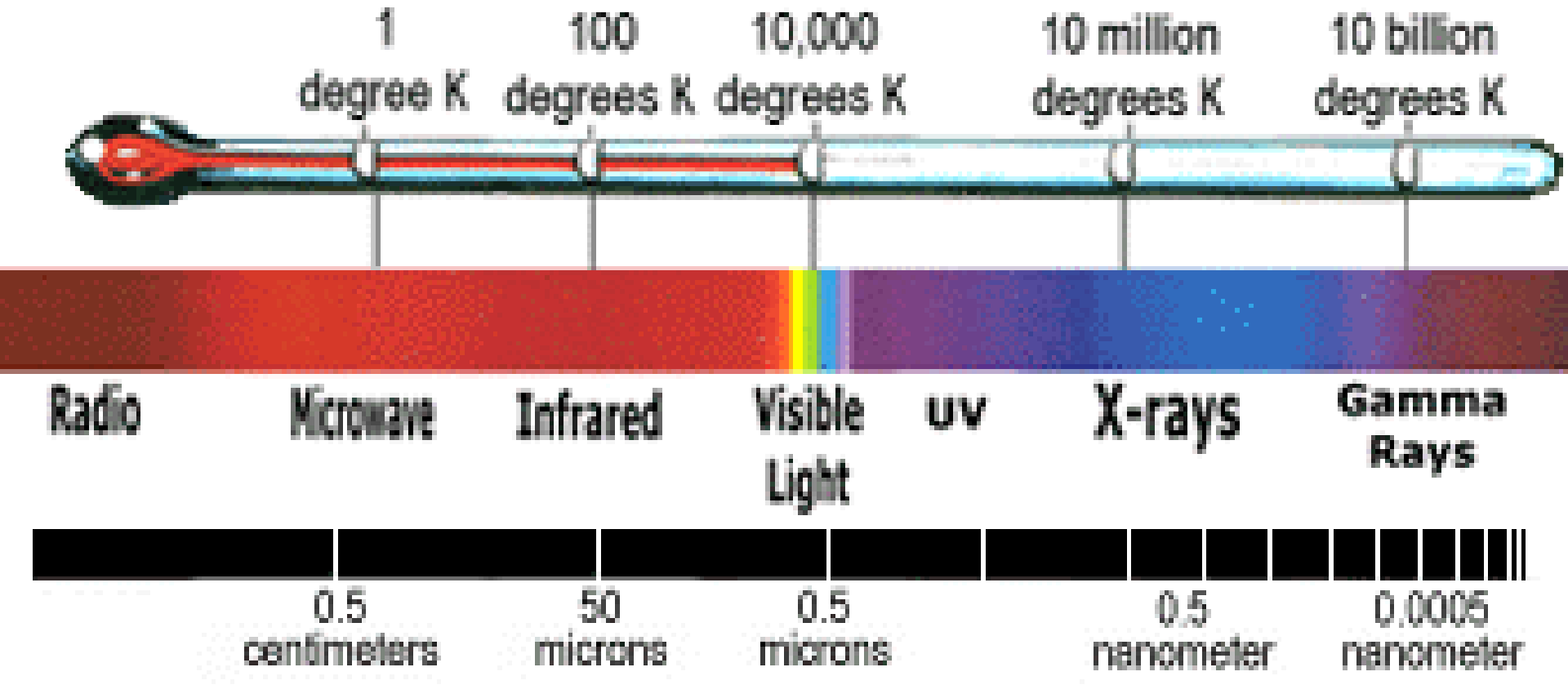
Расширение вселенной. Темная материя.

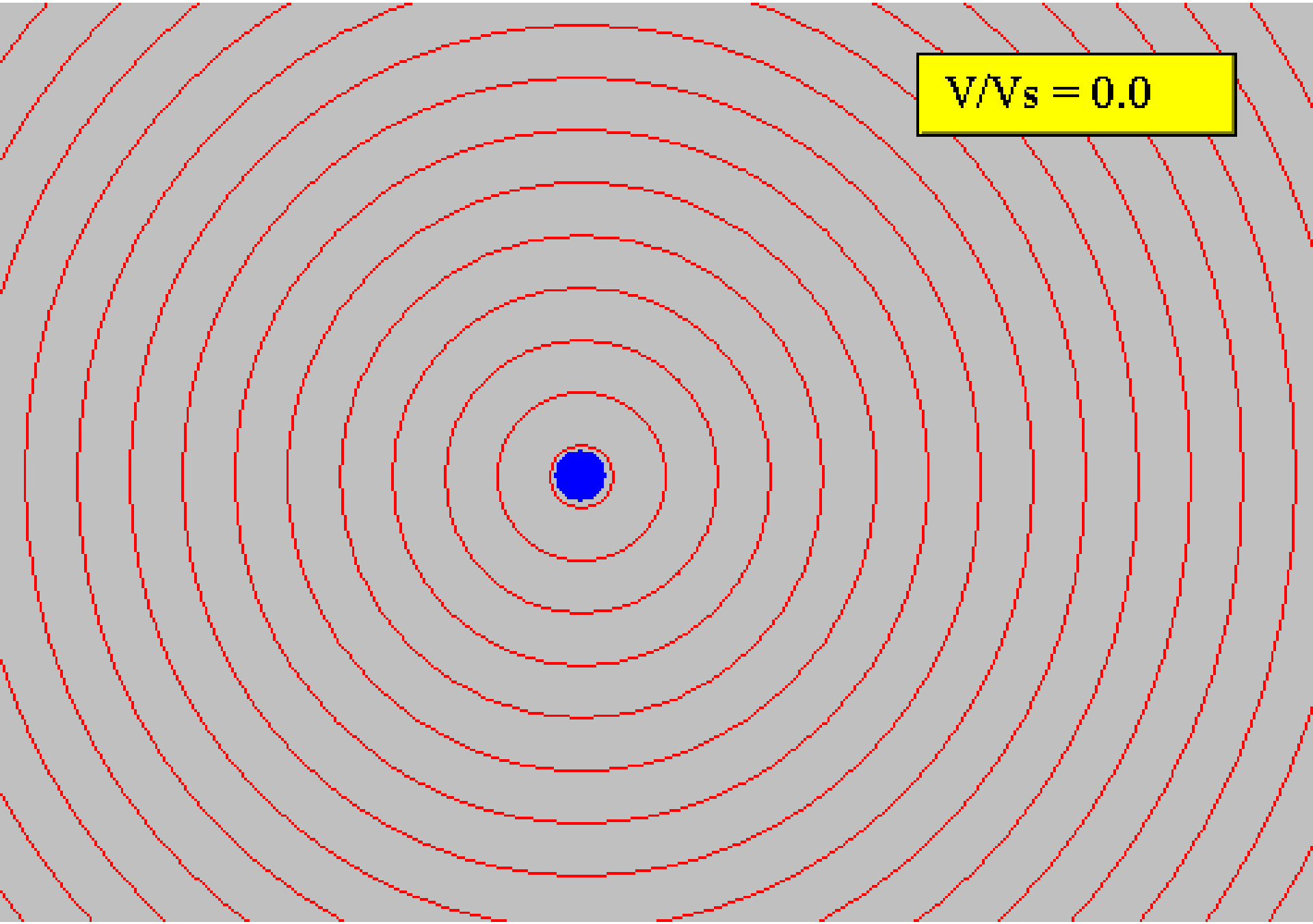
В.Ф.Ежов

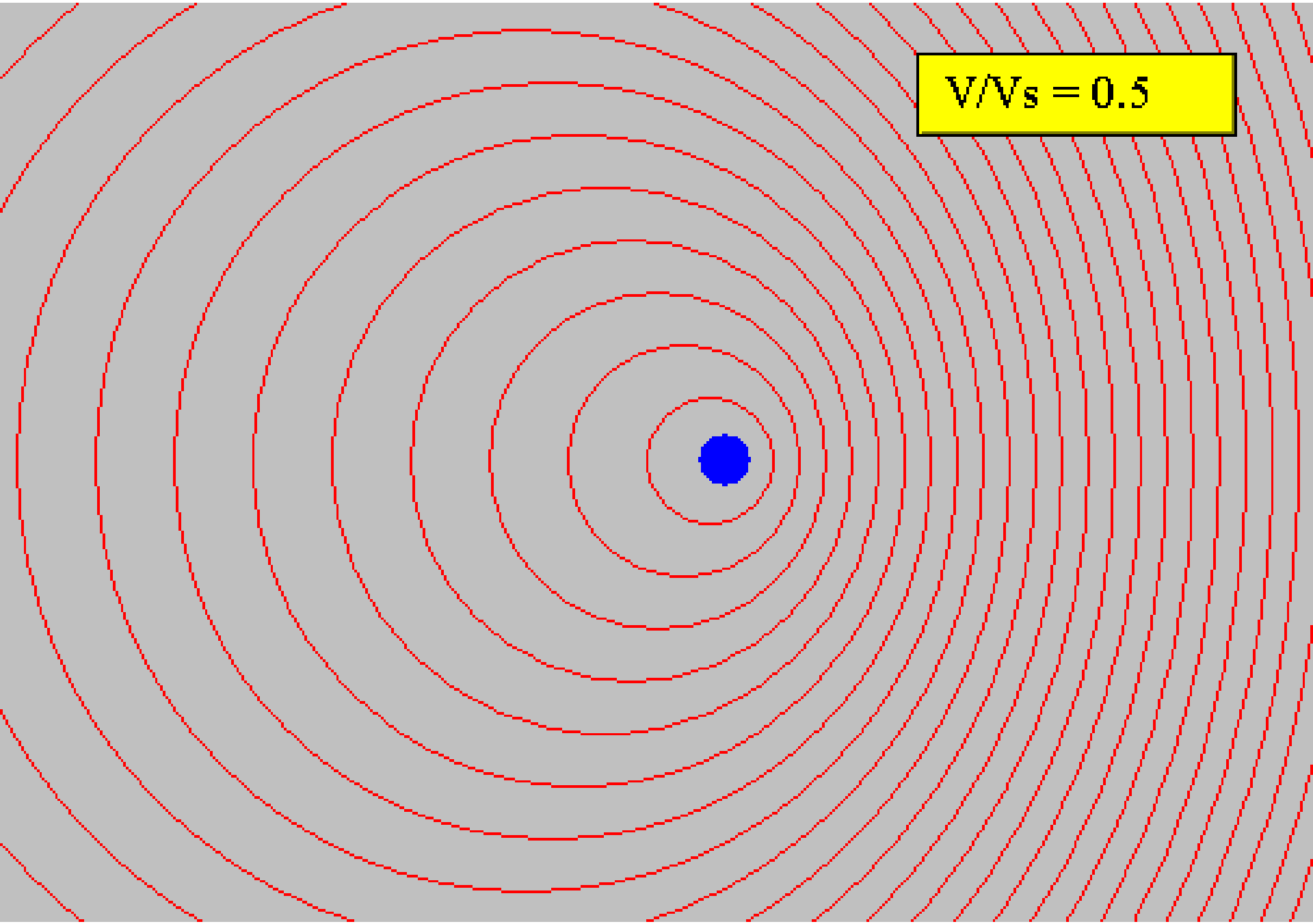
Эффект Допплера

- Частота изменяется из-за того, что наблюдатель движется и изменяется промежуток времени между пучностями волны света
- Из-за изменения частоты меняется и регистрируемая длина волны
- При взаимном удалении источника и наблюдателя возникает *красное смещение*, при сближении – *фиолетовое смещение*

Цвет звезд (Иоганн Христиан Допплер)

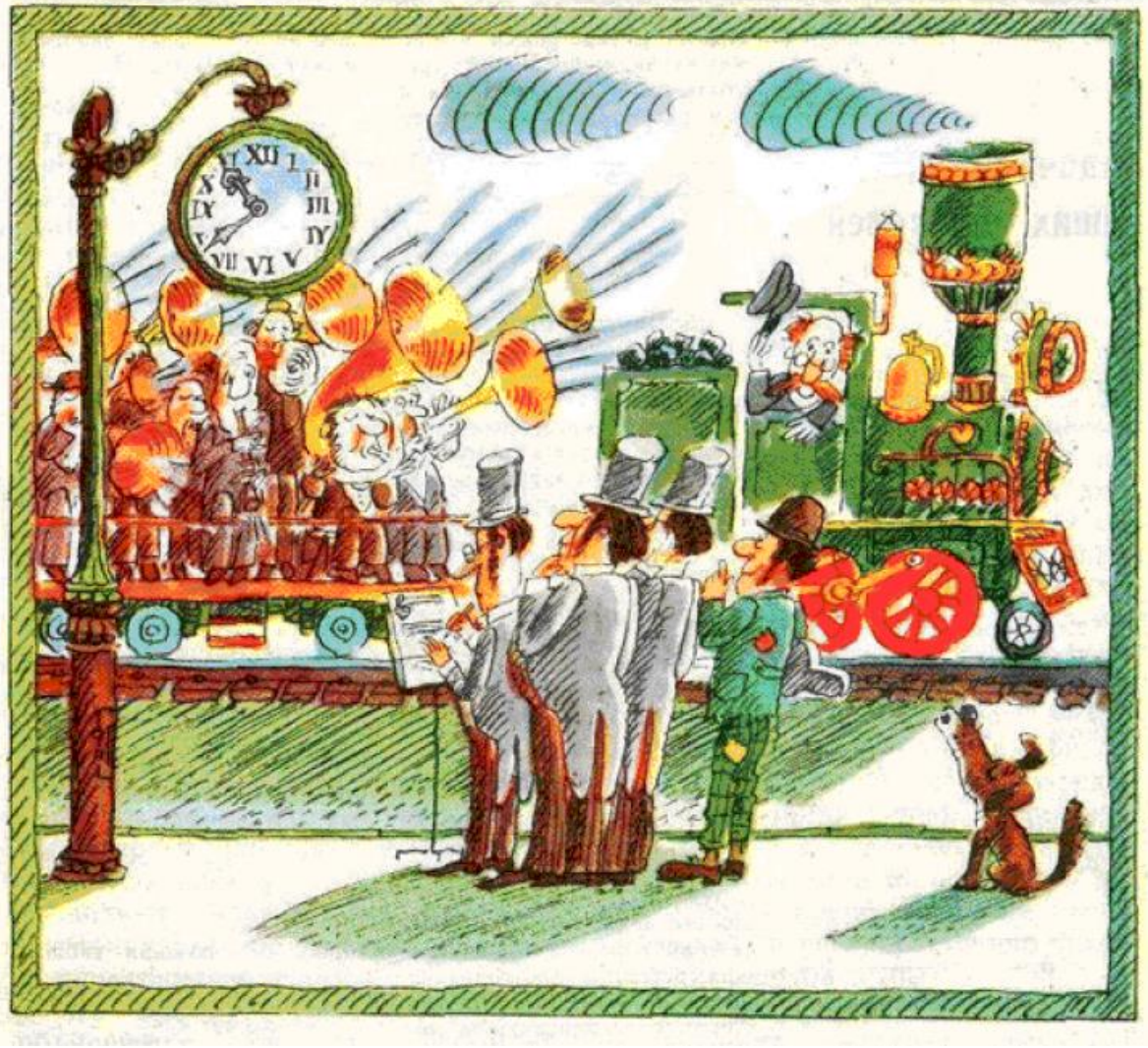



V/Vs = 0.0


V/Vs = 0.5

Христофор Генрих Дитрих Буа-Балло (1845 г.)

Звук



В поезде. идущем с большой скоростью, находились музыканты, которые издавали звук определенного тона. На нескольких железнодорожных станциях по пути следования поезда располагались музыканты-«наблюдатели», которые могли определять высоту тона на слух. В результате этих экспериментов было обнаружено, что высота звука, воспринимаемого наблюдателем. действительно изменяется при движении источника в соответствии с предсказаниями Доплера.

Эффект Допплера

- Точная формула:
  - $$\lambda = \lambda_0 \frac{1 + \frac{v}{c}\cos\theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$1 + z_{Dopl} = \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{1 + \frac{v}{c}\cos\theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

  - v – модуль скорости относительного движения
  - θ - угол между направлением движения источника и линией наблюдения
  - c – скорость света в вакууме
- Примерная формула при $v << c$

$$z_{Dopl} = \frac{v\cos\theta}{c} = \frac{v_r}{c}$$

Красное смещение

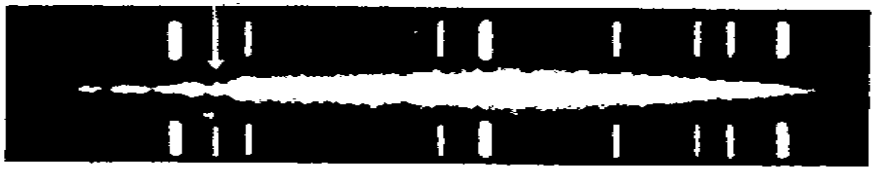
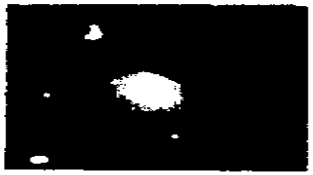
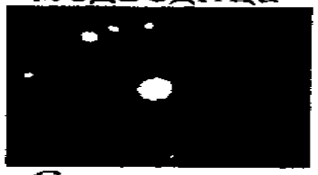
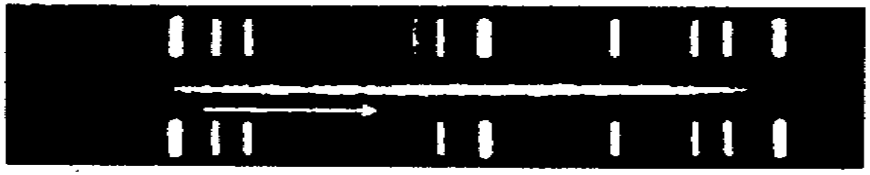
- Сдвиг длины волны определяют как

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0, \text{ где}$$

λ_0 – длина волны, измеренная в лаборатории

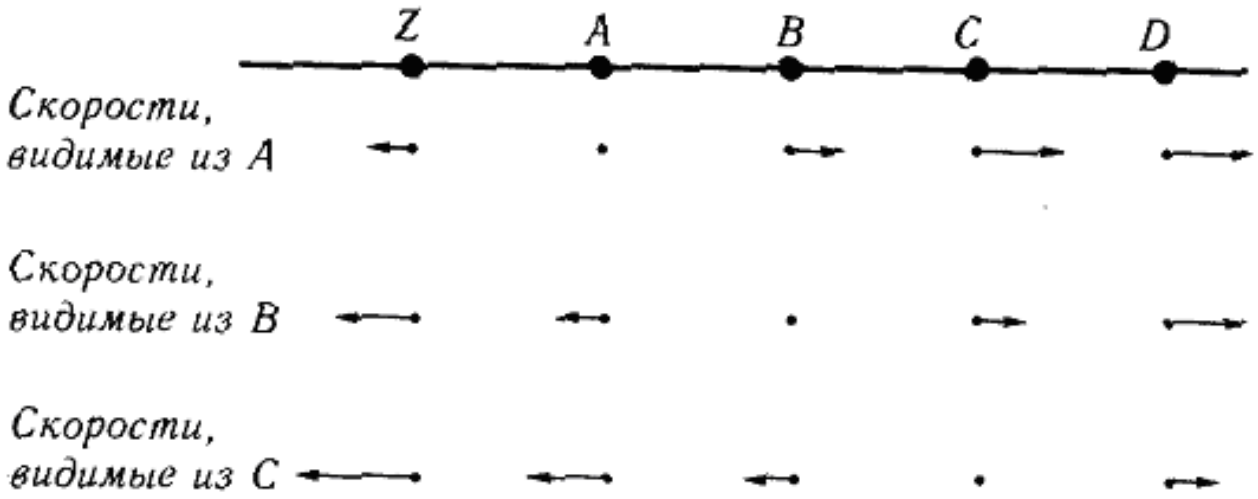
λ – наблюдаемая длина волны

- Обычно ее называют **красным смещением**, так как
  - Если $z > 0$, то $\lambda > \lambda_0$ – линия сдвигается в сторону больших длин волн («красная» сторона)
  - В космологии чаще всего $z > 0$

Скопление туманностей в созвездиях	Расстояние в световых годах	Красные смещения
Дева	78 000 000	 1,2 км/с
 Большая медведица	1 000 000 000	15 км/с
 Северная корона	1 400 000 000	 22 км/с
Волопас	2 500 000 000	39 км/с
Гидра	3 960 000 000	61 км/с

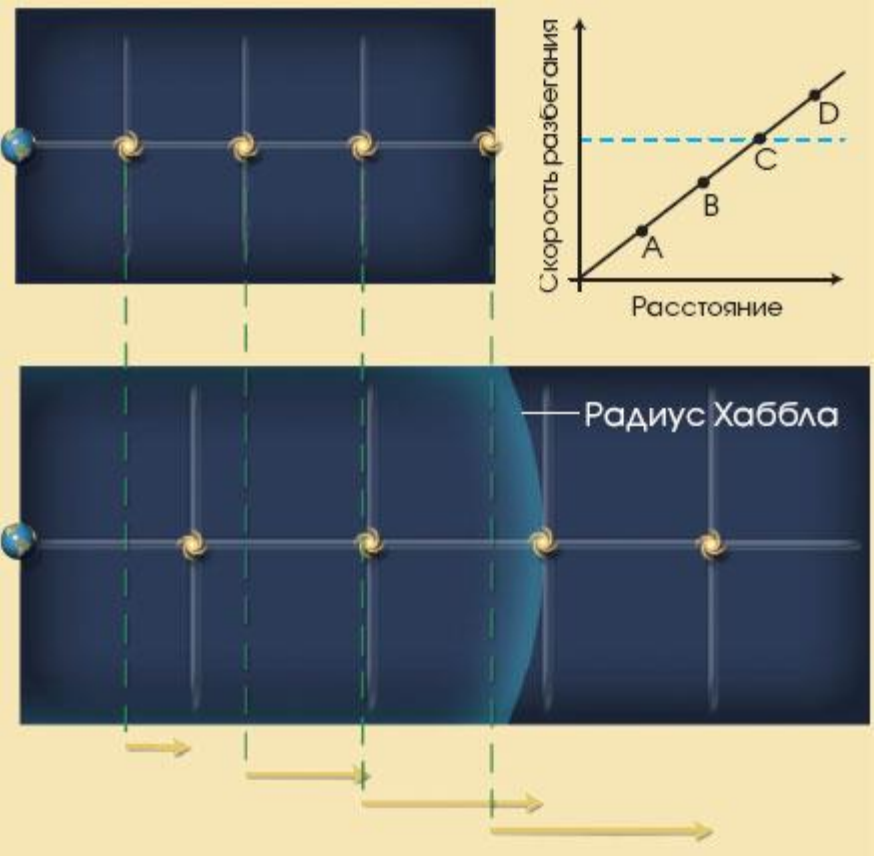
Основной космологический принцип

- Основные предположения, на которых основываются **все** космологические модели:
  - Вселенная однородна и изотропна
  - Законы физики одинаковы во всей Вселенной
- Применимость этих предположений следует из многих данных различных наблюдений



Рассмотрим цепочку равноудаленных галактик Z, A, B, C…
Длина и направление сплошных стрелок соответствуют скорости, измеренной по отношению к A или B или C
Принцип однородности требует, чтобы скорость C, измеренная из B, равнялась скорости B, наблюдаемой из A;
Сложение этих двух скоростей дает скорость C, наблюдаемую из A вдвое больше скорости B
Таким образом можно заполнит $\vec{v} = H\vec{r}$ **казано на рисунке)**
Видно, что скорости подчиняют
Скорость любой галактики, которая видна из любой другой галактики пропорциональна расстоянию между ними.

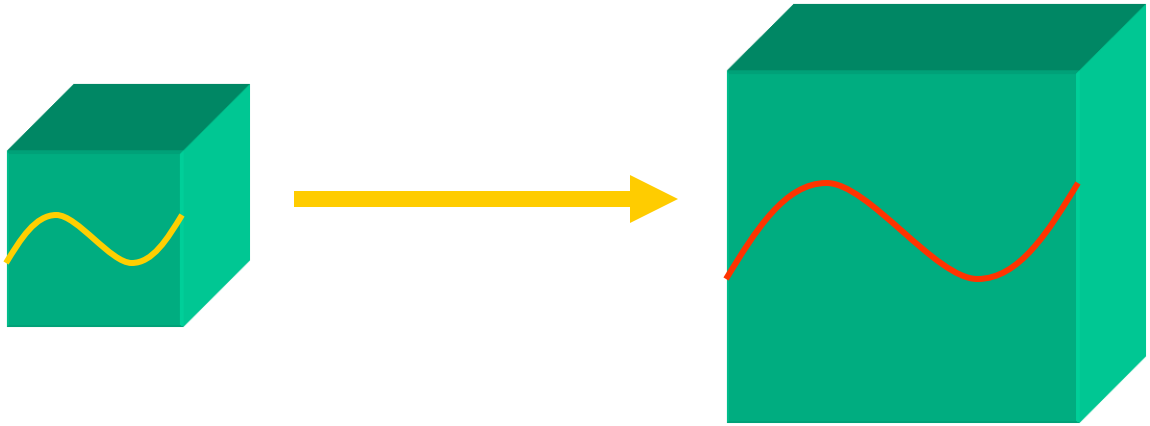
Закон Хаббла – указание на расширение Вселенной

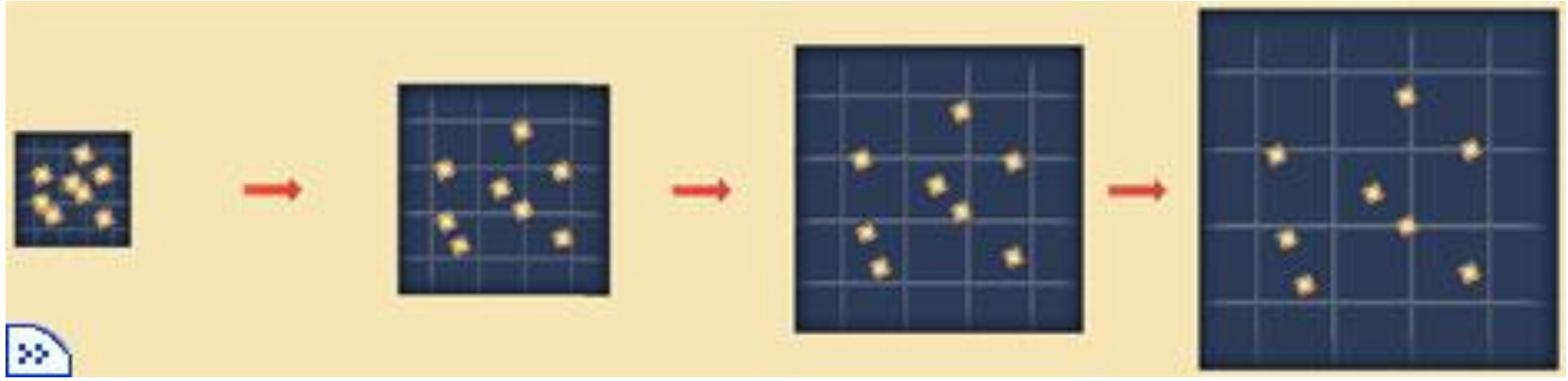


Согласно закону Хаббла, Вселенная расширяется не с постоянной скоростью. Некоторые галактики удаляются от нас со скоростью 1 тыс. км/с, другие, находящиеся вдвое дальше, со скоростью 2 тыс. км/с, и т.д. Таким образом, закон Хаббла указывает, что, начиная с некоторого расстояния, называемого хаббловским, галактики удаляются со сверхсветовой скоростью. Для измеренного значения постоянной Хаббла это расстояние составляет около 14 млрд. световых лет.

Расширение пространства

- Длина волны изменяется, так как в течение свободного движения фотона пространство успело расшириться и «растянуть» фотон
- При расширении пространства возникает *красное смещение*, при сжатии – *фиолетовое смещение*





Это был взрыв самого пространства, который привел вещество в движение. Наше пространство и время возникло в Большом взрыве и начало расширяться. Нигде не было центра, т.к. условия всюду были одинаковыми, никакого перепада давления, характерного для обычного взрыва, не было.

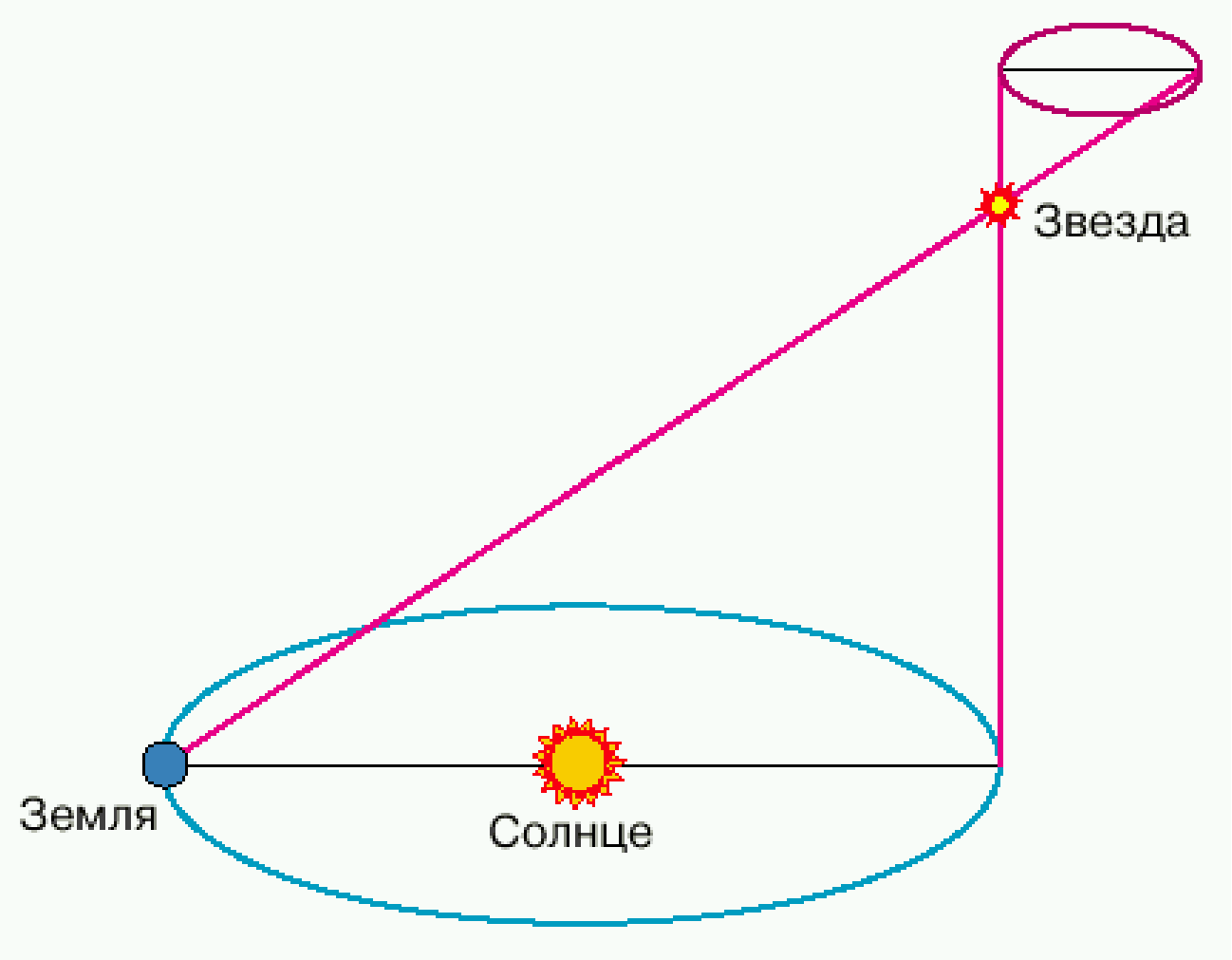
Красное смещение

- Красное смещение галактики складывается из действия двух эффектов

$$1+z_{общ}=\left(1+z_{Dopl}\right)\cdot\left(1+z_{H}\right)$$

- Причина закона Хаббла – *расширение пространства*, а разброс вокруг прямой даёт *эффект Допплера*, который вызывают случайные движения отдельных галактик относительно центра масс скопления галактик

Определение годичного или тригонометрического параллакса



Парсек

Название происходит от параллакс угловой секунды и обозначает расстояние до объекта, годичный тригонометрический параллакс которого равен одной угловой секунде.

Согласно другому эквивалентному определению, парсек — это такое расстояние, с которого средний радиус земной орбиты (равный 1 а. е.), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом одна угловая секунда (1″).

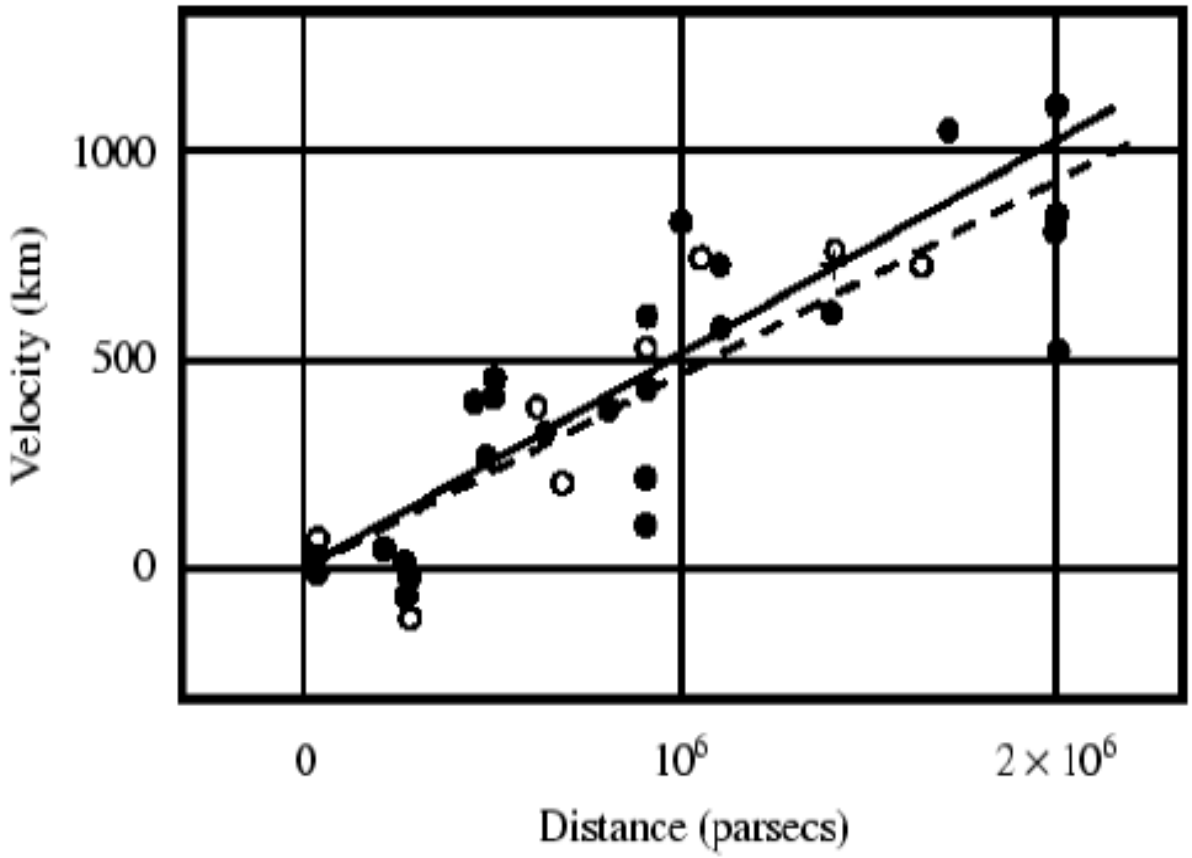
1 пк = $\frac{360 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi}$ **а. е. = 206 265 а. е. = 3,08568×10^{16} м =**

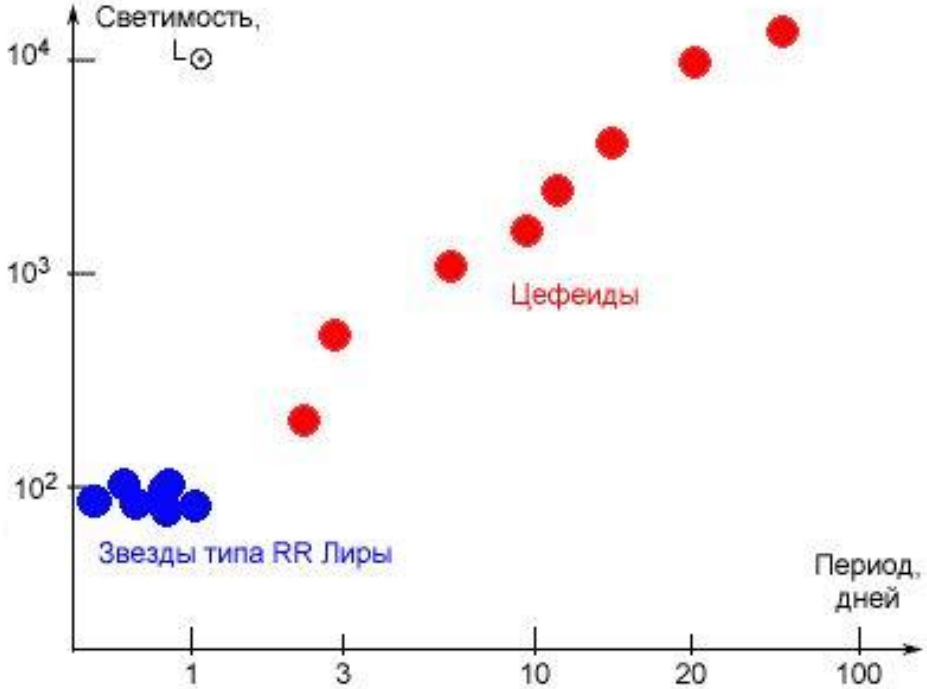
3,2616 световых лет.

1929 г. Э.Хаббл – галактики разбегаются со скоростью, пропорциональной расстоянию

$$V = H R$$

. Первая оценка Хаббла – H ~ 500 км/с/Мпк





Цефеиды это переменные звезды-сверхгиганты изменяющие блеск с периодом от 1 до 50 сут (в др. галактиках - до 218 сут). Одновременно с изменениями блеска изменяются эффективная температура звезды, цвет звезды и радиус звезды.

Период колебания яркости цефеид зависит от массы звезды.

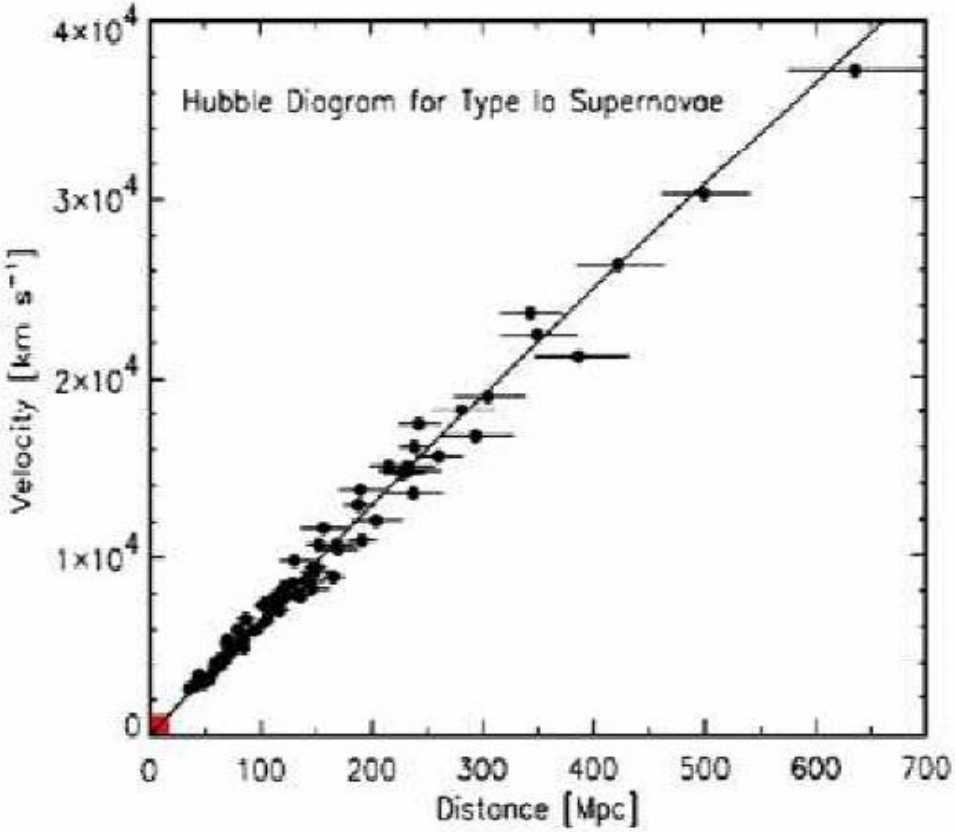
Массой определяется средняя светимость звезды, поэтому, выявив период колебания блеска, всегда можно узнать и светимость. Период –> масса = светимость

Чем дальше от нас находится источник излучения, тем он тусклее. Если узнать истинную светимость объекта, то, сравнив ее с видимым блеском, можно найти расстояние.

Как измерить расстояние до звезды?

В далеких звездных системах, там, где яркости цефеид не хватает, необходимо найти еще какие-нибудь более яркие объекты, которые вели бы себя одинаково. Таким свойством обладают вспышки сверхновых звезд в двойных системах. Спад их яркости после самой вспышки идет во всех случаях одинаково, так как в двойных системах всегда взрываются звезды одинаковой массы. Одинаковы, конечно, и светимости вспышек. Сверхновая – объект, сравнимый по яркости с самойгалактикой, поэтому их находят очень далеко от Земли. Исследуя то, как сверхновая ведет себя после вспышки, определяют, принадлежит ли взорвавшаяся звезда двойной системе. Если так, то все идет по тому же сценарию. Сравнивают известную светимость с яркостью и находят расстояние.

По современным данным:



$$\boldsymbol{H} = \mathbf{67.80 \pm 0.77}\ (\text{км/с})/\text{Мпс}$$

Суть постоянной Хаббла

- Размерность постоянной Хаббла – км/с/Мпк (15 – 100) км/с/Мпк

  1 пк = 3.0857 ·10^(13) км
- Она показывает, насколько в относительных единицах расширяется пространство в единицу времени
- Значит, величина, обратная постоянной Хаббла, приблизительно равна возрасту Вселенной

$$H^{-1} \approx 14.4$$ **млрд. лет**

Открытие реликтового излучения.

В 1960 в Кроуфорд-Хилле, (шт. Нью-Джерси, США) была построена антенна для приема радиосигналов, отраженных от спутника-баллона «Эхо». К 1963 для работы со спутником эта антенна была уже не нужна, и радиофизики Роберт Вудро Уилсон и Арно Элан Пензиас из лаборатории компании «Белл телефон» решили использовать ее для радиоастрономических наблюдений. Антенна представляла собой 20-футовый рупор. Вместе с новейшим приемным устройством этот радиотелескоп был в то время самым чувствительным инструментом в мире для измерения радиоволн, приходящих с широких площадок на небе. В первую очередь предполагалось провести измерения радиоизлучения межзвездной среды нашей Галактики на волне длиной 7,35 см. Предварительные испытания приемной системы показали несколько больший шум, чем ожидалось по расчетам, но казалось правдоподобным, что это связано с небольшим избытком шума в усилительных цепях.

$$\frac{4\pi R^2 l \cdot \pi r^2}{4\pi l^2} = \mathbf{I}\pi \left(\frac{rR}{l}\right)^2$$

Шум антенны = потерям в ней
При переотражении радиоволн
Шум неба = потери радиоволн
при прохождении в атмосфере

Температура - ожидаемая
Неба = 2.3±0.3 К
Антенны = 2.0±1 К
Линии связи = 7.6±0.8 К
Мазера = 7.0±1 К
Итого = 18.9±3 К

Температура - измеренная
Итого = 22.2±2.2 К

Температура – после улучшений
Неба = 2.3±0.3 К
Антенна + Линии связи = 0.9±0.3 К
Шум мазера исключили сравнением
с эталонным источником
Итого = 3.2±0.6 К

Температура - измеренная
Итого = 6.7±0.3 К

Чтобы избавиться от этих проблем, Пензиас и Уилсон использовали устройство, известное как «холодная нагрузка»: сигнал, приходящий от антенны, сравнивается с сигналом от искусственного источника, охлажденного жидким гелием при температуре около четырех градусов выше абсолютного нуля (4 К). В обоих случаях электрический шум в усилительных цепях должен быть одинаков, и поэтому полученная при сравнении разница дает мощность сигнала, идущего от антенны. Этот сигнал содержит вклады только от антенного устройства, земной атмосферы и астрономического источника радиоволн, попадающего в поле зрения антенны.

Пензиас и Уилсон ожидали, что антенное устройство будет давать очень небольшой электрический шум. Естественно, какой-то радиошум ожидался на такой длине волны и от земной атмосферы, но этот шум должен иметь характерную зависимость от направления: он должен быть пропорционален толщине атмосферы в том направлении, в каком смотрит антенна: немного меньше в направлении зенита, чуть больше в направлении горизонта

К своему удивлению, Пензиас и Уилсон обнаружили весной 1964, что они принимают на длине волн 7,35 см довольно заметное количество микроволнового шума, не зависящего от направления. Они нашли, что этот «статический фон» не меняется в зависимости времени суток, а позднее обнаружили, что он не зависит и от времени года. Следовательно, это не могло быть излучением Галактики, ибо в этом случае его интенсивность менялась бы в зависимости от того, смотрит антенна вдоль плоскости Млечного Пути или поперек. Отсутствие каких-либо вариаций наблюдаемого микроволнового шума с направлением весьма серьезно указывало на то, что эти радиоволны, если они действительно существуют, приходят не от Млечного Пути, а от значительно большего объема Вселенной.

Случилось так, что Пензиас позвонил по совершенно другому поводу своему приятелем Бернарду Берку из Массачусетского технологического института. Незадолго до этого Берк слышал от своего коллеги Кена Тсрнера из Института Карнеги о докладе, который тот, в свою очередь, слышал в Университете Джонса Хопкинса, сделаланном теоретиком из Принстона Филом Пиблслм, работавшим под руководством Роберта Дикке. В этом докладе Пиблс приводил аргументы в пользу того, что должен существовать фоновый радиошум, оставшийся от ранней Вселенной и имеющий сейчас эквивалентную температуру около 10 К.

Вышли статьи:

Astrophysical Journal
Nov. 1, 1965

Cosmic Black-body Radiation

R.H. Dicke
P.J.E. Peebles
P.G. Roll
D.T. Wilkinson

"While we have not yet obtained results with our instrument, we recently learned that Penzias and Wilson (1965) of the Bell Telephone Laboratories have observed background radiation at 7.3 cm wavelength..."

A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s

A.A. Penzias
R.W. Wilson

"A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue."
- XBL 7811-6656

Закон Хаббла

В случае линейной зависимости удаление всех тел не означает существования центра расширения

Все тела удаляются от всех!

Но когда-то тела были ближе… Может даже все галактики, вся Вселенная расширяется из одной точки…

КРИТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ

Рассмотрим сферу радиуса R, внутри которой содержатся галактики.

Масса такой сферы равна ее объему, умноженному на космическую плотность массы ρ:

$$M = \frac{4\pi R^3 \rho}{3}.$$

Из ньютоновой теории тяготения следует, что потенциальная энергия любой типичной галактики на поверхности этой сферы

$$\text{П.Э.} = -\frac{mMG}{R} = -\frac{4\pi m R^2 \rho G}{3},$$

где m — масса галактики; G — ньютонова постоянная тяготения. $G = 6.67 \cdot 10^{-8}$ см^3/(г $\cdot$ с^2).

Скорость этой галактики определяется законом Хаббла в виде

$$v = HR, \qquad H \text{ — постоянная Хаббла.}$$

кинетическая энергия галактики равна

$$\text{К.Э.} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mH^2R^2}{2}.$$

$$E = \text{П.Э.} + \text{К.Э.} = mR^2\left[\frac{1}{2}H^2 - \frac{4}{3}\pi\rho G\right].$$

Эта величина должна оставаться постоянной в процессе расширения Вселенной.

полная энергия E положительна, галактика может достичь бесконечности, имея остаточную кинетическую энергию.

условие того, что галактика имеет скорость, как раз равную скорости отрыва, заключается в том, что E обращается в нуль, что дает

$$\frac{1}{2}H^2 = \frac{4}{3}\pi\rho G.$$

Другими словами, плотность должна иметь значение

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{(8\pi G)}.$$

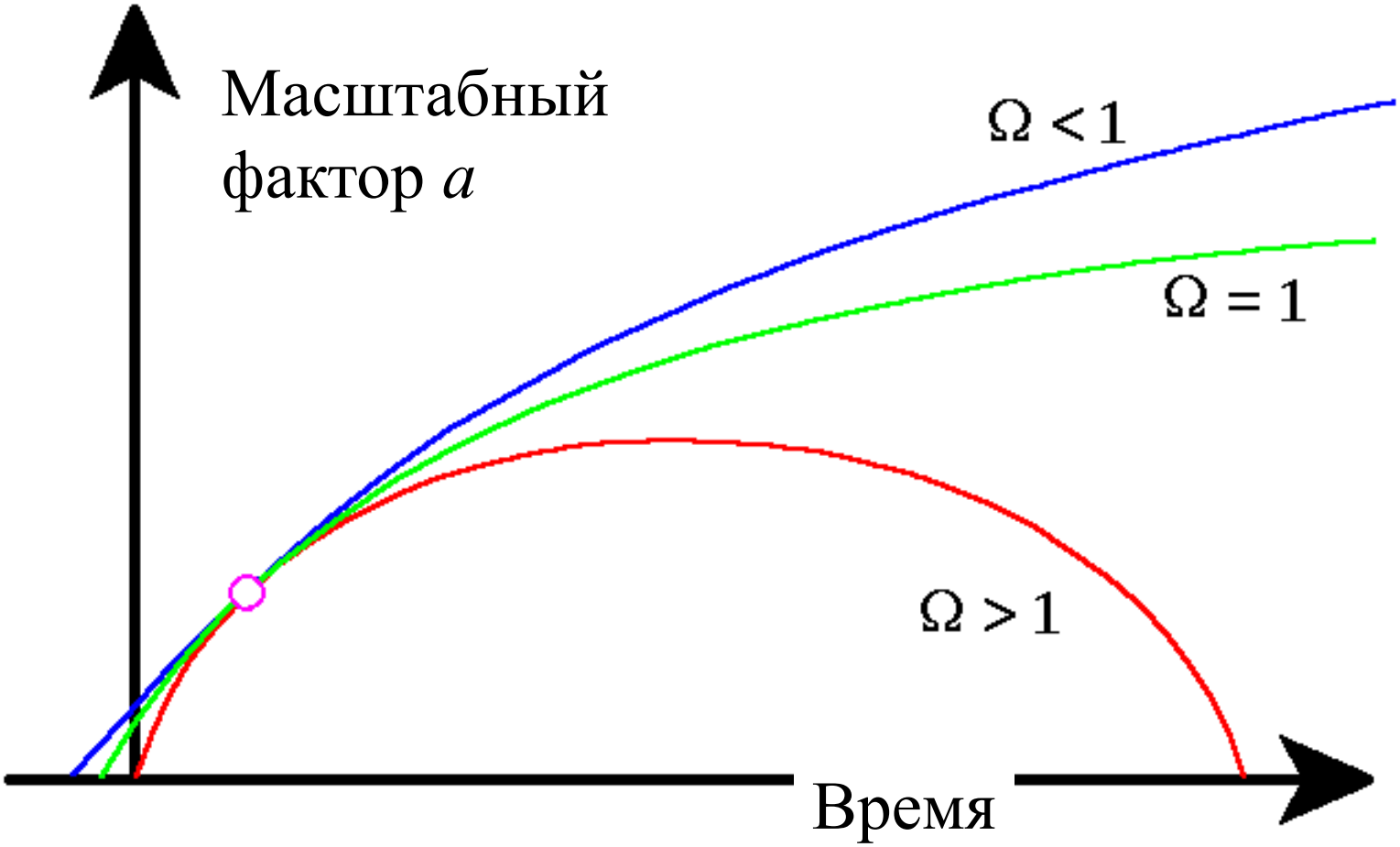
Например, если H равна популярному в настоящее время значению 15 км/с на миллион световых лет, то, вспоминая, что световой год соответствует $9{,}46 \cdot 10^{12}$ километров, мы получаем

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3}{8\pi(6{,}67 \cdot 10^{-8}\ \text{см}^2/(\text{г} \cdot \text{с}^2)} \times$$

$$\times \left(\frac{15\ \text{км/с}/10^6\ \text{св. лет}}{9{,}46 \cdot 10^{12}\ \text{км/св. год}}\right)^2 = 4{,}5 \cdot 10^{-30}\ \text{г/см}^3.$$

В одном грамме содержится $6{,}02 \cdot 10^{23}$ ядерных частиц; такое значение теперешней критической плотности соответствует примерно $2{,}7 \cdot 10^{-6}$ ядерных частиц в 1 см^3, или 0,0027 частицы в одном литре.

Ньютоновская космология



Рассмотрим теперь, что происходит с излучением черного тела в расширяющейся Вселенной. Предположим, что размер Вселенной изменился в f раз; например, если Вселенная удваивается в размере, то $f = 2$.

Как мы видели в главе II, длины волн изменяются пропорционально размеру Вселенной и будут иметь новое значение

$$\lambda' = f\lambda.$$

После расширения плотность энергии du' в новом интервале длин волн от λ' до $\lambda' + d\lambda'$ меньше первоначальной плотности энергии du в старом интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ по двум различным причинам.

1. Так как объем Вселенной увеличился в f^3 раз, то до тех пор, пока не рождалось и не уничтожалось никаких фотонов, их число в единице объема уменьшилось в f^3 раз, т. е. изменилось на множитель $1/f^3$.

2. Энергия каждого фотона обратно пропорциональна его длине волны и поэтому уменьшилась на множитель $1/f$. Отсюда следует, что плотность энергии уменьшилась на общий множитель $1/f^3$, умноженный на $1/f$, то есть на множитель $1/f^4$:

Распределение Планка дает энергию du излучения черного тела в единице объема, приходящуюся на узкий интервал длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, в виде

$$du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} d\lambda \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right)} - 1}.$$

$$du' = \frac{1}{f^4} du = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 f^4} d\lambda \Big/ \left[e^{\left(\frac{hc}{kT\lambda^2}\right)} - 1 \right].$$

Если мы теперь перепишем эту формулу, введя новую длину волны λ', то она примет вид

$$du' = \frac{8\pi hc}{\lambda'^5} d\lambda' \Big/ \left[e^{\left(\frac{hcf}{kT\lambda'}\right)} - 1 \right].$$

Но это в точности та же формула, что и старая формула для du, выраженная через λ и $d\lambda$, за исключением того, что T заменяется новой температурой

$$T' = T/f.$$

Следовательно, мы заключаем, что свободно расширяющееся излучение черного тела продолжает описываться формулой Планка, но с температурой, падающей обратно пропорционально масштабу расширения.

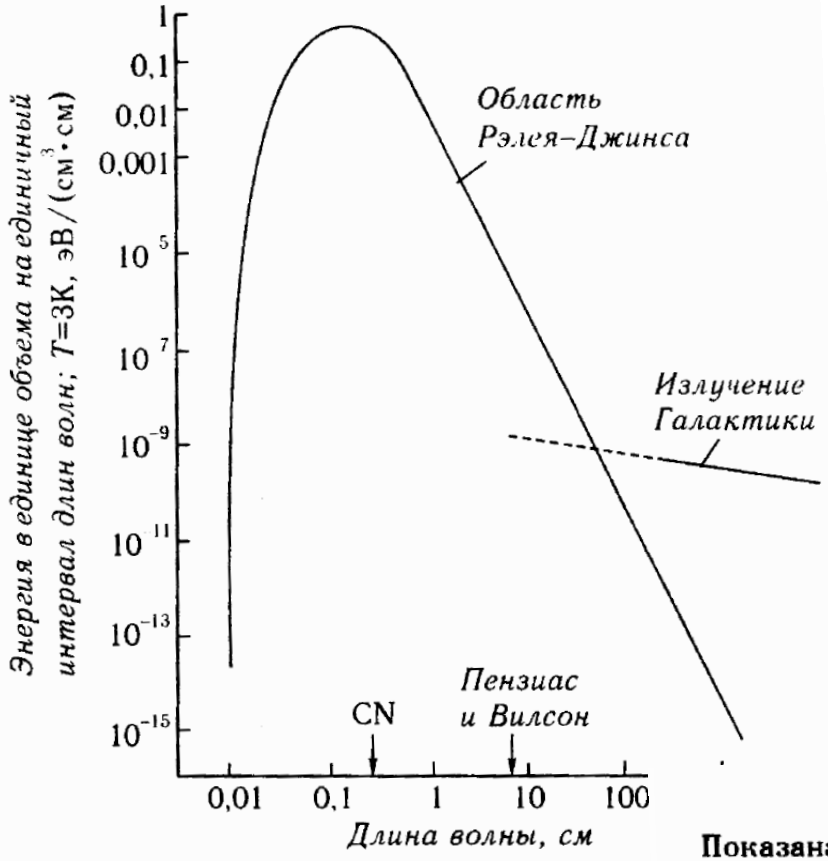


Рис. 7. Распределение Планка.

Показана плотность энергии на единичный интервал длин волн излучения черного тела с температурой 3 К как функция длины волны. (Для температуры, которая больше 3 К на множитель f, необходимо только изменить длины волн на множитель $1/f$ и увеличить плотности энергии на множитель f.) Прямая часть кривой справа приближенно описывается более простым распределением Рэлея – Джинса; кривая с таким наклоном ожидается не только для излучения черного тела, но и во многих других случаях. Крутое падение слева обязано квантовой природе излучения и является специфическим свойством излучения черного тела. Линия, помеченная «галактическое излучение», показывает интенсивность радиошума от нашей Галактики. (Стрелки указывают длину волны первоначального измерения Пензиаса и Вилсона и длину волны, для которой температура излучения может быть выведена из измерений поглощения первым возбужденным вращательным состоянием межзвездного циана.)

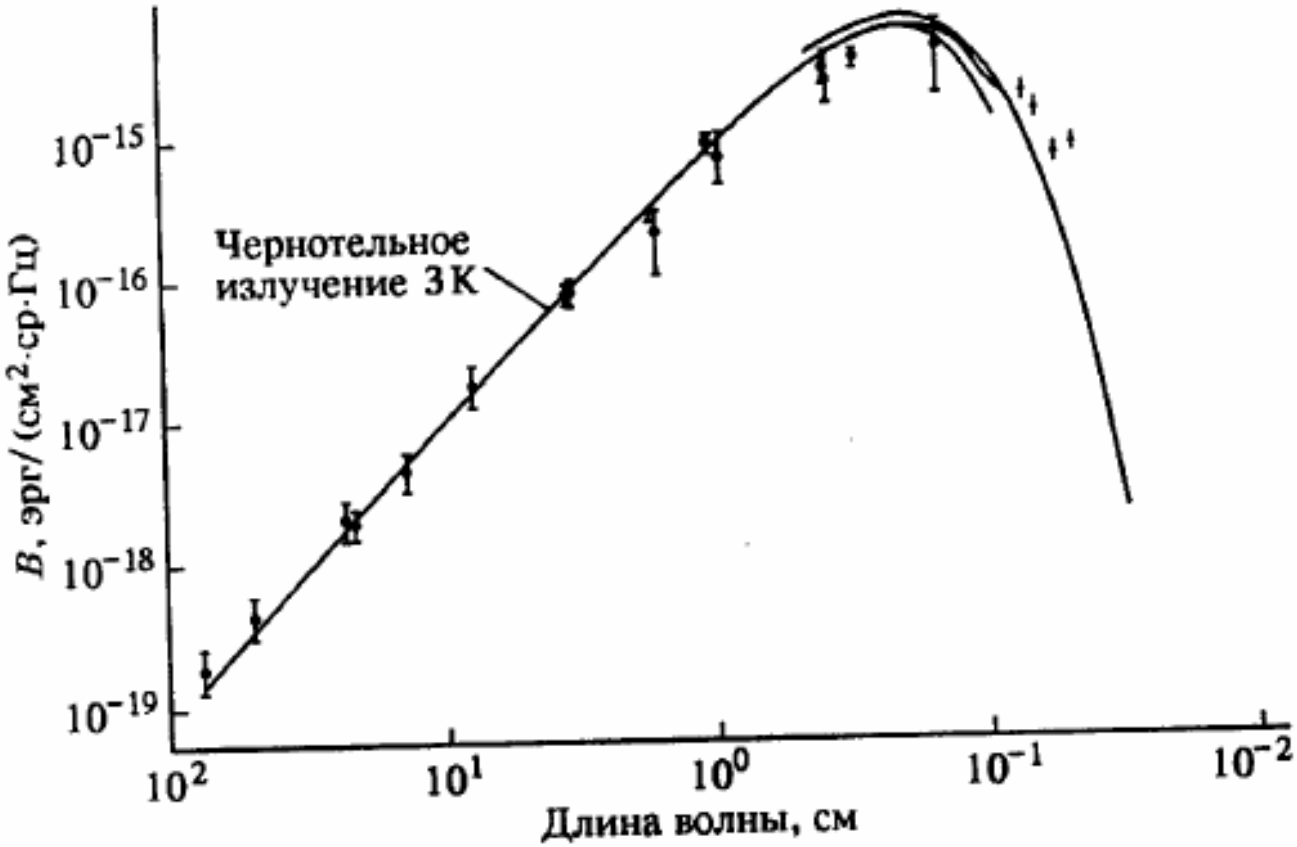


Рис. 3.1. Измеренный спектр реликтового излучения

Эволюция звезд

Olber's "Paradox": Why is the sky dark at night ?

- If the observable universe is
  1. ~~Static (eternal)~~
  2. Infinite
  3. Approximately uniformly filled with stars

- Then sky should be as bright as the surface of a star

  - A faraway star looks dimmer, but there are more stars further away!

  - Brightness falls off as $1/r^2$
  - But area at distance r in some angular region, rises as r^2
  - Hence, these cancel and sky should be equally bright as sun.

  - (e.g. Snowy mountains on a sunny day, equally bright in all directions irrespective of distance)

Resolving Olbers "Paradox"

- The universe is not infinitely old
  - Approx 15 billion years
- The speed of light is finite
  - We can only see part of the universe

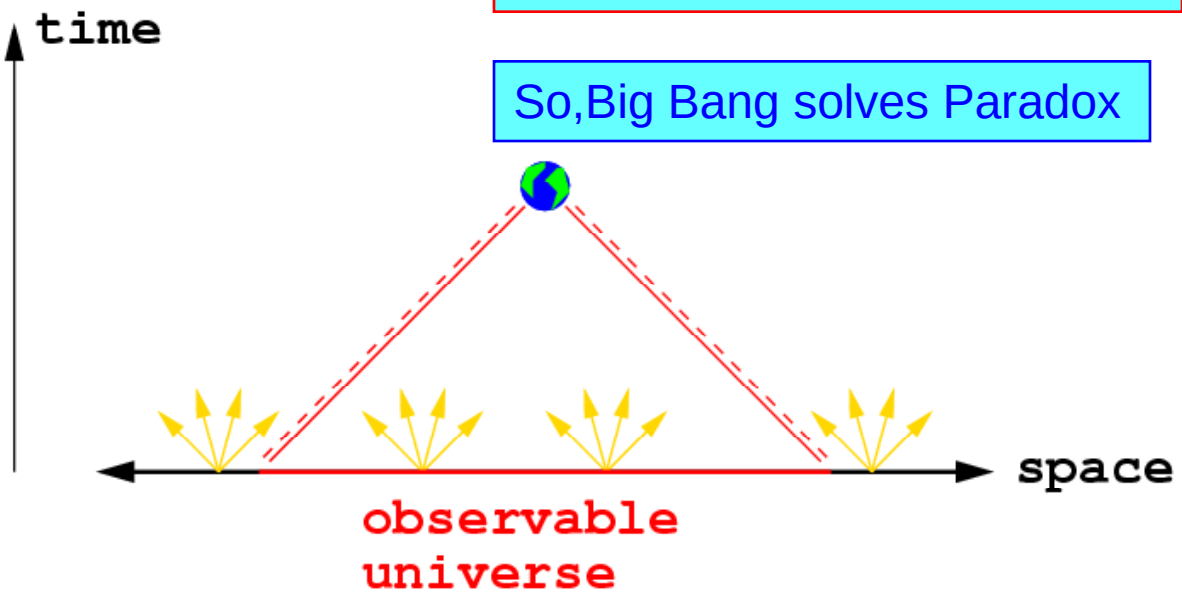
Sky is dark at night because

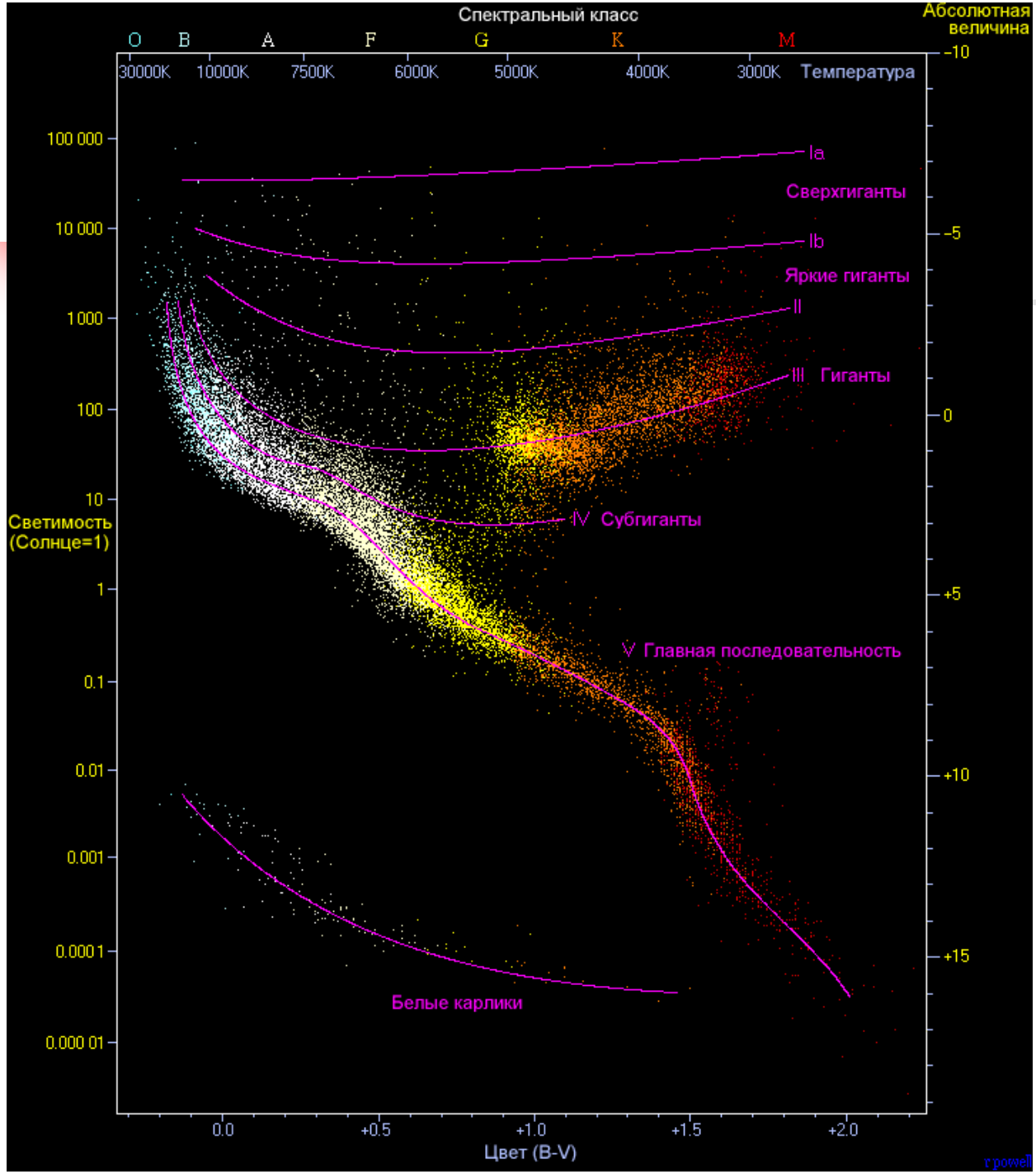
1. Universe is young – distant light hasn't reached us yet

and also

2. Expansion causes doppler shift (red-shift) of light

So,Big Bang solves Paradox





Около 90 % звёзд находятся на главной последовательности. Их светимость обусловлена ядерными реакциями превращения водорода в гелий. Выделяется также несколько ветвей проэволюционировав ших звёзд — гигантов, в которых происходит горение гелия и более тяжёлых элементов. В левой нижней части диаграммы находятся полностью проэволюционировав шие белые карлики.

ВИДЫ ЗВЕЗД

ПЕРЕМЕННЫЕ

Звезды, энергия излучения которых колеблется; меняется блеск и спектр. Причина изменения блеска состоит в периодической пульсации, т. е. в расширениях и сжатиях звезды, сопровождаемых изменениями температуры. Переменные звезды разделяют на периодические и неправильные

НЕ СТАЦИОНАРНЫЕ

Молодые звезды

ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Система из двух звезд, обращающихся вокруг общего центра масс

СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНЫЕ

Звезды, двойственность которых обнаруживается лишь спектральным анализом

КРАТНЫЕ

Система, состоящая не из двух, а из трех и более звезд

ЗАТМЕННО-ДВОЙНЫЕ

Звезды, видимый суммарный блеск которых периодически меняется вследствие того, что они двойные и одна из звезд временами загораживает другую

НОВЫЕ

Звезды, которые внезапно ста-новятся более яркими и затем постепенно возвращаются к прежнему блеску

СВЕРХНОВЫЕ

Звезды, внезапно вспыхивающие, мощность излучения которых во время вспышки во много тысяч раз превышает мощность вспышки новой звезды. К взрыву сверхновой звезды приводит гравитационный коллапс. При взрыве центральная часть становится нейтронной звездой (Пульсаром), а вещество внешних слоев выбрасывается со скоростью в несколько тысяч км/с и образует туманность

КРАСНЫЕ КАРЛИКИ

Звезды, диаметр которых в 2-3 раза меньше диаметра Солнца, их средняя плотность в 4-5 раз больше плотности поды и втрое больше плотности Солнца

КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ

Звезды большой светимости: диаметр их в сотни раз больше диаметра Солнца; плотность в тысячи раз меньше плотности воздуха

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

Электронные постзвезды: масса такого тина звезды — порядка массы Солнца, а радиус — 0,01 радиуса Солнца; плотность - 10 т/см3. Светимость -- 10 ˜ 4 светимости Солнца

НЕЙТРОННЫЕ

Звезды, состоящие из огромного сгустка нейтронов,

ПУЛЬСАРЫ

Пульсирующие космические источники радио-, оптического , рентгеновского и гамма-излучений

У радиопульсаров (быстро вращающихся нейтронных звезд) периоды импульсов - 0,03—4 с; у рентгеновских пульсаров (двойных звезд, где к нейтронной звезде перетекает вещество от второй, обычной звезды) периоды составляют несколько секунд и более

КВАЗАРЫ

Квазизвездные источники радио-излучения; космические объекты чрезвычайно малых угловых размеров. Отдаленность от Солнца — несколько тысяч мегапарсек Это образования окраин Вселенной. Они излучают в десятки раз больше энергии, чем самые мощные галактики. Масса ядра — 108-109 масс Солнца; размеры 10'6-1017 см

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

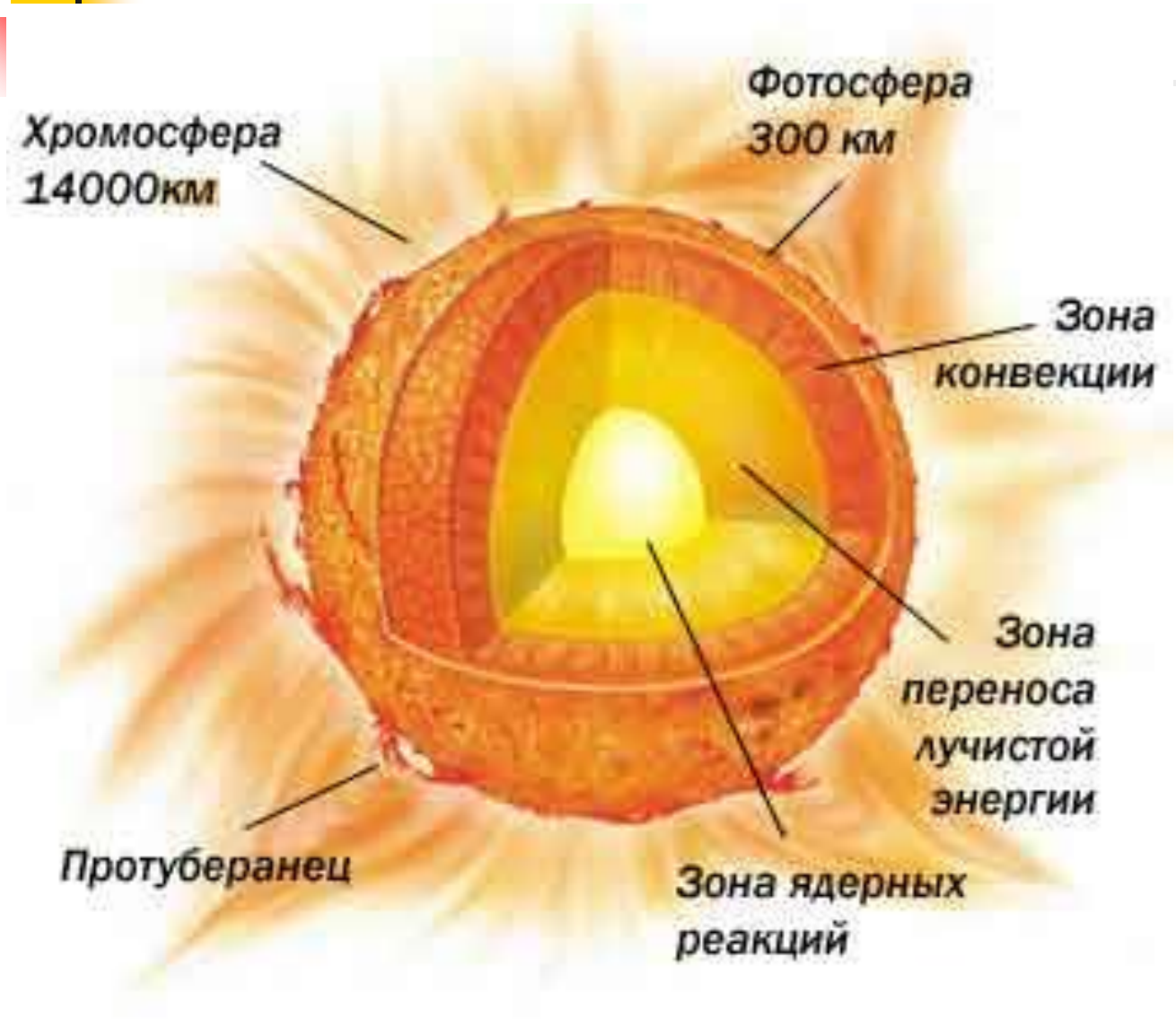
Звезды, сжатые до величины гравитационного радиуса (для Земли величина гравитационного радиуса равна 1 см, для Солнца — 3 км). В них вещество находится в состоянии сингуляр-ности (плотность выше 1074 г/см3). Черная дыра имеет и другие названия: «коллапсар», «флук-туар», «отон», «застывшая звезда», «гравитационная моги-ла»

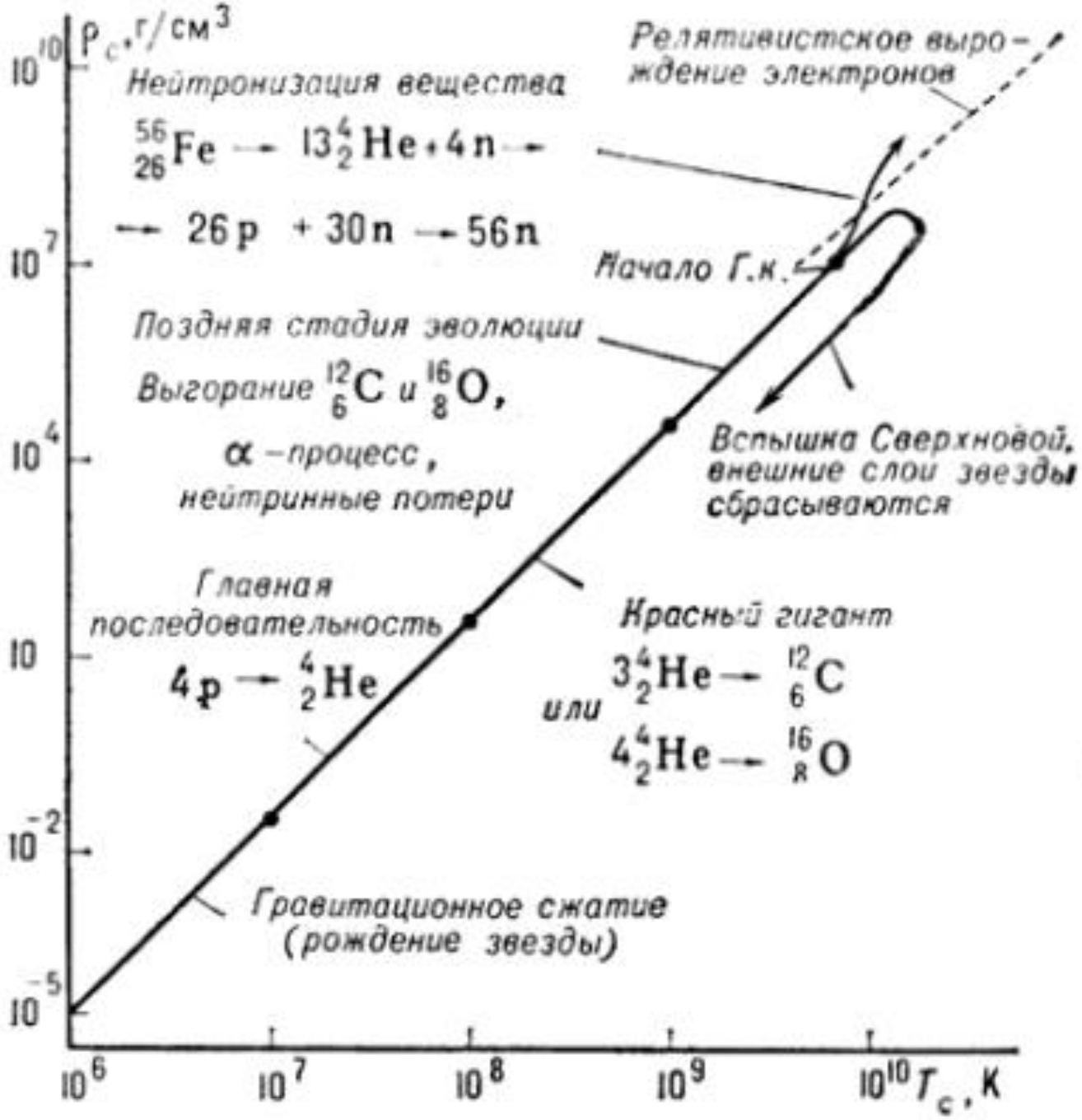
Формирование звёзд

Эволюция звезды начинается в гигантском молекулярном облаке, также называемом звёздной колыбелью. Большая часть «пустого» пространства в галактике в действительности содержит от 0,1 до 1 молекулы на см³.
Молекулярное облако же имеет плотность около миллиона молекул на см³. Масса такого облака превышает массу Солнца в 100 000—10 000 000 раз благодаря своему размеру: от 50 до 300 световых лет в поперечнике.

Пока облако свободно вращается вокруг центра родной галактики, ничего не происходит. Однако из-за неоднородности гравитационного поля в нём могут возникнуть возмущения, приводящие к локальным концентрациям массы.
столкновение двух облаков.
прохождение облака через плотный рукав спиральной галактики.
взрыв близлежащей сверхновой звезды, ударная волна которого столкнётся с молекулярным облаком на огромной скорости.

Строение звезды




ρ_c, г/см^3
10^{10}
10^7
10^4
10
10^{-2}
10^{-5}
Релятивистское вырождение электронов
Нейтронизация вещества
$^{56}_{26}Fe \to 13\,^4_2He + 4n \to$
$\to 26p + 30n \to 56n$
Начало Г.к.
Поздняя стадия эволюции
Выгорание $^{12}_6C$ и $^{16}_8O$,
α -процесс,
нейтринные потери
Вспышка Сверхновой, внешние слои звезды сбрасываются
Главная последовательность
$4p \to\, ^4_2He$
Красный гигант
$3\,^4_2He \to\, ^{12}_6C$
или
$4\,^4_2He \to\, ^{16}_8O$
Гравитационное сжатие (рождение звезды)
10^6
10^7
10^8
10^9
10^{10}
T_c, K

Звезды: “Время жизни”: Конечные стадии эволюции:

Голубые сверхгиганты класса W с массой до 100 $M_\odot$

Голубовато-белые звезды класса O с массой до 50 $M_\odot$

Бело-голубые звезды класса B с массой до10 $M_\odot$

Белые звезды класса A с массой до 5 $M_\odot$

10^6 лет

10^7 лет

10^8 лет

Красный сверхгигант

Взрыв Сверхновой звезды

Черная дыра

Волокнистая туманность

Нейтронная звезда

Желтоватые звезды класса F с массой до 3 $M_\odot$

Желтые звезды класса G, M ~1$M_\odot$

Оранжевые звезды класса K, M < 1$M_\odot$

10^9 лет

10^{10} лет

Красный гигант

Вспышка Новой звезды

Планетарная туманность

Белый карлик

10^{10} лет

Красные звезды класса массой до 0,5 $M_\odot$

Коричневые карлики, M < 0,01$M_\odot$

10^{11} лет

10^{12} лет

Черный карлик

Эволюция двойных звезд носит сложный характер, определяемый массой звезд и расстоянием между ними:

Один из возможных случаев: звезда с большей массой “ворует”, притягивает, вещество соседки, при этом ее масса и температура увеличивается, возрастает интенсивность протекания термоядерных реакций и звезда быстрее проходит свой путь развития

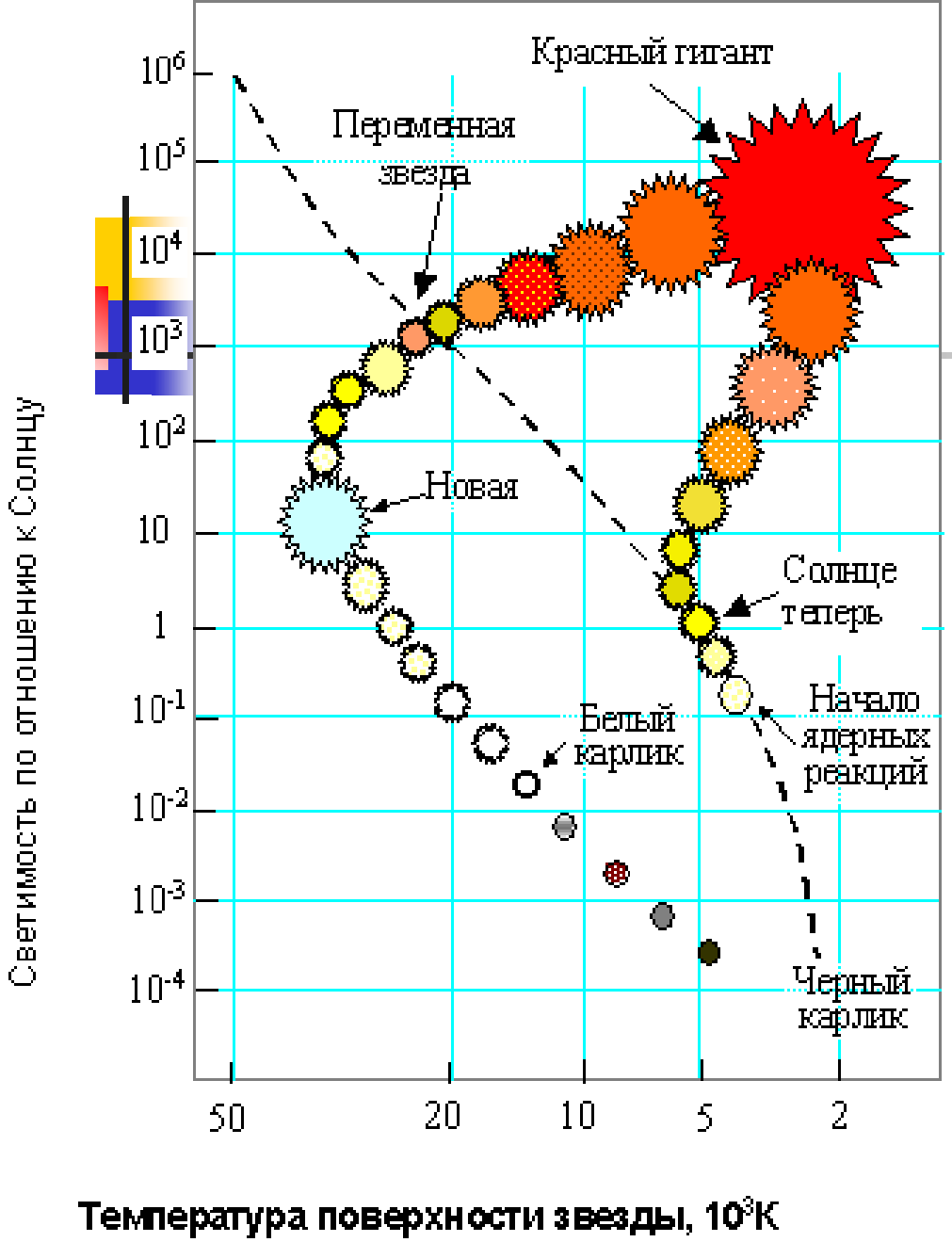


Рис. 1. Упрощенный эволюционный трек типичной звезды

Когда водород в центре звезды исчерпан, она сжимается, что приводит к увеличению температуры и началу другой термоядерной реакции – превращению гелия в углерод. При этом выделяется огромное количество энергии, и светимость звезды возрастает. Выделение энергии приводит к увеличению радиационного давления и, как следствие, к *расширению внешних слоев звезды*. В результате расширения вещество внешних слоев охлаждается, и излучение звезды становится все более *красным*, так что звезда резко смещается от главной последовательности. Расширение продолжается до тех пор, пока диаметр звезды не возрастет в 200-300 раз. Звезда при этом превращается в красного гиганта. Через пять с лишним миллиардов лет такая судьба ожидает Солнце. Вначале, все сильнее и сильнее разогреваясь, оно сожжет Землю, а затем, расширяясь, поглотит то, что от нее останется.

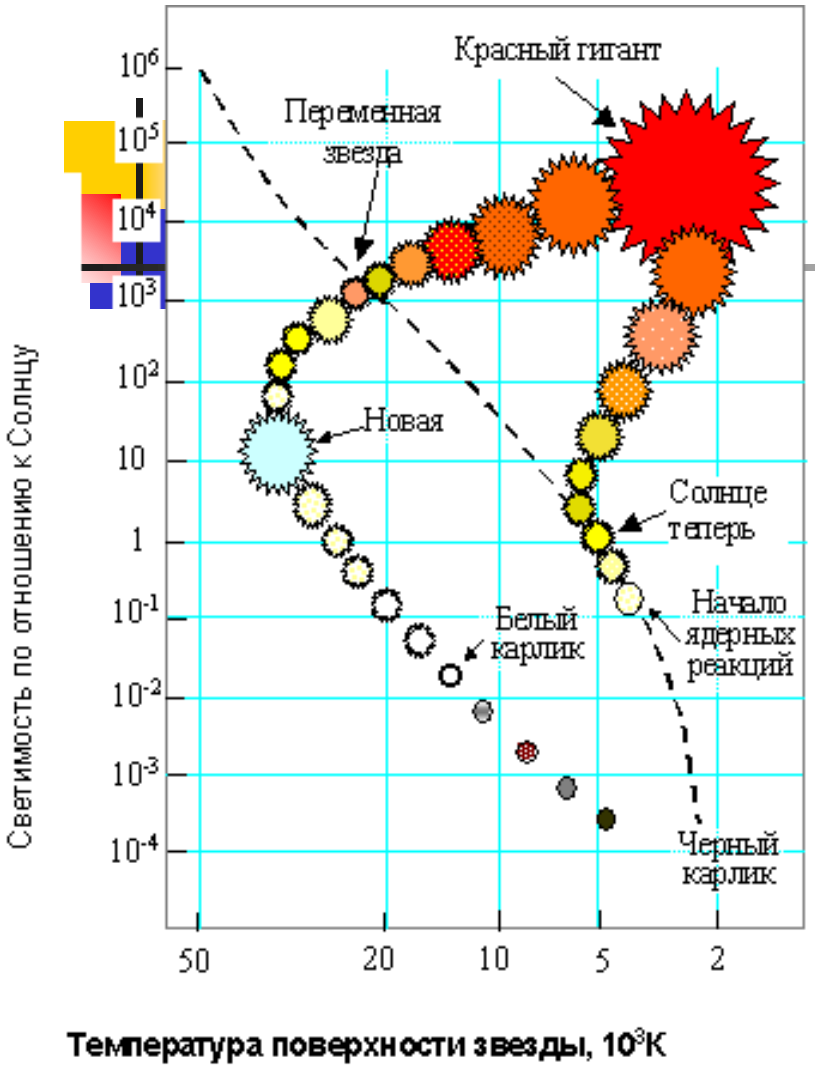


Рис. 1. Упрощенный эволюционный трек типичной звезды

По достижении стадии красного гиганта звезда эволюционирует дальше, и ее положение на диаграмме Герцшпрунга- Рессела сдвигается влево. Примерно через 1% времени жизни звезды она пересекает Главную последовательность. Солнце, например, совершит этот путь приблизительно за 100 млн. лет. В этот период у большинства звезд нарушается динамическое равновесие, и они начинают пульсировать. Это – так называемые цефеиды.

После стадии красного гиганта судьба звезды в значительной степени определяется ее массой М. Звёзды с массой меньшей, чем у Солнца, очень экономно тратят запасы своего ядерного "топлива" и могут светить десятки миллиардов лет. Внешние слои звёзд, подобных нашему Солнцу, с массами не большими 1,4 масс Солнца, постепенно расширяются и, в конце концов, совсем покидают ядро звезды. На месте гиганта остаётся маленький и горячий белый карлик. По образному выражению …белый карлик «вызревает» внутри красного гиганта. После того, как последние запасы белого карлика будут израсходованы, он быстро охлаждается, становясь красным, а затем черным карликом.

Часть молекулярного облака
Протозвезда
Планетарная туманность
Красный гигант
Белый карлик
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
Начало термоядерной реакции
Настоящее (4,57 млрд лет)
Жизненный цикл Солнца
Масштаб и цвета условны. Временная шкала в миллиардах лет (приблизительно)

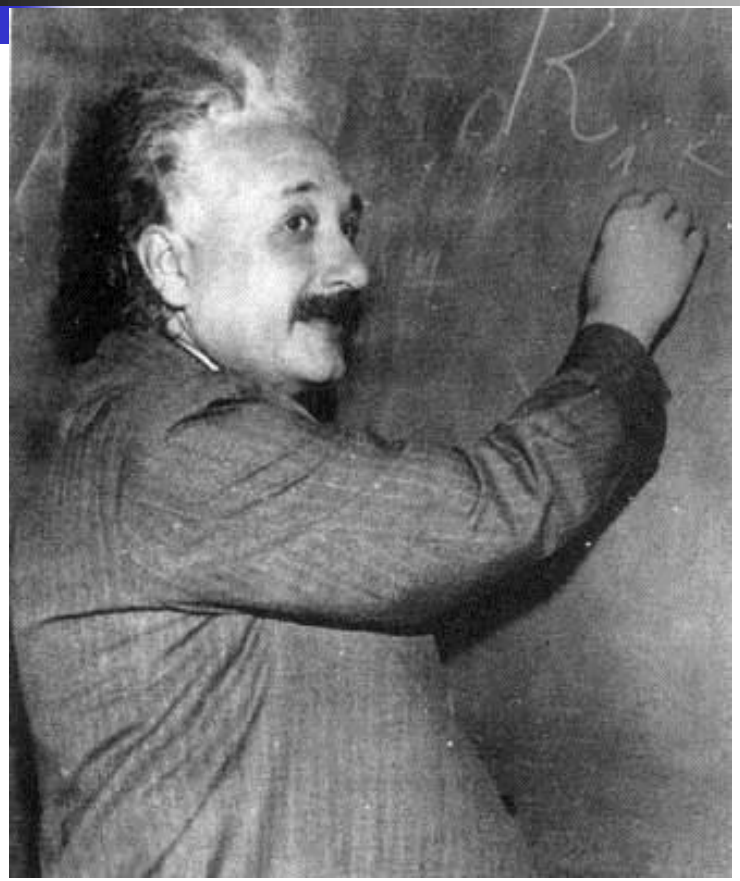
История

- В 1916 году ***А. Эйнштейн*** создает *общую теорию относительности* (ОТО)
- Она рассматривает объекты, которые движутся с большими скоростями в сильных гравитационных полях
- Он (и другие) ищут решения ОТО для описания эволюции Вселенной
- Вселенную представляют однородной и изотропной (космологический принцип)

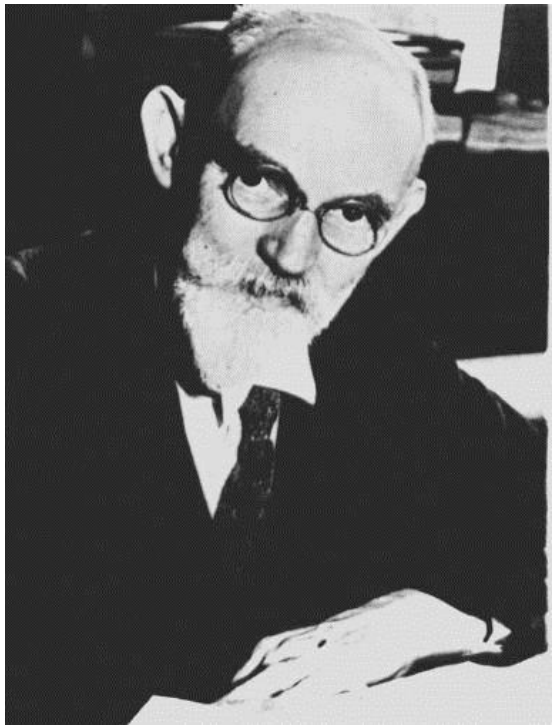
История

- В 1917 году ***А. Эйнштейн*** создает *модель стационарной вселенной*, дополняя уравнения гравитационного поля «Λ-членом»
- В 1917 году ***В. де Ситтер*** находит решение для *динамической пустой вселенной*
- *Закон Хаббла* (1929 г.) соответствует ожиданиям ОТО и соответствует случаю расширения Вселенной

История



Albert Einstein (1879 – 1955)

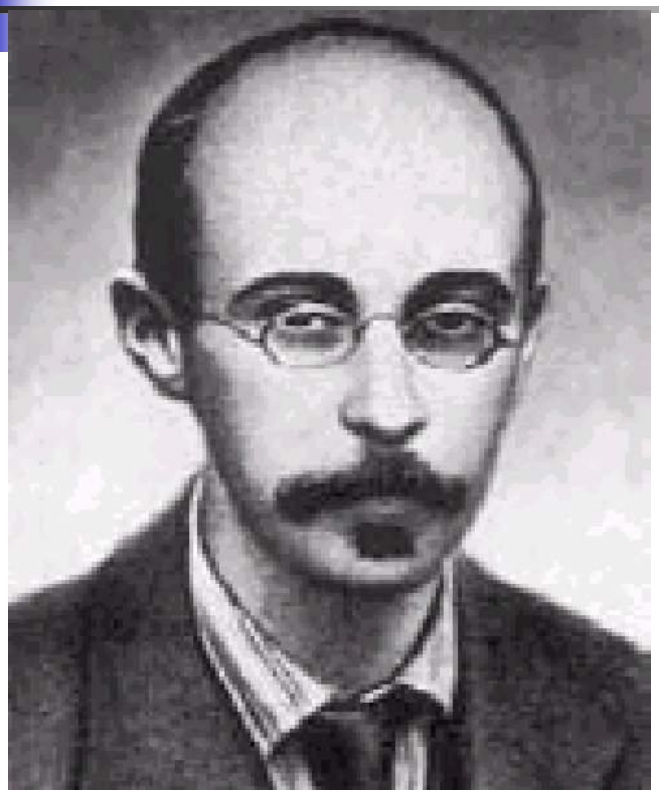


W. de Sitter
(1872 – 1934)

История

- В 1922 году ***А.А. Фридман*** и, независимо от него, в 1927 году ***Г.Е. Леметр*** развили далее модель нестационарной вселенной, учитывая массу, гравитацию и кривизну пространства
- Согласно этой теории вселенная расширяется из начальной пространственно-временной сингулярности до современного состояния и дальше

История



Александр Фридман
(1888 – 1925)

Abbe Lemaitre

- Уравнения Эйнштейна:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik}$$

- Λ - член

- Уравнения, дополненные Λ-членом

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R - \Lambda g_{ik} = -\kappa T_{ik}$$

Тензор энергии-импульса

- Симметричный тензор второго (ранга), описывающий плотность и поток энергии и импульса полей материи, и определяющий взаимодействие этих полей с гравитационным полем.

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} T^{00} & T^{01} & T^{02} & T^{03} \\ T^{10} & T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ T^{20} & T^{21} & T^{22} & T^{23} \\ T^{30} & T^{31} & T^{32} & T^{33} \end{pmatrix}.$$

- T^{00} — *объёмная плотность энергии*. Как правило, она должна быть *положительной*, однако теоретически допускается существование локальных пространственных областей с отрицательной плотностью энергии. В частности, подобную область можно создать с помощью эффекта Казимира.
- T^{10}, T^{20}, T^{30} — *плотности компонент импульса*, умноженные на *c*.
- T^{01}, T^{02}, T^{03} — *компоненты потока энергии (вектора Пойнтинга),* делённые на *c*. В силу симметрии $T^{\mu\nu}$ соблюдается равенство: $T^{0\mu} = T^{\mu 0}$
- Подматрица 3 x 3 из чисто пространственных компонент

$$T^{ik} = \begin{pmatrix} T^{11} & T^{12} & T^{13} \\ T^{21} & T^{22} & T^{23} \\ T^{31} & T^{32} & T^{33} \end{pmatrix}$$

- есть 3-мерный тензор плотности потока импульса, или тензор напряжений со знаком минус.
- Для жидкости в покое тензор энергии-импульса сводится к диагональной матрице ,

$$\mathrm{diag}(\rho c^2,\ p,\ p,\ p)$$

- Где ρ есть плотность массы, p — гидростатическое давление.

Уравнения состояния

- Под уравнением состояния во всех энциклопедиях понимается уравнение, связывающее между собой термодинамические (макроскопические) параметры системы.
- **Уравнение состояния идеального газа** (уравнения Клапейрона).
  - $p\,\mathrm{d}V = R\,\mathrm{d}T$

  где p – давление; $\mathrm{d}V$ – изменение объёма; R – газовая постоянная; $\mathrm{d}T$ – изменение температуры.
- уравнение из теории упругости, связывающую деформацию растяжения-сжатия Δl и деформирующую силу F с накопленной потенциальной энергией W_p :
  - $F\,\Delta l/2 = W_p$
- работа $\mathrm{d}A$ силы **F** по прямолинейному перемещению тела на расстояние d**s**:
  - $\mathbf{F}\,\mathrm{d}\mathbf{s} = \mathrm{d}A$
- Все три уравнения являются частными случаями одного и того же **обобщенного уравнения состояния**, приемлемого для любой формы движения.
- уравнение, связывающее энергетическое воздействие $\mathrm{d}W$ с изменением координаты состояния $\mathrm{d}q_i$, называется **уравнением состояния** *i*-ой формы движения физической системы, и оно записывается в виде:
  - $\mathrm{d}q_i = k_i\,\mathrm{d}W$ где k_i – коэффициент пропорциональности
- В современной физике при записи уравнения состояния предпочитают применять другой коэффициент пропорциональности $U_i = 1/k_i$ и записывать в виде:
  - $U_i\,\mathrm{d}q_{\Sigma i} = \mathrm{d}W$
- Отсюда вытекает уравнение состояния Клапейрона, в котором p соответствует U_i , $\mathrm{d}V$ соответствует $\mathrm{d}q_{\Sigma i}$, а $R\mathrm{d}T$ соответствует $\mathrm{d}W$. Газовая постоянная R выступает в роли размерного коэффициента, учитывающего размерности температуры $\mathrm{d}T$ и энергетического воздействия $\mathrm{d}W$.

Уравнение состояний в астрофизике

- При выводе уравнений наблюдаемое распределение галактик и межгалактического вещества заменяют идеализированной сплошной средой с плотностью ρ и давлением *p*.
- Связь между ρ и *p* устанавливается уравнением состояния, которое на отдельных участках изменения ρ и *p* принимают в виде $p = \alpha\rho c^2$, где α = const.
- для пылевидного вещества $p = 0$ ($\alpha = 0$),
- для излучения $p = {}^{1}/_{3}\rho c^2$ ($\alpha = {}^{1}/_{3}$)-

Масса Планка

Ма́сса Пла́нка — единица массы в планковской системе, обозначается M_p
Частица с такой массой имеет одинаковые радиус Шварцшильда и комптоновскую длину волны

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1{,}2209 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ/с}^2 = 2{,}176 \cdot 10^{-5} \text{ г.}$$

В физике элементарных частиц и космологии используется величина

$$\sqrt{\frac{\hbar c}{8\pi G}} \approx 4{,}340 \text{ мкг} = 2{,}43 \cdot 10^{18} \text{ ГэВ/с}^2,$$

которая называется редуцированной массой Планка. Коэффициент позволяет упростить некоторые формулы.
В отличие от большинства других планковских величин, масса Планка близка к привычным для человека масштабам: так, блоха имеет массу от 4000 до 5000 M_P.
Гипотетическая частица, масса которой равна планковской массе, называется максимон.

Время Планка

Физический смысл этой величины — время, за которое частица, двигаясь со скоростью света, преодолеет планковскую длину. Планковская система единиц названа в честь Макса Планка.

$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5{,}39121(40) \times 10^{-44} \qquad c,$$

Согласно теории Большого взрыва, мы ничего не можем сказать про вселенную в начальный момент времени, хотя предполагается, что в ней присутствуют все фундаментальные взаимодействия, а также все виды материи и энергии. Пространство-время начинает расширяться из одной точки. Спустя одно планковское время после этого события, согласно современной теоретической физике, гравитационные силы отделяются от остальных сил.

Время, прошедшее с момента Большого взрыва ($4{,}3 \cdot 10^{17}$ с), примерно равняется $8 \cdot 10^{60}$ планковским временам.

На сегодняшний день самый маленький экспериментально наблюдаемый промежуток времени составляет порядка аттосекунды (10^{-18} с), что соответствует 10^{26} планковским временам.

Планковская длина — естественная единица длины, поскольку в неё входят только фундаментальные константы: скорость света, постоянная Планка и гравитационная постоянная.

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \cong 1{,}616252(81) \times 10^{-35}$$ **м,**

Примерный радиус наблюдаемой Вселенной ($1{,}3 \cdot 10^{26}$ м или 13 миллиардов световых лет) равен $4{,}6 \cdot 10^{61}$ планковских длин.

С точностью до множителя π, планковская масса равна массе чёрной дыры, радиус Шварцшильда которой равен её комптоновской длине волны. Радиус такой чёрной дыры будет по порядку величины равен планковской длине.

Простой анализ размерностей показывает, что измерение положения физических объектов с точностью до планковской длины проблематично. Действительно, проведём следующий мысленный эксперимент. Допустим, мы хотим определить положение объекта и посылаем на него поток электромагнитного излучения, то есть фотоны. Чем больше энергия фотонов, тем короче их длина волны и тем более точным будет измерение. Если бы фотон имел энергию, достаточную для измерения объектов размером с планковскую длину, он бы сколлапсировал в микроскопическую чёрную дыру и провести измерение было бы невозможно, таким образом, планковская длина накладывает фундаментальные ограничения на точность измерения длины. Этот мысленный эксперимент использует как общую теорию относительности, так и принцип неопределённости квантовой механики. Обе теории предсказывают, что невозможно измерение с точностью, которая превосходит планковскую длину.

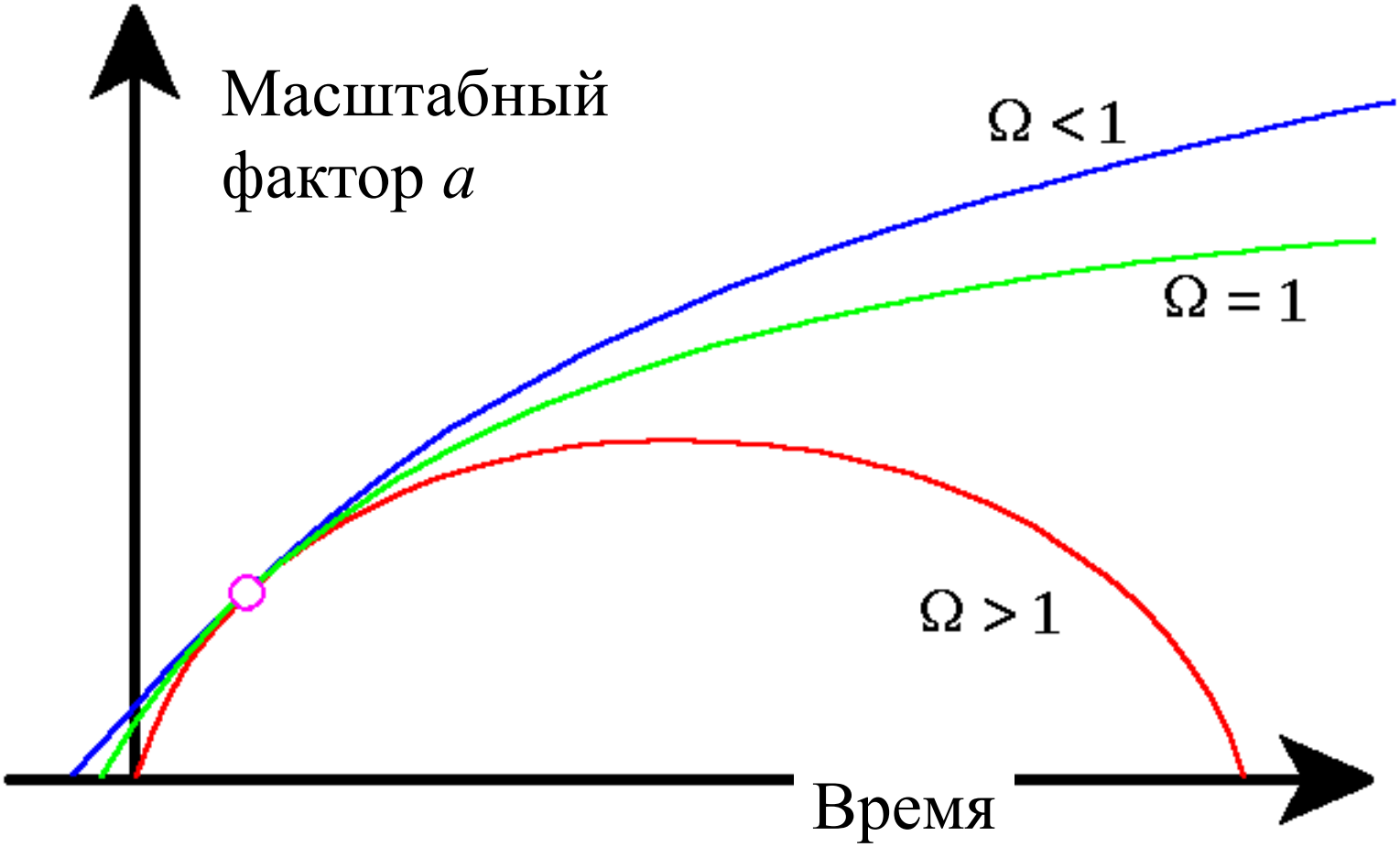
Согласно теории струн, дополнительные 6 (или 7) измерений свёрнуты до размеров планковской длины и поэтому экспериментально не могут быть обнаружены.

Планковская температура

Это одна из планковских единиц, которая представляет фундаментальный предел в квантовой механике.
Современная физическая теория не способна описать что-либо более горячее из-за отсутствия в ней разработанной квантовой теории гравитации. Выше планковской температуры энергия частиц становится настолько большой, что гравитационные силы между ними становятся сравнимы с остальными фундаментальными взаимодействиями.
Это температура Вселенной в первый момент (Планковское время) Большого взрыва в соответствии с текущими представлениями космологии.

$$T_P = \frac{m_P c^2}{k} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}} = 1.41679(11)\cdot 10^{32}\ \mathrm{K}$$

Ньютоновская космология



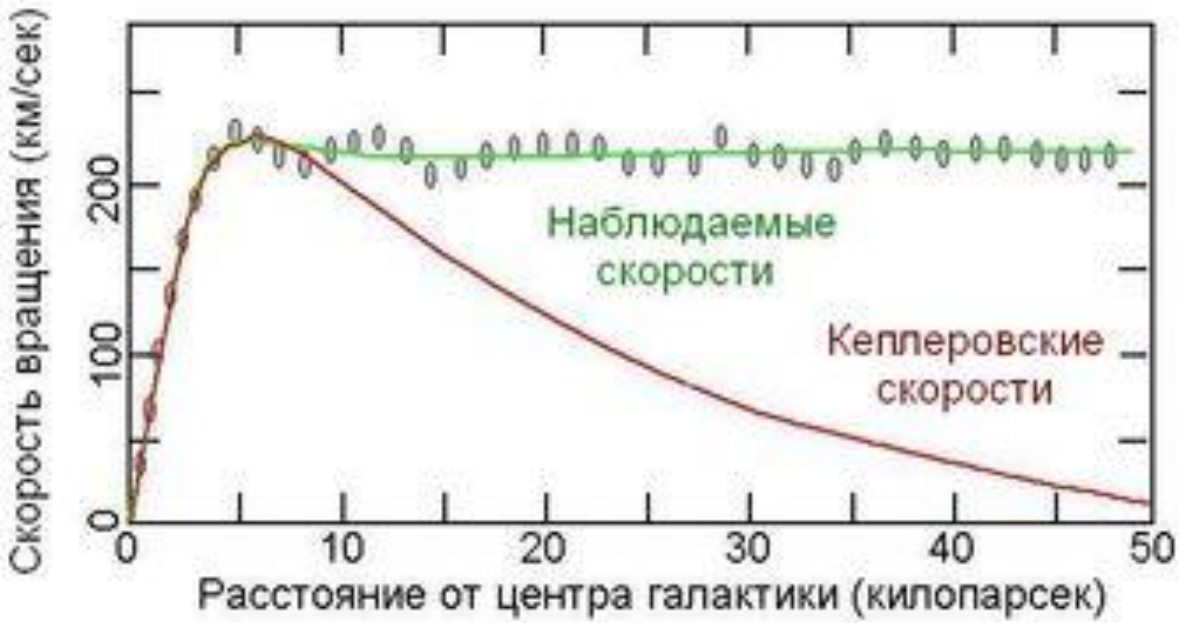
Скрытая масса и вращение галактик

Спира́льная гала́ктика— один из основных типов галактик, которые характеризуются следующими физическими свойствами:
значительный суммарный вращательный момент;
состоят из центрального балджа (почти сферического утолщения), окружённого диском:
балдж имеет сходство с эллиптической галактикой, содержащей множество старых звёзд — так называемое «Население II»

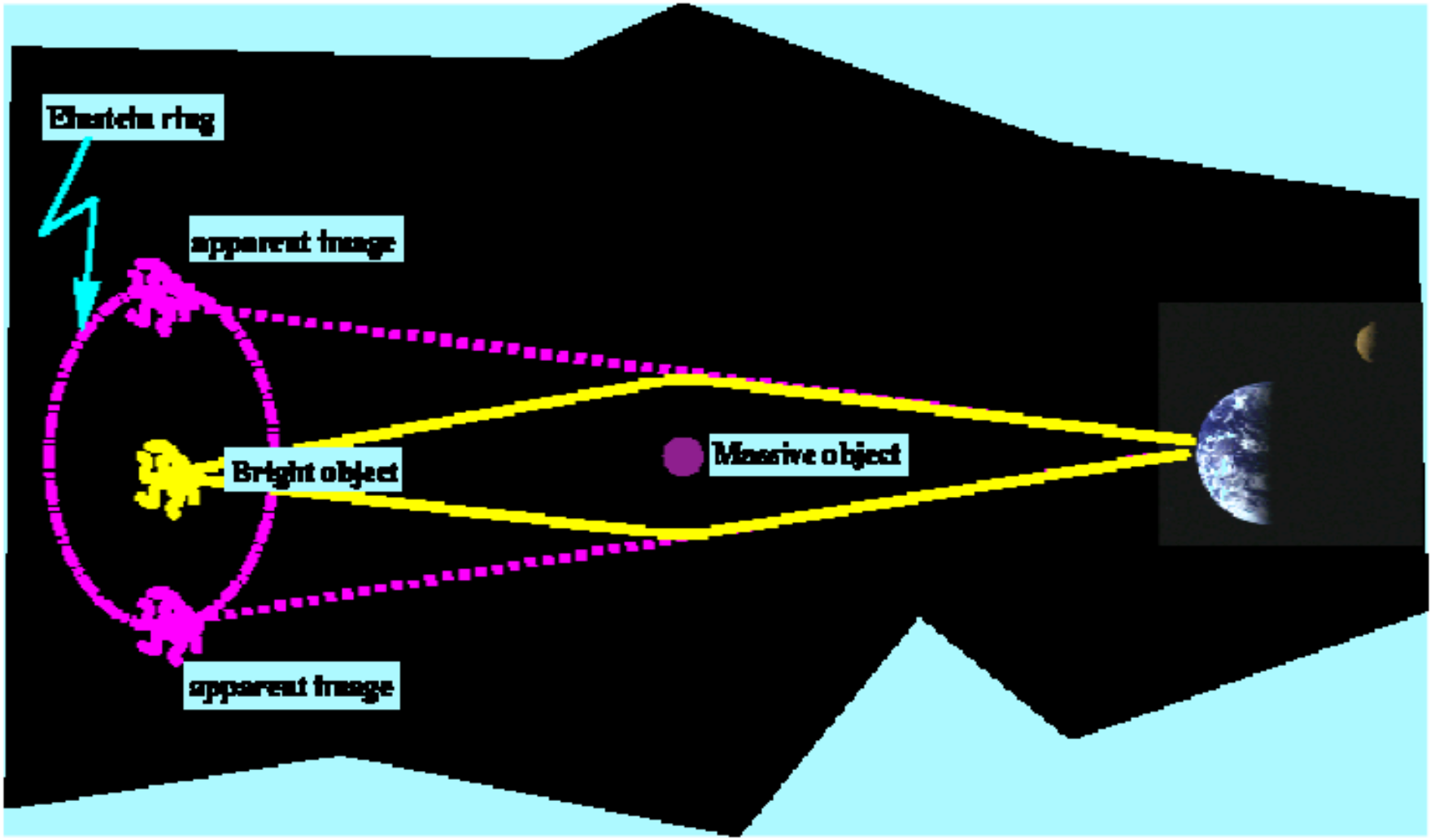
$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

за пределами объёма в котором сосредоточена основная масса галактики скорость вращения

$$v(r) \sim r^{-\frac{1}{2}}$$



Пример искривления изображения в гравитационном поле

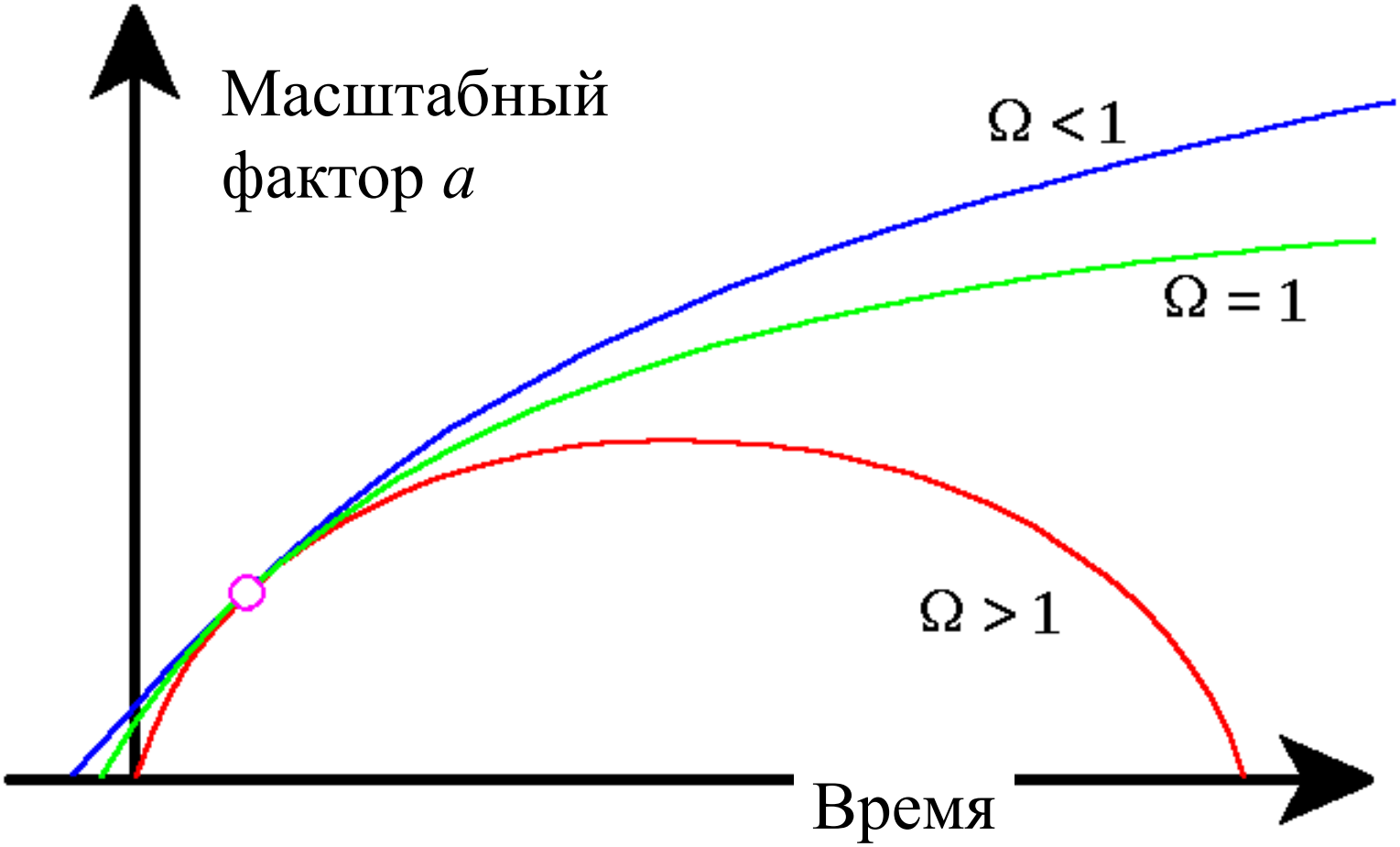


Природа и состав скрытой массы

Кроме прямых наблюдений гравитационных эффектов скрытой массы существует ряд объектов, прямое наблюдение которых затруднено, но которые могут вносить вклад в состав скрытой массы. В настоящее время рассматриваются объекты барионной и небарионной природы: если к первым относятся достаточно хорошо известные астрономические объекты, то в качестве кандидатов во вторые рассматриваются нейтрино и гипотетические элементарные частицы, следующие из классической квантовой хромодинамики (аксионы) и суперсимметричных расширений квантовых теорий поля

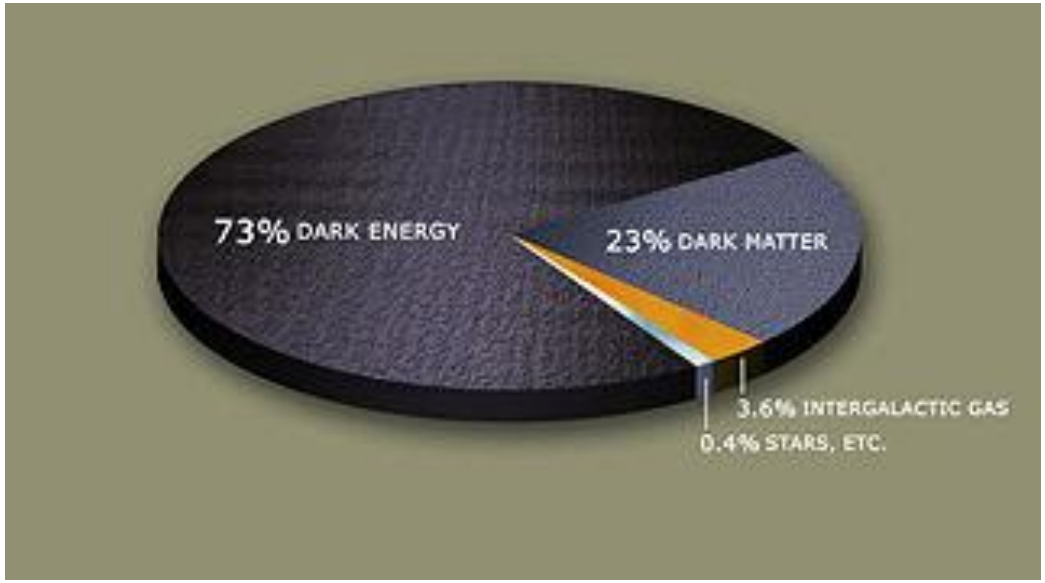
$$\Omega_m \simeq 0.3$$

Ньютоновская космология



Наша Вселенная

- Эволюция Вселенной зависит от уравнения состояния $p = \alpha\rho c^2$
- Во Вселенной одновременно есть типы материи с разными значениями α
- Последние данные убедительно показывают, что около 2/3 от общей энергии занимает т.н. ***тёмная энергия***
- Попробуем понять, что же это такое!



Постоянная Хаббла

Из вида интервала $ds^2 = c^2dt^2 - a(t)^2dx^2$ где $a(t)$ - масштабный фактор dx^2 - элемент координатного расстояния, автоматически получается закон Хаббла.

Действительно, как следует из записи для интервала, физическое расстояние есть $dl^2 = a(t)^2dx^2$, т.е. $dl = a(t)dx$

Пусть координаты точек не меняются, $dx = const$

Скорость изменения физического расстояния тем не менее не равна нулю

$$dv = dl/dt = da/dtdx = (da/dt)/a(t)(a(t)dx) = \dot{a}/adl$$

Интегрируя вдоль геодезической (т.е. вдоль луча распространения света), получается закон Хаббла: $v = Hr$

где $H \equiv \dot{a}/a$ - "постоянная" Хаббла.

Уравнения Космологических моделей (например, Фридмана) – уравнения, описывающие эволюцию масштабного фактора.

z = H·r/c - Красное смещение $\rho_c = \dfrac{3H^2}{8\pi G}$, - Критическая плотность

Темная энергия

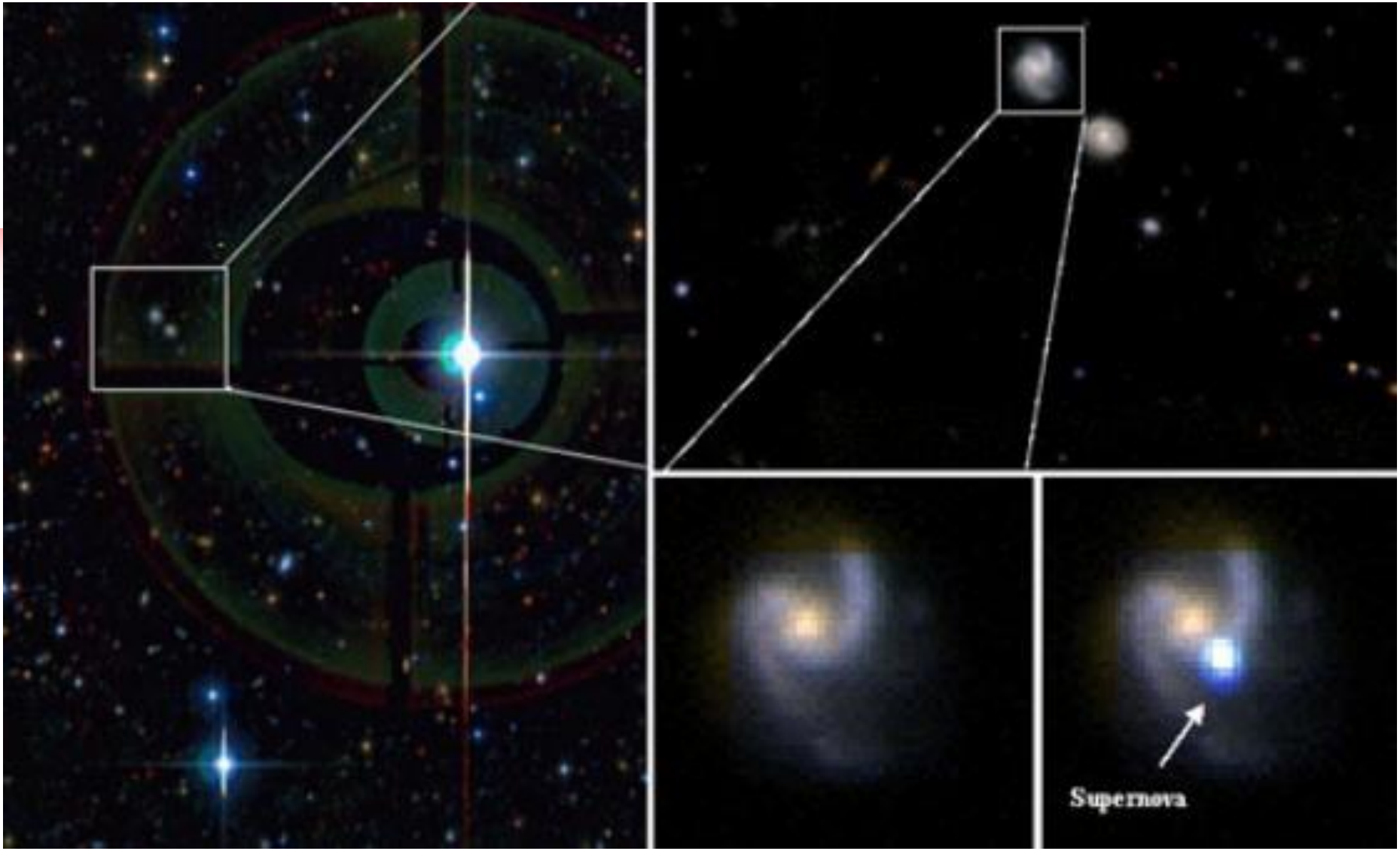
Рис. 37. Сол Перлмуттер и Брайан Шмидт – организаторы групп, открывших в 1998 году ускоренное расширение Вселенной по наблюдениям далеких сверхновых звезд.
Фото с сайтов supernova.lbl.gov и msowww.anu.edu.au.

- **Основная идея этого проекта состояла в том, что SNIa обладают постоянством в максимуме блеска и поэтому их можно использовать в качестве «стандартных свечей» — объектов, истинная мощность излучения которых известна. Если пронаблюдать кривую блеска далекой сверхновой и найти ее видимую звездную величину в момент максимума блеска, то, сравнив эту величину с истинной светимостью, можно сразу найти расстояние до звезды.**
- **Расстояние до этой же звезды можно оценить по ее красному смещению и по задаваемой космологической модели. Сопоставив данные для множества сверхновых в широком диапазоне z, можно с разумной точностью оценить основные параметры Вселенной — значение постоянной Хаббла, плотность вещества, кривизну пространства.**

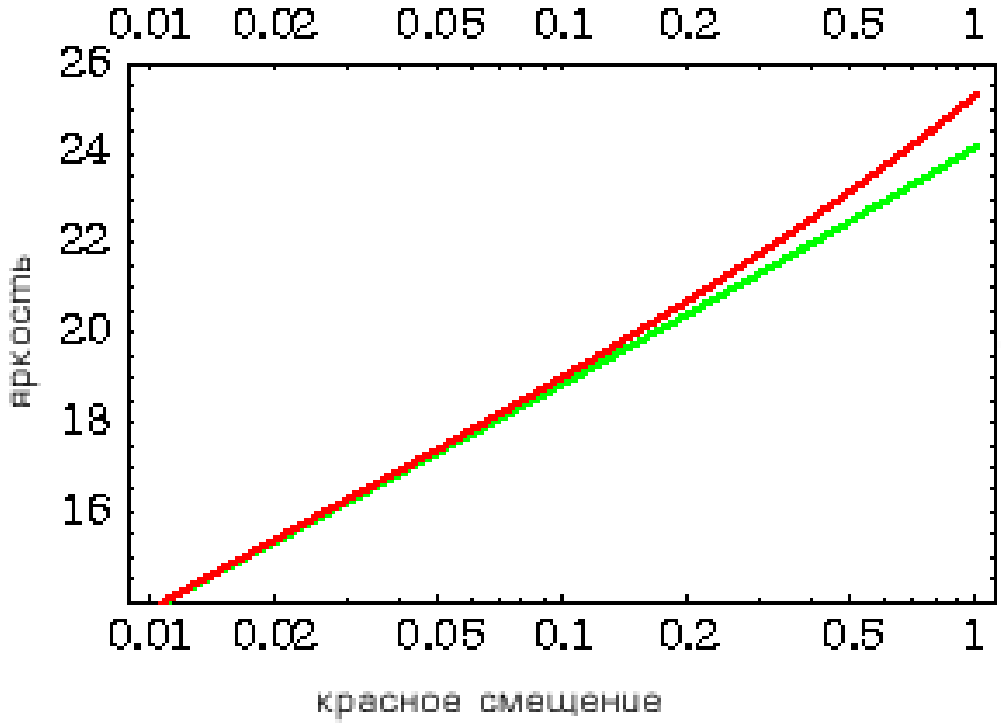
$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2}{(8\pi G)}$$

- Стояли три наблюдательные задачи:
- 1) нужно ее обнаружить
- 2) получить спектр и убедиться, что она относится к типу 1а
- 3) построить кривую блеска, чтобы с хорошей точностью оценить ее блеск в максимуме
- основная проблема - наблюдательное время на больших телескопах заказывается на полгода—год вперед, но ведь заранее никак не предугадать, когда же вспыхнет та сверхновая, для изучения которой этот инструмент понадобится! Блеск сверхновой нарастает очень быстро — если повезет, то до максимума блеска у наблюдателей есть лишь 1-2 недели, — и организовать за это время наблюдения на крупном телескопе почти невозможно.

- **Для решения этой проблемы Сол Перлмуттер предложил следующую стратегию. Вскоре после новолуния (Луна, засвечивая небо, делает невозможным наблюдения слабых далеких объектов) на относительно небольшом телескопе получают снимки нескольких десятков площадок на небе, включающих изображения множества галактик.**
- **Затем, в начале следующего новолуния, то есть примерно через 3 недели, эти области снова наблюдают и с помощью автоматических процедур, сравнивающих изображения, выделяют появившиеся за это время точечные объекты.**
- **После исключения возможных дефектов изображений и следов космических частиц остаются кандидаты в сверхновые звезды. Эти кандидаты тут же начинают исследовать на крупном телескопе, время на котором было заранее заказано на нужные даты.**
- **Такой подход позволяет почти гарантированно, «по заказу» открывать новые сверхновые, причем, чем больше галактик попало в исследуемую область неба, тем больше вероятность открыть сверхновую.**



Сверхновая SNLS-03D4ag вспыхнула 3 миллиарда лет назад. Ее светимость в 100 миллиардов раз больше солнечной, однако ее видимый блеск (22m) в 25 тысяч раз меньше, чем у яркой голубой звезды (11m) в левой части снимка. В свою очередь, эта звезда в 100 раз слабее самых слабых звезд, различимых невооруженным глазом (6m). Иллюстрация с сайта www.cfht.hawaii.edu



Зависимость расстояния сверхновых звезд от их яркости; очевидно, яркость зависит непосредственно от расстояния. Две линии представляют два вида Вселенной, которые отличаются между собой количеством вещества и значением космологической постоянной.

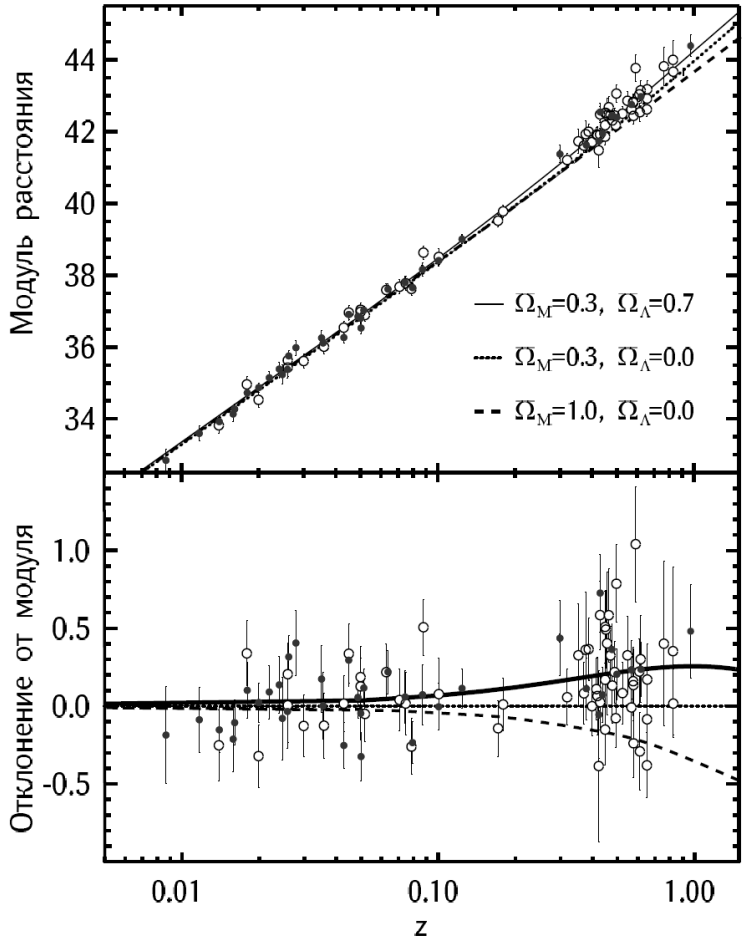


Рис. 38. Объединенные результаты SCP (открытые кружки) и HZT (черные точки) для далеких SNIa. На верхнем рисунке показана зависимость модуля расстояния (разность видимой и абсолютной звездной величин сверхновой в максимуме блеска) от красного смещения. Линиями показаны ожидаемые зависимости для разных космологических моделей. Внизу изображены отклонения модулей расстояния от предсказаний модели пустой Вселенной с $\Omega_m = 0.3$ и с нулевой космологической постоянной. Видно, что данные для далеких SN лежат, в среднем, выше этой теоретической зависимости, изображенной горизонтальной прямой из точек. Сдвиг наблюдательных точек описывается моделью с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$ (непрерывная кривая). (Перлмуттер, Шмидт 2003)

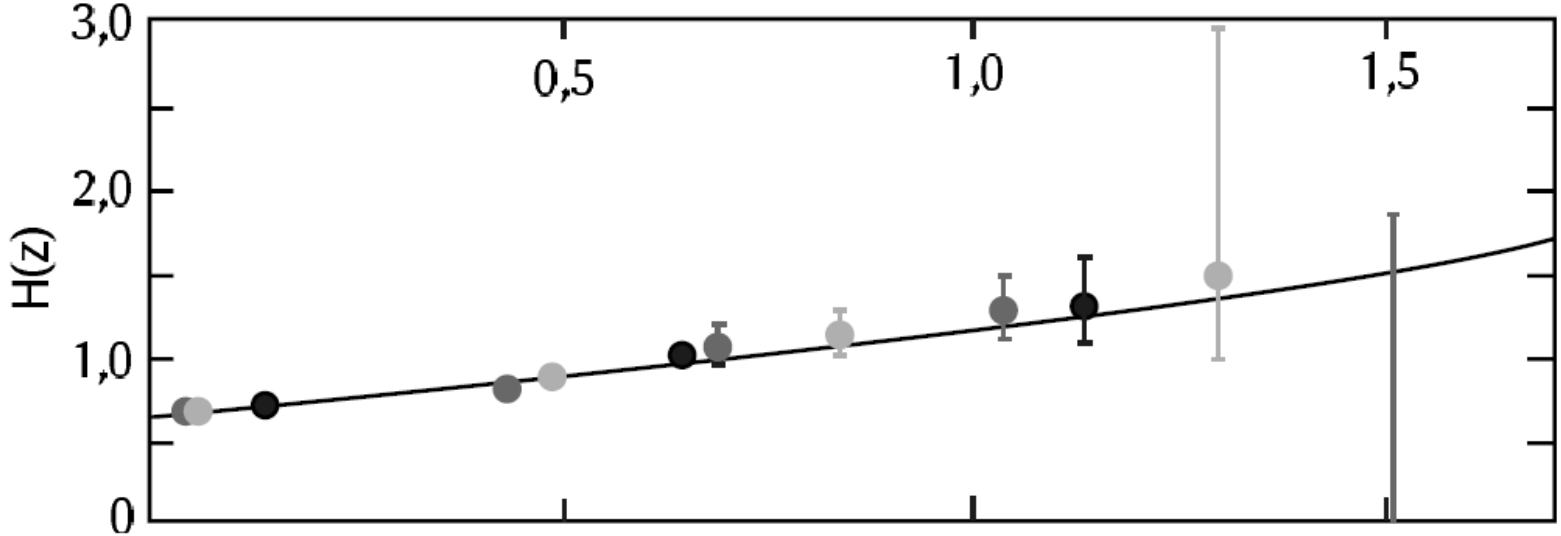
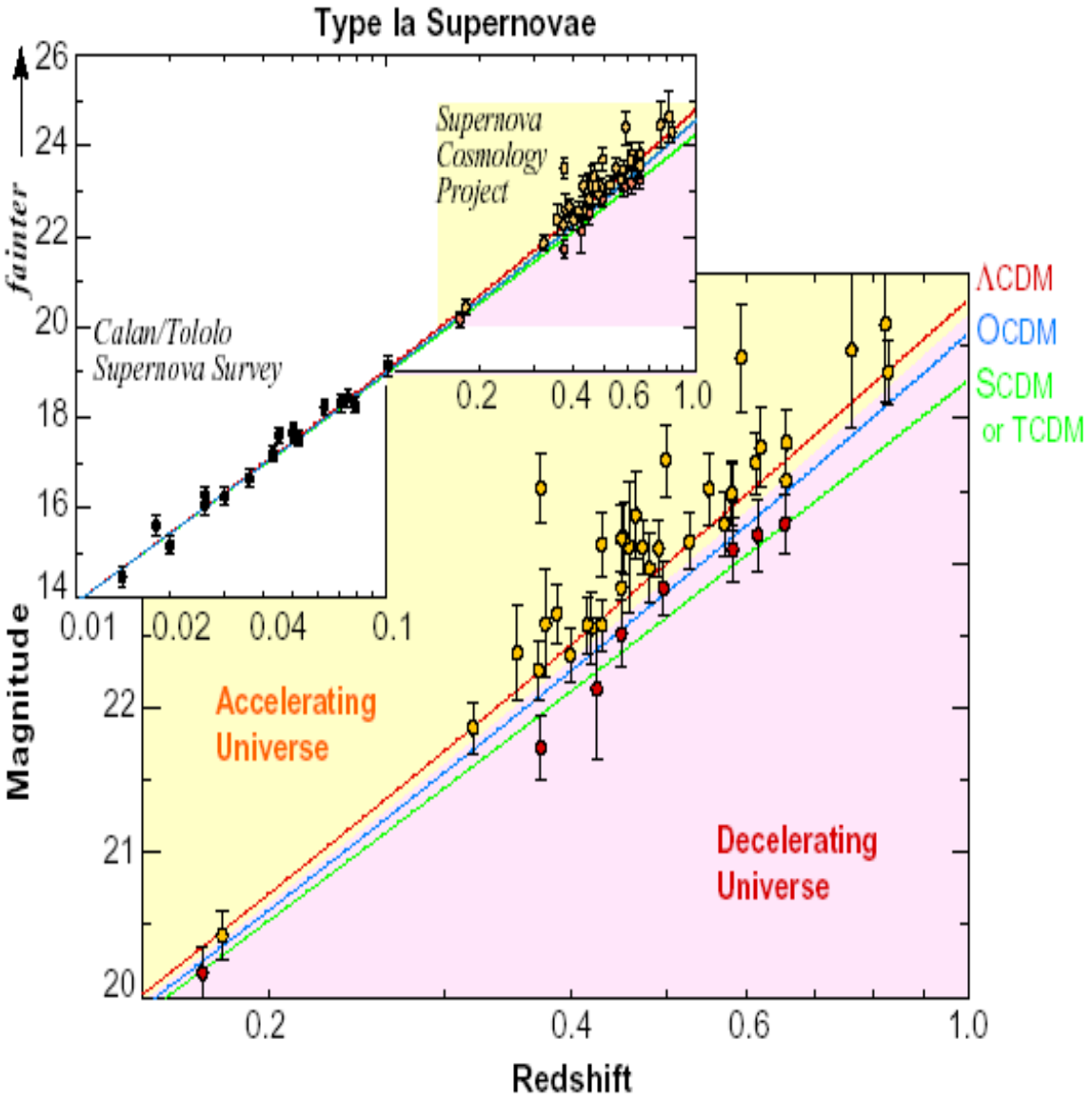


Рис. 39. Эволюция значения постоянной Хаббла по данным о далеких SN Ia согласно Райссу и др. (2007). По вертикальной оси отложено нормированное на 100 км/с/Мпк значение постоянной Хаббла, по горизонтальной — красное смещение (числа вдоль верхней горизонтальной оси — значения *z*). Кружки — результаты измерений, непрерывная кривая — ожидаемая зависимость для модели с $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Блеск сверхновых меньше ожидавшегося. Следовательно, расстояние до них – больше ожидавшегося. Следовательно, расширение Вселенной ускоряется

$$f_{obs} = L/4\pi R^2 ,$$

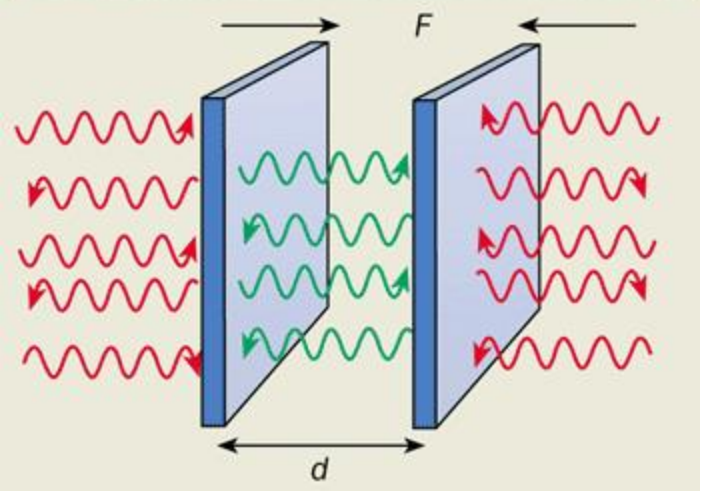
$$H_0 R = c z$$



Эффект Казимира

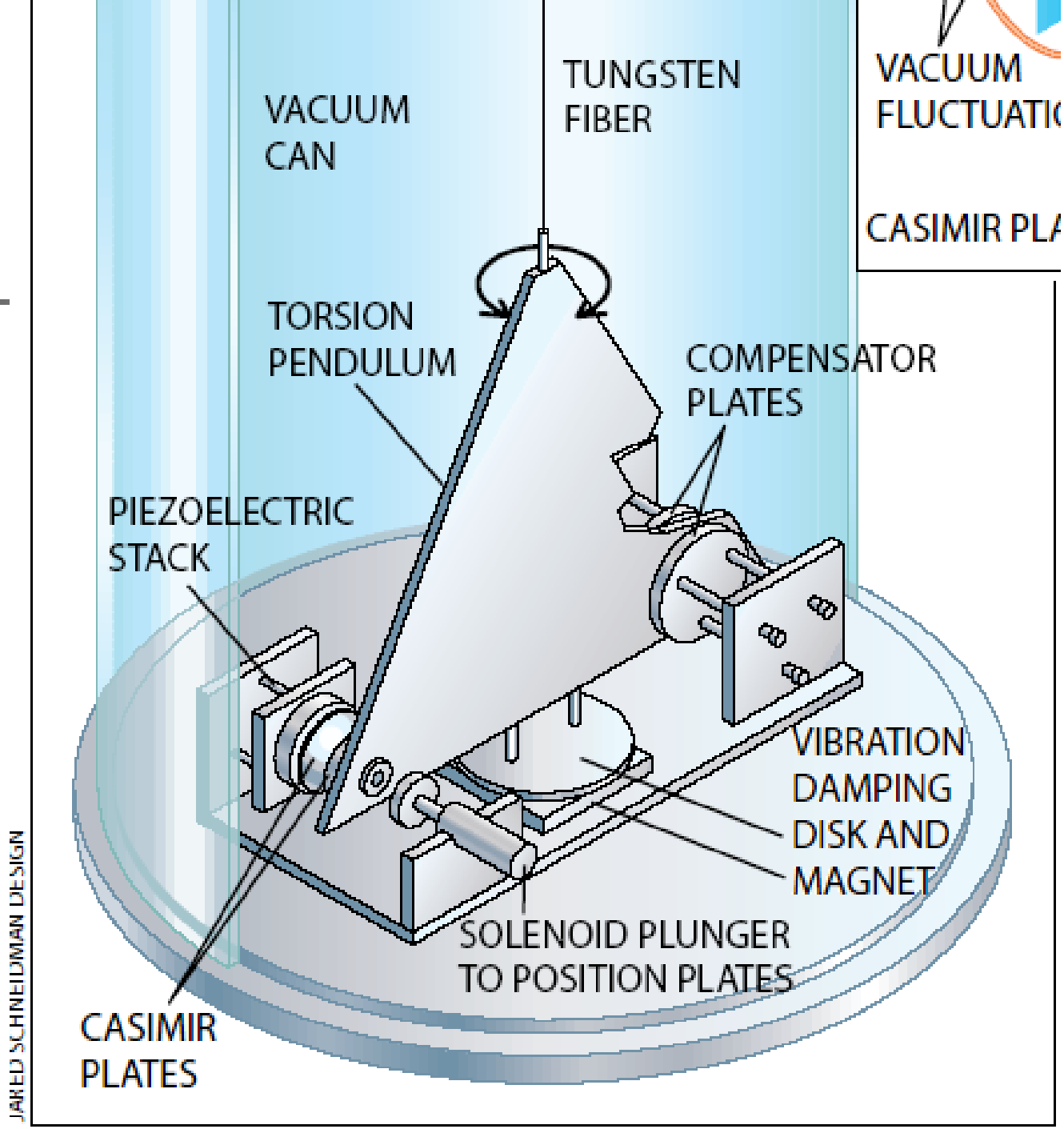
Сила притяжения, действующая на единицу площади F_c / *A* для двух параллельных идеальных зеркальных поверхностей, находящихся в абсолютном вакууме, составляет

$$\frac{F_c}{A} = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4}$$



***d* — расстояние между поверхностями.**
Сила Казимира чрезвычайно мала. Расстояние, на котором она начинает быть сколько-нибудь заметной, составляет порядка нескольких микрон. Однако, будучи обратно пропорциональной 4-й степени расстояния, она очень быстро растёт с уменьшением последнего. На расстояниях порядка 10 нм — сотни размеров типичного атома — давление, создаваемое эффектом Казимира, оказывается сравнимым с атмосферным.

Эффект, аналогичный эффекту Казимира, наблюдался в XVIII веке французскими моряками. Когда два корабля, раскачивающихся из стороны в сторону в условиях сильного волнения, но слабого ветра, оказывались на расстоянии меньше приблизительно 40 метров, в результате интерференции волн, в пространстве между кораблями прекращалось волнение. Спокойное море между кораблями создавало меньшее давление, чем волнующееся с внешних сторон. В результате возникала сила, стремящаяся столкнуть корабли. В качестве контрмеры, руководство по мореплаванию начала 1800-х рекомендовало обоим кораблям послать по шлюпке с 10 − 20 моряками, чтобы расталкивать корабли.


VACUUM
CAN
TUNGSTEN
FIBER
VACUUM
FLUCTUATI
CASIMIR PLA
TORSION
PENDULUM
COMPENSATOR
PLATES
PIEZOELECTRIC
STACK
VIBRATION
DAMPING
DISK AND
MAGNET
SOLENOID PLUNGER
TO POSITION PLATES
CASIMIR
PLATES
JARED SCHNEIDMAN DESIGN

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

- Однородно “разлита” во Вселенной, не собирается в сгустки (галактики, скопления)
- Вселенная сегодня расширяется с ускорением

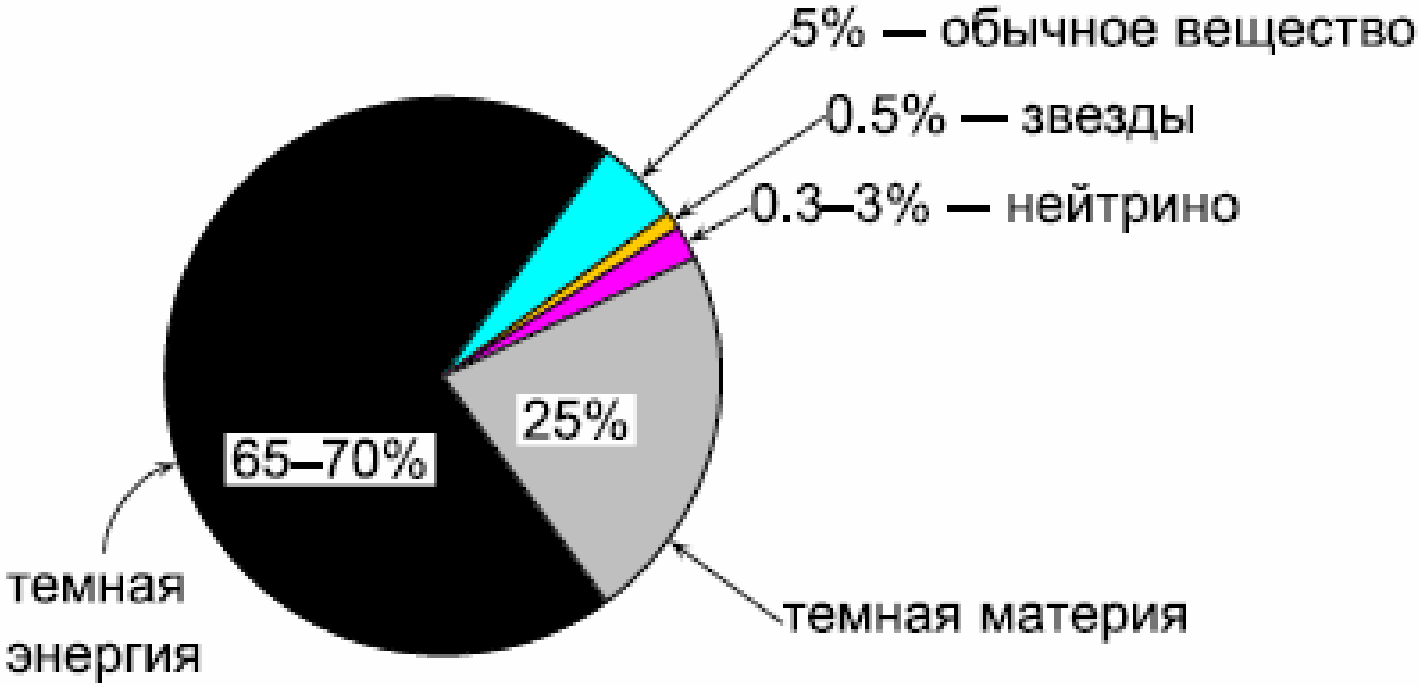
Темп расширения растет

$\Downarrow$

АНТИГРАВИТАЦИЯ

- Нет противоречия с общей теорией относительности, если субстанция имеет отрицательное давление.

Баланс энергий в современной Вселенной



Краткая Биография Вселенной

Возраст: 13.7 миллиардов лет

Размер наблюдаемой части Вселенной: 13.7 миллиардов световых лет, примерно 10^{28} см

Средняя плотность вещества: 10^{-29} г/см^3

Вес: более 10^{50} тонн

Вес в момент рождения:

Согласно теории Большого Взрыва: **бесконечный вес**

Согласно инфляционной теории: **меньше миллиграмма**

Само понятие «**антропный принцип**» появилось уже во второй половине 20-го века. По современным представлениям ***этот принцип вытекает из взаимосвязи мировых констант*** (скорость света, гравитационная постоянная, постоянная Планка, масса электрона и др.). Он был сформулирован в 1961 г. Антропный принцип утверждает, что ***мир таков, каков он есть, потому что в противном случае некому было бы спрашивать, почему он таков*.**

Действительно, свойства окружающего нас мира явились результатом определенной согласованности соответствующих фундаментальных констант, и надо отметить, что интервал возможных значений этих фундаментальных констант, обеспечивающих нам мир, пригодный для жизни, очень мал.

Так, например, ослабление на порядок ***константы сильных взаимодействий*** привело бы к тому, что на ранних стадиях расширения Вселенной образовывались, в основном, только тяжелые элементы, и в мире не было бы источников энергии (водорода и его соединений). Если бы ***гравитационная постоянная*** была бы на порядок меньше, то не возникло бы условий (достаточного сжатия протозвезды) для начала ядерных реакций в звездах. ***Усиление слабых взаимодействий*** превратило бы на ранних этапах эволюции Вселенной все вещество в гелий, а значит, отсутствовали бы реакции термоядерного синтеза в звездах. ***Усиление электромагнитного взаимодействия*** на порядок привело бы к заключению электронов внутри атомных ядер и невозможности вследствие этого химических реакций и превращений.

Наконец, если бы первоначальная скорость расширения Вселенной была хотя бы на 0,1% меньше критической скорости расширения, то Вселенная расширилась бы лишь до трех миллионных долей своего нынешнего радиуса, после чего начала бы сжиматься.

Большой взрыв

- Основная идея модели Большого взрыва заключается в том, что наша Вселенная медленно расширяется (с замедлением) и остывает с момента своего рождения, т.е. примерно 13,7 млрд лет. Такой процесс расширения и охлаждения способен объяснить множество деталей в структуре современной нам Вселенной, если она начала свою эволюцию при строго определенных условиях.
- Наша Вселенная должна была быть практически совершенно однородной - за исключением совсем небольших неоднородностей в массе и энергии. Кроме того. Вселенная должна была быть геометрически плоской, что означает, что лучи света и пути движущихся объектов не искривлялись тканью пространства-времени.

Открытия последнего десятилетия:

1. Вскоре после рождения Вселенной она расширялась с большим ускорением (инфляция Вселенной)

2. 5 миллиардов лет назад расширение Вселенной опять начало ускоряться, но очень медленно (за счет темной энергии)

Космологическая инфляция

Согласно инфляционной модели, Вселенная вскоре после своего рождения очень короткое время экспоненциально расширялась, многократно удваивая свои линейные размеры.

Ученые полагают, что начало этого процесса совпало по времени с отделением сильного взаимодействия и произошло на временной отметке в 10^{-36} с.

Такое расширение (с легкой руки американского физика-теоретика Сидни Коулмена его стали называть космологической инфляцией) было крайне непродолжительным (до 10^{-34} с), однако увеличило линейные размеры Вселенной как минимум в 10^{30}– 10^{50} раз, а возможно, что и много больше.

В соответствии с большинством конкретных сценариев, инфляцию запустило антигравитационное квантовое скалярное поле, плотность энергии которого постепенно уменьшалась и в конце концов дошла до минимума.

Перед тем как это случилось, поле стало быстро осциллировать, порождая элементарные частицы.

В результате к окончанию инфляционной фазы Вселенная заполнилась сверхгорячей плазмой, состоящей из свободных кварков, глюонов, лептонов и высокоэнергетичных квантов электромагнитного излучения.

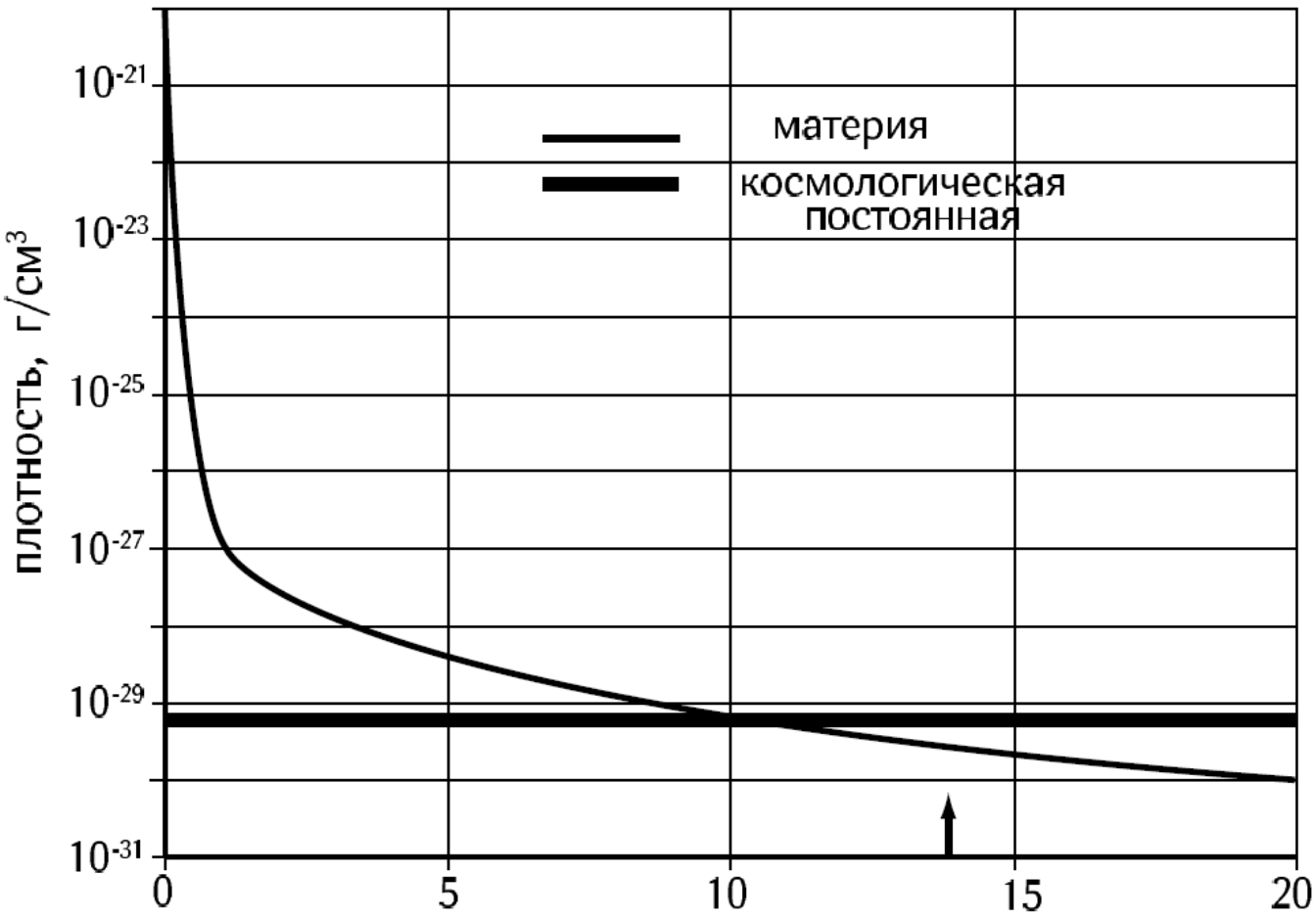


Рис. 40. Зависимость плотности вещества (кривая линия) и темной энергии (горизонтальная прямая) от времени (Краус 2002). Вдоль вертикальной оси отложена плотность в г/см^3, вдоль горизонтальной – время, прошедшее после Большого взрыва, в миллиардах лет. Стрелочкой указана современная эпоха.

Краткая история развития Вселенной		
Время	**Температура**	**Состояние Вселенной**
10^{-45} - 10^{-37} сек	Более 10^{26}K	Инфляционное расширение
10^{-6} сек	Более 10^{13}K	Появление кварков и электронов
10^{-5} сек	10^{12}K	Образование протонов и нейтронов
10^{-4} сек - 3 мин	10^{11} - 10^{9} K	Возникновение ядер дейтерия, гелия и лития
400 тыс. лет	4000 K	Образование атомов
15 млн. лет	300 K	Продолжение расширения газового облака
1 млрд. лет	20 K	Зарождение первых звезд и галактик
3 млрд. лет	10 K	Образование тяжелых ядер при взрывах звезд
10 - 15 млрд. лет	3 K	Появление планет и разумной жизни
10^{14} лет	10^{-2} K	Прекращение процесса рождения звезд
10^{37} лет	10^{-18} K	Истощение энергии всех звезд
10^{40} лет	-20 K	Испарение черных дыр и рождение элементарных частиц
10^{100} лет	10^{-60} - 10^{-40} K	Завершение испарения всех черных дыр

Открытие реликтового излучения.

В 1960 в Кроуфорд-Хилле, Холмдел (шт. Нью-Джерси, США) была построена антенна для приема радиосигналов, отраженных от спутника-баллона «Эхо». К 1963 для работы со спутником эта антенна была уже не нужна, и радиофизики Роберт Вудро Уилсон (р. 1936) и Арно Элан Пензиас (р. 1933) из лаборатории компании «Белл телефон» решили использовать ее для радиоастрономических наблюдений. Антенна представляла собой 20-футовый рупор. Вместе с новейшим приемным устройством этот радиотелескоп был в то время самым чувствительным инструментом в мире для измерения радиоволн, приходящих с широких площадок на небе. В первую очередь предполагалось провести измерения радиоизлучения межзвездной среды нашей Галактики на волне длиной 7,35 см.

Предварительные испытания приемной системы показали несколько больший шум, чем ожидалось по расчетам, но казалось правдоподобным, что это связано с небольшим избытком шума в усилительных цепях. Чтобы избавиться от этих проблем, Пензиас и Уилсон использовали устройство, известное как «холодная нагрузка»: сигнал, приходящий от антенны, сравнивается с сигналом от искусственного источника, охлажденного жидким гелием при температуре около четырех градусов выше абсолютного нуля (4 K). В обоих случаях электрический шум в усилительных цепях должен быть одинаков, и поэтому полученная при сравнении разница дает мощность сигнала, идущего от антенны. Этот сигнал содержит вклады только от антенного устройства, земной атмосферы и астрономического источника радиоволн, попадающего в поле зрения антенны.

Пензиас и Уилсон ожидали, что антенное устройство будет давать очень небольшой электрический шум. Естественно, какой-то радиошум ожидался на такой длине волны и от земной атмосферы, но этот шум должен иметь характерную зависимость от направления: он должен быть пропорционален толщине атмосферы в том направлении, в каком смотрит антенна: немного меньше в направлении зенита, чуть больше в направлении горизонта.

К своему удивлению, Пензиас и Уилсон обнаружили весной 1964, что они принимают на длине волн 7,35 см довольно заметное количество микроволнового шума, не зависящего от направления. Они нашли, что этот «статический фон» не меняется в зависимости времени суток, а позднее обнаружили, что он не зависит и от времени года. Следовательно, это не могло быть излучением Галактики, ибо в этом случае его интенсивность менялась бы в зависимости от того, смотрит антенна вдоль плоскости Млечного Пути или поперек. Отсутствие каких-либо вариаций наблюдаемого микроволнового шума с направлением весьма серьезно указывало на то, что эти радиоволны, если они действительно существуют, приходят не от Млечного Пути, а от значительно большего объема Вселенной.

Исследователям было ясно, что необходимо снова проверить, не может ли сама антенна производить этот электрический шум. В частности, было известно, что в рупоре антенны угнездилась пара голубей. Они были пойманы, отправлены по почте на принадлежащий компании «Белл» участок в Виппани, выпущены на волю, вновь обнаружены несколькими днями спустя на своем месте в антенне, снова пойманы и наконец утихомирены более решительными средствами. Однако во время аренды помещения голуби покрыли внутренность антенны тем, что Пензиас назвал «белым диэлектрическим веществом», которое при комнатной температуре могло быть источником электрического шума. В начале 1965 был демонтирован рупор антенны и вычищена вся грязь, однако это дало очень малое уменьшение наблюдаемого уровня шума.

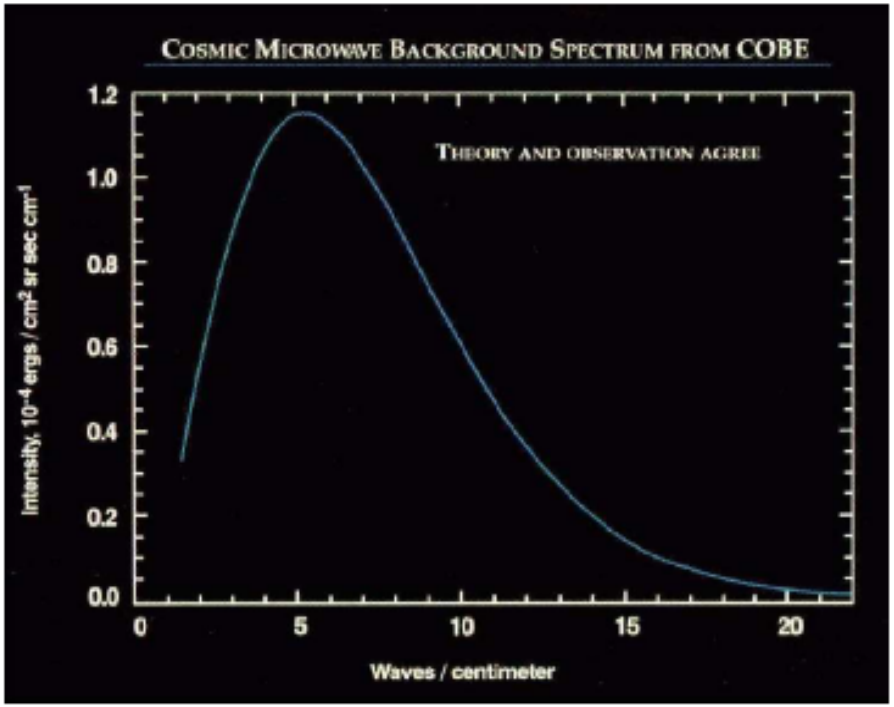
Когда все источники помех были тщательно проанализированы и учтены, Пензиас и Уилсон вынуждены были сделать вывод, что излучение приходит из космоса, причем со всех сторон с одинаковой интенсивностью. Оказалось, что пространство излучает так, как будто бы оно нагрето до температуры 3,5 кельвина (точнее, достигнутая точность позволяла заключить, что «температура космоса» от 2,5 до 4,5 кельвина). Необходимо заметить, что это очень тонкий экспериментальный результат: например, если перед рупором антенны расположить брикет мороженого, то он сиял бы в радиодиапазоне, в 22 млн. раз более ярком, чем соответствующей участок неба. Пензиас и Уилсон не торопились с публикацией.

Случилось так, что Пензиас позвонил по совершенно другому поводу своему приятелем Бернарду Берку из Массачусетского технологического института. Незадолго до этого Берк слышал от своего коллеги Кена Тсрнера из Института Карнеги о докладе, который тот, в свою очередь, слышал в Университете Джонса Хопкинса, сделаланном теоретиком из Принстона Филом Пиблслм, работавшим под руководством Роберта Дикке. В этом докладе Пиблс приводил аргументы в пользу того, что должен существовать фоновый радиошум, оставшийся от ранней Вселенной и имеющий сейчас эквивалентную температуру около 10 K.

- **Инфляцию порождает инфляционная энергия особого типа, которая вместе с гравитационными силами заставила раннюю Вселенную стремительно расшириться за очень короткий промежуток времени. Экстремально большая плотность инфляционной энергии обладает необычным свойством - она практически не меняется при расширении. Наиболее же удивительное ее свойство заключается в том, что гравитационное поле инфляционной энергии обладает не притяжением, а отталкиванием, которое и обусловливает такое быстрое расширение нашего мира.**

Уравнение планковской кривой имеет вид

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\frac{h\nu}{exp(h\nu/\ kT)-1}$$



Микроволновое излучение Вселенной иначе называется реликтовым. *Такое название связано с тем, что оно несет в себе информацию о физических условиях, царивших во Вселенной тогда, когда еще не успели образоваться звезды и галактики. Сам факт существования этого излучения говорит о том, что в прошлом свойства Вселенной были существенно иными, чем в настоящее время.*

Поскольку спектр реликтового излучения является спектром абсолютно черного тела, это излучение формируется ***полностью непрозрачным нагретым телом.***
Так как это излучение равномерно приходит к нам со всех сторон, мы со всех сторон окружены каким-то ***непрозрачным телом.***
Однако Вселенная — в современном ее виде — почти полностью прозрачна для радиоволн в микроволновом (мм и см) диапазоне. Стало быть, вещество, испускающее это излучение, отстоит от нас намного дальше, чем любые наблюдаемые объекты.
Вселенная была полностью непрозрачной в глубоком прошлом, когда еще не образовались звезды и галактики; а раз непрозрачной, значит, очень плотной.