

Мир атомных ядер

**Космос,
в котором
мы живем**



Симметрии

Симметрии лежат в основе Вселенной. Они определяют свойства окружающего нас мира, которые остаются неизменными, даже если эти свойства подвергаются различного рода преобразованиям.

Симметрией объекта являются действия над ним, при котором его внешний вид не изменяется. Чем больше различных преобразований можно произвести над объектом без изменений его внешнего вида, тем более симметричным он является. Шар более симметричен, чем куб.

Изменяются ли физические законы при различных преобразованиях? Законы Ньютона одинаково работают независимо от того, в каком месте пространства они используются. Они обладают трансляционной инвариантностью. Эта симметрия присуща не только законам Ньютона, но и законам электромагнетизма, специальной и общей теории относительности, законам квантовой механики, всем теориям современной физики.

В основе вращательной симметрии или вращательной инвариантности лежит идея, что каждое пространственное направление является одинаковым по сравнению с любым другим. Результаты наблюдений не зависят от ориентации в пространстве.

Галилей установил симметрию двух систем отсчёта движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью. Эйнштейн расширил симметрию Галилея утверждением, что скорость света не зависит ни от движения наблюдателя, ни от скорости движения источника света.

Общая теория относительности устанавливает симметрию среди всех **ускоренных** систем отсчёта. Силы, которые ощущаются при ускоренном движении, не отличаются от сил, которые возникают в гравитационном поле соответствующей интенсивности – большее ускорение эквивалентно большему гравитационному полю.

Симметрии пространства-времени

- Симметрия физических законов относительно сдвигов в пространстве означает эквивалентность всех точек пространства — однородность пространства. С однородностью пространства связан **закон сохранения импульса P** .
- Симметрия физических законов относительно поворотов системы как целого в пространстве означает эквивалентность всех направлений в пространстве, т.е. оно изотропно. С изотропностью физического пространства связан **закон сохранения момента количества движения J** .
- Симметрия физических законов относительно начала отсчета времени (сдвиг во времени) означает эквивалентность всех моментов времени. Время однородно, т.е. физические законы не меняются с течением времени. С однородностью времени связан **закон сохранения энергии E** .
- Симметрия физических законов относительно всех систем отсчета X , движущихся друг относительно друга с постоянной по величине и направлению скоростью, означает эквивалентность всех инерциальных систем отсчета.
- Выполнение законов сохранения энергии E , импульса P , момента количества движения J обусловлено макроскопической структурой пространства-времени на больших расстояниях.
- Понятие симметрии можно расширить, включив в него более абстрактные понятия.

Симметрии. Законы сохранения

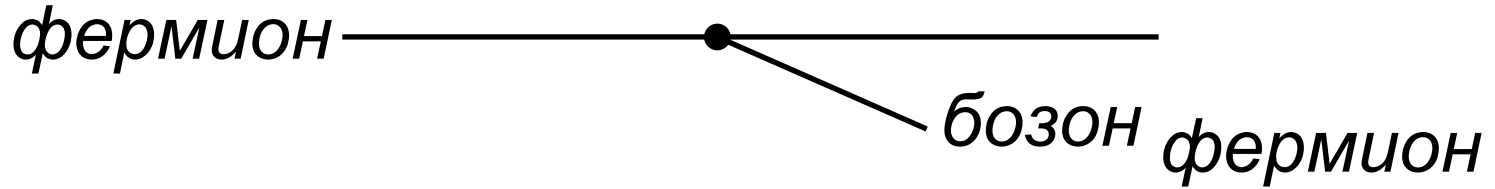
С какими типами симметрий связаны законы сохранения Q , B , L , s , c , b , t , I ? В настоящее время известен ответ для электрического заряда Q и изоспина I .

Сохранение изоспина в сильных взаимодействиях – следствие инвариантности этого взаимодействия относительно поворотов в изоспиновом пространстве. Сохранение электрического заряда есть следствие того, что не существует способа измерить абсолютные значения электрического потенциала и во всех соотношениях он является относительной величиной. Законы сохранения B , L являются эмпирическими. В теориях Великого объединения эти законы нарушаются.

Законы сохранения

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
Аддитивные законы сохранения			
Электрический заряд, Q	+	+	+
Энергия, E	+	+	+
Импульс, p	+	+	+
Момент количества движения, J	+	+	+
Барионный заряд, B	+	+	+
Лептонные заряды L_e, L_μ, L_τ	+	+	+
Странность, s	+	+	-
Charm, c	+	+	-
Bottom, b	+	+	-
Top, t	+	+	-
Изоспин, I	+	-	-
Проекция изоспина, I_3	+	+	-

Объединение взаимодействий



Астрономия

Механика

**Гравитационное
взаимодействие**

Электричество

**Электромагнитное
взаимодействие**

Магнетизм

**Электрослабое
взаимодействие**

Слабое взаимодействие

**Великое
объединение**

Сильное взаимодействие

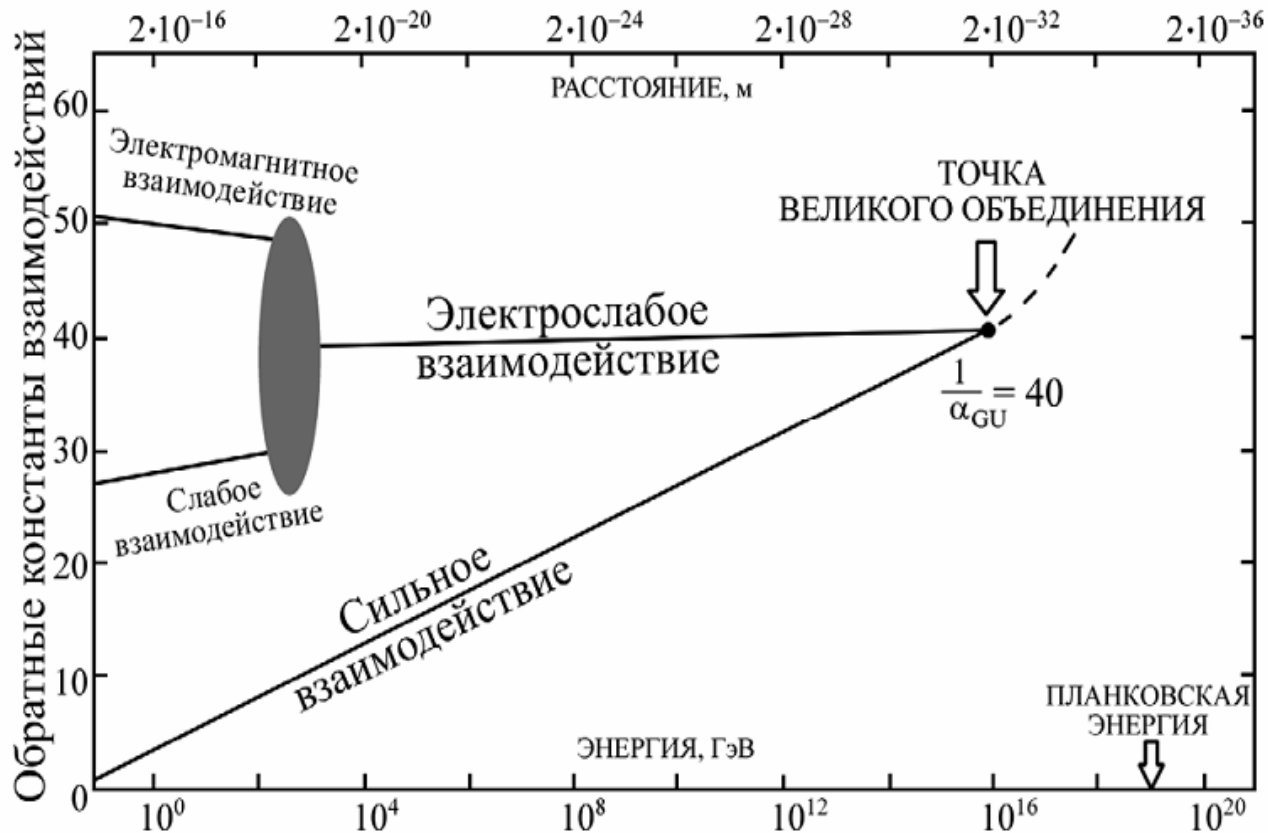
E (ГэВ)

10^2

10^{16}

10^{19}

Объединение взаимодействий



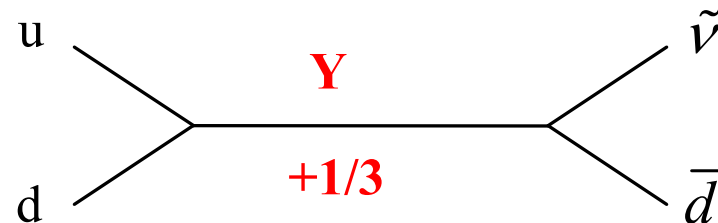
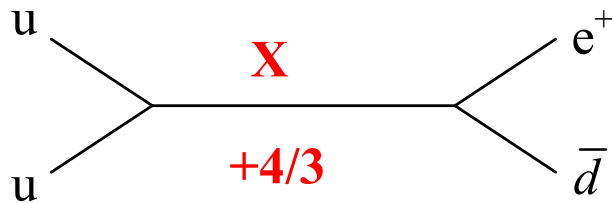
При уменьшении расстояния или, что эквивалентно, при увеличении энергии константа электромагнитного взаимодействия возрастает, в то время как константы сильного и слабого взаимодействия уменьшаются. Расчеты показывают, что если учесть влияние квантовых флуктуаций, константы взаимодействий начнут сближаться, и станут практически одинаковыми на расстоянии $\sim 10^{-29}$ см. Температура и энергия, соответствующие таким масштабам составляют 10^{28} К и $E = 10^{16}$ ГэВ. Такие характеристики имела Вселенная, когда её возраст составлял 10^{-39} с.

Фундаментальные бозоны

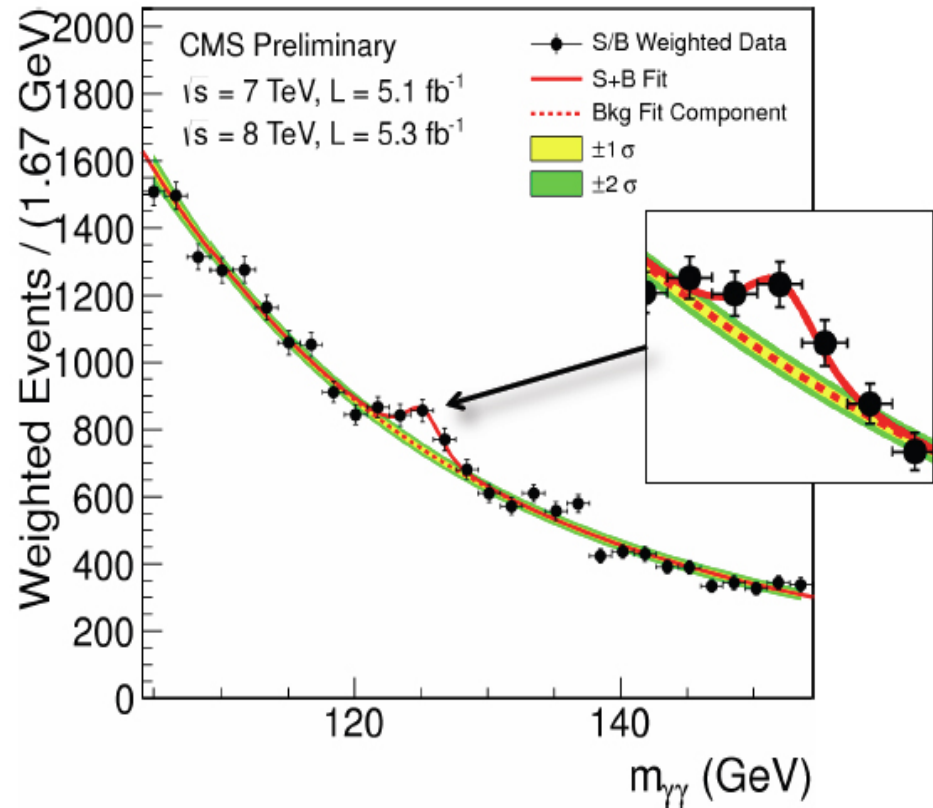
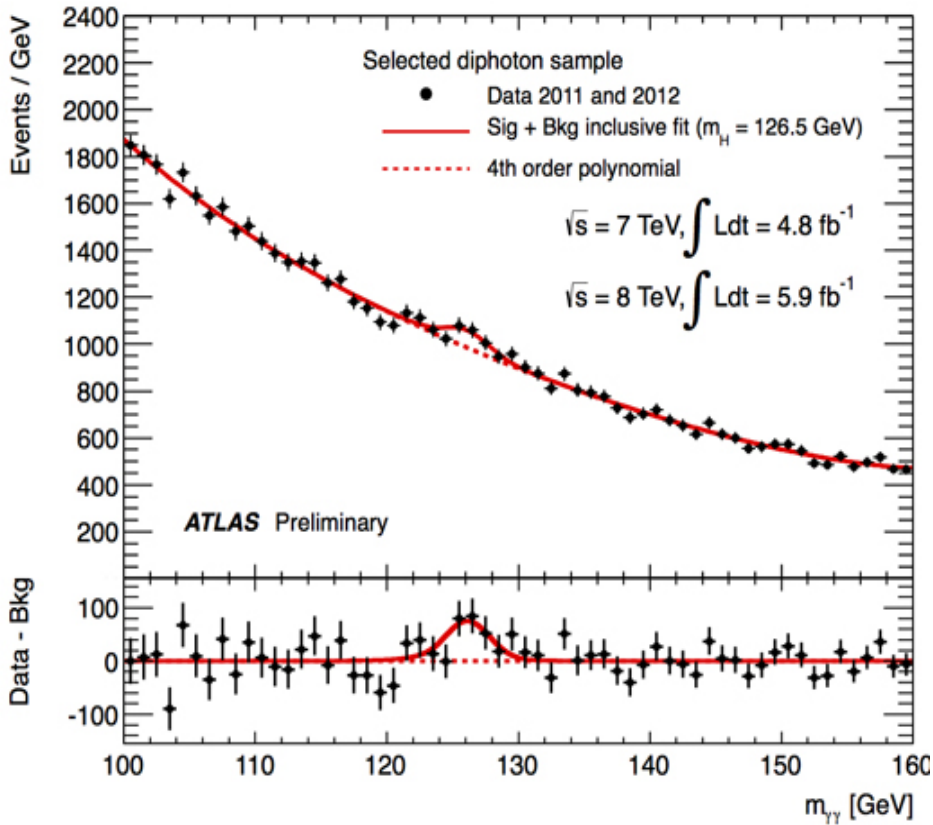
Частица	Античастица
W^+	W^-
Z	
γ	
8 глюонов	
$X(k, z, c)$	$\bar{X}(\bar{k}, \bar{z}, \bar{c})$
$Y(k, z, c)$	$\bar{Y}(\bar{k}, \bar{z}, \bar{c})$

Бозон Хиггса

В ТВО кроме известных калибровочных бозонов, существуют X- и Y- калибровочные бозоны. Взаимодействие, происходящее в результате обмена X- и Y-бозонами, нарушает законы сохранения лептонного и барионного чисел, и, как следствие, может приводить к распаду протона. Энергии покоя X- и Y-бозонов должны превышать 10^{14} ГэВ. На современных ускорителях прямое наблюдение столь тяжелых бозонов невозможно.



2012. Бозон Хиггса



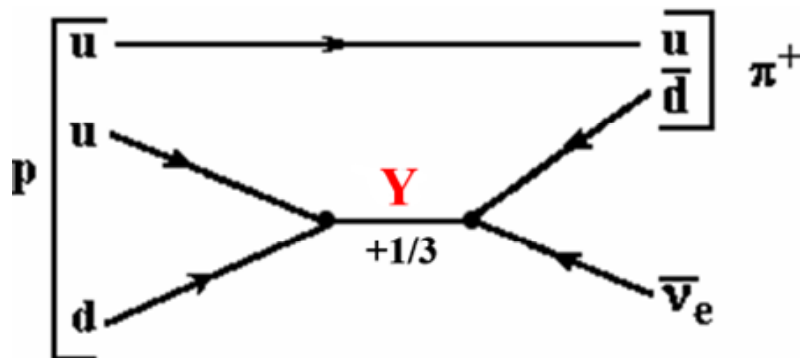
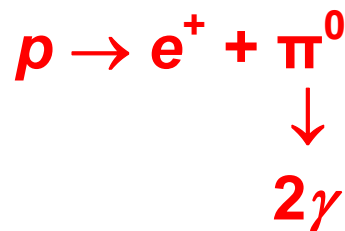
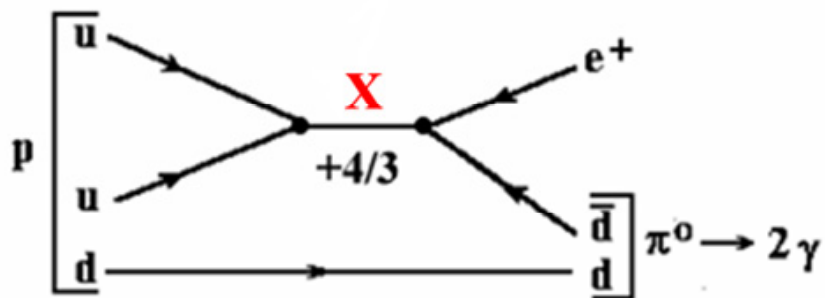
$$M(H) = 125 \text{ ГэВ}$$

$$J(H) = 0$$

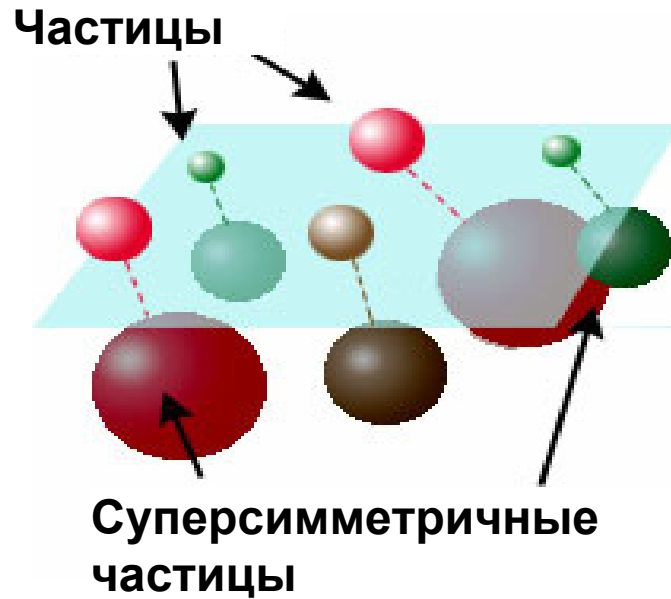
$$\tau > 10^{-24} \text{ с } (10^{-22} \text{ с})$$

Распад протона

Одним из важнейших предсказаний ТВО является *распад протона*. За возможные распады протона отвечают процессы с участием X - и Y -бозонов. Вероятность распада протона чрезвычайно мала из-за большой массы X - и Y -бозонов. По оценкам время жизни протона относительно доминирующего канала распада $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ не может превышать 10^{32} лет. Для этого канала распада протона из эксперимента следует $\tau > 5 \cdot 10^{32}$ лет.



Суперсимметрия



Частица	спин	SUSY-партнёр	Спин
кварк	1/2	скварк	0
лептон	1/2	слептон	0
нейтрино	1/2	снейтрино	0
фотон	1	фотино	1/2
глюон	1	глюино	1/2
W-бозон	1	вино	1/2
Z-бозон	1	зино	1/2
хиггс	0	хиггсино	1/2
гравитон	2	гравитино	3/2

Планковские единицы

Объединение четырёх фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию, должно происходить при энергиях $\approx 10^{19}$ ГэВ. Эту энергию называют *планковской*. Она получается комбинацией трёх мировых констант: гравитационной постоянной G , постоянной Планка \hbar и скорости света:

Планковская энергия

$$E_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Планковская масса

$$m_{Pl} = \frac{E_{Pl}}{c^2} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ} / c^2$$

Планковская длина

$$r_{Pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см}$$

При планковской энергии к трём уже объединённым при более низких энергиях сильному, электромагнитному и слабому взаимодействиям присоединяется гравитационное, образуя единое универсальное взаимодействие.

Первые мгновения жизни Вселенной

Планковский момент $t_{\text{Pl}} \sim 10^{-43}$ с.

Вплоть до этого момента все четыре фундаментальных взаимодействия (гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное) объединены в единое универсальное суперсимметричное взаимодействие. Планковский момент является комбинацией трех фундаментальных констант — G (гравитационная постоянная), \hbar (постоянная Планка) и c (скорость света):

$$t_{\text{Pl}} = (G\hbar / c^5)^{1/2} \approx 10^{-43} \text{ с.}$$

Планковскому моменту соответствует планковский масштаб расстояний (планковская длина)

$$L_{\text{Pl}} = (G / c^3)^{1/2} \approx 10^{-33} \text{ см,}$$

планковская энергия

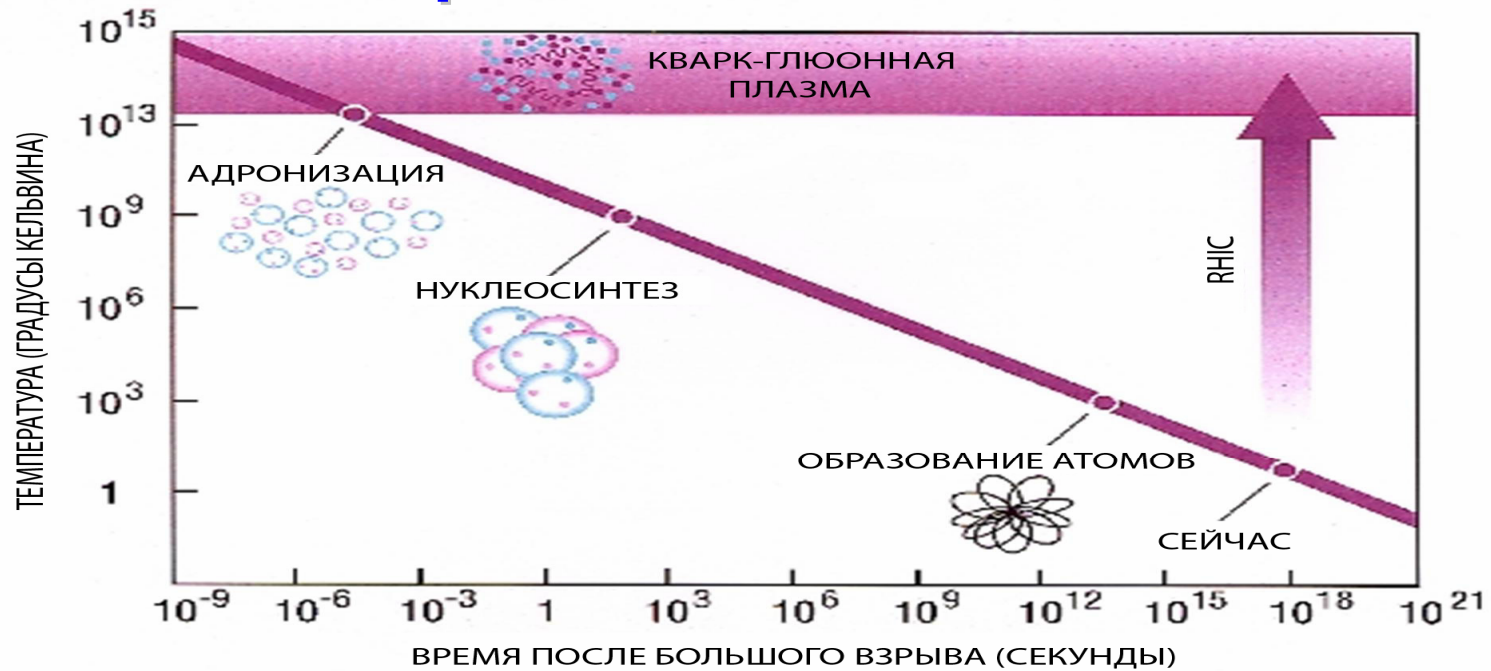
$$E_{\text{Pl}} = (c^5 / G)^{1/2} \approx 10^{19} \text{ ГэВ}$$

и температура $T_{\text{Pl}} \approx 10^{32}$ К.

Первые мгновения жизни Вселенной

Время после Большого Взрыва, с	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Этап/Событие
$< 10^{-43}$	$> 10^{32}$	$< 10^{-33}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий)
10^{-43}	10^{32}	10^{-33}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$	$10^{32} - 10^{28}$	$10^{-33} - 10^{-29}$	Великое объединение электрослабого и сильного взаимодействий
10^{-36}	10^{28}	10^{-29}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электрослабого взаимодействий
10^{-10}	10^{15}	10^{-16}	Конец электрослабого объединения

Кварк-глюонная плазма



При высоких температурах и больших плотностях адронной материи образуется **кварк-глюонная плазма**. В естественных условиях кварк-глюонная плазма существовала в первые 10^{-5} с после Большого Взрыва.

Условия для образования кварк-глюонной плазмы могут существовать и в центре нейтронных звезд. Переход в состояние кварк-глюонной плазмы происходит как фазовый переход 1-го рода при температуре $T \approx 200/k$ МэВ ($k = 8.62 \cdot 10^{-11}$ МэВ/Кельвин). Методом получения кварк-глюонной плазмы является соударение релятивистских тяжелых ионов. Одна из основных проблем – идентификация состояния кварк-глюонной плазмы. Это может быть сделано по аномальному выходу лептонных пар, эмиссии фотонов, аномально большому выходу странных частиц.

Лептонная эра

Время после Большого Взрыва, с	Характерные температуры, К	Характерные расстояния, см	Событие
$10^{-10} - 10^{-4}$	$10^{15} - 10^{12}$	$10^{-16} - 10^{-13}$	Адронная эра. Рождение и аннигиляция адронов и лептонов
$10^{-4} - 10$	$10^{12} - 10^{10}$	$10^{-13} - 10^{-10}$	Лептонная эра. Рождение и аннигиляция лептонов
$0.1 - 1$	$2 \cdot 10^{10}$	10^{-11}	Отделение нейтрино. Вселенная становится прозрачной для нейтрино (антинейтрино)

Радиационная эра. Эра вещества

Время после Большого взрыва	Характерные температуры (К)	Характерные расстояния (см)	Основные события
10 с	10^{10}	10^{-10}	Окончание лептонной эры.
10 с - 10^4 лет	$10^{10} - 10^4$	$10^{-10} - 10^{-5}$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом.
10^4 лет	10^4	10^{-5}	Начало эры Вещества. Вещество начинает доминировать над излучением.
300 000 лет	$3 \cdot 10^3$	10^{-4}	Разделение вещества и излучения. Вселенная становится прозрачной для излучения.

ЛЕПТОНЫ + АНТИЛЕПТОНЫ => γ -КВАНТЫ.

Вселенная из состояния, когда плотность массивных частиц была близка к плотности фотонов, перешла к состоянию, в котором плотность фотонов на много порядков превосходила плотность массивных частиц. Вселенная практически полностью стала состоять из фотонов и нейтрино.

В начале радиационной эры излучение интенсивно взаимодействовало с заряженными частицами (протонами, электронами), входившими в состав Вселенной. За счет расширения Вселенной происходило её охлаждение, в том числе и фотонов. Фотоны охлаждались за счет эффекта Допплера при отражении от удаляющихся частиц. Увеличение длины волны фотонов $\Delta\lambda$ связано с увеличением расстояния ΔR между удаляющимися при расширении Вселенной частицами соотношением:

$$\Delta\lambda / \lambda = \Delta R / R.$$

Химический состав (по массе)

Вселенная

Водород 70,7%, гелий 27,4%,
остальные в сумме меньше 1,2%

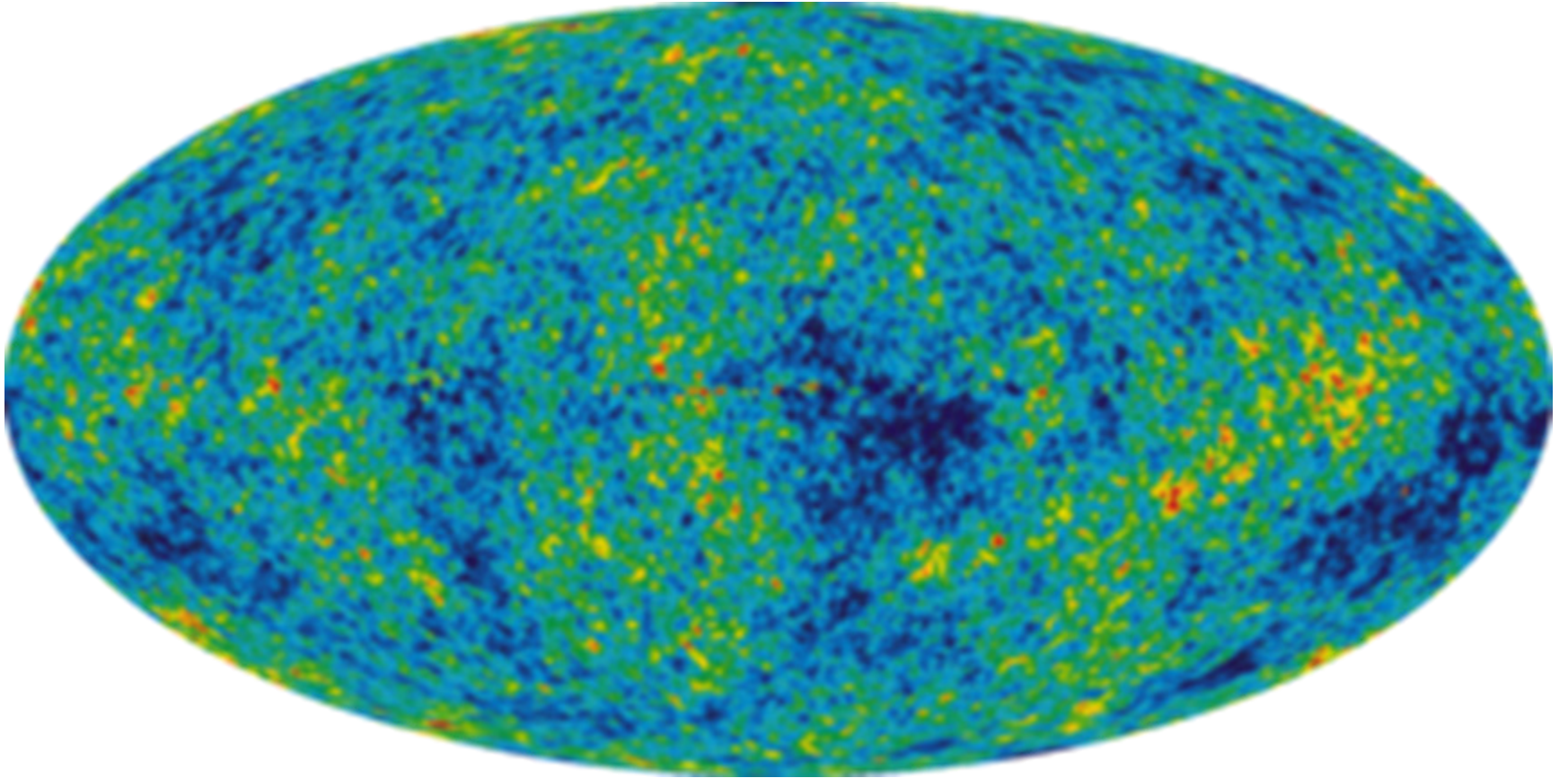
Земля

Кислород 53%, кремний 15%, магний 13%,
железо 12%, сера 2%, алюминий 1%,
остальные меньше 1% каждый

Человек

Кислород 65%, углерод 18%, водород 10%, азот 3%,
кальций 1,5%, фосфор 1%, калий 0,35%

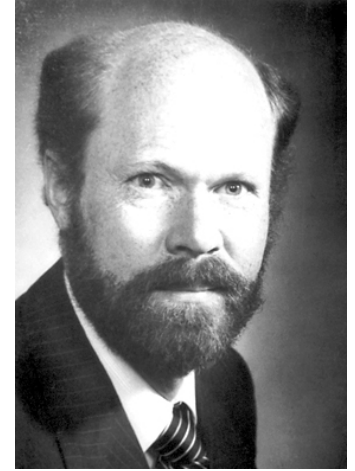
Реликтовое излучение



Реликтовое излучение

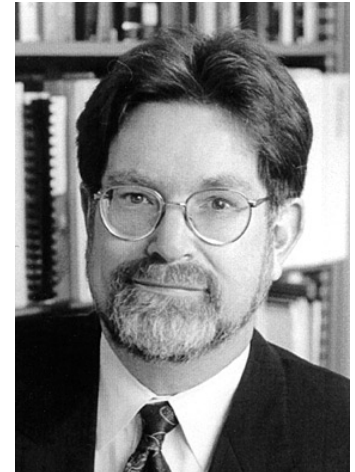
1978 г. А. Пензиас, Р. Вильсон

Нобелевская премия по физике
за открытие микроволнового
реликтового излучения

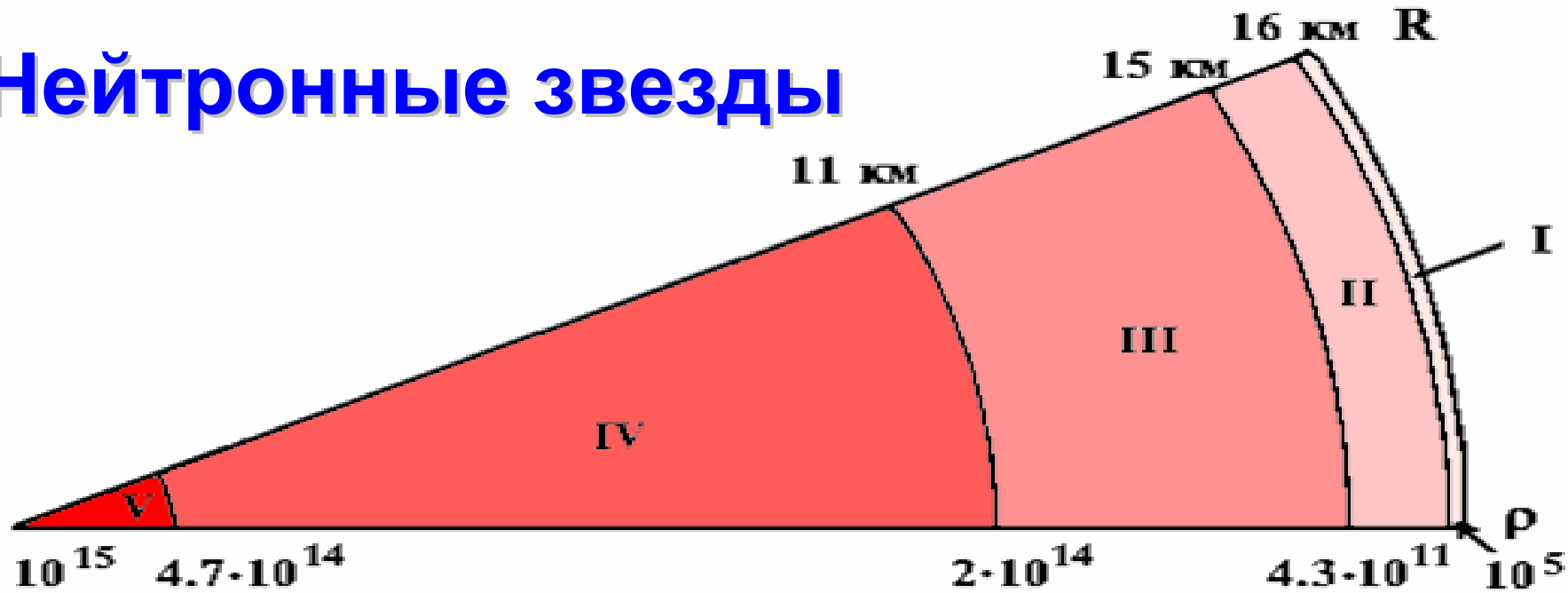


2006 г. Дж. Мазер, Дж. Смут

Нобелевская премия по физике
за открытие анизотропии и
чёрнотельной структуры
энергетического спектра
реликтового излучения



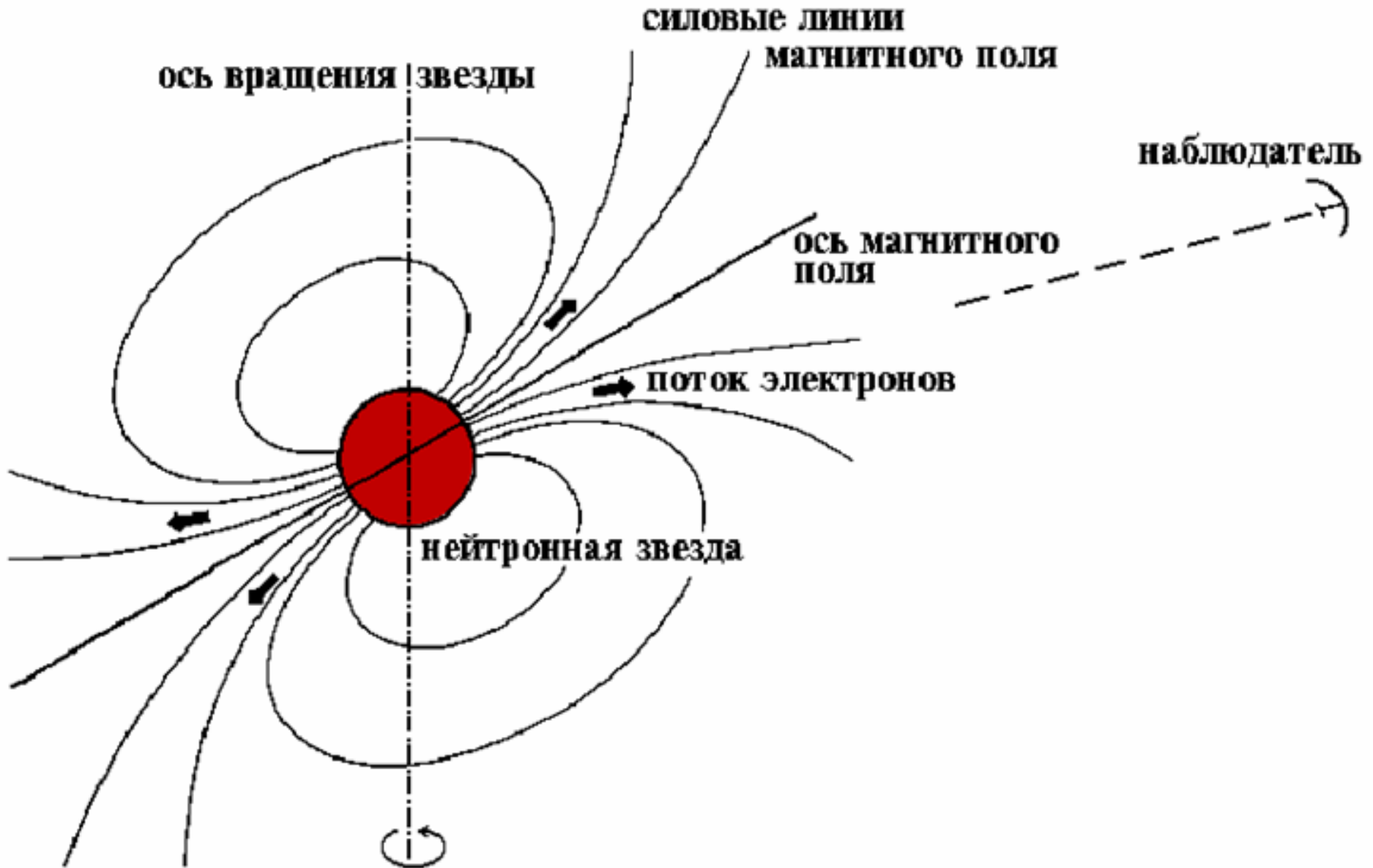
Нейтронные звезды



Нейтронная звезда массой $1.5M$ и радиусом $R=16$ км. Указана плотность ρ в г/см³ в различных частях звезды.

- I** – внешний слой из плотно упакованных атомов;
- II** – кристаллическая решётка атомных ядер и вырожденных электронов;
- III** – твёрдый слой из атомных ядер, перенасыщенных нейтронами;
- IV** – жидкое ядро, состоящее в основном из вырожденных нейтронов;
- V** – адронная сердцевина нейтронной звезды кроме нуклонов должна содержать пионы и гипероны.

Пульсары



Черные дыры

Если при взрыве сверхновой сохраняется остаток массой $M > 5M_{\odot}$, то он не может существовать в виде устойчивой нейтронной звезды. Ядерные силы отталкивания на малых (< 0.5 Фм) расстояниях не в состоянии противостоять дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Возникает необычный объект – черная дыра (термин введён Дж. Уилером в 1967 г.).

Существование чёрных дыр предсказано в рамках общей теории относительности Р. Оппенгеймером и Г. Снайдером в 1939 г.

Основное свойство чёрной дыры состоит в том, что никакие сигналы, возникающие внутри неё, не могут выйти за её пределы и достичь внешнего наблюдателя. Звезда массой M , коллапсируя в чёрную дыру, достигает сферы радиуса r_w (сферы Шварцшильда):

$$r_w = \frac{2GM}{c^2} \approx 3(M / M_{\odot}) \text{ км}$$

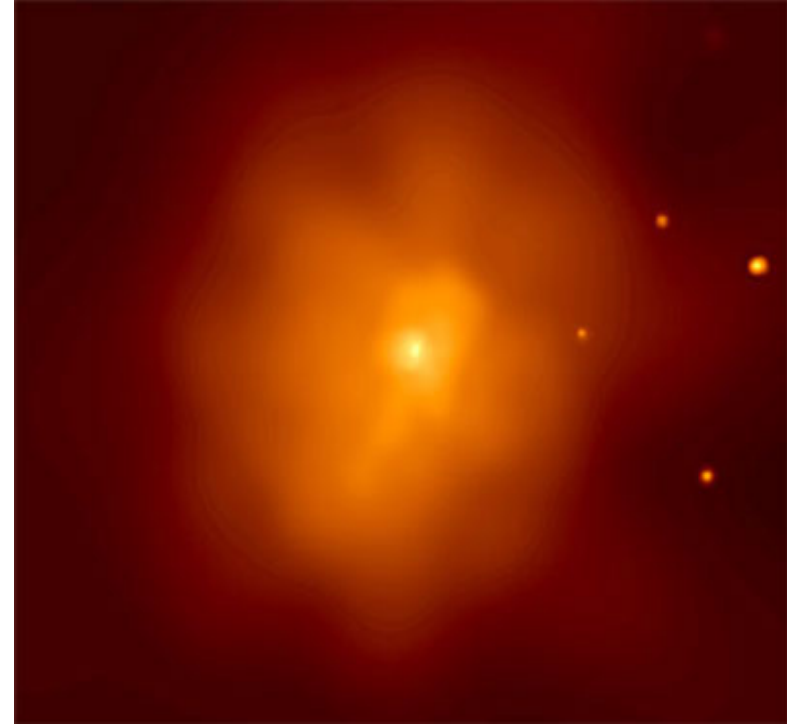
Формально к этому соотношению можно прийти, полагая в известной формуле для второй космической скорости

$$v_{k2} = \sqrt{2GM / R}$$

предельное значение, равное скорости света.

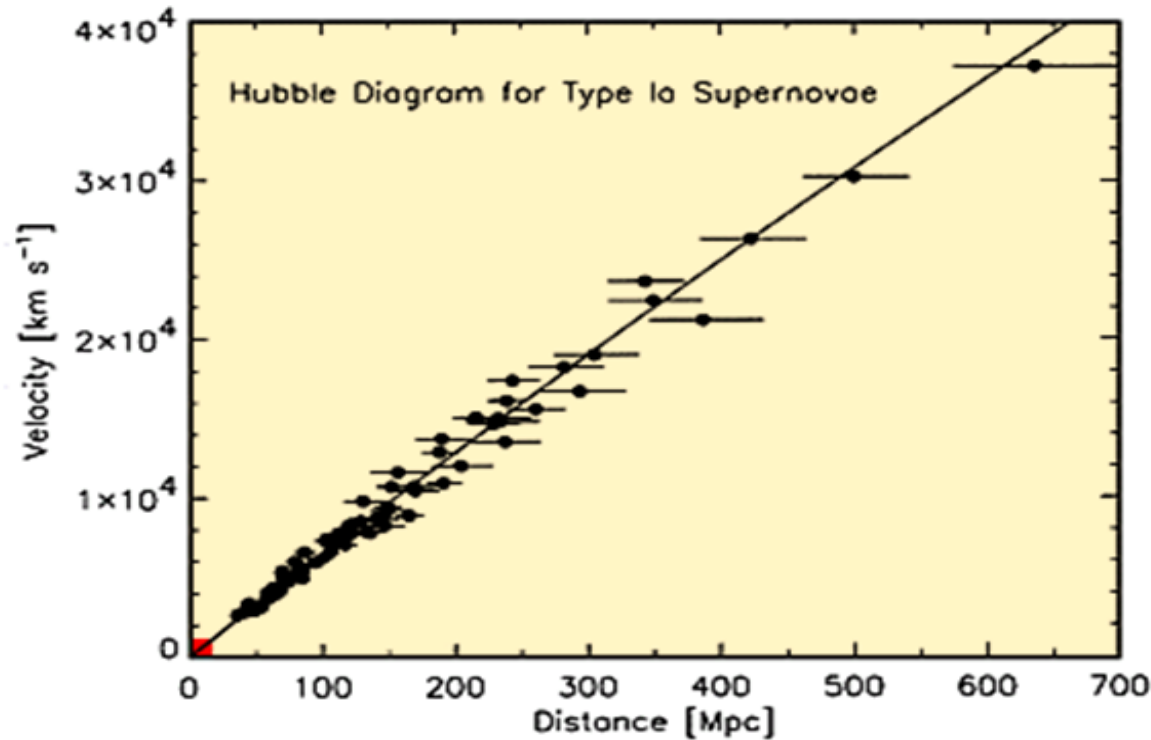
При достижении объектом размера сферы Шварцшильда его гравитационное поле становится столь сильным, что покинуть этот объект не может даже электромагнитное излучение.

Темная материя



- **Движение группы галактик как целого относительно ближайшего окружения.**
- **Гравитационное линзирование изображения далеких галактик с помощью скопления галактик позволяет по форме изображения восстановить распределение плотности материи в скоплении галактик. Масса темной материи примерно в десять раз больше массы светящегося вещества, состоящего из барионной материи.**

1929 г. Э. Хаббл. Расширяющаяся Вселенная



Скорость разлёта v двух галактик и расстояние R между ними связаны законом Хаббла

$$v = HR,$$

постоянная Хаббла $H = 71 \pm 4 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{мегапарсек}}$

1 парсек = $3,09 \cdot 10^{16}$ м.

Согласно космологической модели Большого Взрыва Вселенная образовалась около 15 млрд. лет назад.

Расширяющаяся Вселенная

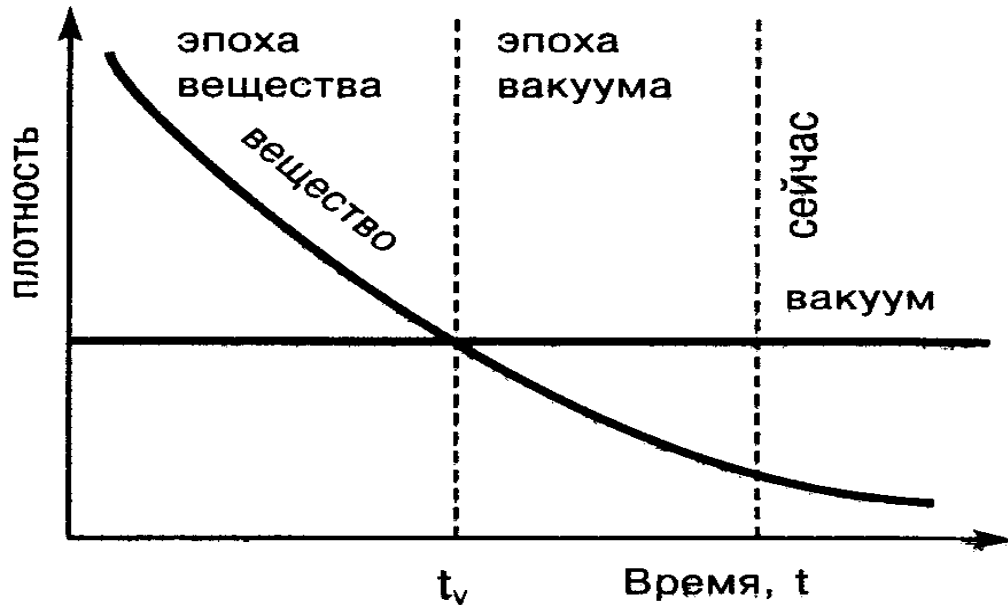
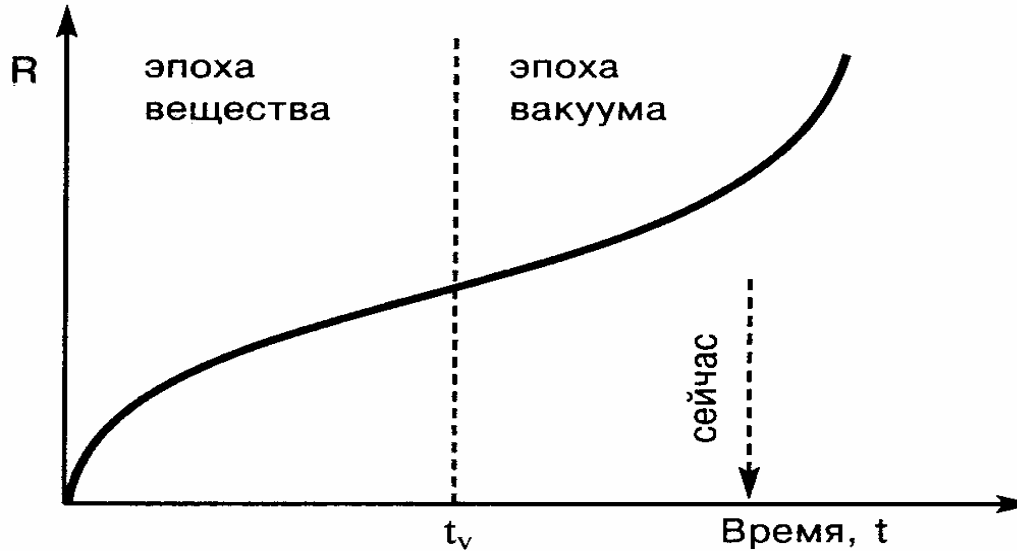


2011 г. С. Перлмуттер, Б. Шмидт, А. Рисс

**Нобелевская премия по физике за открытие
ускоренного расширения Вселенной
посредством наблюдения дальних сверхновых**

1998 г. Темная энергия

В начале 1998 г. было сделано открытие. Оказалось, что последние пять млрд лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого Взрыва, а ускорялось. Этот вывод получен в результате анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5-10 млрд световых лет. Таким образом, было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму.



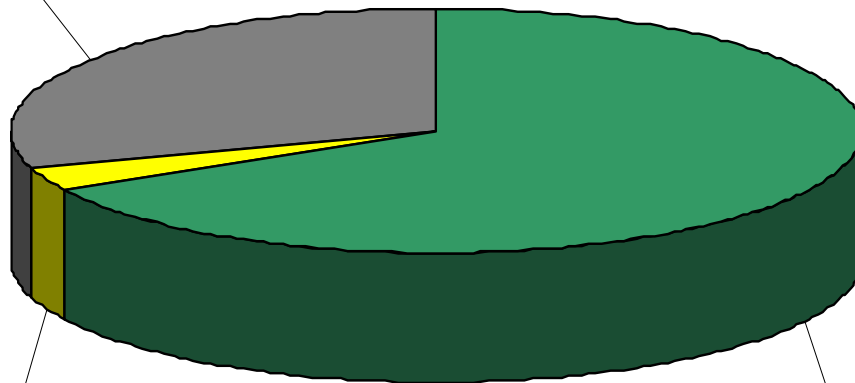
Характеристики Вселенной

БАРИОНЫ	0.02-0.05
в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.002-0.003
ФОТОНЫ	$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ	0.2-0.4
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)	0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	1.02 ± 0.02

Темная
материя

Барионы

Вакуум



Космическая шкала времени

Время от настоящего момента, млрд. лет	Событие
14	Большой Взрыв
14	Рождение частиц, аннигиляция вещества и антивещества
14	Синтез ^2H , ^4He
13	Образование Галактик
10	Сжатие нашей протогалактики
10	Образование первых звёзд
5	Образование Солнечной системы, планет
4	Образование земных пород
3	Зарождение микроорганизмов
2	Формирование атмосферы Земли
1	Зарождение жизни
0,60	Ранние окаменелости
0,45	Рыбы
0,15	Динозавры
0,05	Первые млекопитающие
2 млн. лет	Человек

Параметры Стандартной модели

Стандартная модель требует около 30 параметров, которые используются в расчетах.

1. Массы 6 кварков.
2. Массы трех заряженных лептонов.
3. Масса бозона Хиггса.
4. 4 параметра матрицы Кабибо-Кабаяши-Маскавы, описывающие смешивание кварков.
5. Константы связи слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий.
6. Массы трёх типов нейтрино.
7. 4 параметра, описывающие смешивание нейтрино (аналог параметров матрицы Кабибо-Кабаяши-Маскавы).
8. Два параметра, описывающие вакуум в квантовой хромодинамике.

Вопросы? Вопросы!

Несмотря на впечатляющие успехи Стандартной модели, целый ряд вопросов сегодня не имеет убедительных ответов.

1. Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
2. Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
3. Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
4. Почему фундаментальными частицами вещества являются фермионы, в то время как фундаментальными переносчиками взаимодействия — бозоны?
5. Правильна ли гипотеза о механизме Хиггса?
6. Почему разные фундаментальные частицы имеют разные массы?
7. Почему различаются пространственная и временная степени свободы?
8. Живем ли мы в четырехмерном пространстве-времени, или оно имеет большее число измерений?
9. Существуют ли кванты пространства и времени?
10. ??????