 80 голубые отрезки - это усики ошибок. Видно, что расстояние измеряется с большой ошибкой и ошибка может составлять 50% от расстояния. Это сложные технические задачи и поэтому был придуман другой способ: астрономические спутники (например, на рисунке спутники Hipparcos и GAIA).

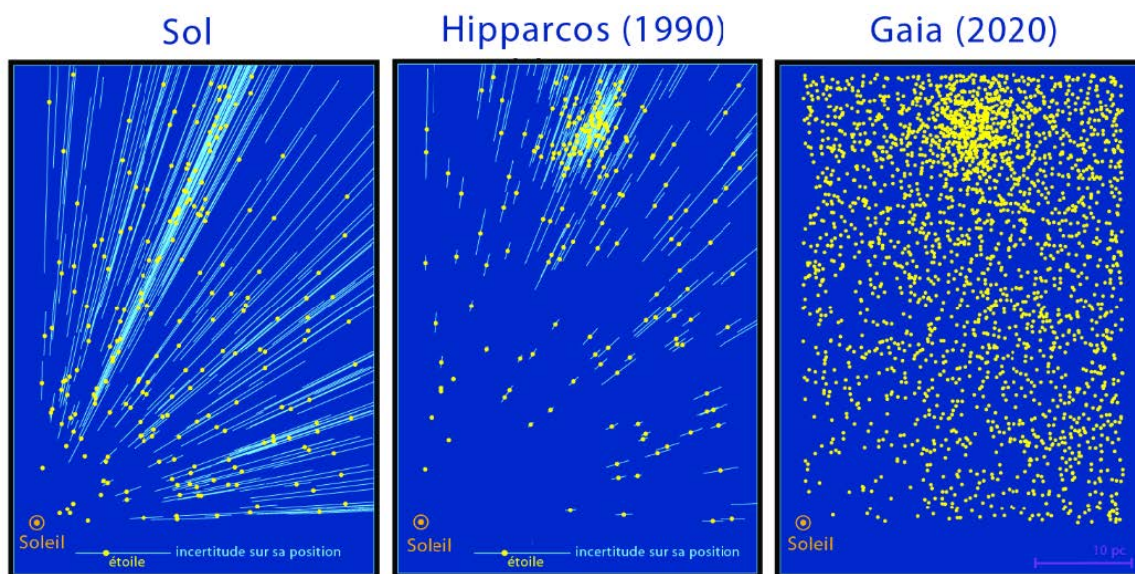


Рис. 80.

## Галактики и звезды

Вселенная состоит конечно же из пустоты, мы видим звезды, а суммарный объем звезд в видимой части Вселенной - это  $10^{-30}$  от объема Вселенной. Вселенная действительно в этом смысле пуста, но видим мы ее, именно благодаря свету звезд. Именно звёзды создают картинку: звёзды подсвечивают нам Вселенную.

Фактически все искусственное освещение, которое у нас есть, тоже завязано на Солнце. Это или напрямую солнечная энергия, или гидростанции, или ископаемое топливо и оно, естественно, является продуктом жизнедеятельности растений или ещё чего-нибудь, что использовало энергию Солнца. И ядерная энергетика тоже основана на звездах, потому что изначально, до появления звезд во Вселенной, плутония и урана не существовало. Таким образом, мы все видим, потому что есть звёзды и мы видим именно так тоже не случайно, т.к. наш глаз адаптирован под Солнце.

Самая лёгкая звезда в 12 раз легче Солнца, самая тяжелая в 120 тяжелее солнца, так что Солнце - это довольно средняя звезда, немножко ближе к небольшим и наш глаз адаптирован именно для того, чтобы видеть Солнце, то есть в итоге для того чтобы видеть звезды.

## 6.2. Парадокс Ольберса

Звезды мы видим ночью, если вообще видим. Есть такой парадокс: почему небо темное? Так не должно быть, если вы логически будете рассуждать, как последовательный материалист 19 века, вы живете в бесконечной Вселенной, выполняется коперниканский принцип (Вселенная везде одинаковая), вы не в какой-то выделенной области живете, значит Вселенная вся заполнена звездами. Кажется, это логично.

Если Вселенная бесконечна, то вы везде будете видеть звезды, и никакого темного неба не будет, небо должно засветиться, как поверхность звезды и обойти этот парадокс нельзя. В видимом диапазоне можно сказать, что далёкие звёзды закрыты пылью, но если добавить инфракрасное излучение, энергия сохраняется, пыль должна переизлучить эту энергию. Парадокс все равно останется, значит звезды где-то заканчиваются. Это очень смущало людей начиная с 18 века.

Разрешить этот парадокс можно только в рамках современной космологической модели. Глядя на далекий объект, мы смотрим в прошлое, мы видим Альфа Центавру такую какой она была три с половиной года назад, мы видим Сириус таким каким он был 25 лет назад, дальше больше, но нет никакой звезды, которую можно увидеть такой какой она была 14 млрд лет назад, потому что звезд не было. Звезды заканчиваются не в пространстве, а заканчиваются во времени.

### 6.3. Образование звезд

Мы видим разные стадии формирования звезд: мы видим облака газа и пыли, в которых она только-только начинается образовываться, мы видим молодые звезды, вокруг которых ещё остались диски заполненные пылью. Эти диски возникают из-за того, что после образования планетной системы остаются тела с размером сотен метров до десятков километров, они сталкиваются друг с другом, запускается каскад дробления и появляется много пыли, в инфракрасном диапазоне эта пыль будет довольно хорошо заметна.

Сам процесс формирования звезды идёт долго: 1000000 лет, но наблюдая разные объекты мы можем восстановить все эти стадии. Важно, что все начинается со сжатия облака в межзвездной среде. Тогда возникает вопрос: почему остались какие-то облака? Существует критическое условие, для того, чтобы звезда образовалась, его можно записать для массы, для размера области, но идея состоит в том, чтобы область какого-то облака начало отжиматься под действием собственной гравитации, эта гравитация должна победить давление.

Чтобы у нас объект начал сжиматься, нужно чтобы его полная энергия стала отрицательной, т.е. чтобы у вас потенциальная энергия по модулю стала больше кинетической, которая в данном случае тепловая энергия, но мы можем начать с теоремы о вириале.

$$2E_{kin} = |E_{pt}|$$

$$2N \frac{3}{2} kT = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R}$$

$$N = \frac{M}{m}, M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$$

$N$  — количество частиц,  $M$  — полная масса,  $m$  — масса одной частицы

$$\frac{1}{5} G \frac{4}{3} \pi R^3 \rho = \frac{kT}{m}$$

Критический радиус или радиус Джинса:

$$R_J = \left( \frac{15kT}{4\pi G m \rho} \right)^{1/2} \quad (33)$$



Получим выражение для массы:

$$M_J = \frac{5kT}{Gm} R_J \quad (34)$$

Для реалистичных параметров межзвездной среды:

$$M_J = 3M_\odot, \text{ если } \frac{T}{10K} \frac{R_J}{10^{15}\text{см}} \quad (35)$$

Как видно для того чтобы у нас были какие-то реалистичные параметры, нужно чтобы температура была достаточно низкой и в этом состоит некоторая проблема. Межзвёздному веществу надо как-то остывать и для первых звезд это было почти непреодолимой проблемой, поэтому долго время считалось, что первые звёзды могли быть только очень массивными, потому что веществу, состоящему только из водорода и гелия очень трудно остывать.

Давайте получим джинсовские параметры другим способом.

Представим, что у нас есть облако квазисферической формы, радиусом  $R$  и действует две силы: гравитация стремится облако сжать, силы давления, естественно, не дают гравитации это сделать. И мы можем этот процесс представлять не в терминах сил, а в терминах времен. Мы поджигаем облако, например, внешним воздействием (рядом взорвалась сверхновая) и ударная волна облако начала поджимать. Если нет никакого давления, облако начнёт схлопываться под действием собственной гравитации и это происходит за время свободного падения  $t_{ff}$ :

$$t_{ff} = \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \quad (\text{по порядку величины})$$

Если за это время давление успеет среагировать и будет противодействовать этой силе и сжатия становятся, соответственно мы можем ввести звуковое время, которое просто равняется:

$$t_s = \frac{R}{c_s}$$

Таким образом, условием начала сжатия будет равенство этих времён.

Если окажется, что скорость звука достаточно мало и время реагирования кажется большим то тогда облака начнет сжиматься

$$c_s^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho}$$

$$PV = \frac{M}{\mathcal{M}} RT$$

$$P = \frac{\rho}{\mathcal{M}} RT$$

И, таким образом, скорость звука:

$$c_s = \sqrt{\frac{R}{\mathcal{M}} T} = \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad (36)$$

Из-за того, что у нас есть условия на равенство времён:

$$\frac{1}{\sqrt{G\rho}} = \frac{R_J}{c_s}$$

Мы можем определить критический джинсовский радиус:

$$R_J = \sqrt{\frac{RT}{MG\rho}} \quad (37)$$

Масса:

$$M_J = \frac{4}{3}\pi R_J^3 \rho \quad (38)$$

Нет смысла здесь детально следить за коэффициентами, потому что жизнь устроена сложнее, много процессов которые мы не учитываем: там работает не только давление, есть магнитное поле, есть космические лучи, есть турбулентность.

Эти простые рассуждения показывают нам, что если у вас начало сжиматься облако было достигнуто условие и ясно, что проще достичь этого условия в большом масштабе. Температура может быть больше для большого объекта, т.е. не надо было сильно остывать, и обычно так и происходит у вас на самом деле начинает сжиматься большое облако и по мере сжатия внутри выделяются более мелкие области, происходит фрагментация и тогда у нас уже формируются звезды и это объясняет то, что звезды любят образовываться большими группами, скоплениями и довольно небольшая доля звезд являются истинными звездами.

Солнце, например, тоже рождалось в Звездном скоплении и изотопный состав вещества в Солнечной системе несёт след этого.

## 6.4. Первые звезды

Какая была сложность у первых звезд? Вселенная, когда она появилась, она состояла только из водорода и гелия. Первые звезды могли образовываться из газа, который состоял на 100% из водорода и гелия. Если у вас температура высокая, то джинсовский радиус гигантский и облако может не начать остывать и поэтому у нас есть межзвездная среда. Чтобы остывать нужно излучать и в современной межзвездной среде есть хладагенты - молекулы, которые очень интенсивно излучают, и для этого молекулы должны быть несимметричные (лучше излучают). Например, CO с точки зрения формирования очень хорошая молекула: массы двух атомов различны и вибрация этой молекулы приводит к интенсивному излучению в межзвездной среде, CO в абсолютных единицах не так много, но именно эта молекула помогает облакам сжиматься.

В первичной межзвездной среде может быть единственная молекула  $H_2$ , потому что гелий ничего не образует, а у водорода это симметричная молекула, которая очень плохо излучает. И поэтому первые звезды, как показывали расчеты, должны были быть очень массивными, с массами в сотни масс Солнца и тогда все хорошо работало и это была, отчасти, плохая новость, потому что массивные звезды живут недолго и они 13 миллиардов лет назад образовались и эти первые звезды естественно быстро

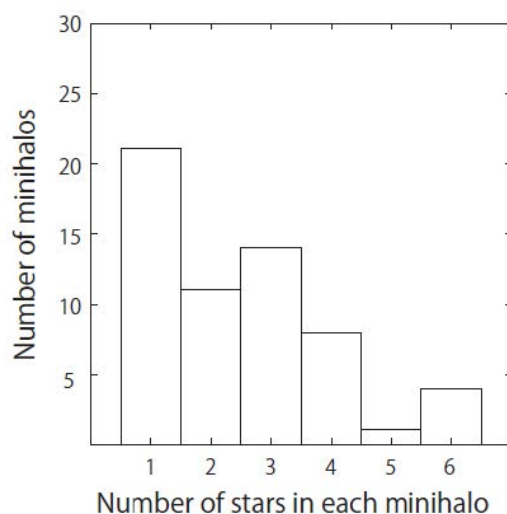


Рис. 81.

за несколько миллионов лет все взорвались и все обнаружить их вокруг нас мы не можем.

Хорошей новостью является то, что могут образовываться и легкие звезды из первичного вещества, возникает фрагментация и на графике (рис. 81) показано количество звезд образующихся в одном облаке.

Видно, что в некоторых облаках образуется по одной звезде и тогда она очень массивная, а в некоторых облаках образуется по 6 штук и это позволяет образовываться лёгким звёздам.

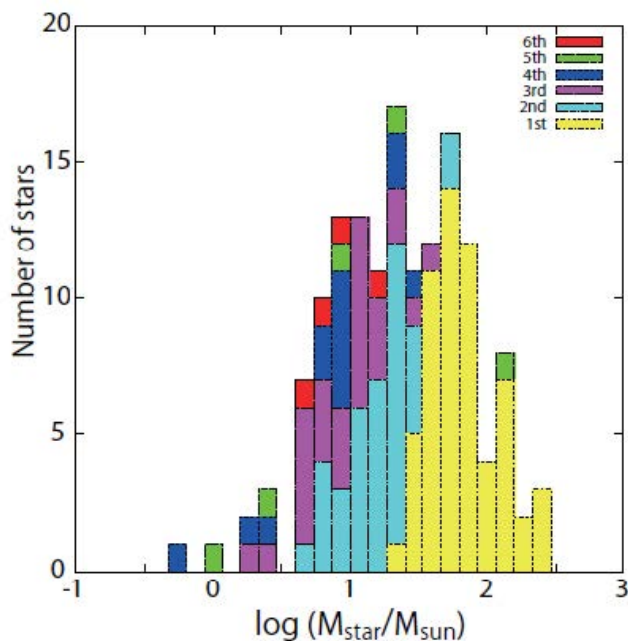


Рис. 82. Спектр масс

## История Вселенной

Звезды возникают раньше галактик.

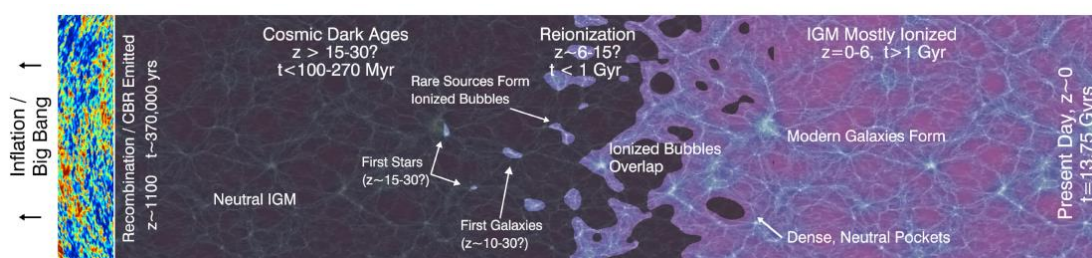


Рис. 83. История Вселенной

История Вселенной такова, что вначале ничего не происходит, в течение довольно большого времени есть облака темного вещества с добавлением газа.

Спустя несколько десятков миллионов лет после большого взрыва в облаках образуются первые звезды. А позже, ещё через десятки миллионов лет, из этих облаков начинают складываться первые галактики.

Если мы хотим искать самые первые звёзды, то нам нужно искать малометаллические звезды. Все элементы тяжелее гелия астрономы называют металлами, поэтому металличность это доли элементов тяжелее гелия.

## 6.5. Устойчивость звезды

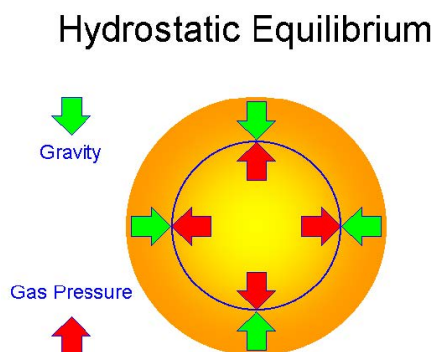


Рис. 84. Устойчивость звезды

Звезда - очень устойчивое образование. Звезда - это очень стабильный объект и связано это с тем, что для звезд выполняется теорема вириала и существует очень хорошее равновесие между гравитацией и внутренним давлением.

Условие гидростатического равновесия для звезды:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \quad (39)$$

Оценка по порядку величины:

$$\frac{P}{\rho} \simeq \frac{GM}{R}$$

Если мы учтем, что плотность  $\rho \sim MR^{-3}$ , то

$$P \sim \frac{M^2}{R^4} \quad (40)$$

Устойчивость приводит к очень интересному явлению, которое называют отрицательной теплоемкостью.

В норме есть взять просто газовый шар, и если его нагревают, то он нагревается, его охлаждают, он охлаждается. Звезда ведет себя не так. Если мы возьмём и начнём больше выделять энергии в недрах звезды, то температура ее поверхности упадёт, потому что сдвинется вот этот баланс: вы повышаете давление и звезда начинает раздуваться, и при раздувании она будет остывать, поэтому когда в звезде на поздней стадии эволюции включается какой-нибудь мощный источник энергии, она раздувается и превращается в красного гиганта. Наоборот, если вы от звезды будете забирать энергию, то она начнёт поджиматься, сжатие увеличит температуру и давление в центре повысит интенсивность термоядерных реакций и снова установится равновесие.

Рассмотрим элемент массы:

$$dm = 4\pi r^2 \rho dr$$

Звезда находится в гидростатическом равновесии:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2}$$

$$\rho = \frac{dm}{4\pi r^2 dr}$$

$$\frac{dP}{dr} \frac{4\pi r^2}{dm} = -\frac{GM(r)}{r^2}$$

$$4\pi r^2 \frac{dP}{dm} = -\frac{GM(r)}{r^2}$$

Обе части домножим на  $r dm$  и получим:

$$4\pi r^3 dP = -\frac{GM(r)}{r} dm$$

Проинтегрируем от 0 до полной массы звезды:

$$\int_0^M 4\pi r^3 dP = - \int_0^M \frac{GM(r)}{r} dm$$

Получаем:

$$\int V \cdot 3dp = - \underbrace{\int_0^M \frac{GM(r)}{r} dm}_{E_{pot}}$$



Левую часть выражения проинтегрируем по частям и получим:

$$-3 \int_0^M P dV = E_{pot} \quad (41)$$

И левая часть по виду похожа на тепловую энергию. Если по всей звезде интегрируется такое выражение, то вы получаете именно энергию:

$$-2E_{kin} = E_{pot} \quad (42)$$

Это и есть теорема вириала.

$$\begin{aligned} E_{kin} &= \int_0^M u dm = \int_0^M \frac{3}{2} \frac{N_A}{\mathcal{M}} kT dm \\ P &= \frac{\rho N_A}{\mathcal{M}} kT \\ E_{kin} &= \int_0^M \frac{3}{2} \frac{P}{\rho} dm, \quad \frac{dm}{\rho} = dV \end{aligned} \quad (43)$$

Таким образом, мы получили, что в левой части действительно стоит удвоенная кинетическая энергия, удвоенная тепловая энергия. Для звезд выполняется теорема вириала, и поэтому они обладают свойством отрицательной теплоемкости.

Остановимся более подробно на интегрировании по частям и разберем переход:

$$3 \int_0^M V dP \implies -3 \int_0^M P dV \quad (44)$$

$$3VP|_0^M - 3 \int_0^M P dV \quad (45)$$

$$V(0) = 0, \quad P(M) = 0$$

## 6.6. Эволюция звезд

Звезды эволюционируют. Звезды в течение какого-то времени видим пока они звезды, в конце Солнце сбросит внешние слои и в начале превратиться в красивую планетарную туманность, в центре будет вызревать белый карлик, а потом это вещество попадет в межзвездную среду, обогатив эту среду тяжелыми элементами, которые произвелись внутри звезды, а дальше цикл повторяется. Из этой среды образуется новое поколение звезд и выделяют три основных поколения или населения звезд или популяции:

- 1) популяция III - самые первые звезды
- 2) популяция II - старые звезды в Галактике
- 3) популяция I - "современные" звезды (Солнце)

Популяция I - это современные звезды, в том числе и Солнце, современные в данном случае не означает, что образующиеся только сейчас в галактике. В истории Галактики была в общем два основных периода: быстрое формирование звезд в начале, когда образовались первые звёзды и всё остальное. И все остальное это звезда популяции I. Солнцу четыре с половиной миллиарда лет - это звезда население один. Самые старые звезды в галактике - это звезды в области вокруг галактического центра, это звёзды шаровых скоплений - это звезды населения II и звёзды населения III - это, те самые первые звезды, которые образовались из чистой водородно-гелевой смеси без примеси тяжелых элементов, которым было трудно из-за того что не было молекул, которые могли бы эффективно изучать и охлаждать межзвездную среду.

Судьба звезды зависит от ее массы, то соответственно звезды рождающиеся в разные эпохи жизни Вселенной или Галактики могут иметь разные судьбы.

Звездную эволюцию удобнее всего обсуждать на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.

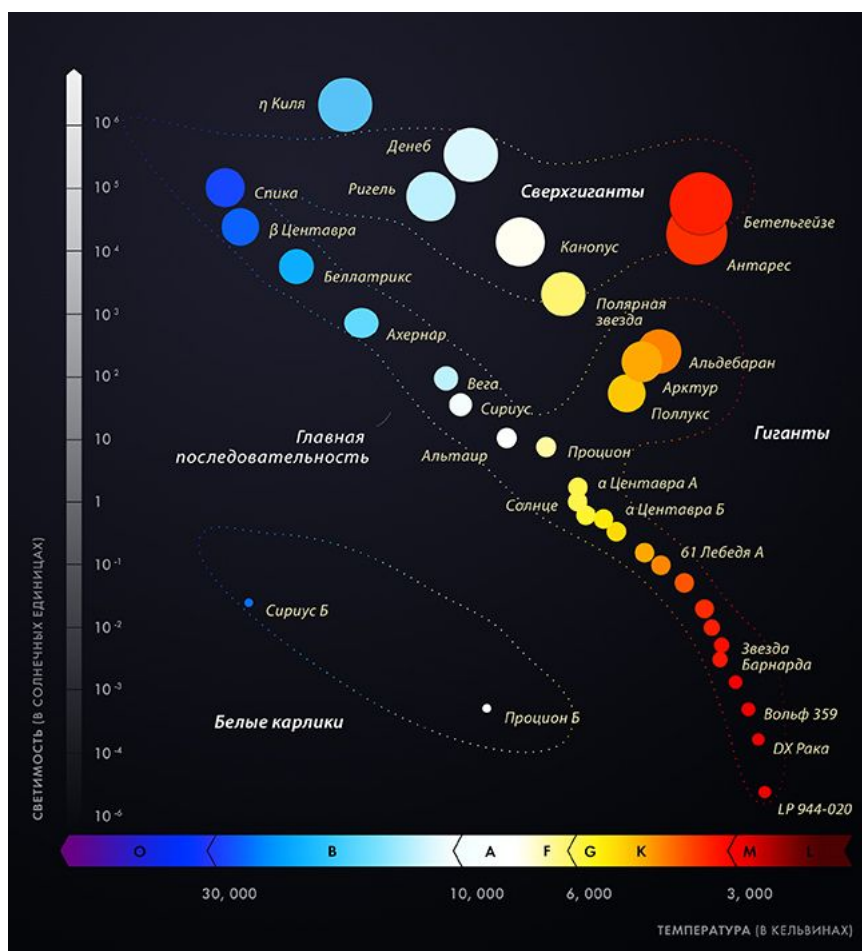


Рис. 85. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

Вначале её строили наблюдатели, которые не могли измерять реальные физические характеристики звезд.

В идеале диаграмма Герцшпрунга-Рассела - это зависимость светимости звезды от температуры. В реальности не получалось измерять ни температуру звезд, ни светимость, поэтому по горизонтальной оси откладывали спектральные характеристики, условно говоря, цвет звезд (спектральные классы). По вертикальной оси откладывали светимость, но вначале люди не могли измерять светимость звезд и поэтому использовалась хитрость. По вертикальной оси откладывали звездную величину для данного скопления и когда это сделали, то оказалось, что подавляющее большинство звезд ложится на одну линию, которую назвали главной последовательностью. Положение звезды на главной последовательности определяется ее массой. На главной последовательности происходит самое главное в жизни звезды: водород превращается в гелий.

Звезды большую часть времени проводят на главной последовательности, когда водород в ядре заканчивается, то со звездой начинают происходить превращения, которые показываются на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.

### Эволюция одиночной звезды

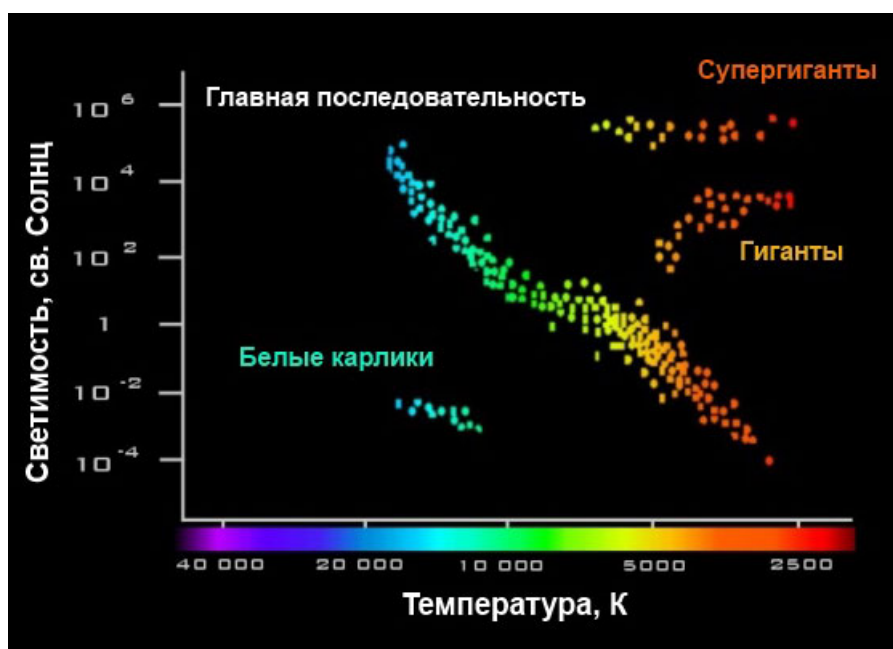


Рис. 86. Путь легкой звезды

Будем разделять массивные звезды и маломассивные звезды. Основное различие состоит в том, во что они превращаются: массивные звезды взрываясь, превращаются в нейтронные звезды или черные дыры, а легкие звезды не взрываются, и превращаются в белые карлики. Это первое разделение. И есть второе разделение, в зависимости от контекста важно одно или другое. В легких звёздах, как солнце, есть снаружи большая конвективная оболочка. Чем звезда легче, тем эта конвективной оболочка больше и давление в основном газовое. В массивных звёздах конвективная оболочка если есть, то она находится ближе к ядру, снаружи находится

лучистая зона, зона лучистого переноса энергии и основной вклад в давлении вносит излучение. Это тоже дихотомия между массивными и легкими звездами и эти два разделения, к сожалению, не идеально совпадают друг с другом.

## Масса

Самый главный параметр жизни звезды это масса и многие величины, описывающие свойства звезд так или иначе зависят от ее массы, в частности светимость. Светимость, время жизни, радиус звезды все они очень сильно зависят от массы и мы попробуем простыми оценками получить характерные зависимости.

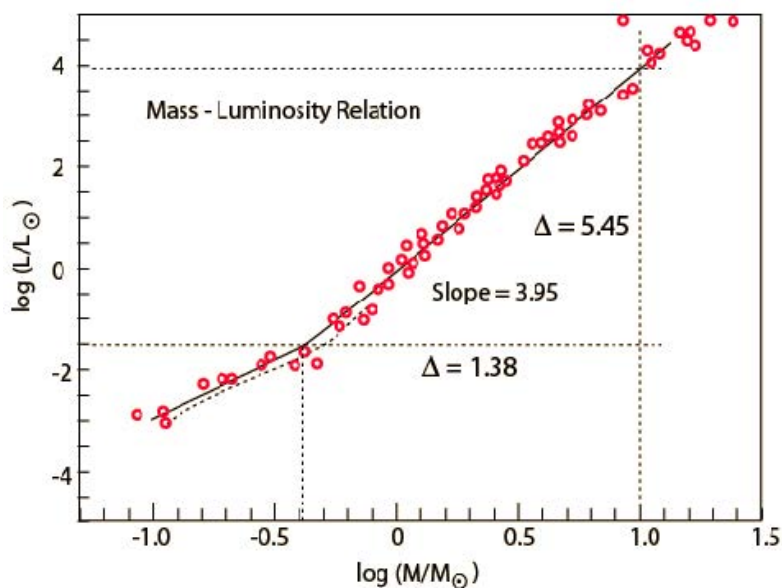


Рис. 87. Наблюдаемое соотношение масса-светимость

Видно, что чем звезда массивнее, тем больше она излучает и это можно получить из довольно простых соображений. Строго говоря, нужно проводить отдельно рассуждение для звезд в устойчивости которых главную роль играет газовое давление и для звезд для которых главную роль играет давление излучения. Для звезд типа солнца с газовым давлением мы получим характерную зависимость, для массивных звезд - не в деталях.

Начинаем с уравнения гидростатического равновесия:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho}{r^2}$$

Среднее давление можно оценить из теоремы вириала:

$$\langle P \rangle = -\frac{1}{3} \frac{E_{pot}}{V}, \quad E_{pot} = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$\langle P \rangle = \frac{GM^2}{4\pi R^4}$$

С другой стороны, давление можно записать, как  $P = nkT$ .

$$\langle P \rangle = \frac{\langle \rho \rangle}{\langle m \rangle} kT$$

Таким образом мы получаем:

$$kT = \frac{GM \langle m \rangle}{\rho R}$$

$$R = \left( \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\rho} M \right)^{1/3}$$

Светимость звезды определяется по формуле:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 = 4\pi \left( \frac{3}{4\pi} \frac{M}{\rho} \right)^{2/3} \sigma \left( \frac{GM \langle m \rangle}{3kR} \right)^4$$

$$L \sim M^{3\frac{1}{3}} \quad (46)$$

Это типичная зависимость светимости от массы для лёгких звезд, для звезд где несущественно давление излучения.

Для массивных звезд уравнение нужно писать с учётом радиационного давления и важна будет зависимость внутренней температуры от массы.

Для массивных звезд:

$$L \sim M \quad (47)$$

Светимость теперь растёт гораздо медленней.

Следующее важное соотношение - это масса - радиус.

Если бы плотность не менялась, то радиус был бы пропорционален массе в степени 1/3, в реальности зависимость более сильная: показатель степени 0.8 - 1 у легкий звезд, для больших масс зависимость более плоская: степень 0.6.

Зависимость между светимостью и массой позволяет получить интересную оценку для времени жизни звезды.

## Время жизни звезды

Время жизни звезды:

$$t \sim \frac{\eta M}{L} \quad (48)$$

$M$  — масса звезды, пригодная для термоядерной реакции,

$\eta$  — какой-то коэффициент?, который меньше единицы. и разделить на светимость

Нам нужен просто коэффициент трансформации.

$$t = \eta M L^{-1} c^2 \zeta, \quad (49)$$

$\zeta = 0.007$  - столько энергии от  $mc^2$  выделяется в реакциях превращения водорода в гелий

И тогда вы можете посчитать реальное время жизни. Например, для солнца:

$$t = \eta \frac{2 \cdot 10^{33}}{4 \cdot 10^{33}} 9 \cdot 10^{20} \cdot 0.007 \approx \eta \frac{63}{2} 10^{17} \text{сек} \approx \eta \cdot 10 \cdot 10^{10} \text{лет}$$



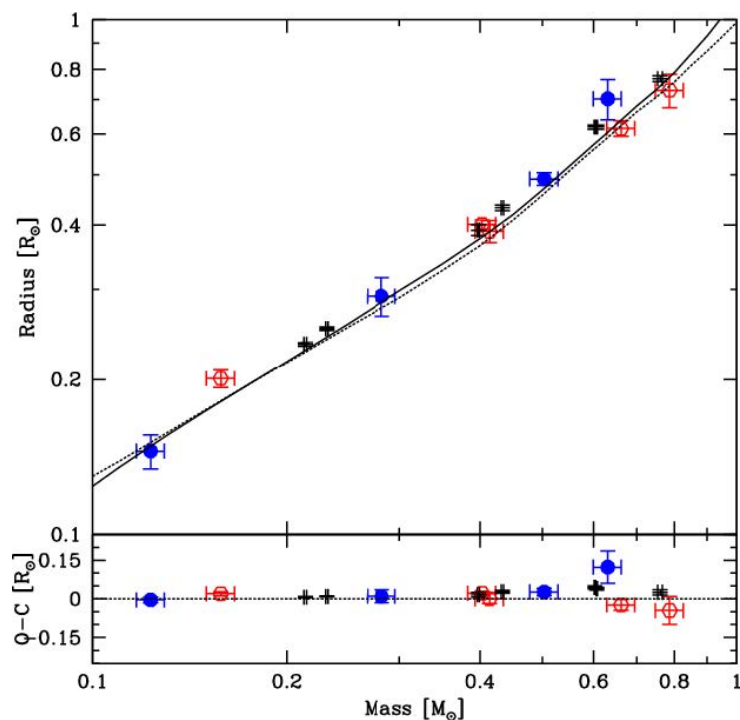


Рис. 88. Соотношение масса-радиус

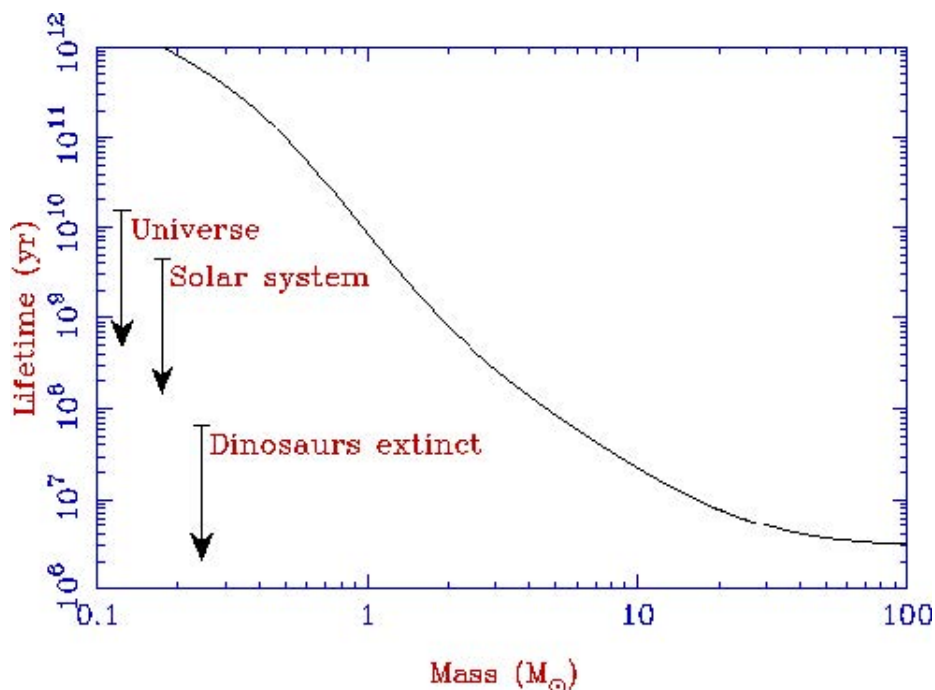


Рис. 89. Время жизни

## Область неустойчивости

На диаграмме Герцшпрунга-Рассела есть интересная область, так называемая полоса неустойчивости, она располагается выше главной последовательности. Там

находятся звёзды-гиганты и эти звезды, попавшие в полосу неустойчивости, начинают пульсировать. В недрах выполняются условия, в которых можно можно запастись энергией и звезда поддавшись, запасает энергию для того, чтобы сделать движение наружу после чего она опять начнёт поджиматься, таким образом звезды пульсируют и это очень важная штука, потому что как оказалось это и это идеальный способ измерения расстояний до далеких объектов на масштабах порядка миллионов световых лет, то есть измерение расстояния до относительно близких галактик. Эти особые звёзды, которые пульсируют, называются цефеидами.

Для цефеид есть связь между светимостью и периодом пульсаций:

$$L \longleftrightarrow P$$

Эту зависимость установили наблюдатели, это феноменологическая зависимость.

Процедура определения расстояний выглядит так: вы определяете параллаксом расстояние до каких-то звезд, параллаксом дотягиваетесь до нескольких цефеид, измеряете до них точное расстояние, градуируете это соотношение и дальше по цефеидам можете измерять расстояние до далеких галактик.

Полоса неустойчивости соответствует звездам-гигантам, поэтому цефеиды - это очень заметные звезды.

Период пульсации:

$$P = \frac{R}{c_s}$$

$R$  – размер звезды.

Характерная скорость для этого процесса это скорость звука.

$$c_s \sim \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

И получаем, что период пульсации звезды:

$$P \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}}$$

Таким образом, период оказывается связанным с плотностью звезды, плотность связана с массой. Масса определяет всё. С массой связана светимость и такая вот цепочка: период-плотность-масса-светимость объясняет факт, что расстояние до цефеид мы можем определить померив период их пульсаций.

## Химическая эволюция звезд

Звезды рождаются из межзвездной среды с каким-то типичным на данный момент составом, который определяется предыдущие историей галактики, в основном это водород и гелий, и дальше запускается термоядерная реакция синтеза. Всегда синтезируются более тяжелые элементы. В конце своей жизни звезда сбрасывает свои внешние слои и, если она маломассивная, то без взрыва она сбрасывает внешнюю оболочку, если она массивная, она взрывается и остается остаток сверхновой и это сброшенное вещество существенно обогащено тяжелыми элементами, которые входят в следующее поколение звезд.

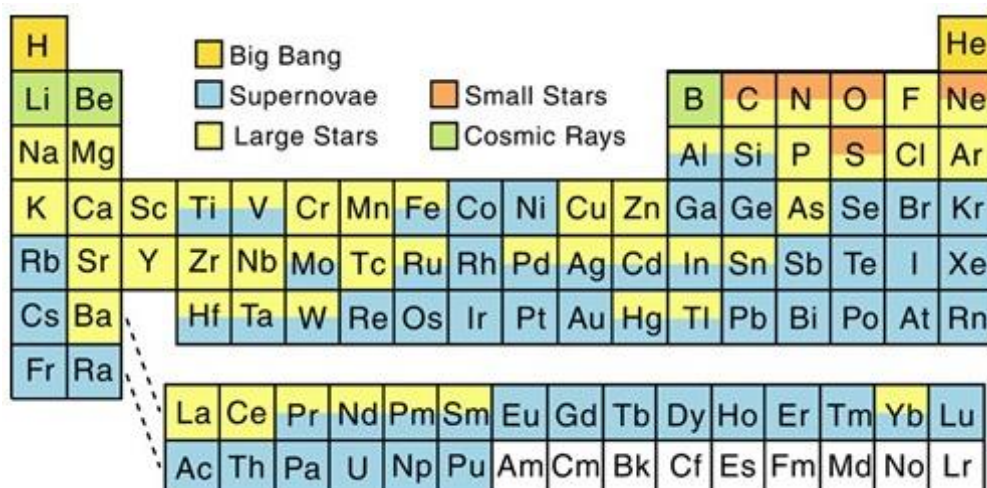


Рис. 90. Возникновение элементов во Вселенной

Кроме реакций в ядре, существуют другие процессы. Реакции в ядре доходят только до элементов группы железа, потому что синтез элементов дальше оказывается не выгодным.

### S - процесс

Этот процесс дает свободные нейтроны, которые легко проникают в ядра. Идет в оболочках звезд-гигантов.

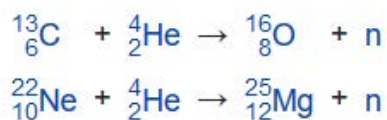


Рис. 91.

Медленный захват нейтронов, идет при относительно низкой плотности нейтронов. Захваченный нейтрон испытывает в ядре бета-распад, превращаясь в протон.

## R - процесс

Этот процесс идет, когда нейтронов очень много. Идет во вспышках сверхновых и при слиянии нейтронных звезд.

## r- and s-process synthesis paths

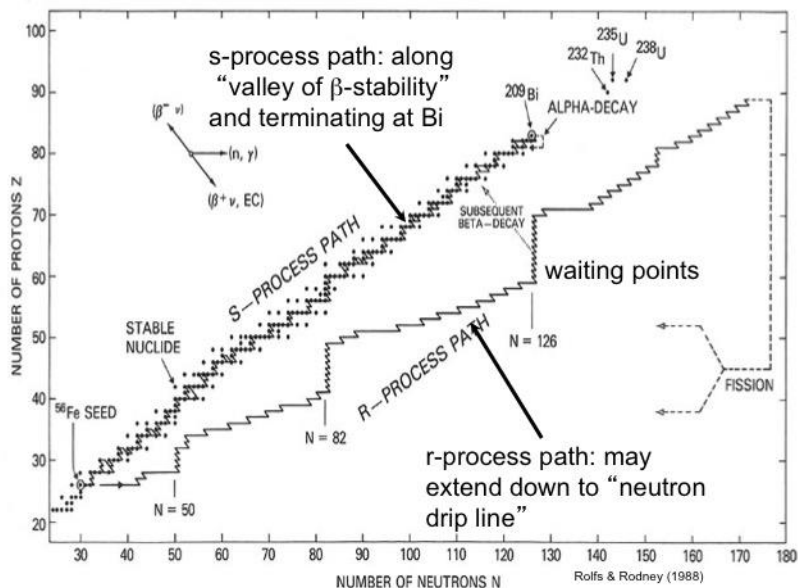


Рис. 92. S и R - процессы

## Лекция 7. Объекты во Вселенной.

### 7.1. Двойные звезды

Под двойными звездами подразумевается не просто две звезды близкие на небе, а две звезды образующие гравитационно связанную систему. Почему не говорят о тройных звездах, четверных, пятерных, шестерных и так далее? На самом деле говорят, но сразу скажем, что если вы возьмете три звезды, то они образуют неустойчивую конфигурацию. Если звёзды будут все-таки взаимодействовать - это всегда парное взаимодействие.

Совсем недавно было окончательно доказано, что Проксима Центавра образует гравитационно связанную систему с двумя звездами Альфа Центавра - это на самом деле тройная звезда, но период обращения проксима Центавра вокруг общего центра масс с Альфа Центавра где-то полмиллиона лет. Если вы делаете еще более широкие системы, то просто случайно пролетающая рядом звезда или суммарный гравитационный потенциал галактики такую систему разделяет, отодвигает друг от друга и система перестает быть связанной, поэтому очень широких систем не бывает. А взаимодействие всегда парная, и поэтому мы будем говорить мы будем говорить именно про двойные системы.

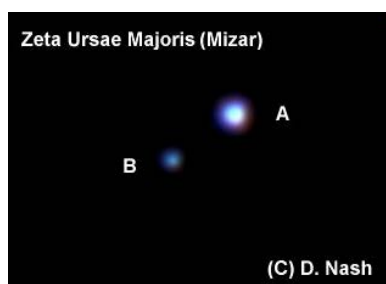


Рис. 93. Мицар

Пример двойной звезды - мицар. Видно как одна звезда крутится вокруг другой, потому что орбитальный период недостаточно длинный, и мы правда можем увидеть часть траектории или всю траекторию.

Двойные звёзды - это очень распространенный случай и примерно половина звезд входит в двойные системы, на самом деле доля двойственности немного зависит от массы. Массивные звезды почти все рождаются в двойных системах или в системах более высокой кратности. Маломассивные звезды рождаются в двойных системах реже, но больше трети маломассивных звезд входит в состав двойных таким, образом это существенная доля - 50%.

Звёзды, естественно, будут обладать в паре разными массами, иногда это разница в массе достаточна, чтобы звёзды видно имели разные цвета.

#### 7.1.1. Обмен масс

Самое интересное, что происходит в двойных системах - это обмен массы.



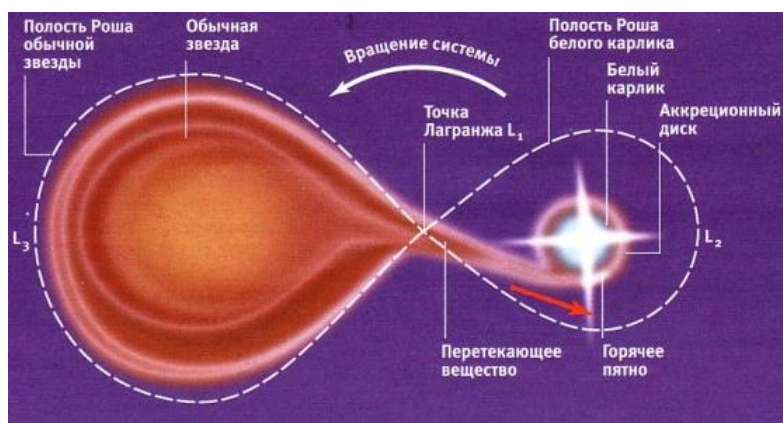


Рис. 94. Обмен масс

Почему это самое интересное? Потому что масса - это главный параметр, определяющий жизнь звезды, эволюцию, конечную судьбу, все что с ней будет происходить, будет ли белый карлик или чёрная дыра, будет взрыв или не будет: всё это определяется массой и в двойной системе это можно менять.

Кроме того перетекание массы может приводить к тому, что будет выделяться большое количество энергии, поэтому такие источники можно наблюдать.

Что такое взаимодействующие системы и что такое нет?

Нам понадобятся несколько характерных величин.

Радиус Солнца  $R_{\odot} = 696000$  км

а. е. = 150 млн. км

1 пк =  $3 \cdot 10^{18}$  см

Максимальные размеры двойных систем:  $r = 10^6 \div 10^7 R_{\odot}$

Взаимодействующих звезд может быть много. Заметная доля звезд в двойных системах будет взаимодействовать друг с другом, и поэтому это взаимодействие, этот перенос массы, это очень часто встречается.

Интенсивное взаимодействие начинается, когда звезда заполняет, так называемую полость Роша. Если у нас есть два тяготеющих центра, то вокруг каждого из них, есть область, где именно это тело контролирует движение частиц и если звезда заполнит свою полость Роша, то она начнёт перетекать на соседа и тогда начнётся интенсивный обмен масс, при котором можно перенести на звезду-соседку заметную часть массы. И если в начале более массивной была одна звезда, потом более массивной может стать другая. Таким образом, взаимодействие, в первую очередь, происходит, когда одна из звезд сильно раздувается, становится красным гигантом или ещё чем-нибудь большим и начинает перетекать на звезду-соседку. Другой способ заполнить свою полость Роша - это сблизить звезды в двойной системе, то есть, если звёзды начинают избавляться от орбитального момента (например, дует сильный звездный ветер), то система будет сближаться и может начаться перетекание.

### 7.1.2. Парадокс Алголя

Поняли, что взаимодействие двойных звезд - это важная штука сравнительно недавно и началось все с парадокса Алголя в середине пятидесятих годов 20

века.

Алголь - известная переменная звезда, она переменная, потому что там две звезды, мы видим систему почти с ребра и вращаясь вокруг общего центра масс звезды периодически заслоняют друг друга, соответственно, то мы видим две звезды, то видим одну, то другую, когда они закрывают друг друга. Поэтому звезда переменная, её довольно легко изучать и удалось определить массу звезд в этой системе. И выяснилась удивительное: более проэволюционировавшей выглядит более лёгкая звезда. Возник парадокс. Разрешить его удалось очень простым способом, сказав что был существенный обмен массой.

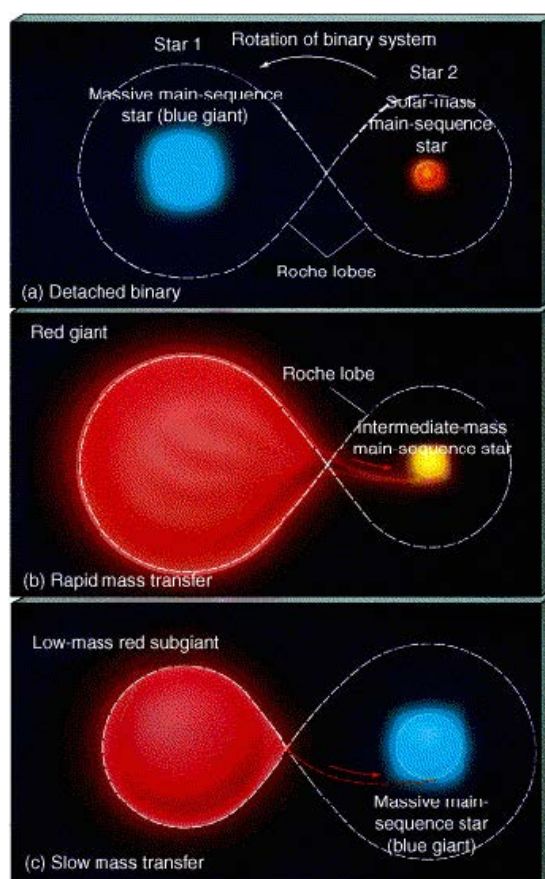


Рис. 95. Парадокс Алголя

### 7.1.3. Гелиевые белые карлики

Двойные существенные ещё для появления нескольких интересных типов объектов и другой парадокс связан с гелиевыми белыми карликами. Есть у нас звезда, в ядре горит водород, водород превращается в гелий и если у звезды хватает массы, она начинает гелий пересжигать в углерод, дальше возникает кислород, допустим более тяжелые элементы не образуются, взрыва сверхновой не происходит и возникает белый карлик. Гелиевые белые карлики должны образовывать только легкие звезды, в которых углерод не может образовываться. Можем определить массу, при

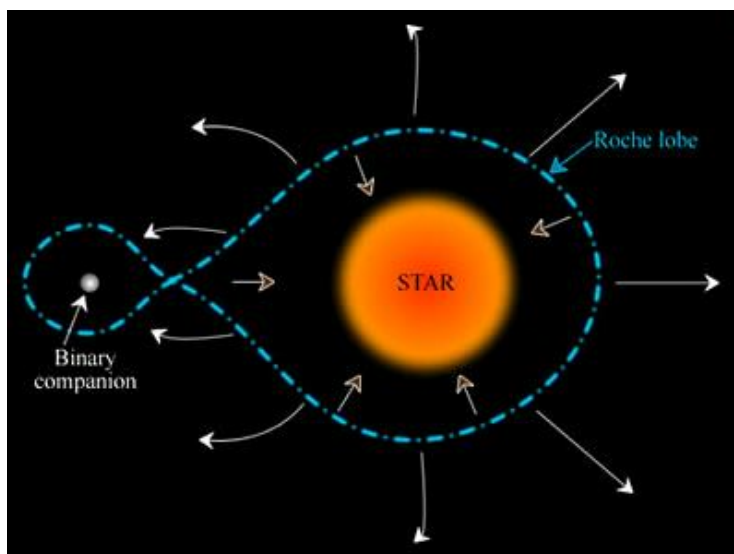


Рис. 96.

которой происходит поджог гелия и начало реакции синтеза с образованием углерода. Оказывается, что эта масса настолько низкая, что ни одна звезда, которая должна породить гелевые белые карлики, ещё не могла успеть это сделать. Т. е. гелевых белых карликов в природе быть не должно, а они есть.

Парадокс объясняется тем, что такие звёзды эволюционировали в двойной системе, то есть была звезда, которая пережигала водорода в гелий в своем ядре, т. е. гелевое ядро формировалась и у нее была соседка, тоже лёгкая звезда. И в результате взаимодействия вторая звезда смогла снять с первой оболочку: система сблизилась, началось взаимодействие, оболочка была сброшена и гелевое ядро просто обнажилось в результате взаимодействия. И если бы не этот процесс то в белых гелевых карликов не было бы.

#### 7.1.4. Сверхновые типа Ia

Еще только в двойных системах возникнут сверхновые типа Ia. Это взрывы белых карликов. Белые карлики могут достигать критической массы, при которой начинаются термоядерные реакции, приводящие к полному взрыву звезды. Белый карлик как раз такой объект. Из-за того что он выраженный, он не может очень быстро реагировать на дополнительное выделение энергии. Реакции быстро охватывают весь белый карлик, происходит взрыв, как правило, без остатка, т. е. происходит полное разрушение объекта и это снова возможно только в двойной системе, потому что массу белого карлика как-то надо увеличивать, на него надо перенести большое количество вещества, а это возможно только в двойной.

#### 7.1.5. Сверхновая 1987A

Есть ещё интересный тип объектов, происхождение которых связано именно с двойными системами. Например, долгое время визитной карточкой телескопа

Хаббл была фотография сверхновой 87 года (рис. 97) в Большом магеллановом облаке.



Рис. 97. Сверхновая 1987А

На рисунке видим, что здесь произошёл взрыв, здесь была звезда. Откуда взялись эти кольца? Это объясняется эволюцией в двойной системе. Было две звезды, одна массивнее и она эволюционировала быстрее, начала перетекать на своего компаньона, но при этом звезды могут оказаться погруженными в общую оболочку, истекающую с первой звезды. Эта оболочка будет разлетаться, унося орбитальный момент, и поэтому звёзды будут сближаться, но на этой стадии образовалось истечение вещества в виде квазиколецеобразной формы вокруг сливающихся двойной и двойная слилась, образовалась одна звезда из двух вокруг, плюс вокруг есть вещество в виде "бублика". Затем образовавшаяся звезда начала испускать очень сильный звездный ветер и взаимодействие звездного ветра, во-первых, образовало кольцо снаружи, а, во-вторых, провзаимодействовало с этим "бубликом" а потом все взорвалось. Произошел взрыв и структура, которая была нарисована газом по газу, просто прорисовалась.

#### 7.1.6. Изображения двойных звезд

Звезда омикрон Кита - это звезда очень сильно меняющая свой блеск, настолько сильно, что в максимуме оно ярче бй звёздной величины (это предел для невооруженного глаза), а в минимуме меньше и поэтому в до телескопической эпохе казалось, что звезда периодически появляется на небе и исчезает. Эта система из красного гиганта и белого карлика. Вещество с гиганта может перетекать на карлик и при этом образуется яркий источник. Блеск объекта сильно меняется и мы можем

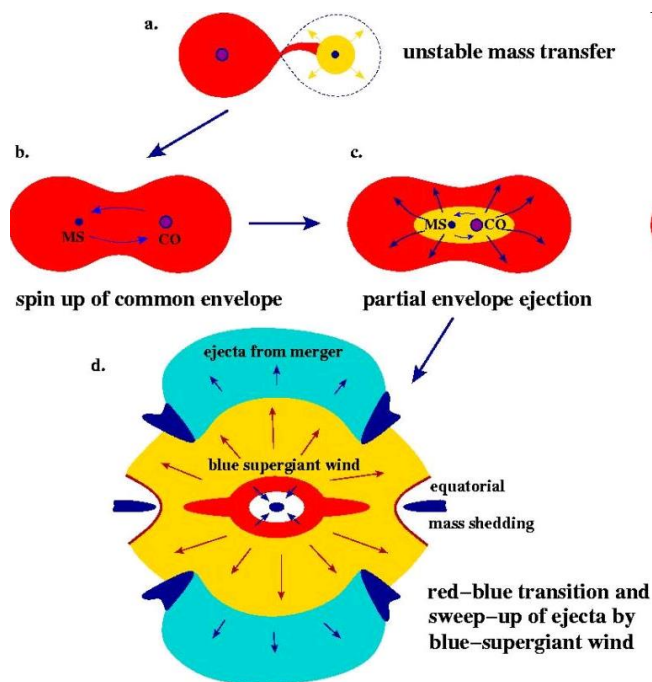


Рис. 98. Модель сверхновой 1987А

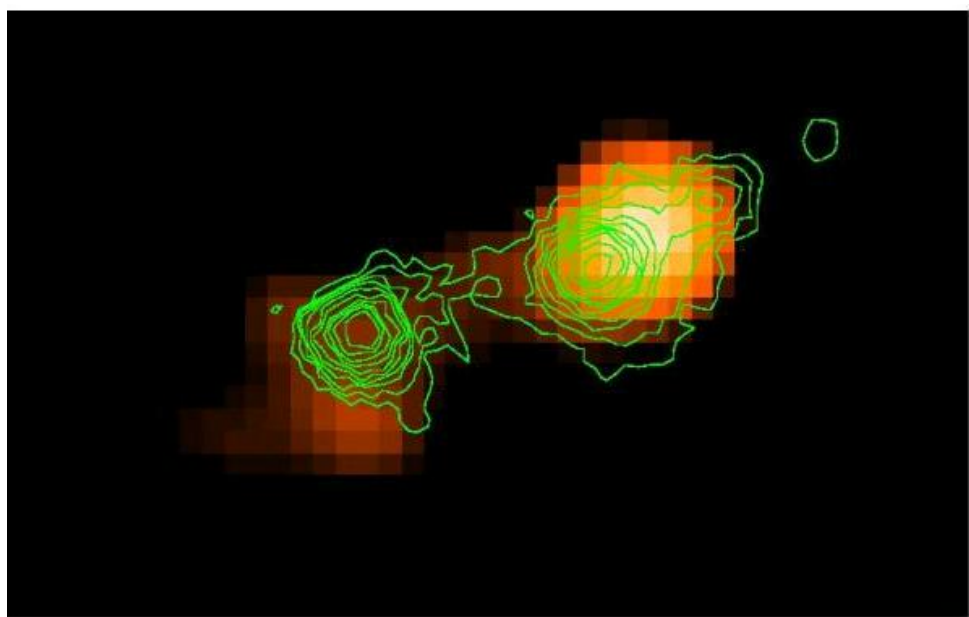


Рис. 99. Мира (омикрон Кита)

прямо наблюдать как это происходит. Благодаря интерферометром в оптическом диапазоне можно получать изображение разных двойных.



### 7.1.7. Тесные двойные

Бывают очень тесные двойные и их существование - это следствие взаимодействия звезд двойных системах. Самая тесная двойная система, из известных состоит из двух белых карликов. Это естественно, т.к. они сами маленькие, поэтому их легко сблизить и белые карлики делают оборот вокруг общего центра масс за 5 минут, что соответствует скорости около одного миллиона километров в час.

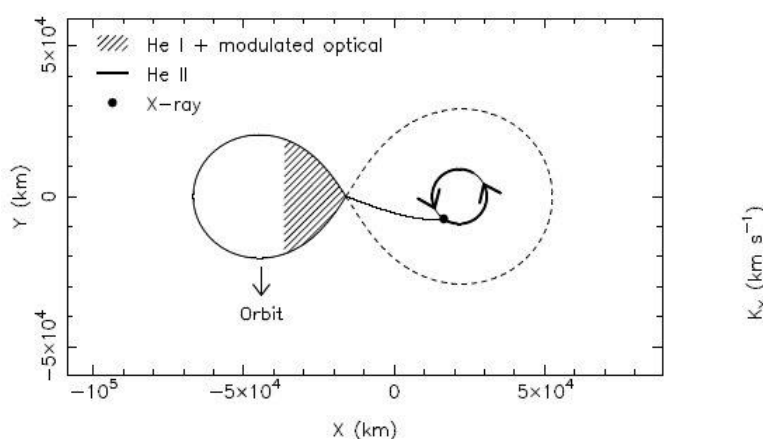


Рис. 100.

Если посчитать по закону Кеплера какого размера эта орбита, то окажется, что две звезды, из которых образовались белые карлики, туда не помещаются, т. е. это означает, что система в начале была более широкой, потом происходил перенос массы и стадия с общей оболочкой, когда система сильно сближается. И в итоге образовалось два белых карлика на очень небольшом удалении друг от друга, что позволяет иметь очень короткий орбитальный период, в будущем эта система, естественно, сольётся. Формально такая система является источником гравитационных волн. Чтобы видеть гравитационные волны от таких пар белых карликов нужна установка типа LISA, космический интерферометр.

А слияние двух белых карликов, если они достаточно тяжелые может приводить к взрыву сверхновых типа Ia.

### 7.1.8. Новые звезды

Если у нас есть пара из белого карлика и обычной звезды, вещество обычной звезды может перетекать на белый карлик и происходит накопление водорода, наконец, в этом водороде начинаются термоядерные реакции. Просто достигается критическое условие и происходит взрыв. Такие объекты называются новые звезды.

Блеск возрастает очень сильно (рис. 101).

### Планетарные туманности

Планетарные туманности - это то, что образуется после эволюции звезд, типа солнца, которые не взрываются. Гиганты сбрасывают внешние оболочки, образу-

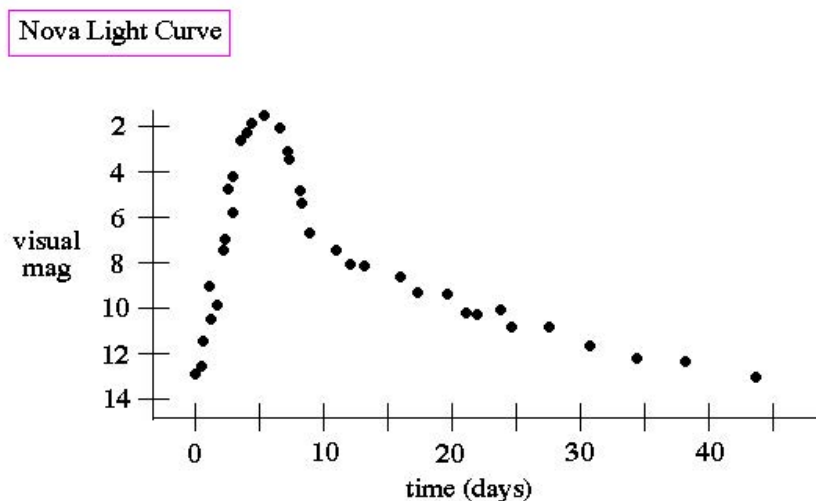


Рис. 101.

ются красивые туманности и большинство туманностей с биполярной структурой, скорее объясняются двойными системами.

## 7.2. Измерение масс

Двойные системы важны, именно в них мы можем точно измерять массу звезд. Чтобы правильно построить теорию звездной эволюции нам необходимо определять массы, но массово определять массу мы не можем, мы можем определить массу только, если есть какое-то пробное тело, если есть двойная система. В двойной системе мы можем наблюдать орбитальный период и это измерение точное, ни от чего не зависящее, и по эффекту Доплера мы можем наблюдать орбитальные скорости иногда для одной звезды или вообще одного компонента системы, поскольку это может быть звезда и чёрная дыра, например, иногда для двух. Но это скорости по лучу зрения, плоскость орбиты может быть наклонена к нам, мы видим всегда скорость в проекции.

$$\frac{Pv_{1r}^3}{2\pi G} = \frac{m_2^3(\sin i)^3}{m_2^3(1+q)^2}, \quad \text{где } q = \frac{m_1}{m_2}$$

$P$  - это орбитальный период системы

$v_{1r}$  - это скорость первой звезды в проекции на луч зрения, радиальная скорость первой звезды

$G$  - ньютоновская постоянная

$m_2$  - масса второй звезды

$q$  - отношение масс

$i$  - наклон орбиты

Обозначим эту величину, как функцию масс:

$$f(m) = \frac{Pv_{1r}^3}{2\pi G}$$

Тогда

$$m_2 = f(m) \frac{(1+q)^2}{(\sin i)^3} \quad (50)$$

Неизвестным остается только синус угла наклона, но часто синус угла наклона удается определить, если в системе происходит затмение.

И тогда вы получаете точное измерение масс для каждой из звезд. Для всех остальных, для многообразия одиночных звезд, прямых оценок нет.

Функция масс, комбинация наблюдаемых величин, является нижним пределом на массу.

Есть места, где взаимодействие очень интенсивное и там много пар образованных в процессе эволюции. Звёзды двигаются довольно большими скоростями и при взаимодействии им нужно избавиться от очень большой энергии, чтобы образовать связанную систему. Если взаимодействуют две звезды единственный способ избавиться от этой энергии это диссипировать ее с помощью приливов, то есть звёзды должны настолько близко проходить друг от друга, чтобы вызвать сильный прилив и это взаимодействие диссипирует энергию.

Рассмотрим шаровое скопление и в таких системах будет происходить так называемая перезарядка: у вас есть уже двойная система прилетает третья звезда и три тела взаимодействия могут весь лишний импульс и энергию передать выбрасываемому и соответственно у вас образуется двойная система, но эти две звезды не рождались вместе, они могут иметь разный возраст, разный химический состав.

В двойных системах могут возникать планеты.

## Скорости звезд в Галактике

Круговые скорости вращения в галактике довольно большие. Там, где находится Солнце на расстоянии 8 от центра, скорость вращения примерно 200220 километров в секунду, но звезды естественно вращаются вместе. Это происходит в диске. В гало звезды двигаются по вытянутым орбитам, наклоненным к плоскости диска с совершенно другими орбитальными параметрами.

### 7.3. Убегающие звезды

Звезды вокруг нас это в основном звёзды диска, которые вместе с нами вращаются вокруг центра Галактики и относительные скорости звезд небольшие, они грубо соответствуют скорости звука в межзвездной среде 10-20 км в секунду. Но есть убегающие звёзды, звёзды которые двигаются с очень большими скоростями: 70, 80, иногда 100 километров в секунду. Среди массивных звезд довольно большой процент относится к убегающим.

Откуда берутся убегающие звёзды? Первая причина - это динамическое взаимодействие. Несколько звезд провзаимодействовали гравитационно друг с другом и обычно самой лёгкой передали дополнительный импульс, ее скорость увеличилась, две другие звезды замедлились. Большая часть звезд солнечной окрестности, которые относятся к убегающим, образовались именно из распада двойных систем.

Мы знаем, где находятся убегающие звёзды, мы можем померить их скорости, мы примерно знаем их возраст и мы можем проинтегрировать их скорость назад и очень часто эта скорость приводит нас в какое-нибудь скопление звезд молодых и тогда мы уверены, что убегающая звезда родилась в этом скоплении. Тогда мы можем определить возраст звезды, когда произошёл вылет и можем попытаться определить было ли это динамическое взаимодействие или разрушение двойной системы. Разрушение двойной системы происходит чаще. И если при распаде системы никакой из объектов не получает дополнительной скорости, то условие для разрушения двойной системы очень простое:

$$\Delta M > \frac{1}{2}(M_1 + M_2)$$

Откуда берётся такое условие? Полная энергия - это сумма потенциальной и кинетической, естественно, потенциальная энергия меньше нуля, а меньше нуля потому что отрицательная потенциальная энергия по модулю равна двум кинетическим энергиям.

При взрыве существенно:

$$E_k \sim M$$

$$E_p \sim M^2$$

Учитывая,  $\Delta M = \frac{1}{2}M$ , то кинетическая энергия изменяется в 2 раза, а потенциальная энергия измеряется в 4 раза.

Полная энергия равна нулю - это граничное условие, при котором система разрушается.

После взрыва три части: одна звезда, ядро взорвавшейся звезды и оболочка двигаются независимо.

Звезды в галактике из-за взаимодействия и различных особенностей могут приобретать большие скорости и самая быстрая звезда (рис. 102) в галактике на сегодняшний день имеет скорость 1200 километров в секунду относительно так называемого местного стандарта покоя. Звезда летит не из центра Галактики, значит скорее всего такую большую скорость она приобрела из-за разрушения двойной системы.

На этом рисунке произошёл взрыв сверхновой, была потеряна масса и звезда полетела, причем в данном случае скорее всего это был взрыв сверхновой 1A, взорвался белый карлик. Почему хочется взорвать белый карлик? Во-первых, это маленькие объекты, поэтому система могла быть очень тесной, была большая орбитальная скорость, а во-вторых, взрыв белого карлика обычно приводит к полному разрушению объекта, ничто звезду не тормозило, она двигалась с какой-то орбитальной скорости, вторая звезда просто исчезла, ее вещество мгновенно разлетелось и звезда сохранив свою орбитальную скорость полетела вперед.

Убегающие звезды могут образовываться в результате динамического взаимодействия. При таком взаимодействии легкие звезды могут приобретать очень большую скорость и соответственно тоже будут наблюдаться как убегающие звезды.

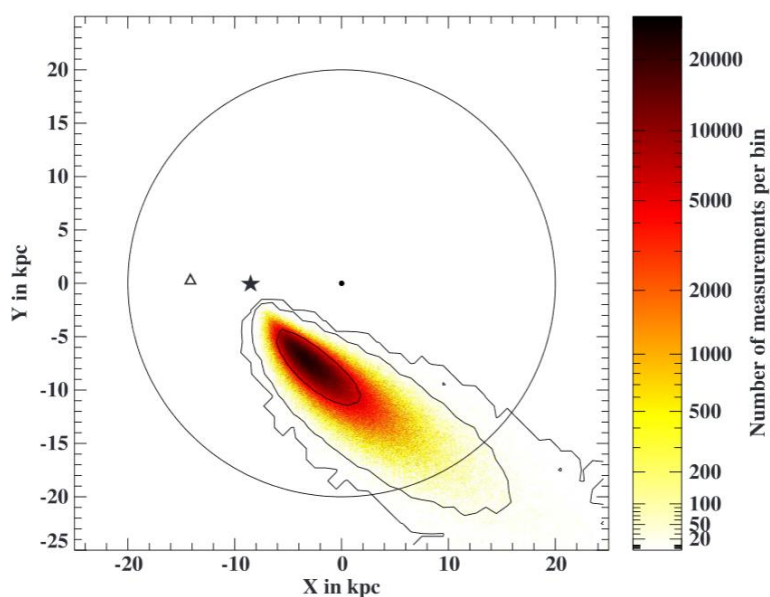


Рис. 102.

## 7.4. Звезды гало

Звезды гало, как кометы в Солнечной системе, движутся по вытянутой траектории и они пересекают диск Галактики, скорости их не могут быть в 10 раз больше скоростей вращения в этом месте, но зато они движутся в другую сторону.

Мы можем оценить относительно максимальную скорость звёзды диска из звезд гала, если скорость диска - это 200 километров в секунду, то относительная скорость будет около 500 километров в секунду.

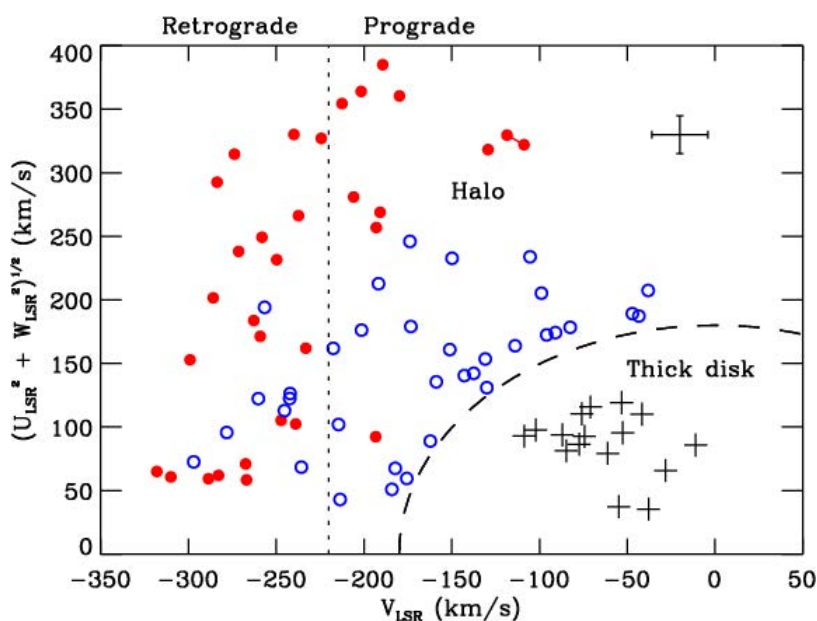


Рис. 103. Скорости звезд гало



Существуют гиперскоростные звезды, которые движутся с гораздо большими скоростями, эти звёзды должны навсегда улетать из нашей Галактики на графике 104 нарисовано следующее: по горизонтальной оси расстоянии от центра галактики в килопарсеках, а скорость убегания нарисованна двумя пунктирными линиями для разных моделей Галактики, но видно, что звезды со скоростями больше, чем 400 километров в секунду и находящиеся достаточно далеко от центра Галактики уже будут не связаны с нашей галактикой и такие звезды есть.

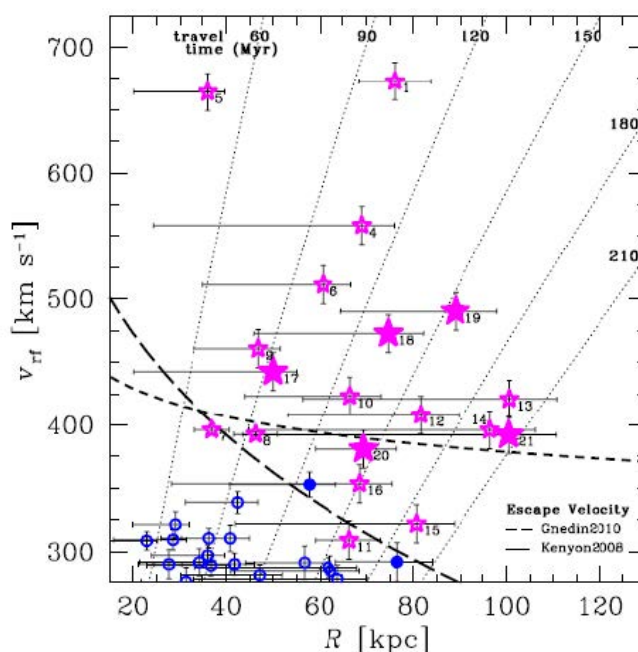


Рис. 104.

Фиолетовым отмечены гиперскоростные звезды, их скорость больше скорости убегания и возникает вопрос откуда они берутся? Почему звезды могут иметь скорость больше скорости убегания из галактики?

Эти звезды снова связаны с двойными системами и в данном случае эта ситуация похожая на "перезарядку", то есть двойная система взаимодействует с третьим телом, происходит обмен одна из звезд остается с этим телом, вторая приобретает скорость и летает, но как легко догадаться, чем массивнее это третье тело, тем лучше вы сможете разогнаться. И самое массивное, что есть в галактике - это черная дыра в центре. Если двойная звезда пролетает достаточно близко от этой черной дыры, то приливные силы могут разорвать двойную систему одна из звезд останется здесь, вторая улетит.

Есть еще более хитрые ситуации, которые вначале выглядели как парадокс. Представьте, вы видите гиперскоростную звезду, вы знаете ее скорость, вы знаете расстояние до центра Галактики. Оказывается, что звезда находится на таком расстоянии от центра Галактики, которое она не могла бы преодолеть за всю свою жизнь, она бы уже взорвалась или превратилась в белый карлик. Это некий парадокс и для его объяснения понадобилось еще одна двойная, нужно чтобы система была тройной. С черной дырой сближается тройная система. Тесная пара и компаньон в

результате взаимодействия, внешний компаньон остается с черной дырой, пара становится более тесной и улетает и в процессе полёта происходит слияние двух звезд, составлявших эту пару, в результате образуется более массивная звезда, разогретая слиянием.

Галактики теоретически могут обмениваться звездами, естественный процесс редкий, работает только на близких Галактиках.

Чёрные дыры могут образовываться и без взрыва сверхновой, происходит коллапс ядра массивной звезды, сбрасывается внешняя оболочка, мощного энерговыделения не происходит.

## 7.5. Белые карлики

Белые карлики были открыты довольно давно. Анализируя движение Сириуса, люди поняли, что у него есть звезда, компоненты входят в двойную систему, но саму звезду не удавалось увидеть, что было довольно удивительно. Наблюдая движение Сириуса можно было примерно оценить массу его соседа и получалось, что это объект с массой порядка солнечной. Такую звезду с близкого расстояния должны были бы увидеть, но ее не видно - это уже было загадкой, т.к. массивный объект, но не наблюдается. В начале 20 века люди впервые смогли начать серьезное изучение белых карликов, получить их спектры. Если Вы получили спектры, знаете расстояние, то знаете светимость, вы можете определить размер объекта

Если объект излучает, как черное тело, его светимость:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (51)$$

Для белых карликов оказалось, что радиусы порядка тысяч километров, а температура соответственно достаточно большая.

Белые карлики - это первые макроскопические объекты, для объяснения природы которых, понадобилась квантовая механика. Устойчивость белого карлика связана с запретом Паули. Белые карлики - это вырожденные звезды и в данном случае выраженными оказываются электроны.

Для белых карликов есть верхний предел массы, так называемый предел Чандрасекара. Если добрать до этого предела, то белый карлик коллапсирует в нейтронную звезду при этом мощного взрыва происходить не будет. В некоторых случаях, чуть-чуть не доходя до чандрасекарского предела, может начаться термоядерный взрыв, который уже охватывает весь объем звезд, идут реакции синтеза и происходит полное разрушение звезды. Элементов синтезируется много и все они попадают в межзвездную среду.

Взрывы сверхновых типа 1A - это очень мощная очень заметные события. Это действительно мощный взрыв далеко видимый, именно поэтому их легко наблюдать на очень больших очень космологических расстояниях. Сверхновые типа 1A очень похожи друг на друга, они не идеальны, но потому как меняется блеск сверхновой можно восстановить истинную светимость и поэтому иногда взрывы сверхновых 1A называют стандартные свечи, их используют для измерения расстояния на космологических масштабах и темную энергию удалось косвенно открыть благодаря изучению сверхновых типа 1A, именно благодаря этим термоядерным взрывам

белых карликов в двойных системах, потому что случае этих сверхновых мы можем очень точно измерять расстояние до настолько далёких объектов, что другие надежные способы там не работают.

Расчеты взрыва сверхновой это очень сложная штука, поскольку там сразу перемешано очень много разной физике, которые обычно друг с другом не встречаются. Нужно добавлять магнитогидродинамику, добавлять нейтрино, добавлять взаимодействия нейтрино с веществом, кроме того, поскольку взрывается достаточно компактное ядро звезды, а потом просто образуется релятивистский объект, вам нужно учитывать эффекты общей теории относительности и наконец, как мы увидим, очень часто оказываются важны эффекты, связанные уже с ядерной физикой и физика элементарных частиц.

Было ядро звезды радиусом округляет 10000 километров, а после схлопывания у вас образовалась нейтронная звезда с радиусом 10 километров, термоядерного взрыва взрыв в этом смысле не происходит, у вас просто происходит падение ядра самого в себя, но в конечном итоге это падение останавливается и у вас огромный кинетическая энергия вещества разом выделяется, выделяется в основном виде нейтрино, часть энергии перейдет в кинетическую энергию и какая-то часть энергии будет в итоге излучена, видим мы, естественно, только то, что только, что изучается.

При вспышке в случае сверхновых типа 1A выделяется больше энергии в оптическом диапазоне. В результате коллапса может образоваться нейтронная звезда с большим магнитным полем и очень коротким периодом вращения, и вот эту энергию вращения за счет мощного магнитного поля можно закачивать в туманность вокруг, а потом переизлучать и есть очень мощные сверхновые, они могут быть в 100 раз мощнее типичной сверхновые 2 типа.

В веществе, выброшенном в результате взрыва сверхновой, происходят разнообразные реакции, во-первых, это могут быть реакции синтеза и образовывать очень тяжелые элементы, но в ходе этого процесса могут образовываться очень много радиоактивных элементов, которые затем будут распадаться и соответственно этот процесс будет идти с выделением энергии, в частности, образуется много элементов с относительно небольшими периодами распада и тогда они могут подпитывать подпитывать энергетику сверхновой. При наблюдении за сверхновой 87 года построен очень хороший спектр и удалось увидеть гамма линию, которая связана с титаном 44, именно распад этого изотопа определяет излучение остатка сверхновой на позднем этапе эволюции.

Физика взрыва сверхновой плохо изучена.

## Лекция 8. Нейтронные звезды.

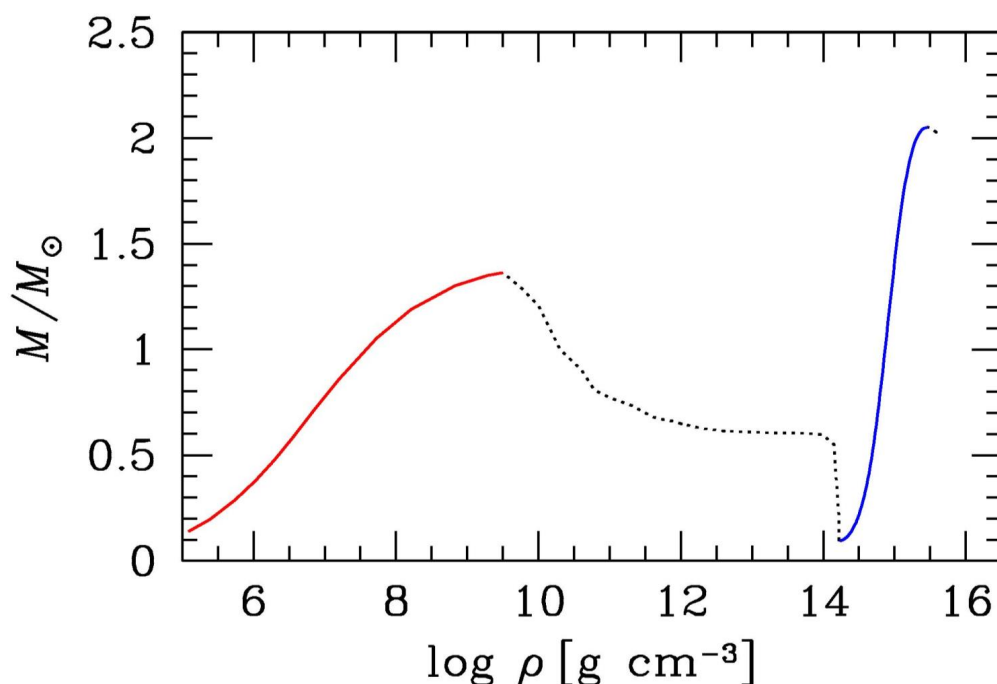


Рис. 105. Массы нейтронных звезд (синяя линия) и белый карликов (красная)

Белые карлики - это компактные остатки эволюции маломассивных звезд, звезды с массами до 7-8 масс Солнца, безо всякого взрыва в конце превращаются в белые карлики. Белый карлик взрывается в ядре, внешние слои сбрасываются образуются планетарная туманность. Оставшееся ядро поджимается, начинает остывать это и есть стадия белого карлика. Белые карлики устойчивы за счет давления вырожденного электронного газа, то есть действует запрет Паули, поэтому они не сжимаются и объекты эти достаточно плотные.

У белых карликов есть предельная масса, так называемый предел Чандрасекара. Он зависит от химического состава, к счастью, у белых карликов задан химический состав, зависимости от массы у них практически четко определен химический состав. Самые тяжелые состоят в основном из кислорода, неона и магния и для такого состава предел чандрасекара - 1.4 массы Солнца. Многие белые карлики в процессе увеличения массы чуть-чуть не дойдя до этого предела, взрываются, образуются сверхновые Ia. Если белый карлик добрался не взорвавшись до этого предела, то дальше произойдет коллапс в нейтронную звезду.

Нейтронные звёзды, достигнув верхнего предела, коллапсируют в чёрные дыры. Интересно, что у нейтронных звезд есть нижний предел массы и связано это с тем, что нейтронные звезды устойчивы из-за принципа запрета Паули, из-за того что у нас есть массивные частицы, в основном нейтроны.

Нейтронных звезд легче, чем 0.1 масс Солнца не существует. У этих самых лёгких нейтронных звезд радиус исчисляется уже сотнями километров.

В нейтронных звездах вещество находится в экстремальном состоянии. Нейтронная звезда это самое интересное место, где сжатие вещества остановилось, вы достигли самых высоких плотностей, самых экстремальных параметров, но все еще видно нейтронные звезды обладают сильными магнитными полями, там естественно сильная гравитация (радиус порядка 3-4 шварцшильдовских), сверху плотное вещество, в центре плотность вещества выше ядерной.

Нейтронные звезды рождаются в результате взрыва ядра массивной звезды в конце ее эволюции. Это называют сверхновой. На месте взрыва остается компактный объект – например, нейтронная звезда и остаток взрыва сверхновой – расширяющаяся туманность. Внутри туманности может существовать плерион. Эта часть туманности видна из-за накачки энергии нейтронной звездой.

Крабовидная туманность – плерион (Рис. 2). Внутри находится один из самых известных радиопульсаров.

Нейтронные звезды были открыты в 60-е годы. Они были открыты в рентгеновском диапазоне в тесных двойных системах. Если это нейтронная звезда, то у вас большое количество энергии выделяется с очень маленькой поверхности и естественно у вас при этом спектр сдвигается в жесткий диапазон излучения.

Когда с маленькой площади нужно изучить большую энергию, то используются фотоны с самой большой энергией, но если мы говорим о тепловом излучении - это оказывается рентгеновский Фотон в случае нейтронов.

Еще до запуска аппаратуры на спутниках, люди начали ставить рентгеновские детекторы на ракетах. Важно вывести детектор за пределы атмосферы, поскольку атмосфера рентген поглощает.

Рентгеновские звезды в двойных системах распознали в начале 70-х годов, когда был запущен первый спутник для рентгеновских наблюдений.

Настолько много энергии выделяется при аккреции?

Аккреция – самый мощный источник энергии в мире из тех, что могут давать большой выход энергии.

$$E = \frac{GM}{R}m$$

Чем компактнее объект, тем больше энергии будет выделяться.

Есть предельный случай с черной дырой, но с ней есть проблема, потому что у неё нет поверхности.

Если мы подставим в формулу параметры нейтронной звезды, то получим:

$$E' = \frac{10^{-7} \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 10^{33}}{1.5 \cdot 10^6} \simeq 2 \cdot 10^{20} \text{ эрг/г}$$

При падении вещества на нейтронную звезду выделяется энергии до 10% от  $mc^2$ .

Нейтронные звезды в двойных системах наблюдаются. После взрыва сверхновой трудно сохранить двойную систему, во-первых, сбрасывается вещество и если сброшено больше половины, то система распадается, во-вторых, нейтронная звезда при рождении получает дополнительную скорость из-за симметрии взрыва сверхновой и это тоже будет разрушать двойную систему, но заметная доля двойных систем выживает, поэтому нейтронные звезды и черные дыры наблюдаются в двойных системах.



Таким образом, мы можем их на некоторых стадиях эволюции видеть как аккрецирующие источники.

Удалось открыть и пульсар в крабовидной туманности. Феномен рентгеновского пульсара связан с тем, что у нас есть нейтронная звезда и звезда-соседка. Вещество закручивается вниз, но вещество ионизованно, а у нейтронной звезды есть магнитное поле. Плазма может течь только вдоль магнитных силовых линий и поэтому на магнитных полюсах возникает горячее пятно. Нейтронная звезда вращается, при этом ось вращения не совпадает с магнитной осью и соответственно возникает такой маячок: то это горячее пятно направлено на нас, то оно оказывается повернутым, и мы видим пульсирующее радиоизлучение.

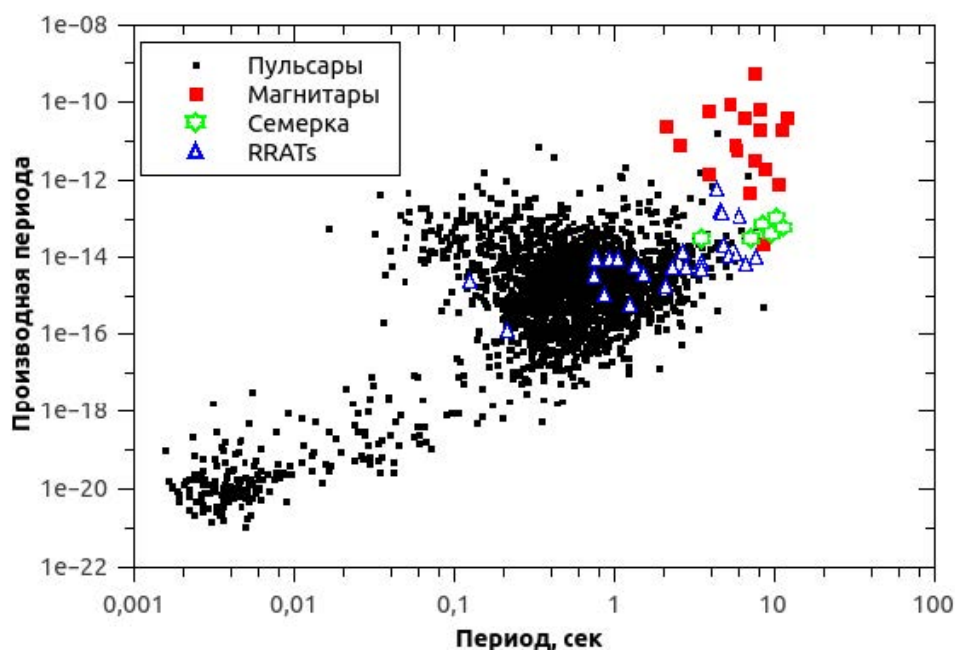


Рис. 106. Диаграмма период- производная периода

Для радиопульсаров самым графиком стала диаграмма период - производная периода. Это две наблюдаемые величины, причём наблюдаемые с высокой точностью.

Облако чёрных точек - это обычный радиопульсар. Обычно радиопульсар имеют периоды порядка долей секунды и производную периода порядка  $10^{-14}$  секунд за секунду.

Изучение диаграммы позволяет немного определять параметры нейтронных звезд, хотя бы качественно.

В простейшем случае это позволяет оценить многие физические параметры нейтронной звезды, поскольку можно построить довольно простую модель энергопотери.

Если вы просто возьмёте шарик намагниченный, закрутите его в вакууме и посмотрите с какой скоростью он будет терять энергию, энергию него вращательная:

$$E_{rot} = \frac{I\omega^2}{2}$$

$\omega$  - частота вращения  
 $I$  - момент инерции

Нам важна светимость, т. е. потери этой вращательной энергии. Радиопульсар в основном излучает за счёт того что он замедляется.

$$\dot{E}_{rot} = I\omega\dot{\omega} = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \sin^2 \beta$$

$\beta$  - угол между магнитной осью, т.е. осью магнитного диполя и осью вращения  
 $\mu$  - это магнитный момент:  $\mu = BR^3$

$$p\dot{p} \sim B^2$$

Вы можете определить некое эффективное магнитное поле. Типичные значения полей это  $B \sim 10^{12}$  Гаусс .

$T$  - это возраст.

$$p^2 - p_0^2 = T \cdot [B^2 \dots]$$

Если вы считаете, что современный период намного больше начального  $p \gg p_0$ , то есть нейтронная звезда сильно замедлилась, то только из наблюдений периода и производной периода, вы можете оценить возраст пульсара:  $p \sim \sqrt{t}$

В последние 15 лет стало ясно, что нейтронные звезды могут рождаться очень разными, совсем непохожими на обычные радиопульсары типа Краба.

## Магнетары

Самый эффектный источник, связанный с молодыми нейтронами звездами - это магнетар. Магнетар - это нейтронные звезды, как правило, с сильными магнитными полями. У нейтронных звезд могут быть разные источники энергии. Радиопульсар виден благодаря вращательной энергии. Если вы видите тепловое излучение поверхности, то это соответственно запасенная тепло в нейтронной звезде, если у вас пульсар в двойной системе, то речь идет об аккреции, то есть излучается энергия вещества, разгоняемого в гравитационном поле нейтронной звезды, но есть ещё один источник энергии- это магнитная энергия.

Магнитные поля порождается электрическими токами и в данном случае наверное разумнее говорить о том, что магнетары излучают энергию токов, которые текут в первую очередь в ее магнитосфере. Энергию поля можно выделять очень быстро в момент короткого замыкания.

Максимальная наблюдавшаяся светимость для магнитара:  $L \simeq 10^{47}$  эрг/с. Магнетар вовремя максимума вспышки становится ярче целой Галактики.

## Компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых

Другой тип молодых нейтронных звезд, которые удалось увидеть это компактные рентгеновские источники в центрах остатков сверхновых, потому что это компактный рентгеновские источники наблюдаемые в центрах остатков сверхновых.

Остатки сверхновых это идеальный способ определения возраста нейтронной звезды. Возраст остатка сверхновой довольно определяются, потому что мы более или менее представляем себе динамику расширения остатков в межзвездной среде.

У вас происходит точечное выделение большой энергии, начинается на сверхзвуковой скорости расширяться в первое время сферически симметричная оболочка, в начале у вас идёт практически свободный разлёт поэтому, радиус остатка практически пропорционален времени. Остатки сверхновой - это то вещество, которое загребалось ударной волной и наконец остаток останавливается межзвездной средой, давление выравнивается и остаток рассеивается. Это занимает примерно 100000 лет, зависит от энергии взрыва, от свойств межзвездной среды.

Чем нейтронные звёзды важны?

- 1) Инструменты для физиков и астрофизиков
  - радиопульсары – тесты теорий гравитации
  - регистрация гравитационных волн
  - точное время
- 2) Теория поведения вещества при высокой плотности –квантовая хромодинамика
- 3) Процессы в сильном магнитном поле

Еще один вариант, почему важны нейтронные звезды - это система навигации, основанная на рентгеновских пульсаров, речь идет именно о вращающихся нейтронных звёздах, без аккреции.

Современные системы ориентации межпланетных станций, по всей видимости будут основаны на наблюдениях рентгеновских пульсаров, таким образом физика нейтронных звезд становится прикладной наукой.

## 8.1. Внутреннее строение

Во внутреннем строении (рис. 106 нейтронных звезд выделяют две основные области: кору и ядро, и, соответственно, кору и ядро делят на две части каждую: внешняя кора, внутренняя кора, внешнее ядро, внутреннее ядро.

Внешняя кора в первом приближении кулоновский кристалл. По мере продвижения вглубь коры растёт плотность и у вас вещество начинает менять свойство, у вас становится больше нейтронов, появляются ядра обогащённые нейтронами, а потом в ядерном веществе начинают возникать сложные структуры и в итоге мы переходим во внутреннюю кору, где у нас есть ядра или ядерные структуры и между ними свободные нейтроны. Т. е. нейтроны выдавливаются из ядер. В конце концов все ядерные структуры разрушаются, у вас начинается ядро, которое в начале состоит из протонов и нейтронов плюс электроны для электрической нейтральности, протоны могут находиться в сверхтекучем состоянии, что автоматически означает сверхпроводимость, сверхтекучесть заряженных частиц - это и есть сверхпроводимость, по мере продвижения у вас часть электронов меняется на мюоны. А вот дальше начинается внутреннее ядро, которое мы не знаем из чего состоит.

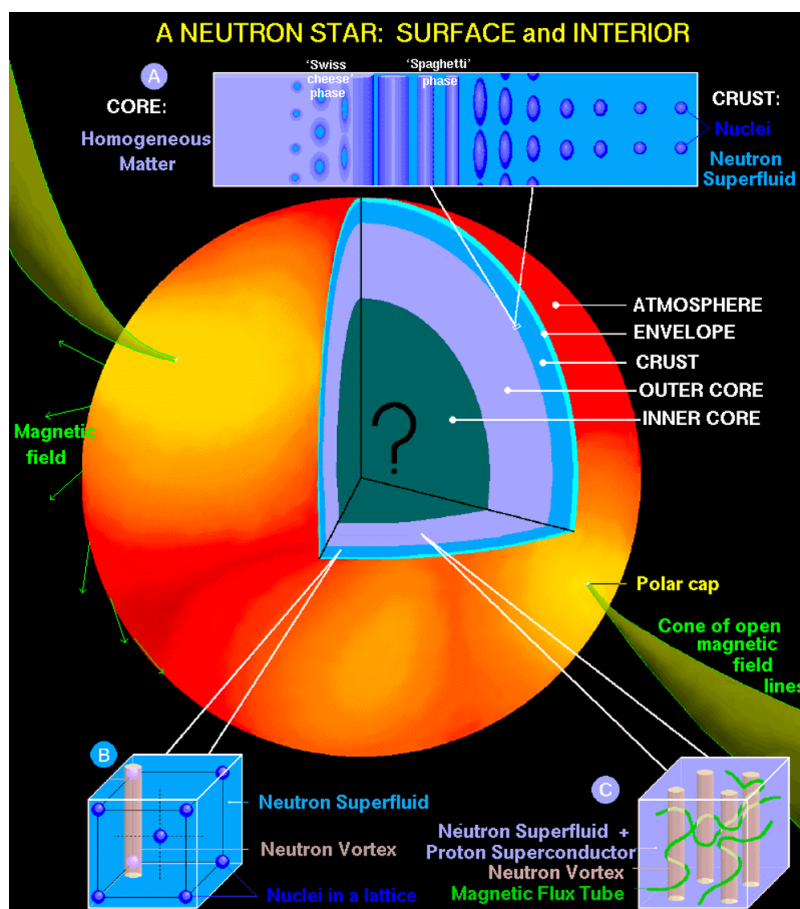


Рис. 107.

В зависимости от модели объекты, которые мы называем нейтронными звездами, могут иметь очень разное строение.

Что мы для нейтронной звезды можем измерить? Массы и радиусы, красное смещение на поверхности, температуру поверхности, момент инерции нейтронные звезды, измерить разницу между гравитационной барионной массой и предельное вращение.

### Гравитационная барионная масса

Барионная масса больше гравитационной. При коллапсе ядра часть его массы превращается в энергию:  $E = mc^2$  и высвечивается. Похоже на энергию связи атомного ядра. В итоге объект имеет гравитационную массу меньше барионной.

Дефект масс зависит от того как плотное вещество упаковано, зависит от уравнение состояния это один из способов узнать как устроена нейтронная звезда внутри и понять как взаимодействует вещество при очень высокой плотности.

Но скорее всего ответ о внутреннем строении нейтронных звезд будет получен благодаря измерения массы радиусов нейтронных звезд (рис. 108).

Массы можно измерят в двойных системах (рис 109), в случае нейтронных звезд идеальная система: нейтронная звезда плюс другая нейтронная звезда, и если хо-

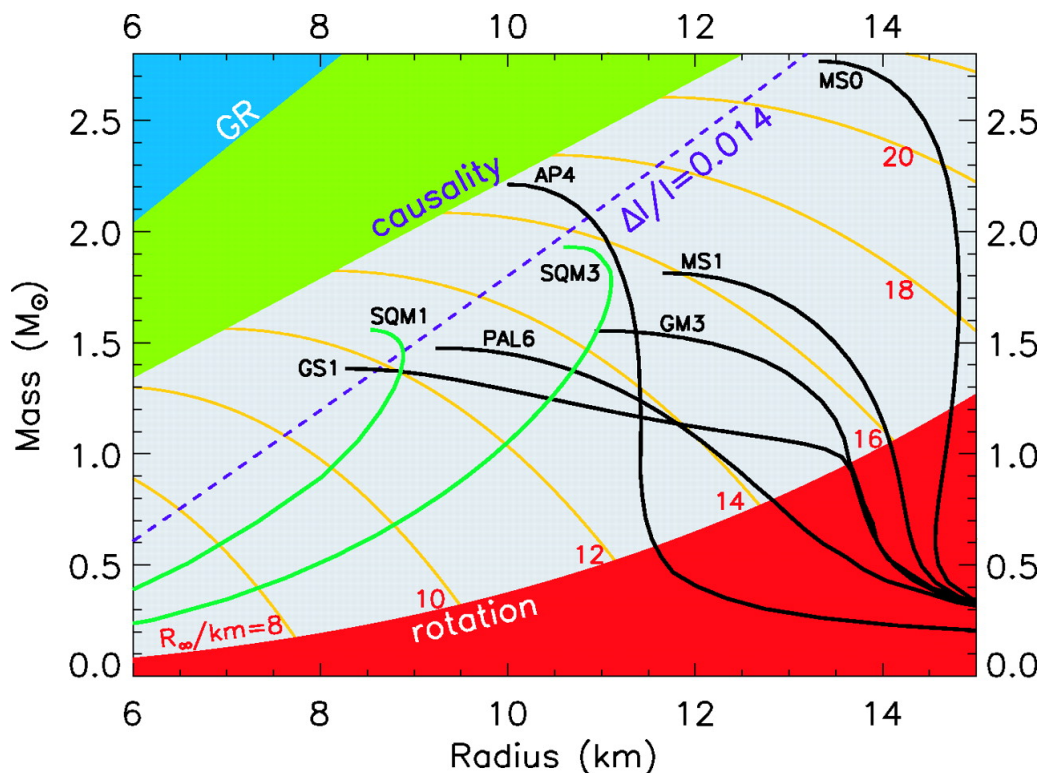


Рис. 108.

Если бы одна из них является радиопульсаром, то вы можете очень точно измерить функцию масс.

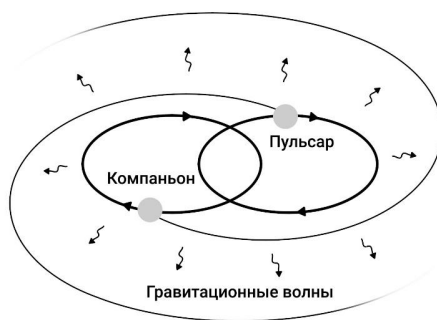


Рис. 109.

Нам нужно искать как можно более тяжелые нейтронные звезды (рис. 110), для того чтобы отбрасывать какие-то уравнения состояния

Чем больше масса – тем сильнее сжато вещество в недрах нейтронной звезды.



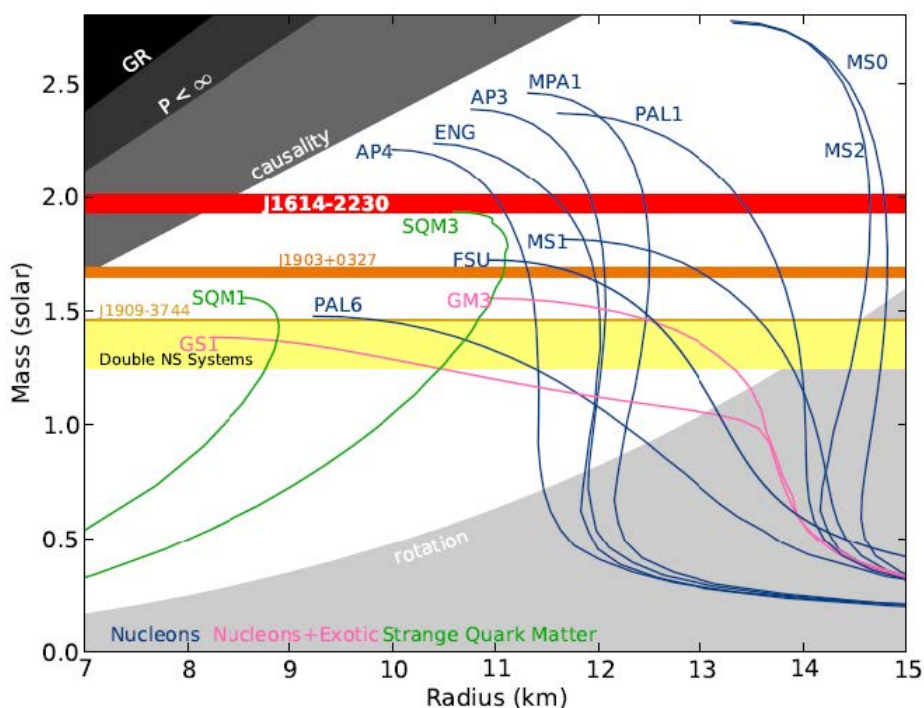


Рис. 110.

## Кварковые звезды

В отличие от нейтронных звезд кварковые удерживаются не гравитацией, а ядерными силами. Нет минимальной массы.

Кварковое вещество – «самодостаточно». Для его устойчивости не нужна гравитация. Т.е., могут существовать как странные звезды, так и маленькие комочки, капельки. Странные звезды могут встречаться в космических лучах. Это будут частицы с большой массой, но с зарядом относительно небольшим.

Такие объекты могут образовываться в результате слияния нейтронных звезд, если у вас изначально было две кварковые звезды или две нейтронной звезды с кварковым ядром, то в результате слияния часть вещества, естественно, будет выброшена и таким образом огромное количество этих странных звезд как будет засеивать Галактику, но и пространство между галактиками и их можно обнаружить в Космических лучах.

## 8.2. Остывание нейтронных звезд

Нейтронные звезды рождаются горячими и потихоньку начинают остывать. Остывание идет за счет ядерных процессов в недрах, т. е. от внутреннего состава.

Мы видим нейтронные звезды, возрастов несколько тысяч лет.

Кроме относительно небольшого излучения фотонов с поверхности, основную долю энергии остывающей молодой нейтронной звезды несут нейтрино прямо из недр. Нейтронная звезда прозрачна для нейтрино.

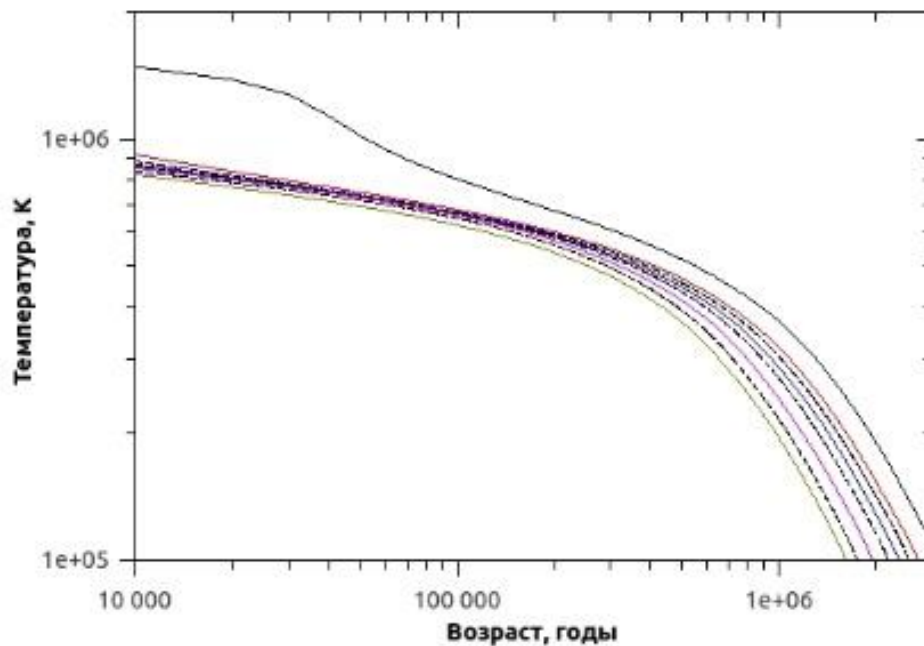


Рис. 111. Остывание нейтронных звезд

Существенным оказывается самый простой кинематический возраст. Нейтронные звезды рождаются там, где живут массивные звезды. В нашей Галактике массивные звезды находятся в диске и нейтронные звезды рождаются именно в диске, но рождаются могут с большими скоростями и начинают из диска убегать. Измерив смещение нейтронной звезды относительно диска, зная расстояние до нейтронной звезды вы можете определить возраст.

## Лекция 9. Черные дыры.

Черная звезда может родиться через фазу нейтронной звезды, или протонейтронной звезды. Некоторые чёрные дыры можно образовать без сверхновых.

Искали и нашли случай, когда массивная звезда исчезла (рис. 112), а никакой сверхновой не было видно. Они используют архивные данные Хаббловского телескопа для поиска исчезнувших (без взрыва) массивных звезд. Исследовано 15 галактик. Выделено несколько кандидатов. Детальный анализ показал, что одно событие действительно очень похоже на исчезновение желтого сверхгиганта (масса около 25-30 масс Солнца) без взрыва. Это примерно то, что и ожидалось, т.е., пусть и на очень низкой статистике, но подтверждает идею о "тихом коллапсе" некоторых массивных звезд. Хотя в статье приведен лишь один хороший кандидат, доля таких событий может быть довольно большой.

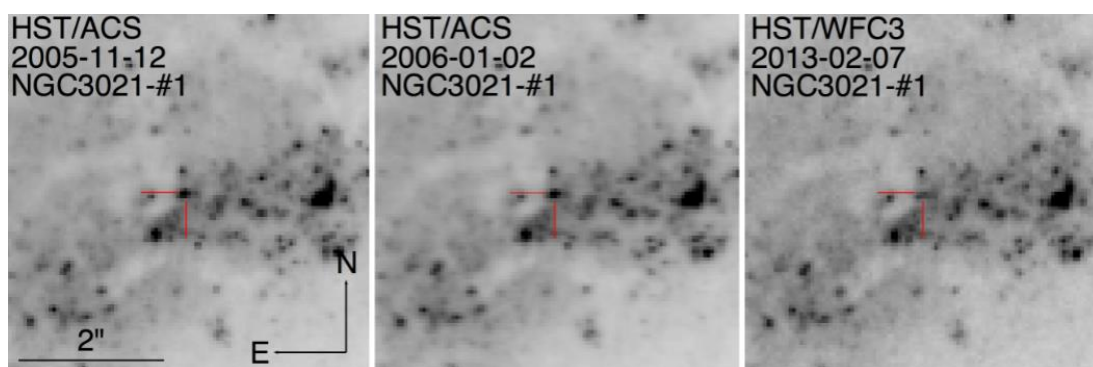


Рис. 112. Остывание нейтронных звезд

Существуют ли чёрные дыры? Доказать отсутствие горизонта очень трудно и связано это с тем, что все процессы вблизи горизонта с точки зрения наблюдателя проходят очень медленно и прямым доказательством точно некоей поверхности нет.

С точки зрения астрофизика, чёрные дыры есть.

Есть объекты, которые ведут себя так, как должны себя вести чёрные дыры в астрофизике и возникает второй вопрос: а как на самом деле устроена чёрная дыра? С точки зрения астрофизика: это компактный объект, в который вы кидаете вещество и не видите никаких проявлений поверхности, т.е. вещество как будто проваливается в дыру.

Часто можно услышать такое, что если мы из бесконечности, то есть там где находимся, наблюдаем коллапс ядра звезды, то с точки зрения удаленного наблюдателя, образование горизонта займёт бесконечное время и мы никогда не увидим как она превращается в черную дыру. Это и так и не так, т.е. если мы перейдем в практическую точку зрения, то увидим как за очень короткое время объект станет выглядеть как чёрная дыра.

Чёрная дыра ограничена горизонтом. Если мы говорим о простой чёрной дыре, простая значит она не имеет электрического заряда (вообще у чёрной дыры может быть три параметра: масса, параметр характеризующий вращения и электрический заряд), и у нас не вращающаяся черная дыра, характеризующаяся одним параметром.

ром: массой. Масса сразу позволяет вам определить размер горизонта:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.95 \text{ км} \frac{M}{M_\odot}$$

Типичные массы звёздных черных дыр, которые образуются из массивных звезд несколько масс Солнца, соответственно, типичный размер черной дыры, который образовался из звезды это радиус я 10-15 километров.

## 9.1. Основные типы черных дыр

С астрофизической точки зрения выделяют несколько типов чёрных дыр и два из них существуют и два из них являются гипотетическим. Самые известные это чёрные дыры звездных масс, то что образуется из массивных звезд в результате коллапса их ядер. Начиная с 3 масс солнца могут образовываться такие чёрные дыры, верхний предел определяется тем, какие есть звёзды, сколько вещества может упасть в черную дыру, сейчас в галактике редко должны образовываться чёрные дыры с массой больше чем 15-20 масс Солнца. Второй тип черных дыр, который как мы думаем существует, это сверхмассивные черные дыры. Они находятся в центральных областях галактик и могут иметь массу в очень большом диапазоне от десятков тысяч масс Солнца до миллиардов масс Солнца. Рекорд где-то 20 миллиардов масс Солнца с верхней стороны несколько тысяч масс Солнца с нижней стороны.

Есть еще два типа черных дыр, но в их существовании люди не столь уверены. Во-первых, это первичные черные дыры, которые образуются в ранней Вселенной. Когда у вас расширение только, началось плотность велика и она естественно флуктуирует, и из-за этих флуктуаций какие-то области пространства могут становиться достаточно плотными, чтобы складываться в чёрные дыры. Как легко догадаться, получить маленькую пунктуацию проще, чем большую поэтому спектр масс первичных черных дыр будет больше в стороне маленьких масс.

Чем меньше масса чёрной дыры, тем быстрее она испаряется. Чем меньше масса чёрной дыры, тем меньше радиус, тем сильнее искривление пространства вблизи горизонта, и чем вы сильнее скрываете пространство, тем эффективнее работает механизм Хокинга и самые лёгкие первичные черные дыры должны были испариться, если механизм работает, а черные дыры с массой больше, чем  $10^{15}$  грамм, такие чёрные дыры должны испаряться и интересно было бы увидеть их вспышку, и это было бы идеальным доказательством существования черных дыр.

И есть так называемая чёрная дыра промежуточных масс, промежуточных между звездами и сверхмассивными.

Например, на нейтронную звезду течет поток вещества, то светимость - это будет поток массы, умноженный на эффективность аккреции:

$$L = \dot{M} \cdot \mu \frac{GM}{R}$$

Существует предельная светимость, т. к. свет оказывает давление и, когда излучения становится много, то падающее вещество начинает активно взаимодействовать с исходящим потоком излучения и в результате и излучение начинает сдувать вещество, аккреция оказывается саморегулирующийся.

Рассмотрим простейший случай водородной плазмы. У нас есть протоны и электроны, которые летают по отдельности, но друг с другом взаимодействуют и в водородной плазме их количество равно друг другу. Протон в 2000 раз тяжелее электрона и поэтому мы можем в первом приближении считать, что у нас есть сила гравитации, которая действует в первую очередь на протоны, а электрон лёгкий и на него очень эффективно будет воздействовать сила связанная с излучением.

$$F_g = G \frac{M_{\text{пр}}}{R^2}$$

Сила радиационного давления:

$$F_r = R_r \cdot \sigma_T$$

$\sigma_T$  - площадь.

$$\sigma_T = \left( \frac{8\pi}{3} \right) \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2$$

Нам нужно посчитать давление, которое оказывает свет:

$$I = \frac{L}{4\pi R^2}$$

$I$  — поток излучения.

Давление:

$$P_r = \frac{I}{c} \quad (52)$$

Приравняем силы:

$$\frac{GM_{\text{пр}}}{R^2} = \frac{L}{4\pi R^2 c} \sigma_T$$

Критическую светимость:

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GM_{\text{пр}}}{\sigma_T} \approx 10^{38} \text{ эрг/с} \frac{M}{M_{\odot}} \quad (53)$$

Чем тяжелее объект, тем более мощным источником излучения он может стать.

## 9.2. Черные дыры в двойных системах

В течение долгого времени самыми надежными кандидатами в чёрной дыры были чёрные дыры в двойных системах. И первая такая система, это система Лебедь x-1. Это первый рентгеновский источник, обнаруженный в созвездии лебеда.

Сейчас таких кандидатов в чёрные дыры в двойных системах много.

Чтобы стать хорошим надежным кандидатом в чёрные дыры, компактный объект должен быть тяжелым.



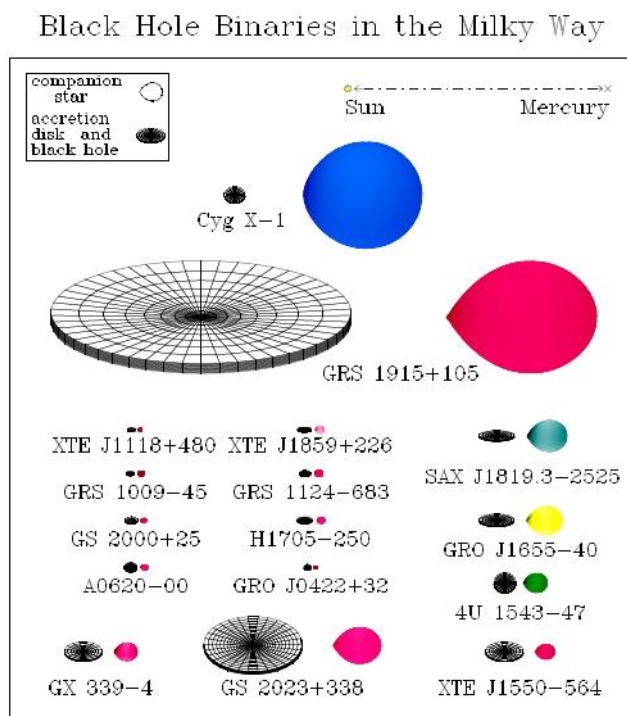


Рис. 113. Кандидаты в черные дыры

## Рентгеновские новые

Иногда аккреционный диск нестабилен, в нем возникают неустойчивости, вещество у вас сбрасывается из всего диска и происходит всплеск рентгеновского излучения, такие объекты называют рентгеновскими новыми.

Рентгеновские новые - это очень важный типа объектов. Обычно мы видим или только звезду, с которой течёт вещество, или только аккреционный диск. И тогда у нас не очень точно определяются массы. А у рентгеновских новых есть и то и другое. То есть вы можете довольно точно измерить массу черной дыры, единственный неизвестный параметр это под каким углом к вам расположена орбита.

Но тем не менее у нас нет окончательной уверенности, что там именно чёрная дыра.

### 9.2.1. Рентгеновский барстер

Есть более надёжное, более иллюстративное проявление того, что у некоторых объектов нет поверхности. В случае нейтронных звезд мы знаем источники, которые называются рентгеновские бартеры - это двойная система с нейтронной звездой. Нормальная звезда маломассивная, вещество с неё перетекает на нейтронную, мы видим источник в процессе аккреции. Но самое главное, что вещество накапливается на поверхности нейтронной звезды, растёт плотность и температура и при достижении критической температуры и плотности начинается термоядерная реакция, она быстро охватывает всю звезду и происходит мощная вспышка. Оболочка сбрасывается, а дальше процесс повторяется. Вы выведете периодически вспыхи-

вающий источник и есть копия этих систем, где все тоже самое, только вспышек нет.

Объекты с черным дырам являются именно такими системами, отсутствие феномена рентгеновского бартера в таких объектах является сильным аргументом в пользу того, что там нет поверхности, то есть не происходит накопление вещества.

Одна из самых достоверных - это черная дыра в центре нашей галактики (рис. 114).

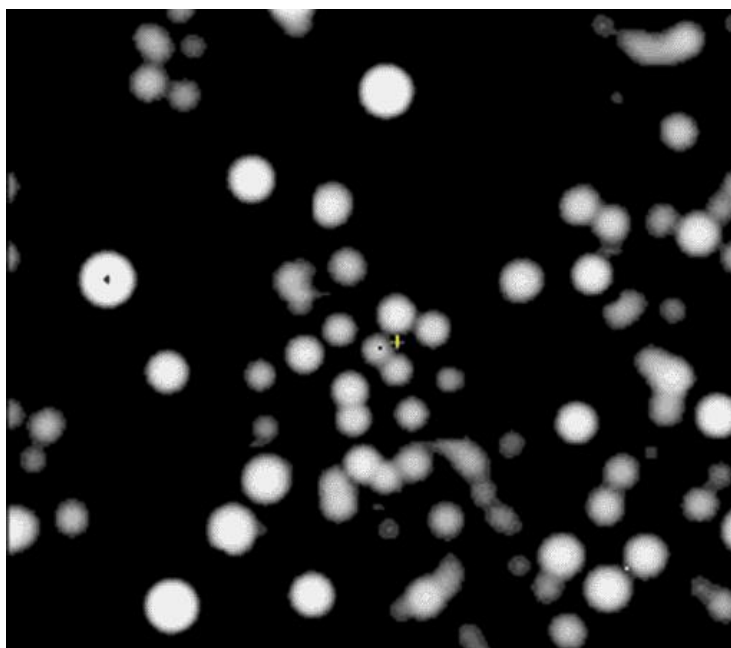


Рис. 114. SGR A\*

Оценка массы даёт примерно 4000000 масс Солнца с достаточно высокой точностью. Самая большая неопределенность это расстояние до центра Галактики. Черная дыра в центре нашей галактики очень не активна. Некоторое время назад, примерно 350 лет назад, наша чёрная дыра было гораздо активнее, произошла мощная вспышка и излучение пошло в разные стороны и излучение дошло до облака и произошла накачка энергии, излучение черной дыры было закачено в облако и сейчас мы видим как облако отдаёт это излучение (рис. 115).

Чёрная дыра в центре нашей галактики не всегда была такой спокойной, как сейчас, в прошлом мы явно видим примеры очень мощных вспышек этой черной дыры. Сейчас вспышки более мелкие, они наблюдаются довольно часто вспышки, вспышки происходит примерно раз в день.

Обычные чёрные дыры мы видим благодаря аккреции. Это может быть в двойной системе, если есть звезда-сосед, вещество с которой течёт на чёрную дыру, было бы интересно увидеть одиночную чёрную дыру, поскольку все-таки большинство черных дыр звездных масс - это одиночные объекты и есть два способа увидеть черную дыру:

#### 1) Аккреция

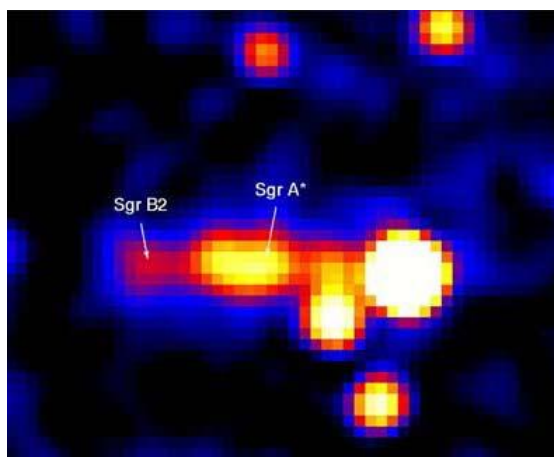


Рис. 115.

## 2) Микролинзирование

Идея микролинзирования очень простая: массивные тела искажают пространство вокруг себя, соответственно если наблюдатель наблюдает какую-нибудь звезду далекую и между нами и звездой пролетает массивный объект, он искажает пространство вокруг себя, свет идет по искривленным траектории и гравитационная линза всегда работает как собирающая линза. Мы видим рост блеска этой звезды, а потом спадания и если это просто это просто точечный объект, то рост и спад будут абсолютно симметричны, причем в разных спектральных диапазонах.

Есть ещё другой вид микролинзирования. Кроме того, что линза увеличивает блеск источника, она ещё его смещает.

## 9.3. Сверхмассивные черные дыры в центрах галактики

В центральной части Галактики M31 (Туманность Андромеды) есть точечный источник и можно попробовать оценить массу этой черной дыры. Оценки разнятся от нескольких десятков миллионов масс Солнца до двух сотен миллионов масс Солнца.

Полная светимость чёрной дыры в M31 гораздо ниже эддингтоновской.

Определение масс черных дыр

- 1) Измерение орбит звезд и мазерных источников
- 2) Кинематика газа
- 3) Профиль звездной плотности
- 4) Реверберационное картирование

Можно дать верхний предел на массу, исходя из того, что светимость не превосходит критическую (эддингтоновскую).

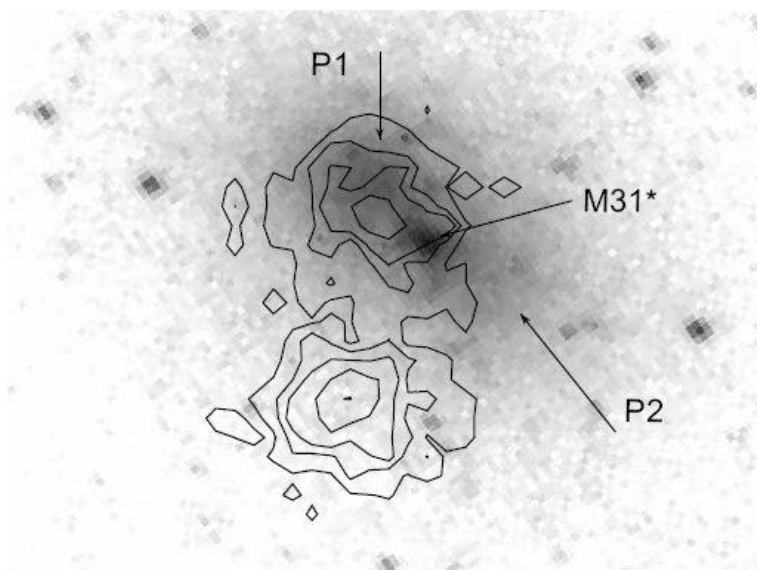


Рис. 116. M31

### 9.3.1. Мазеры

Самые точные способы возникают, если мы видим как что-то вращается вокруг черной дыры.

В межзвездной среде возникают мазерные источники - это когерентные источники миллиметрового излучения и если вы наблюдаете мазеры - это очень хорошо, потому что вы наблюдаете очень узкую спектральную линию и это позволяет вам измерить скорость движения объекта с фантастической точностью.

Наблюдая движение мазерных источников в галактике NGC 4258, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

### 9.3.2. Кинематика газа

Иногда мы видим отдельные объекты, как случае мазеров, иногда просто видим как вращается газ, как вращается газовый диск. Если вещество движется в нашу сторону, то за счет эффекта Доплера, оно синее, все сдвигается в синюю часть спектра.

И вы можете померить как по галактике меняется скорость движения вещества.

Для M87 скорости газа измерены внутри одной миллисекунды дуги (5pc). Масса  $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$ . Одна из самых тяжелых черных дыр

### 9.3.3. Соотношение между массами черной дыры и балджа

Масса черной дыры коррелирует со свойствами галактики. У Галактики есть диск и есть центральная сферическая часть (балдж). Наблюдения показали, что масса балджа галактики очень хорошо коррелирует с массой чёрной дыры, черная дыра в центре балджа, и скорее всего это объясняется просто общей историей

формирования.

Поэтому возникает корреляция (рис. 117).

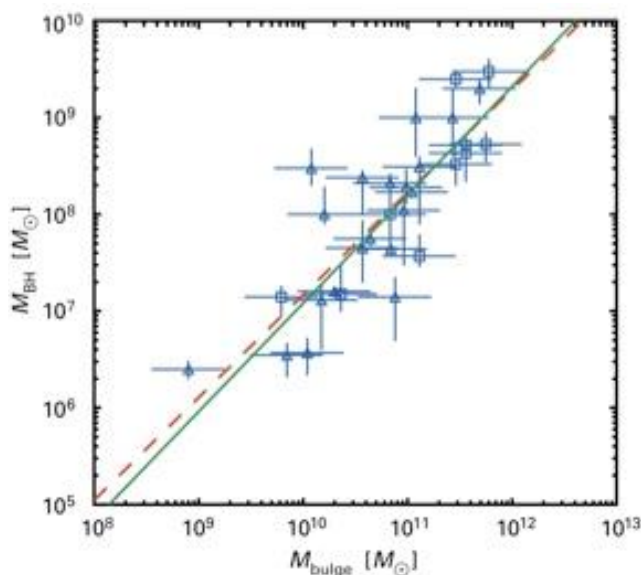


Рис. 117.

Откуда берутся сверхмассивные черные дыры?

Галактики образуются в результате скупивания протогалактических гала, содержащих темное вещество и газ, и чёрная дыра потихоньку оседает в центре этой структуры.

Чем массивнее начальная зародышевая чёрная дыра, тем быстрее будет идти рост массы и самый надежный способ получить первые чёрные дыры - это из самых первых звезд.

Чёрные дыры - это продукт космической эволюции, когда первичные неоднородности плотности, под действием гравитации начинают расти, формируются скопления галактик.

В процессе роста структуры происходят многочисленные слияния «строительных блоков». Каждый из блоков может иметь внутричерную дыру. После слияния черная дыра медленно движется к центру новой структуры. Формирование крупных галактик заканчивается на  $z \approx 2$ , после этого происходит только поглощение небольших спутников.

В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

Еще одна интересная форма активности черных дыр связана с их мощным гравитационным полем. При приближении объекта к черной дыре, возникают приливные силы, которые стремятся его разорвать. Сверхмассивные черные дыры могут разрывать не слишком компактные звезды, они легко разрывают красные гиганты. В центре довольно сложная структура сингулярности.

Можно увидеть то, что называют тенью чёрной дыры. Если это просто чёрная дыра на фоне чёрного неба, то никакой тени не будет. Но если чёрная дыра в



галактическом центре, она окружена излучающей областью и в этом смысле мы видим черную дыру на фоне излучения.

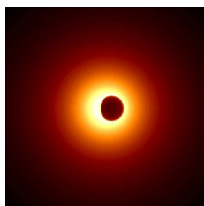


Рис. 118. Тень черной дыры

В случае SGR A\* есть ещё один аргумент в пользу того, что там именно чёрная дыра. Объект довольно близкий и мы видим сколько вещества туда течёт и мы можем посмотреть сколько энергии выделяется в потоке, наблюдения показывают, что как минимум 99,6% энергии выделяется в потоке, а не при ударе, то есть удар мы действительно не видим.

В норме свет идет по прямой, но вблизи чёрной дыры, за счет искривления пространства, свет пойдёт изогнутой траекторией задняя часть диска будет к вам визуально поднята.

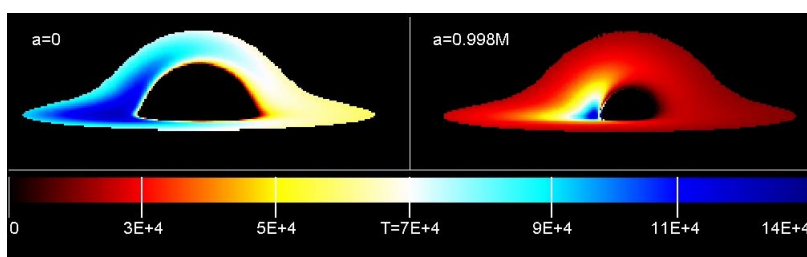


Рис. 119. Диски вокруг черных дыр

Диск вращается с большой скоростью естественно и возникает мощный эффект Доплера: та часть диска, которая движется к вам сдвинута в синюю сторону спектра. Меняется распределение температуры. Есть еще один эффект гравитационного красного смещения: чем ближе к черной дыре испущен свет, тем более красным он будет.

## Лекция 10. Структура галактик.

### 10.1. Млечный путь

То, что мы живём в большой звездной системе стало ясно достаточно давно. С тех пор как люди начали догадываться, что млечный путь - это скопление звезд, тогда сразу ясно, что есть на небе полоса, которая несимметрична, которая сгущается в сторону созвездия Стрельца.

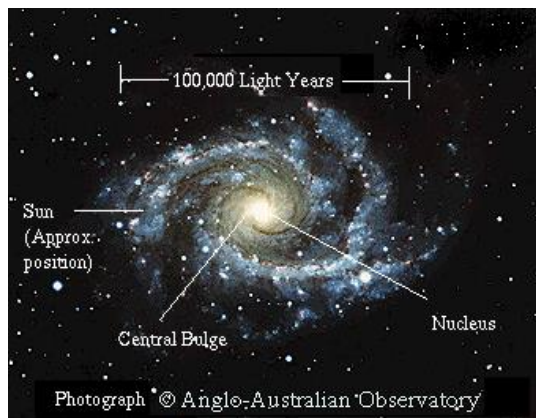


Рис. 120. Млечный путь

Мы находимся в плоскости Галактики, в Галактике много пыли и изнутри понять структуру Галактики довольно трудно.

В нашей Галактике выделяется центральная часть (балдж), которая состоит из более старых звезд, есть диск который мы видим и в этом диске есть спиральные ветви. Солнце находится относительно далеко от центра.

Размер Галактики около 100000 световых лет, естественно у Галактики нет резкой границы, она постепенно сходит на нет. Звезды в диске распределены по экспоненциальному закону.

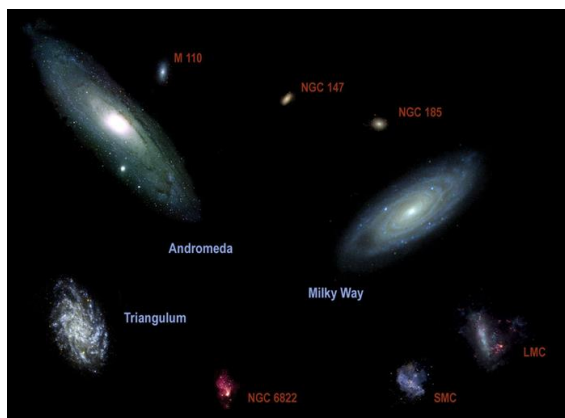


Рис. 121.

Наша галактика входит в небольшую группу (рис. 121), в которую, кроме нашей Галактики, входят Туманность Андромеды (Галактика м31) - это Галактика, похо-

жая на нашу и сравнивая по всем основным параметрам, Галактика в треугольнике М33 и также входит большое количество карликовых галактик разных типов, самыми известными являются большое и малое магеллановы облака, которые являются относительно близкими и для карликов относительно крупными спутниками нашей Галактики.

До туманности Андромеда примерно 777 килопарсек.

Галактики упакованы плотнее, чем звёзды.

Звезды в Галактике ведут себя как пыль, звезды друг с другом взаимодействуют слабо. Они очень редко сталкиваются друг с другом, поскольку разбросаны очень редко и скорость кругового движения в галактике достаточно велика  $>220$  км/с.

Есть объекты, которые концентрируются к спиральным рукавам. Полное число галактик достаточно крупных в видимой части Вселенной можно оценить и получится число примерно  $10^{11}$ . Находясь внутри нашей галактики, мы не можем её изучать, но видим много похожих галактик и мы знаем, что есть объекты, который очень хорошо концентрируется к спиральным рукавам. В первую очередь выделяются большие облака водорода и соответственно наблюдая такие облака водорода в нашей Галактике (например, в радиодиапазоне, где Галактика более прозрачна) и измеряя расстояние до этих облаков мы можем построить карту (рис. 122).

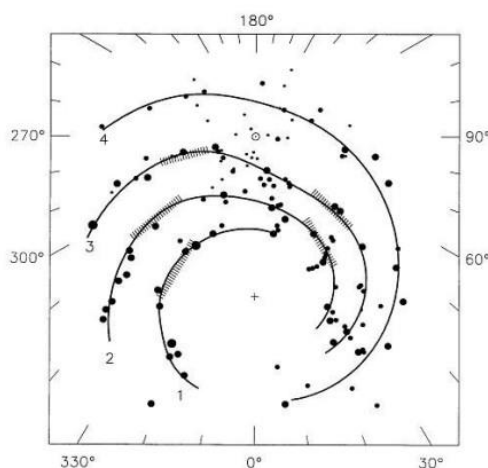


Рис. 122.

Видно, что облака концентрируется к неким кривым, которые по всей видимости являются мощными спиральными рукавами.

Рукава - это места для звезды рождаются и где находятся самые яркие звезды, которые долго не живут. Скорость движения спирального узора по галактике отличается от скорости движения звезд. Звезды летают сами по себе в галактическом потенциале. Газ и звезды двигаются сквозь рукав и происходит следующее: газ втекает в рукав, здесь газ поджимается, в нем запускается процесс образования звезд.

Массивная звезда не успевает за время своей жизни не то, что сделать круг вокруг Галактики, она успевает пройти несколько процентов от этой окружности, буквально несколько градусов и взорвётся, вспыхнет как сверхновая, превратится в нейтронную звезду или может возникнуть чёрная дыра.

Маломассивные звезды успевают за время своей жизни сделать много оборотов вокруг центра Галактики и поэтому маломассивные звезды довольно равномерно размазаны.

Три основные части Галактики: балдж, диск и гало. В галактическом диске много газа и пыли, поэтому у нас есть диск звезды. Облака звезд очень плохо остывают, звезда, очень плохо теряет энергию своего движения и угловой момент, а газ очень хорошо может остывать. Если у вас втекает газ в Галактику или в начале было вращающееся газовое облако, то в процессе эволюции облако очень легко сжаться в диск. Новые поколения звезд формируются из этого газа в плоскости диска, поэтому возникают дисковые Галактики.

Нейтронные звезды неплохо концентрируются к спиральным рукавам Галактики. По молодым пульсарам можно изучать структуру Галактики, но более или менее вблизи нас. Довольно хорошо мы можем изучать структуру спиральных рукавов в области с характерным радиусом несколько килопарсек вокруг нас.

Галактики бывают разные. Наша галактика дисковая, спиральная. Делят Галактики на дисковые, эллиптические и неправильные - это 3 самых основных подразделения.

В эллиптических галактиках мало газа, который может превращаться в звезды, у них не выделяется это дисковая структура, новое поколение звезд практически не формируются. Есть вариант дисковых галактик, который называется линзовидный, в них не виден спиральный узор, в них, как правило, не идет активное образование звезд, но это тоже дисковые Галактики, диск там тоже выделяется. Есть неправильные Галактики, неправильные Галактики могут быть по нескольким причинам: из-за взаимодействия, не хватки массы и другие.

Мир галактик был открыт относительно недавно, а именно менее 100 лет назад.

Давайте оценим какую звездную величину нужно было Хабблу увидеть, для того чтобы определить расстояние до туманности Андромеды. Расстояние до туманности Андромеды:

$$D = 778 \text{ kpc} \simeq 2.5 \cdot 10^{24} \text{ см}$$

Светимость цефеид:

$$L_c = 10^5 L_\odot$$

Абсолютная звездная величина Солнца:  $M_\odot \simeq 5^m$

Абсолютная звездная величина, которую звезда имела если бы мы наблюдали её с расстояния 10 парсек:

$$M \approx -7.5^m$$

Звездная величина цефеиды в m31:

$$m_c \approx 17^m$$

Это довольно слабый объект.

На рисунке 123 символами отмечены цефеиды.

Можем оценить звездную величину самой Галактики M31.

Число звезд в туманности Андромеды:  $N \sim 3 \cdot 10^{11}$

Средняя светимость звезды:  $\langle L \rangle \sim 0.1 L_\odot$

Светимость Галактики:  $L_{M31} \simeq 3 \cdot 10^{10} L_\odot$

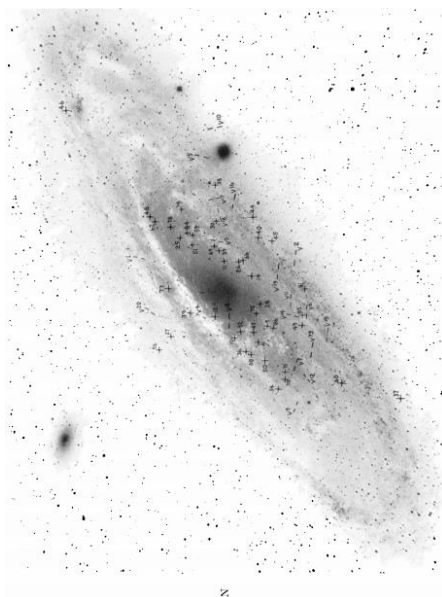


Рис. 123. Оригинальный снимки Хаббла, Галактика M31

Абсолютная звездная величина Галактики:  $M \simeq -21.5^m$

Видимая звездная величина:  $m = M - 2.5 \lg \frac{f(778 \text{ kpc})}{f(10 \text{ pc})} \approx 4^m$

В годы 20-го века люди поняли, что есть мир галактик и благодаря космическому телескопу имени Хаббла открылось глубокое поле Хаббла - очень маленький кусочек неба, на котором видно огромное количество галактик и звезд практически нет.

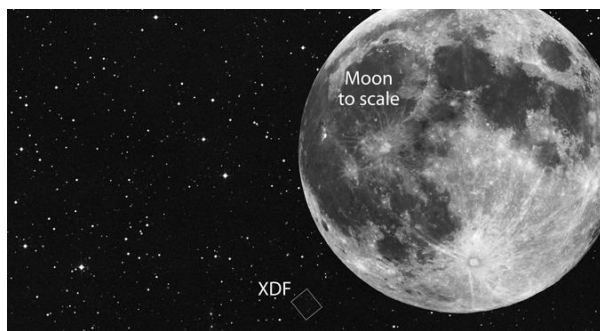


Рис. 124. В масштабе. Луна и глубокое поле Хаббла

## 10.2. Квазары

Изучение мира Галактик привело к нескольким радостным и неожиданным открытиям, одним из таких открытий были квазары. Когда люди начали наблюдать в радиодиапазоне, они обнаружили большое количество радиоисточников, посмотрели, что там видно с помощью оптических телескопов, увидели в некоторых случаях квазизвездный объект. Т. е. что-то, что на снимке выглядит как звезда, но есть подозрение, что звездой это не является.



Удалось идентифицировать квазары Мартину Шмидту в шестьдесят третьем году, он смог отождествить линии в спектре квазаров, сказав что они сдвинуты в красную сторону на довольно заметно величину, процентов на 25 в случае квазара 3C273.

И если предположить, что это космологическое красное смещение, красное смещение, возникающие из-за того, что расширяется Вселенная, то немедленно можно получить расстояние до объекта (2.4 млрд св. лет).

Если посчитать его светимость, то светимость оказалось больше светимости типичной крупной галактики, а при этом объект выглядит, как точечный объект.

Чем важно открытие квазаров?

Во-первых, квазары раздвинули границы наблюдаемого мира: они были дальше известных тогда галактик.

Во-вторых, возникла необходимость объяснять, как же они работают.

Это дало дорогу концепции сверхмассивных черных дыр.

### 10.3. Пузыри Ферми

Черная дыра в центре нашей галактики по всей видимости, когда-то была гораздо активнее и сейчас мы видим реликтовую структуру, которая называется пузыри Ферми (рис. 125) - это гамма-излучение. Есть два пузыря, которые центрированы на центр галактики.

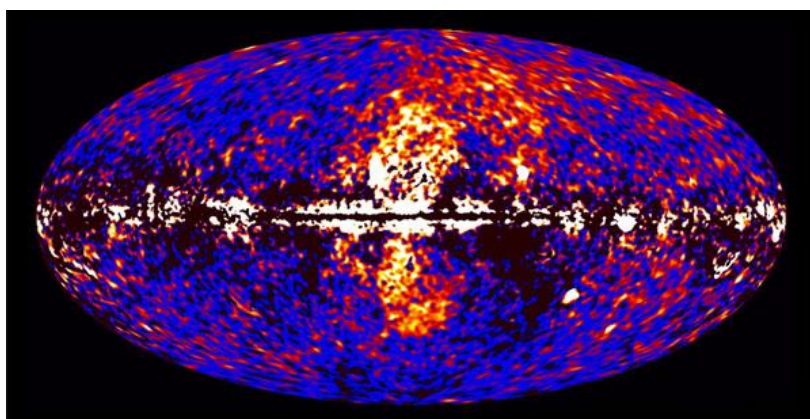


Рис. 125.

Есть разные гипотезы, что является причиной появления таких пузырей, но как бы то ни было, это связано с какой-то активностью в центре нашей галактики: или несколько десятков миллионов лет назад произошла мощная вспышка звездообразования, что менее вероятно, или, что более вероятно, несколько десятков миллионов лет назад черная дыра в центре нашей галактики перешла в активное состояние и ее активность привела к выдуванию двух пузырей.

Активных ядер галактик известно много разных типов: квазары и блазары, радиогалактики разных типов и заметную часть этого многообразия можно объяснять в рамках единой модели, когда аккрецирующая чёрная дыра окружена аккреционным диском, который погружен в полевой тор, выбрасываются две струи и в

зависимости от ориентации всей этой системы относительно луча зрения, вы видите или мощный блазар, если смотрите прямо в джет или радиогалактику, если смотрите сбоку, когда сама чёрная дыра закрыта и вы видите только радиоизлучения от джета.

Мы видим как формируются галактики в глубокого поле хаббла видно, что формы галактик сильно отличается от регулярной, который мы наблюдаем в вокруг. Мы видим такими какими они были примерно 10 миллиардов лет назад, то есть в этой стадии, когда Галактики еще активно продолжают формироваться.

Видимая форма отражает не распределение звезд, а отражает распределение относительно молодых, но просто короткоживущих очень массивных звезд большой светимости, т. е. мы видим области звездообразования

Мы видим как формируются скопления галактик, мы вдали не видим скопления галактик.

Что мы подразумеваем под составом Вселенной. У нас есть видимая часть Вселенной, определяемая возрастом Вселенной и скоростью света, мы можем определить распределение плотности в ней. Мы видим, что Вселенная однородна и изотропна. Обычное вещество (это в первую очередь барионы и в первую очередь вообще водород и гелий) формирует примерно 5% от полной массы Вселенной. Нейтрино вносят очень маленький вклад, потому что нейтрино легкие частицы, а большая часть вселенной Вселенная состоит из чего-то, что нам в деталях неизвестно, мы знаем глобальные, интегральные свойства этого и соответственно одну часть (четверть от полной плотности Вселенной) мы называем темным веществом или тёмной материи, и темная энергия, которая отвечает сейчас в наше время за 70% полной плотности.

Темное вещество и темная энергия остаются гипотезами.

## 10.4. Темное вещество

Часто мы видим какие-то отклонения в поведении объектов, которые хочется объяснить гравитацией невидимого объекта.

Историю современного темного вещества правильно вести от работ Фрица Цвикки, который наблюдал галактики. В скоплениях галактик по Доплеру можно измерить скорость движения Галактик в скоплениях. Скорость разлета скопления оказывалась очень маленькая, что уже противоречило космологическим данным. Значит всё-таки надо сказать, что скопление это устойчивые образования и гравитация удерживает Галактики от разлета. Значит мы можем определить полную массу скопления и когда Цвикки сделал соответствующие расчеты, то он с удивлением обнаружил, что звездной массы сильно не хватает, не хватает там минимум раз в 10 для объяснения поведения галактик.

## Вращение галактик

Кривые вращения (рис. 126).

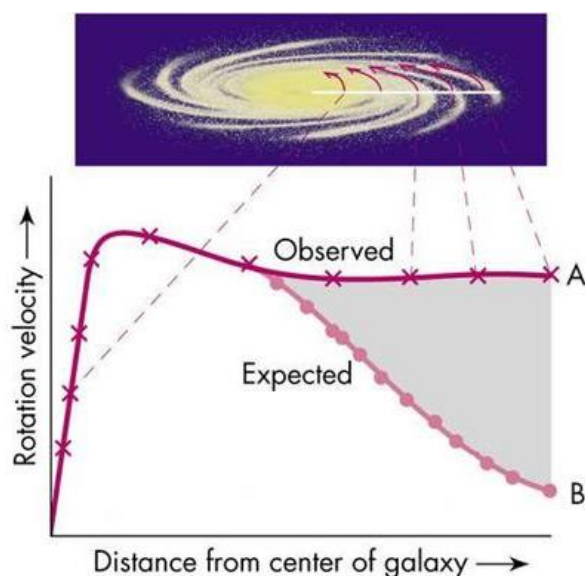


Рис. 126.

Для простоты говорим о дисковых галактиках и скорости движения в диске.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

В центре звезд практически нет. В начале нарастает масса, набирает основную массу, дальше у вас новых звезд не добавляется. Звёздная масса уже спадает и вы ожидали бы, что скорость вращения звезд в галактике будет уменьшаться, а это не наблюдается. Вместо ожидаемого спада на больших расстояниях, вы видите, что у многих галактик скорость не меняется. Отсутствие спада вы можете объяснить только тем только, что на самом деле полная масса продолжает расти дальше.

Нужно какое-то темное вещество.

Есть Галактики, которые ведут себя так, как должны вести себя Галактики без темного вещества.

Большой комплекс космологических данных требует, по своим совершенно независимым причинам, введения дополнительного темного вещества.

Есть области (рис. 84), где мы не рассчитываем увидеть никаких отдельных объектов, дальше мы видим реликтовое излучения. В истории Вселенной был такой эпизод: все начинается из горячего, плотного состояния. В горячем, плотном состоянии никакой сложной структуры существовать не может.

## Лекция 11. Вселенная и космология.

### 11.1. Реликтовое излучение

У нас есть много данных, которые позволяют нам очень близко подойти к моменту большого взрыва и то, что ближе всего и что непосредственно связано с наблюдаемыми данными - это реликтовое излучение и первичный нуклеосинтез. Имея протоны и нейтроны, вы создаете более тяжелые элементы, естественно, это термоядерная реакция, не требует большой температуры и плотности и, соответственно, если у вас была большая температура, то у вас все было погружено в большую "баню" фотонов, и впоследствии когда вещество стало прозрачным эти фотоны остались, за счет расширения Вселенной их длины волн увеличились и соответственно, зная температуру в момент первичного нуклеосинтеза, вы можете посчитать какую температуру имеет реликтовое излучение в наши дни.

Реликтовое излучение было обнаружено, как шум в радио эфире. Максимум этого излучения приходится на миллиметровую область, это излучение с температурой 3 Кельвина.

Это самые древние фотоны, они освобождаются спустя примерно 350000 лет после начала расширения, после большого взрыва и это самая древняя прямая информация, которая у нас есть.

Карта реликтового излучения доносит нам информацию о том, каковы были физические свойства у Вселенной спустя всего лишь 350, 360, 380 тысяч лет после большого взрыва.

Почему Вселенная резко становится прозрачной? По мере своего расширения, остывания, уменьшения плотности, она из полностью ионизированного состояния переходит в состояние, когда водород рекомбинирует.

Реликтовое излучение принесло нам много информации о глобальных свойствах Вселенной.

Анализ данных по реликовому излучению позволяет определить геометрию Вселенной, её кривизну. Можно говорить о топологии Вселенной, т. е. имеет ли Вселенная какую-то форму. Ответ мы не знаем, у нас нет никаких прямых данных о топологии. А кривизна это локальная характеристика, ее можно измерить, где угодно.

Есть три типа кривизны: это положительная кривизна, отрицательная кривизна и промежуточный случай между ним - плоская Вселенная.

Средняя температура по небу реликтового излучения 272 Кельвина, она имеет очень небольшой уровень флуктуаций  $10^{-5}$ . Размеры этих флуктуаций определяются условиями в ранней Вселенной, которые мы можем достаточно надежно рассчитать. То есть мы знаем как должна выглядеть карта реликтового излучения, по крайней мере, в смысле статистических свойств самых заметных флуктуаций. И потом мы можем сравнить данные наблюдений, мы знаем какого углового размера должны быть синие красные пятнышки и мы знаем, что мы видим и в результате сравнения мы получаем что Вселенная плоская. То есть это означает, что при передаче изображения во Вселенной, оно не искажается, но не искажается с точностью современных измерений в 1%.

## 11.2. Первичный нуклеосинтез

Данные по реликтовому излучению показывают Вселенная - плоская. Это означает, что плотность равна некому критическому значению. Плотность вселенной складывается, естественно, из разных компонент и до единицы при правильной нормировке, она дополняется кривизной Вселенной. Эта плотность, связанная с кривизной Вселенной, с точностью порядка 1% сейчас равна нулю. Это очень важный результат, то есть плотность вселенной равна некоторому критическому значению.

Из чего Вселенная может состоять и самое банальное - это обычное вещество, то которое есть в таблице Менделеева. Его называют барионным веществом, и поскольку была эпоха первичного нуклеосинтеза, мы можем довольно точно посчитать сколько было барионов.

Вселенная, действительно, состоит в основном из водорода и гелия, важно что немного синтезируется лития, немного синтезируется дейтерия, бериллия, и эти элементы хороши тем, что они не синтезируются в звёздах. В ранней Вселенной синтез не шёл дальше, очень трудно его вести вот по этим доуглеродным элементам. Измеряя современное количество лития, гелия-3, дейтерия, гелия-4, мы можем определить барионную плотность Вселенной. Она оказывается малой, то есть она оказывается сильно недостаточной для того, чтобы объяснить данные по реликтовому излучению.

Оказывается, что обычного вещества не хватает для объяснения, не хватает сильно, не хватает 96%, поэтому хочется добавить ещё какие-то составляющие и как раз одно из таких составляющих является темное вещество. В зависимости от того, что вы добавите по-разному будет вести себя Вселенная.

Во Вселенной кроме обычного вещества и темного вещества, есть другая по крайней мере одна важная составляющая - тёмная энергия.

Данные по реликтовому излучению и данные по нуклеосинтезу можно приводить в какое-то разумное согласие друг с другом, только если мы добавляем новую составляющую Вселенной, какой-то вид вещества, который своей гравитацией тормозит расширение, например, но которое не является барионами и не проявляет себя в электромагнитном взаимодействии.

Мы можем определить распределение в массовых скоплениях, например, по гравитационному линзированию.

В скоплениях есть составляющая, которая обладает такими свойствами:

1. это какое-то вещество, потому что оно собирается в кучу,
2. это вещество участвует в гравитационном взаимодействии, однако мы его не видим, по крайней мере в наблюдениях оно не проявляет себя в электромагнитном диапазоне,
3. оно плохо взаимодействует с газом и само с собой.

Таким образом у нас есть, пусть немногочисленные, но довольно прямые свидетельства того, что мы не можем описать комплекс наблюдательных данных без введения какого-то нового довольно необычного компонента, потому что чтобы удовлетворить всем этим требованиям, нужно постулировать существование ещё какого-то типа элементарных частиц.

Мы помним, что обычное вещество это всего лишь 4% от полной плотности Вселенной. Темного вещества нужно не оставшиеся 96% , но тем не менее нужно в раз



5-6 больше, чем барионного вещества и поэтому в крупномасштабном смысле именно темное вещество формирует структуру Вселенной. В галактике, в скоплениях галактик, в сверхскоплениях галактик его больше, поэтому оно диктует обычному веществу куда двигаться.

Скорее всего маленькие неоднородности в плотности формировались на так называемой стадии инфляции из-за квантовых процессов в очень-очень-очень ранней Вселенной.

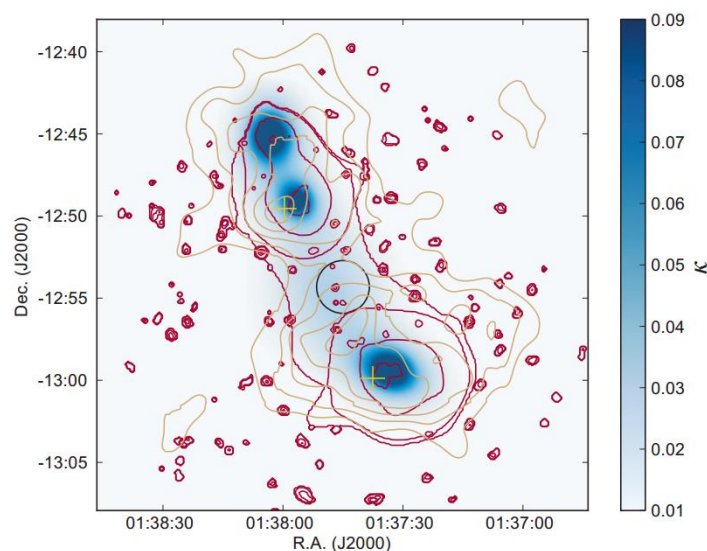


Рис. 127.

На рисунке 127 мы видим скопление галактик, а красным нарисовано распределение массы в этих скоплениях и между ними. Снова распределение массы получено слабым гравитационным линзированием и видно, что между скоплениями массы довольно много. Там не видно никаких галактик, там не видно никакого газа, поэтому единственное объяснение для массы между скоплениями, это сказать, что все-таки мы видим существование волокна, доминированное темным веществом, как это и предсказывает стандартная космологическая модель.

Потихоньку набираются все новые аргументы в пользу того, что существует некий вид элементарных частиц. Что мы знаем о них? Мы знаем, что эти частицы - не частицы стандартной модели. Это не могут быть барионы. Темное вещество не может состоять из кварков, потому что иначе оно проявило бы себя в первичном нуклеосинтезе. Например, этими частицами могут быть нейтрино или аксионы. И то и другое не входят в стандартную модель. И то и другое претендует на роль частиц темного вещества. Есть прямые физические способы поиска, например, в подземной лаборатории в Италии. Подземный эксперимент, чтобы избавиться от фона, от космических лучей и люди пытаются увидеть все-таки взаимодействие частиц темного вещества с обычным веществом, это взаимодействие происходит слабо, что означает что вам нужно очень много пролетов темного вещества сквозь ваш образец, сквозь рабочее тело вашего детектора, для того чтобы было какое-то значимое количество событий. И соответственно люди борются с шумами, повышают чувствительность, увеличивают размеры детекторов, но пока ничего не увидели.

К сожалению из теоретических каких-то соображений очень трудно дать хорошие ограничения.

Есть другой способ - астрофизический. Во многих моделях частицы вещества имеют частицы античастицы, происходит аннигиляция и в результате аннигиляции рождаются пары нормальных частиц-античастиц и рождается нормальное электромагнитное излучение, соответственно, пытаются поймать этот сигнал. Частицы темного вещества скорее всего достаточно массивные, поэтому в результате их аннигиляции должно генерироваться гамма-излучение и люди ищут лишний гамма-сигнал от тех областей, где как мы думаем темного вещества больше.

В основном сейчас эти поиски ведутся с помощью спутника Ферми.

### Темное вещество в галактиках

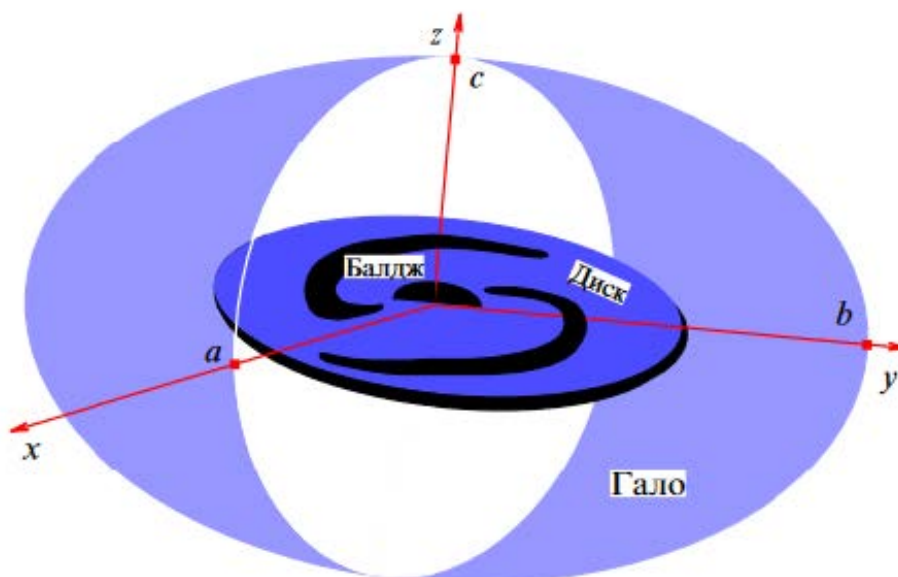


Рис. 128. Структура галактики и темное вещество

Галактики растут в результате процесса иерархического сгущивания. В начале были неоднородности плотности у вселенной, они начинают расти, первыми дорастают маленькие, то есть первыми образуются облака темного вещества с массой около миллиона масс Солнца, примерно 100000 масс газа, и там образуются звезды самого первого поколения, звезды популяции III/

Потом эти образования складываются в более крупные образования, и так возникают Галактики. На каком-то этапе Галактики сливаются с Галактиками и, если в итоге мы имеем дисковую галактику, то структура выглядит так: в центре есть балдж, есть диск и все это погружено в гало темного вещества, который имеет квазисферическую форму, потому что оно сформировалось в результате слияния многих Галакти.

Важное свойство темного вещества: оно плохо взаимодействует с обычным веществом и само собой. Это означает, что вы не можете сделать компактную структуру. Если у вас есть облако темного вещества, то оно очень плохо остывает, темное вещество избавляться от орбитального момента быстро не может. Гала темного вещества очень плохо релаксируют, они долго приходят к какой-то более симметричной структуре.

Современные вычисления учитывают роль обычного барионного вещества. На

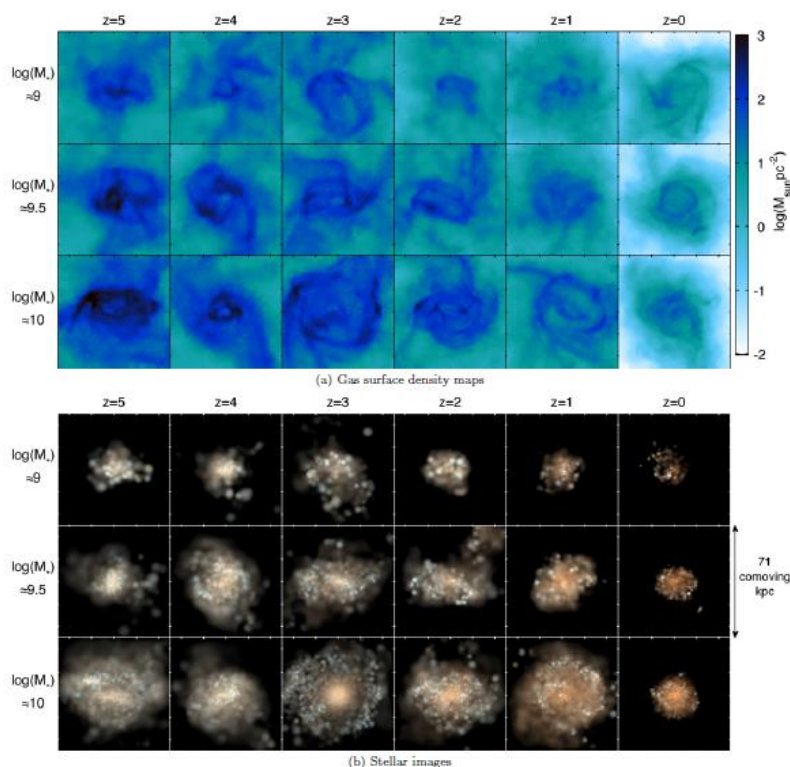


Рис. 129.

рисунке 129 показано как эволюционирует галактика от красного смещения 5 до красного смещения 0, то есть до нашего момента времени. Здесь посчитано уже для галактик реальной формы, которые нельзя посчитать без участия барионного вещества. Но стартуете вы с ситуации, где доминирует именно темное вещество.

Важно понимать, что именно благодаря тёмному веществу эта структура начинает расти.

Галактики, полученные в результате численного моделирования, неотличимы от наблюдаемых. Исследуя «компьютерные галактики», можно проследить эволюцию наблюдаемых галактик определенных типов (рис. 130).

По данным по реликтовому излучению, мы знаем глобальные геометрические параметры Вселенную, кривизну. Мы знаем, что Вселенная плоская, то есть плотность Вселенной равна некоторому критическому значению. От этого критического значения барионное вещество составляет 4-5%, то есть 95-96 - это что-то другое, не барионное вещество. Сейчас мы знаем, что это не все темное вещество, темное вещество не составляет 95% полной плотности Вселенной.

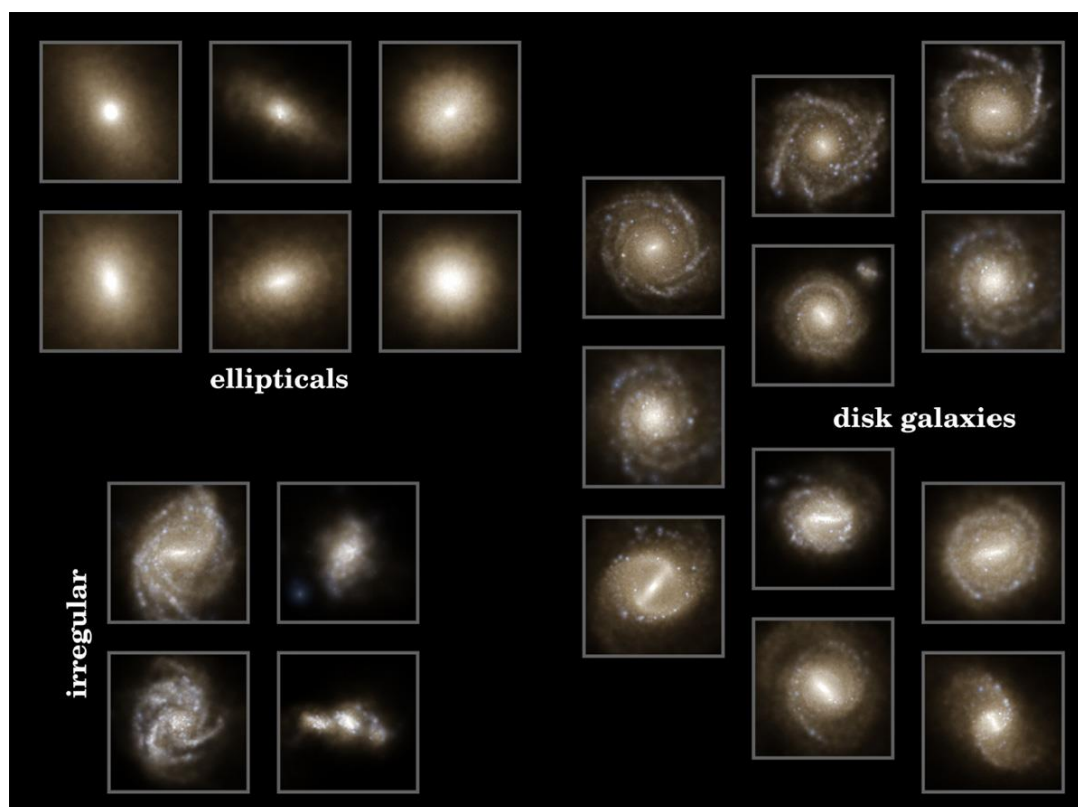


Рис. 130. Формирование Галактик

Темного вещества примерно в 5-6 раз больше, чем барионного. В современной картине, которая ещё может уточняться, темное вещество отвечает примерно за 25% полной плотности Вселенной.

Скелет Вселенной создается из темного вещества, не только потому что его больше, но ещё потому что оно раньше начало формировать структуру.

### Взаимодействующие Галактики

Галактики взаимодействуют друг с другом. Галактики действительно сливаются Галактики, в центре должна сидеть чёрная дыра, значит в итоге возникнет единая Галактика, в центре которой будет две черные дыры и, в ряде случаев, мы действительно видим такие пары чёрных дыр в центральных частях галактик.

На рисунке 131 мы видим две черные дыры, на каждую из них идёт аккреции вещества, поэтому они проявляют себя как яркие рентгеновские источники.

В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр. Для нейтронных звезд это сложно, т.к. мы недостаточно точно знаем EoS. Для черных дыр – потому что ОТО плохо поддается прямым численным расчетам. Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознавания слабых всплесков на фоне шумов.

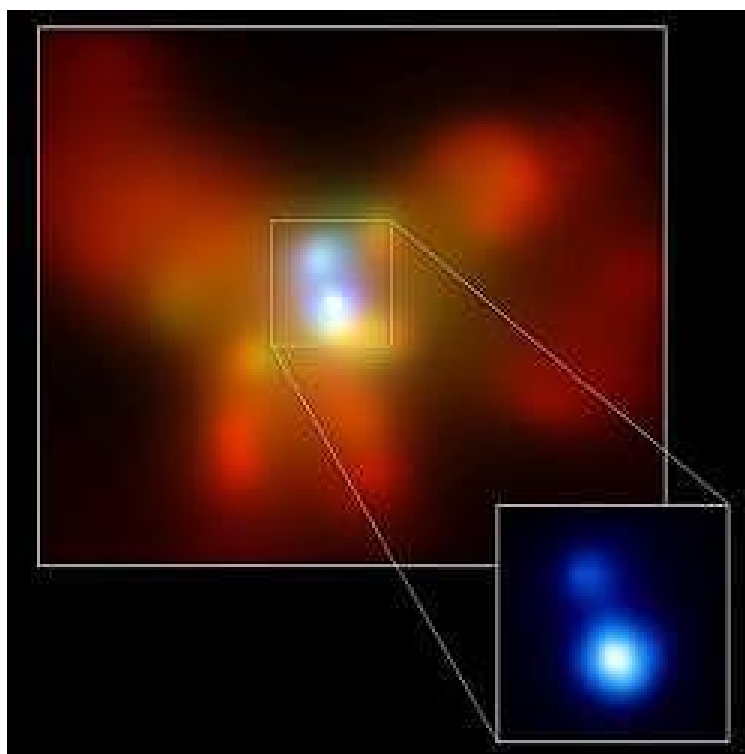


Рис. 131. Пример двойной черной дыры

### 11.3. Космология

У нас есть серьёзные наблюдательные данные в пользу того, что Вселенная действительно эволюционирует.

Мы на самом деле видим, что далекие Галактики выглядят не так, как Галактики вокруг нас. Там происходит много слияний.

Мы видим, как мир галактик меняется, естественно, мы не видим как он меняется на наших глазах, но мы можем смотреть на группы галактик, на разных расстояниях от нас, то есть заглядывать на разное время в прошлое и мы видим, как меняется эта картина, то есть мир галактик является эволюционирующим.

Мы видим скопления галактик и мы видим эпоху, когда скоплений галактик нет. Мы знаем карту распределения галактик в нашей окрестности (131).

Относительно недавно люди смогли восстановить поле скоростей для огромного количества крупных галактик в нашей большой окрестности. Мы можем посчитать, как растёт наше сверхскопление, которое получило название Ланиакея.

В волокнах, соединяющих скопления галактик, должен быть газ (134).

Мы видим химическую эволюцию, мы можем определять состав межзвездного газа, вокруг нас в близких галактиках газ имеет так называемый солнечный состав, где примерно 1.4 - 2% приходится на элементы тяжелее гелия. И наши расчеты показывают, что в начале не было этих тяжелых элементов. Мы можем искать и находить облака газа или звезды, которые имеют существенно другой состав.

Мы сказали, что есть реликтовое излучение и температура реликтового излучения меняется со временем, потому что расширяется Вселенная. Был фотон ре-



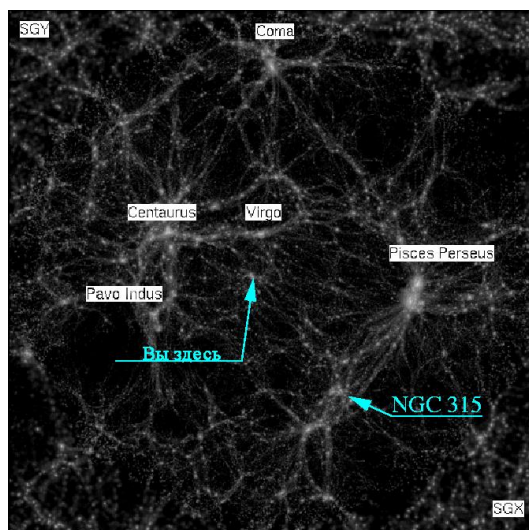


Рис. 132. Наши окрестности

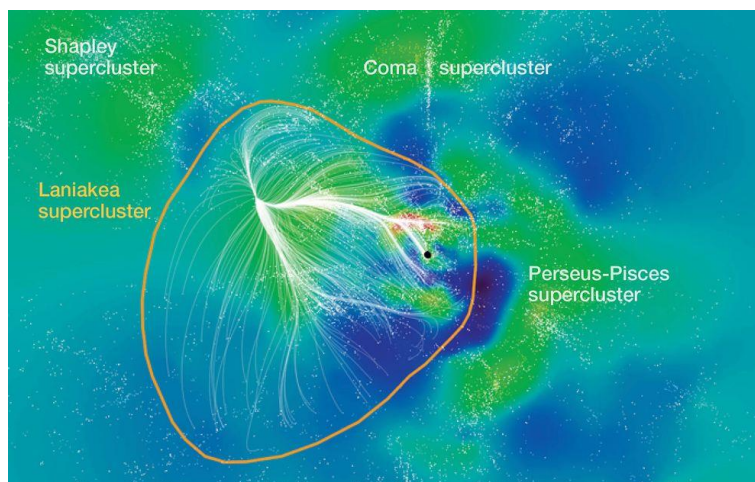


Рис. 133. Ланиакее

ликтового излучения, Вселенная расширяется, фотон растягивает, у него увеличивается длина волны, меняется температура реликта. Можно ли это измерить? Оказывается мы можем измерить температуру реликтового излучения по эффекту Сюняева-Зельдовича, по возбуждению линий.

Глядя на скопление галактик, вы будете видеть эффект, который называется эффектом Сюняева-Зельдовича. Реликтового излучения на нормальной длине волны становится меньше в направлении скоплений, но зато у вас появляется лишнее излучение, которое соответствуют этим нагретым фотонам и этот эффект можно измерить. Если мы знаем свойства скопления, а свойства скопления, как правило, мы знаем по рентгеновским наблюдениям, тогда мы сможем восстановить температуру реликтового излучения, в тот момент когда происходило взаимодействие. То есть если мы видим скопление на красном смещении  $z = 1$ , то мы измеряем температуру реликтового излучения примерно семь миллиардов лет назад.

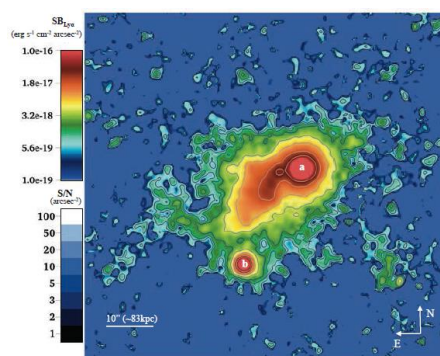


Рис. 134. Газовое волокно

Первым важным открытием, которое показало глобальную динамику Вселенной, было обнаружение расширения Вселенной, т. е. разбегание галактик.

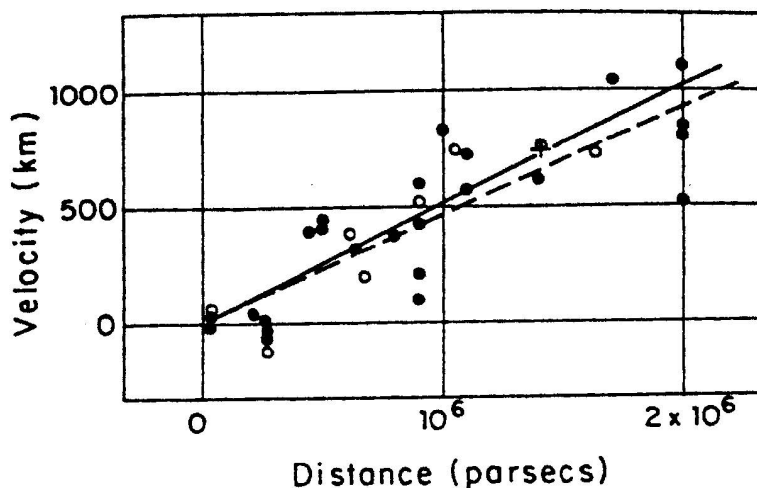


Рис. 135. Расширение Вселенной

Это первое изображение (рис. 135), которое показывает самый глобальный процесс, который есть во Вселенной.

Хаббл смело провёл через данные прямую линию, поэтому мы это теперь называем законом Хаббла, и это действительно правильно, современные данные на наблюдение подтверждает этот закон с совершенно фантастической точностью.

Чем дальше галактика – тем быстрее она удаляется. Центра расширения нет. Если мы перелетим в другое место, то картина расширения не изменится.

Мы видим вселенную расширяющейся, мы можем проэкстраполировать это назад и мы получим конечный возраст Вселенной. Существование конечного возраста Вселенной при конечной скорости распространения взаимодействия, скорости света, говорит нам то, что нам для наблюдений всегда доступна какая-то конечная область.

Мы должны судить о глобальных свойствах Вселенная, наблюдая заведомо маленькую ее часть. Соответственно, мы не знаем ответ на вопрос конечна ли Вселен-

ная. Из-за того, что нам доступна для наблюдения конечная область, мы не можем сделать никакого вывода о том конечная Вселенная или нет.

Нам научиться правильно считать время и расстояние, и в космологии возникает ряд особенностей, из-за того что происходит расширение.

У нас есть физическая реальное расстояние между объектами в момент испускания сигнала, у нас есть физическое расстояние между объектами сейчас, и расстояние это путь который проделал свет и все эти три расстояния не равны друг другу.

Расстояние, которое называют сопутствующим расстоянием, обозначим  $\chi$ . Сопутствующее расстояние соответствует тому, что Вселенная у нас расширяется физическое расстояние между расстоянием между галактиками не меняется, но мы отмечаем Галактики теми же самыми координатами, возникает сопутствующие координата.

Вводится собственное расстояние, обозначается  $d = a\chi$  и вычисляется через сопутствующее. У нас возникает очень важная величина  $a$  - это масштабный фактор.

Мы можем сказать, что масштабный Фактор в настоящий момент равен единице  $a(t_0) = 1$ . Тогда расстояние в настоящий момент:  $d(t_0) = a(t_0) \cdot \chi = \chi$ .

В будущем масштабный фактор будет больше, в прошлом масштабный фактор был меньше и, таким образом, видно, что собственное расстояние со временем естественно растет, потому что растёт масштабный фактор.

Для близких объектов собственное расстояние примерно пропорционально красному смещению.

Именно для собственного расстояния записывается Закон Хаббла и именно, потому что для близких объектов это расстояние примерно пропорционально красному смещению, Хаббл смог установить закон Хаббла.

Современный закон Хаббла:

$$v = H \cdot d \quad (54)$$

$v$  - скорость удаления Галактики

$H$  - постоянная Хаббла 72 км/с/Мпк

Этот линейный закон продолжается, куда угодно, пока Вселенная не закончится и скорость света не является пределом.

Постоянная Хаббла - это производная от масштабного фактора, деленная на масштабный фактор:

$$H = \frac{\dot{a}}{a} \quad (55)$$

Постоянная Хаббла характеризует темп расширения Вселенной.

Интервал:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dl^2 \quad (56)$$

Краткий вывод закона Хаббла

$$a^2(t) dl^2 = d^2$$

$$dd = a(t) dl$$

$$d = a(t) \int dl = a\chi$$

$$v = \frac{dd}{dt} = \left( \frac{da}{dt} \right) \chi = [(da/dt)/a] (a\chi) = H d$$

У нашей Вселенной может быть 3 три основных составляющих: релятивистское вещество, нерелятивистское вещество и вакуум. Количество частиц меняется как масштабный фактор в кубе.

## Лекция 12. Космология.

### 12.1. Фотометрическое расстояние. Угловое расстояние

Детали процесса зависят от того, чем Вселенная заполнена. Мы считаем, что плотность, в данный момент времени везде одинакова для любых составляющих Вселенной.

$$1 + z = \frac{a_0}{a} \quad (57)$$

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (58)$$

$z$  - красное смещение,

$a_0 = 1$  - современный масштабный фактор.

$1 + z$  это масштабный фактор.

Плотность обычного вещества падает как масштабный фактор в степени -3:  $a^{-3}$ , то есть у вас расширяется Вселенная и вы тоже самое вещество размазываете по большему объему.

Если вы смотрите на далекий объект, вы видите их в раннюю эпоху и, соответственно, там на большом красном смещении, плотность больше.

С расширением Вселенной вакуумный вклад не падает, вклад вещества падает как обратный куб масштабного фактора, вклад излучения падает как минус 4 степень масштабного фактора, поэтому во Вселенной можно выделять разные фазы, где доминируют в динамике Вселенной разные компоненты. Сейчас мы живем во Вселенной, которая ускоренно расширяется, потому что доминирует вакуумноподобное состояние. 7 млрд лет назад доминировало вещество, в очень ранней вселенной доминировало излучение.

### 12.2. Красное смещение

Далекая Галактика, которая в момент  $t_1$ , которому соответствует масштабный фактор  $a_1$ , испускает фотон с длиной  $\lambda_1$ , фотон распространяется по расширяющейся Вселенной и фотон всё время растягивается и это отличается от других вариантов красного смещения, с которыми мы обычно сталкиваемся.

Космологическое красное смещение не объясняется эффектом Доплера. Сложнее с гравитационным красным смещением, их можно увязать друг с другом, но мы этого делать не будем.

Фотон движется, постоянно растёт масштабный фактор, фотон увеличивает длину волны и наконец в какой-то момент времени наблюдатель его регистрирует какое-то с другим масштабным фактором  $a_2$  и длиной волны  $\lambda_2$ .

Красное смещение растёт для более далеких объектов, также как сопутствующее расстояние и в этом смысле красное смещение можно связать с любым расстоянием.

Вблизи красное смещение похоже на эффект Доплера, числен равняется, асимптотически в локальной Вселенной вы можете формально пользоваться законом Доплера. Хаббл, когда установил закон Хаббла, считал что это доплеровский эффект и пользовался доплеровской формулой. ему повезло и мы можем объяснить почему. Фактически в измерениях Хаббла было заложено, что скорость пропорциональна



красному смещению, соответственно, если красное смещение и расстояние пропорциональны, то выполняется закон Хаббла.

Чем дальше объект, тем быстрее он от вас будет удаляться.

Почему расстояние пропорционально красному смещению для близких объектов?

При  $z \rightarrow 0, d \sim z, \dot{a} \simeq const$ . Когда смотрим на достаточно близкие объекты, постоянная Хаббла меняется слабо в наших окрестностях, и чем дальше объект в сопутствующих расстояниях, тем при постоянно темпе, при расширении, будет больше физическое расстояние и красное смещение.

А вдали закон будет отличаться от доплеровского. СТО это локальная теория и нельзя пользоваться формулой для релятивистского эффекта Доплера для расчета скорости удаления объекта. Нужно пользоваться формулами в рамках ОТО.

Скорость в космологии не измеряется, мы ее вычисляем.

### 12.3. Формулы для расширения

В зависимости от разных составляющих Вселенной, мы получаем разные формулы для скорости расширения Вселенной, для возраста Вселенной и так далее.

Разные среды:

1. Вещество (пыль,  $p = 0$ )
2. Излучение ( $p \sim T^4$ )
3. Космологическая постоянная ( $p = -\rho c^2$ )

$$p = \omega \rho c^2$$

$$a \sim t^{1/\alpha}, \quad \alpha = \frac{3}{2}(\omega + 1)$$

Значения для  $\alpha$ :

1. Пыль  $\alpha = 3/2$
2. Излучение  $\alpha = 2$
3. Космологическая постоянная  $\alpha = 0$

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{1}{\alpha t}$$

Можно посчитать, как постоянная Хаббла меняется со временем:

$$H^2(z) = H_0^2 (\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_c(1+z)^2 + \Omega_\Lambda) \quad (59)$$

И можно посмотреть как постоянная Хаббла связана с красным смещением:

$$H = H_0(1+z)^\alpha \quad (60)$$

Постоянная Хаббла в прошлом больше.

Для световых лучей квадрат интервал  $ds^2 = 0$  и можно записать удобную формулу, которая связывает сопутствующие расстояние с наблюдаемыми величинами.

$$\chi = \frac{c}{a(t_0)H_0} \int_0^z \frac{dz}{H(z)} = \frac{c}{a(t_0)H_0} \frac{1}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha} - 1] \quad (61)$$

Для наблюдателя самым комфортным является фотометрическое расстояние:

$$d_{ph} = \left( \frac{L}{4\pi f} \right)^{1/2} = a^2(t_0) \frac{\chi}{a(t_{em})} \quad (62)$$

Это очень важно, поскольку на больших расстояниях мы измеряем расстояние, как правило, фотометрическим способом.

Другое расстояние это угловое расстояние.

Угловое расстояние это то что вы рассчитывается, зная линейный размер объекта и угол, под которым вы его видите.

$$d_{\Theta} = \frac{c}{H_0} \frac{1}{1-\alpha} [(1+z)^{1-\alpha}] \frac{1}{(1+z)} \quad (63)$$

Здесь возникает парадокс, который очень хорошо иллюстрирует важный момент в расширении Вселенной то, что расстояния настолько велики и скорости удаления настолько велики, что всё это начинает быть сравнимым со скоростью света и это важно учитывать.

## 12.4. Расстояние по собственному движению. Время путешествия фотона

Если мы знаем скорость движения детали в джете, то по ее угловому смещению мы сможем рассчитать расстояние. Удивительным свойством является то, что оно равно собственному расстоянию в настоящий момент времени. К сожалению, мы не знаем примера «стандартной скорости».

$$d_{pm} = a(t_0)\chi \quad (64)$$

Есть просто время путешествия фотона.

Именно об этом расстоянии чаще всего говорят в новостях: «открыта далекая галактика, свет от которой шел к нам 10 миллиардов лет».

Но пока свет шел – вселенная расширялась, поэтому, если свет идет из точки А в точку Б, то на момент прибытия расстояние между А и Б будет больше чем просто произведение  $ct$ .

В итоге получаем:

$$d_{\Theta} = a(t_{em})\chi = \frac{d_{pm}}{(1+z)} = \frac{d_{ph}}{(1+z)^2} \quad (65)$$

Можно проиллюстрировать на детальном рисунке 136 время-вперёд. Штрихпунктирные линии соответствуют движению Галактик, свет от Галактики распространяется нам по световому конусу.

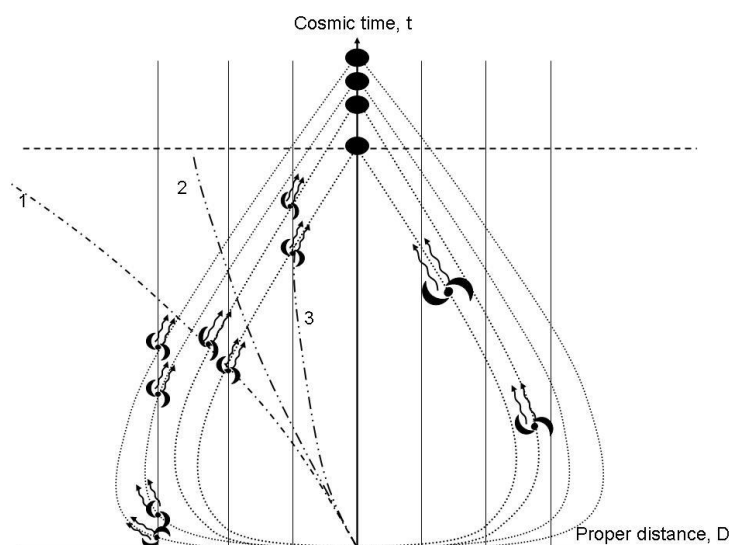


Рис. 136.

## 12.5. Формулы для расширения. Космологический калькулятор

Появляется важное понятие критической плотности и для постоянной Хаббла можно записать вот такую такое уравнение:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (66)$$

Критическая плотность:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (67)$$

Критическая плотность - это то, что делает Вселенную плоской и критическую плотность можете набрать всем, что есть во Вселенной, в том числе и космологической постоянной.

Мы можем получить плотность, нормированную на критическую, тогда можем записать уравнение:

$$\Omega_m = \frac{\rho_{m0}}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3H_0^2}\rho_{m0} \quad (68)$$

Кривизна:  $k = -1, 0, 1$

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2) \quad (69)$$

Параметр замедления  $q$ :

$$q = - \left( 1 + \frac{\ddot{a}}{aH^2} \right) \quad (70)$$

При  $q = 0, t = \frac{1}{H}$

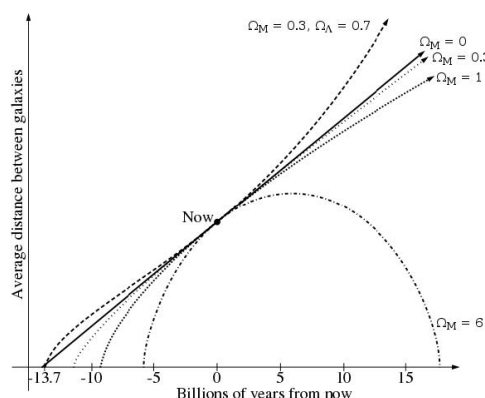


Рис. 137.

При  $q = 1/2, t = \frac{2}{3H}$

Сейчас  $q < 0$  (рис. 137)

Для удобства расчетов существует космологический калькулятор. Чрезвычайно удобный инструмент, позволяющий рассчитывать разные расстояния для разных космологических параметров.

Enter values, hit a button

70	$H_0$
0.3	$\Omega_{\text{M}}$
1.5	$z$
Open	Flat
0.7	$\Omega_{\text{vac}}$
General	

**Open** sets  $\Omega_{\text{vac}} = 0$  giving an open Universe [if you entered  $\Omega_{\text{M}} < 1$ ]  
**Flat** sets  $\Omega_{\text{vac}} = 1 - \Omega_{\text{M}}$  giving a flat Universe.  
**General** uses the  $\Omega_{\text{vac}}$  that you entered.

For  $H_0 = 70$ ,  $\Omega_{\text{M}} = 0.300$ ,  $\Omega_{\text{vac}} = 0.700$ ,  $z = 1.500$

- It is now 13.462 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift  $z$  was 4.197 Gyr.
- The light travel time was 9.266 Gyr.
- The comoving radial distance, which goes into Hubble's law, is 4363.4 Mpc or 14.232 Gly.
- The comoving volume within redshift  $z$  is 347.985 Gpc<sup>3</sup>.
- The angular size distance  $D_A$  is 1745.3 Mpc or 5.6926 Gly.
- This gives a scale of 8.462 kpc''.
- The luminosity distance  $D_L$  is 10908.4 Mpc or 35.579 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or  $9.461 \cdot 10^{26}$  cm.  
1 Gyr = 1,000,000,000 years.  
1 Mpc = 1,000,000 parsecs =  $3.08563 \cdot 10^{24}$  cm, or 3,261,566 light years.

Рис. 138. Космологический калькулятор

## 12.6. Парадокс Ольберса

Все эти формулы, которые мы написали, позволяют уже количественно объяснить парадокс Ольберса.

Существенно не только то, что интеграл сходится, потому что у вас количество объектов, но и то, что с расширением Вселенной падает поверхностная яркость объектов, потому что кроме расширения, есть красное смещение, то есть приходящий свет далеких объектов становятся менее интенсивным.

$$\text{Поток } F \sim \frac{L}{d_l^2}$$

$$\text{Яркость } I = \frac{F}{\Delta\Omega}$$

$$\text{Угловой размер } \Delta\Omega \sim \theta^2 \sim \frac{1}{d_a^2}$$

$$\Rightarrow F \sim L \left( \frac{d_a}{d_l} \right)^2 = \frac{1}{(1+z)^4} \quad (71)$$

## 12.7. Космическое время. Скорость измерения расстояния

Мы моделируем вселенную как однородную, изотропную, мы считаем, что в данный момент времени все идеальные часы во Вселенной идут одинаково.

Другое дело, если вы будете наблюдать далекие часы. Они вам будут казаться идущими по-разному.

«Сейчас» космическое время соответствует нашим часам. Но, на каком-нибудь далеком наблюдаемом объекте с точки зрения наших наблюдений часы идут медленнее.

«Часы Бога» - космическое время, но проблема в том, что наблюдаем мы изнутри.

У нас есть разные определения расстояний и как минимум два определения времени («космическое» и по часам наблюдателя), значит, мы можем определять скорости разными способами. Скорость - это всегда изменение расстояния за данный промежуток времени.

Разные скорости иллюстрируют разные аспекты расширения вселенной. Важно, что скорость удаления далекой (и при этом наблюдаемой) галактики не связана ограничением  $v < c$ , т.к. локально галактика покоится.

Скорости складываются по галилеевскому закону, не надо применять здесь релятивистский закон из СТО.

### Три скорости

Две скорости соответствуют «Взгляду бога»:

1. Скорость удаления на момент излучения по «космическим часам»
2. Скорость удаления на настоящий момент по «космическим часам»
3. Третья соответствует тому, что может измерить наблюдатель: скорость удаления, которая имела место на момент испускания излучения, но измеряем мы ее по своим часам.

Все три могут быть больше  $c$ .

### «Привязанные» и «отвязанные» галактики

Многие важные особенности космологии можно проиллюстрировать такими мысленными экспериментами.

Представим себе, что мы «выцепили» галактику из хаббловского потока. Все зависит от свойств Вселенной. В разных космологиях галактика может как приближаться, так и удаляться. Но галактика все равно «нырнет» обратно в Хаббловский поток.



## 12.8. Космические горизонты

### 1. Горизонт частиц

Этот горизонт соответствует расстоянию до самого далекого объекта, который мы сейчас видим. В реальных случаях важно помнить, что мы должны считать не от момента «ноль», а от момента, скажем, образования первых звезд или галактик, или испускания какого-то вида частиц.

### 2. Горизонт событий

Можно сказать, что горизонт событий – это расстояние до самого далекого объекта, до которого когда-нибудь в будущем сможет дойти наш световой сигнал, посланный сейчас.

Рисунок 140 соответствует стандартной на сегодняшний день космологической модели. На рисунке изображена хаббловская сфера, горизонт событий (черная линия) и горизонт частиц (пунктирная линия)

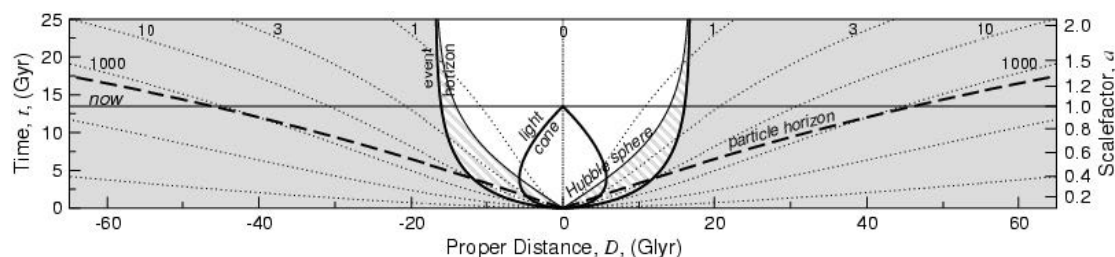


Рис. 139. Горизонты и эволюция

Более детально:

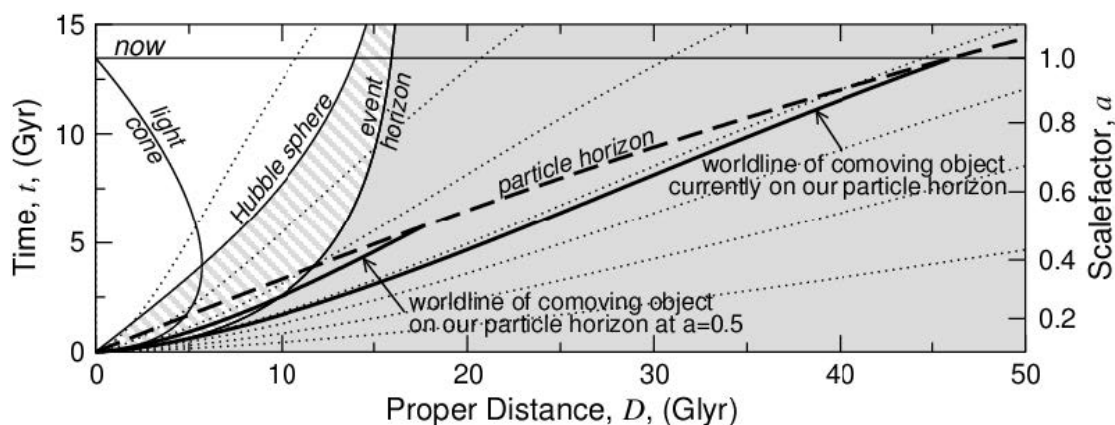


Рис. 140. Горизонты и эволюция

## Как мы можем увидеть расширение Вселенной?

### 1. Изменение красного смещения

2. Изменение фотометрического расстояния
3. Изменение углового расстояния
4. Изменение расстояния по собственному движению

Вероятнее всего первым будет зарегистрировано изменение красного смещения. Это потребует ввода нового поколения спектрографов на новых телескопах. Затем, видимо, удастся увидеть изменение углового расстояния, измеряемого по наблюдениям лазерных источников.

## 12.9. Изменение красного смещения

Вселенная все время расширяется, но иногда это происходит быстрее, иногда – медленнее.

Изменение красного смещения показывает, как изменилась динамика расширения Вселенной с момента излучения к настоящему.

Если мы рассматриваем замедляющуюся Вселенную, то красное смещение со временем будет уменьшаться, а если мы говорим об ускоряющейся Вселенной, то красное смещение будет расти.

Когда мы рассматриваем реалистичную Вселенную, то здесь ситуация сложнее, т.к. в начале вселенная расширялась с замедлением, а потом – с ускорением. Соответственно, если мы проводим сейчас наблюдения с высокой точностью, то мы увидим, что далекие галактики «синеют», а близкие – краснеют.

Реликтовое излучение мы всегда видим таким, каким оно было в момент «освобождения».

Поэтому красное смещение реликтового излучения всегда растет, вне зависимости от того, какова динамика расширения вселенной.



ФИЗИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
Л Е К Ц И И   У Ч Е Н Ы Х   М Г У