

СИММЕТРИИ ПРИРОДЫ

Организация материи

- Молекулы, фотоны, нейтрино
- Атомы, фотоны, нейтрино
- Атомные ядра, электроны, нейтрино, фотоны
- Протоны, электроны, нейтрино, фотоны
- Адроны, лептоны, фотоны
- Кварки, лептоны, калибровочные бозоны, бозон Хиггса
- ??????

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.

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	+	+	-

Изоспиновая симметрия – симметрия сильных взаимодействий

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электро-магнитное	Слабое
Изоспин, I	+	-	-
Проекция изоспина, I ₃	+	+	-

			$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$		
Сильное взаимодействие	I	3/2	1/2	1	
	I ₃	+3/2	+1/2	+1	
			$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + e^+ + e^-$		
Электромагнитное взаимодействие	I	1	0	0	0
	I ₃	0	0	0	0
			$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$		
Слабое взаимодействие	I	1	0	0	
	I ₃	-1	0	0	

Дискретные симметрии

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
Мультипликативные законы сохранения			
Пространственная четность, P	+	+	-
Зарядовая четность, C	+	+	-
Временная четность, T	+	+	-
Комбинированная четность, CP	+	+	-
CPT-четность	+	+	+
G-четность	+	-	-

Ряд законов сохранения связан с различными операциями отражения. Операции отражения имеют два общих свойства.

1. Отражение является дискретной операцией.
2. Если провести операцию отражения два раза подряд, то в результате система возвратится в исходное состояние.

Наиболее привычным примером операции отражения является зеркальное отражение относительно какой-либо плоскости.

Пространственная инверсия. P-четность

$$X, Y, Z, \vec{P}, \vec{J} \xrightarrow{P} -X, -Y, -Z, -\vec{P}, \vec{J}$$

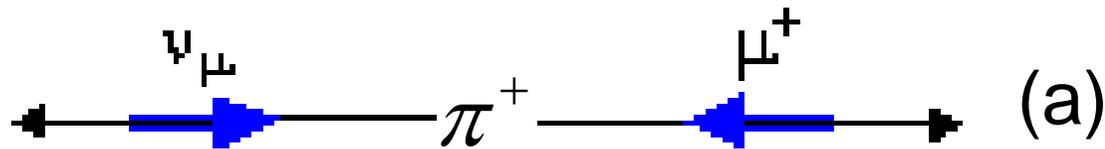
Распад ρ^0 -мезона $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

P-преобразование распада ρ^0 -мезона, который происходит в результате сильных взаимодействий:

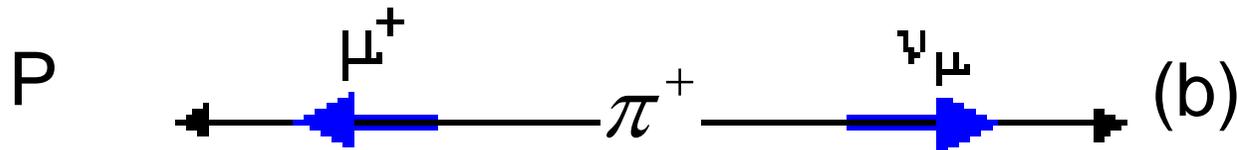
$$\begin{array}{c}
 \pi^+ \leftarrow \rho^0 \rightarrow \pi^- \\
 P: \quad \pi^- \leftarrow \rho^0 \rightarrow \pi^+
 \end{array}$$

В результате P-преобразования в сильных взаимодействиях получается наблюдаемый в природе процесс.

Слабый распад π^+ -мезона $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$



В результате P-преобразования изменяются знаки импульсов и не изменяются направления спинов:



Из требования P-инвариантности следует равенство сечений процессов (a) и (b). В распаде (b) образуются мюонные нейтрино с положительной четностью, которые в природе не наблюдаются, что означает нарушение P-инвариантности в слабых взаимодействиях.

Зарядовая четность. С-четность

Операция зарядового сопряжения C изменяет знаки зарядов, оставляя неизменными пространственные переменные x , импульс p и момент импульса J .

$$\hat{C}(x, p, J, Q, B, L_e, L_\mu, L_\tau, s, c, b, t) = (x, p, J, -Q, -B, -L_e, -L_\mu, -L_\tau, -s, -c, -b, -t)$$

Оператор зарядового сопряжения имеет собственные значения лишь для полностью нейтральных (истинно нейтральных) частиц, таких как фотон γ и мезоны $q_i \bar{q}_j - \pi^0, \eta, \eta', \rho^0, \phi, \omega$ и другие, а также для полностью нейтральных систем частиц $\pi^+ \pi^-, e^+ e^-$ и др. Для таких частиц (систем) соотношение

$$\hat{C}|частица\rangle = C|частица\rangle$$

приобретает смысл и величина C , называемая *зарядовой чётностью*, равна либо $+1$, либо -1 . Зарядовая чётность (как и пространственная) является мультипликативным квантовым числом.

$$C(q\bar{q}) = C(e^+ e^-) = (-1)^{L+S}$$

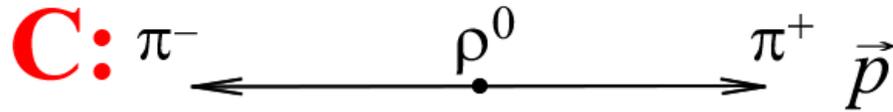
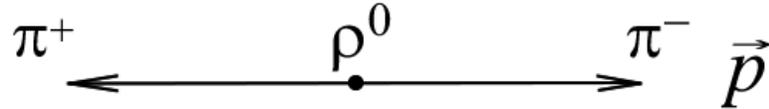
Зарядовая чётность C

Зарядовая чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях и не сохраняется в слабых взаимодействиях.

Зарядовая четность. С-четность

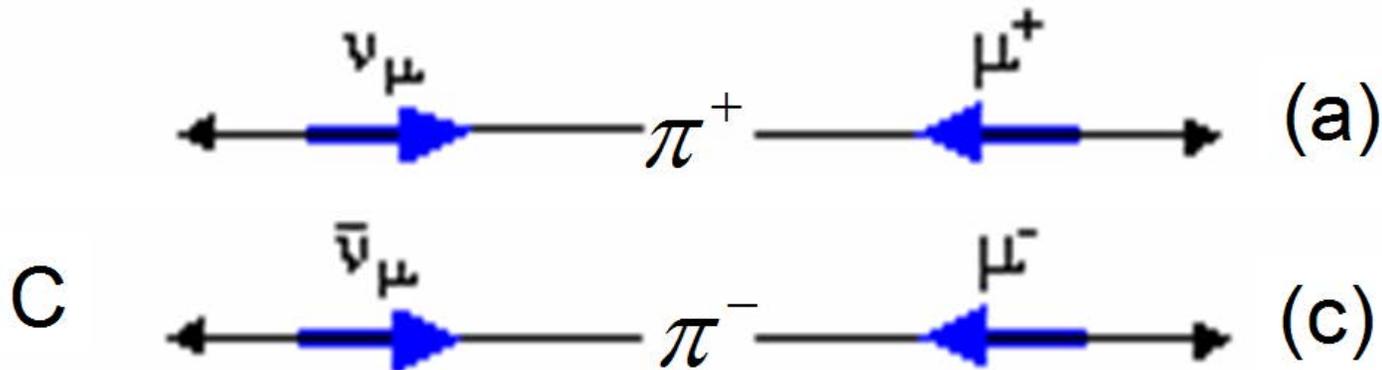
$$\hat{C}(x, p, J, Q, B, L_e, L_\mu, L_\tau, s, c, b, t) = (x, p, J, -Q, -B, -L_e, -L_\mu, -L_\tau, -s, -c, -b, -t)$$

Операция зарядового сопряжения С сильного распада ρ^0 -мезона $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$.



В результате С-преобразования получается наблюдаемый в природе процесс.

Операция зарядового сопряжения слабого распада π^- -мезона $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

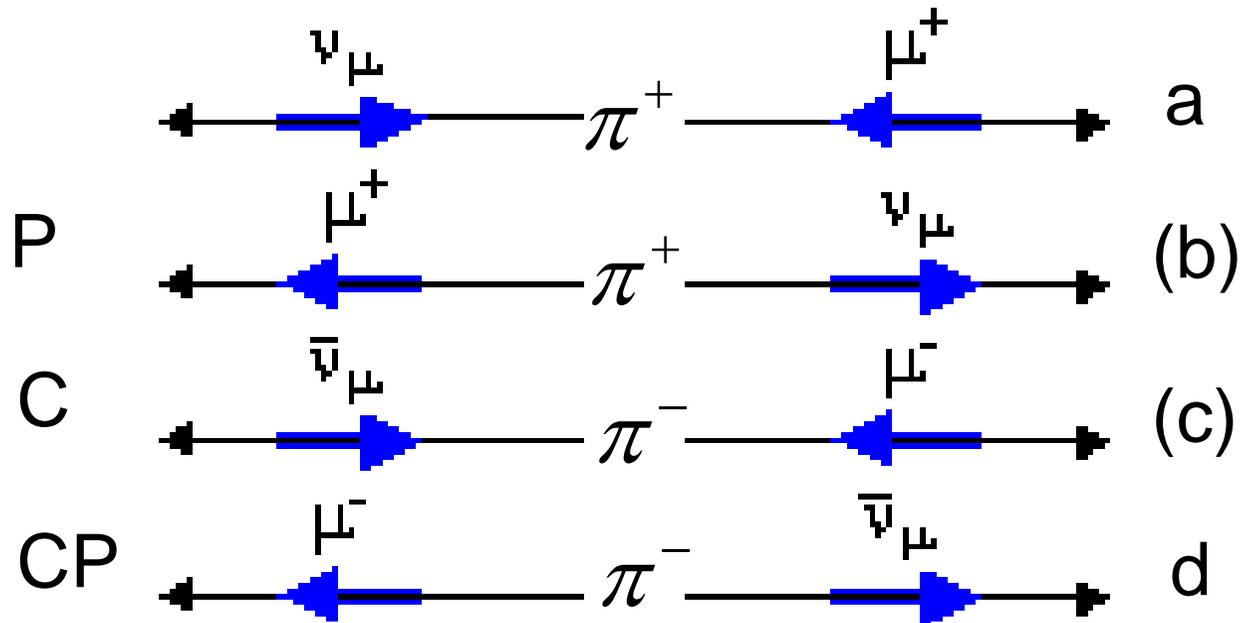


В результате С-преобразования получаются мюонные антинейтрино с отрицательной спиральностью, которые в природе не наблюдаются. Следовательно, в слабых взаимодействиях С-инвариантность нарушается.

Комбинированная четность. CP-четность

Операция CP-сопряжения слабого распада π^+ -мезона.

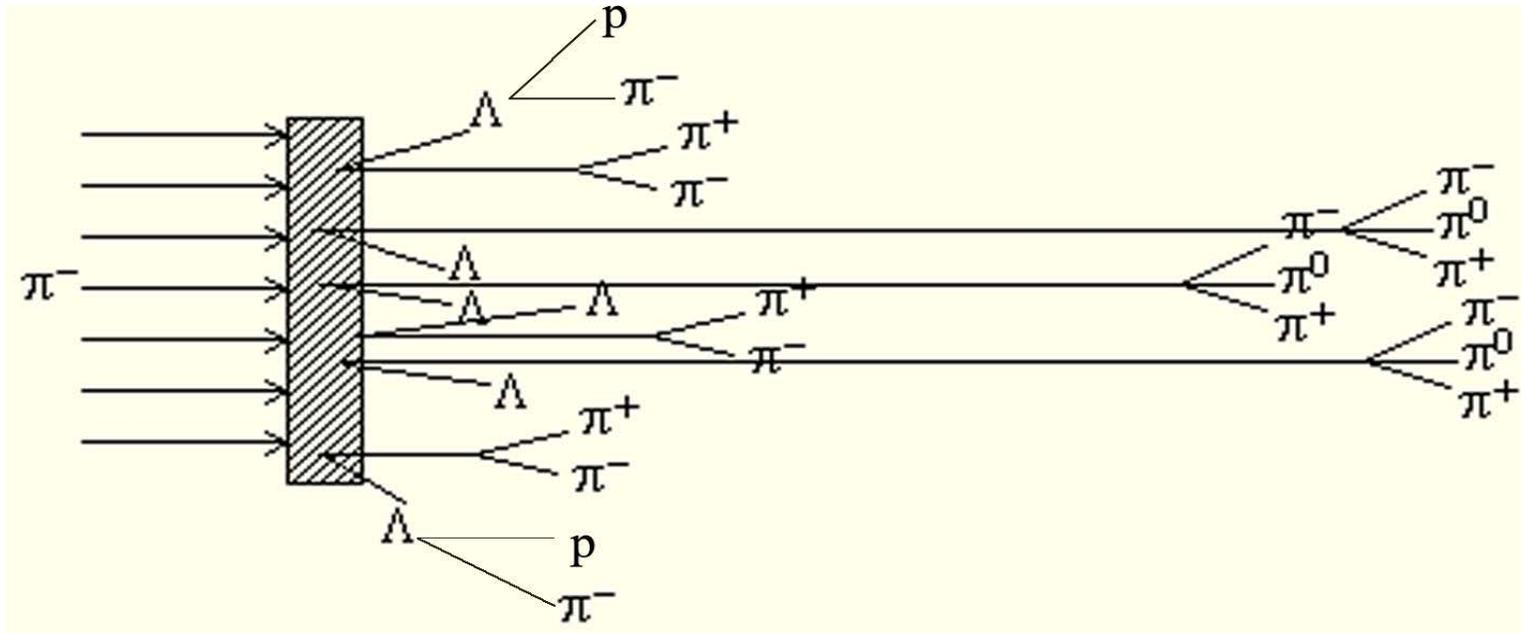
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



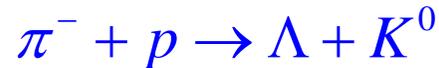
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

В результате CP-преобразования получается процесс, наблюдаемый в природе.

Распады K^0 и \bar{K}^0 -мезонов



Если пучком π^- -мезонов обстреливать мишень, то в результате реакции



из мишени будут вылетать Λ -гипероны и K^0 -мезоны. Распад K^0 и \bar{K}^0 -мезонов происходит в результате слабого взаимодействия. При этом наблюдается ситуация показанная схематически на рис.

Так как время жизни Λ -гиперонов $2.6 \cdot 10^{-10}$ с, они распадаются вблизи мишени на протон и π^- -мезон.



Вблизи мишени наблюдаются также вилки $\pi^- \pi^+$ от распадов K^0 -мезонов



Однако такие распады наблюдаются лишь для 50% образовавшихся K^0 -мезонов. В оставшихся 50% случаев K^0 распадается гораздо дальше от мишени на 3 π -мезона.



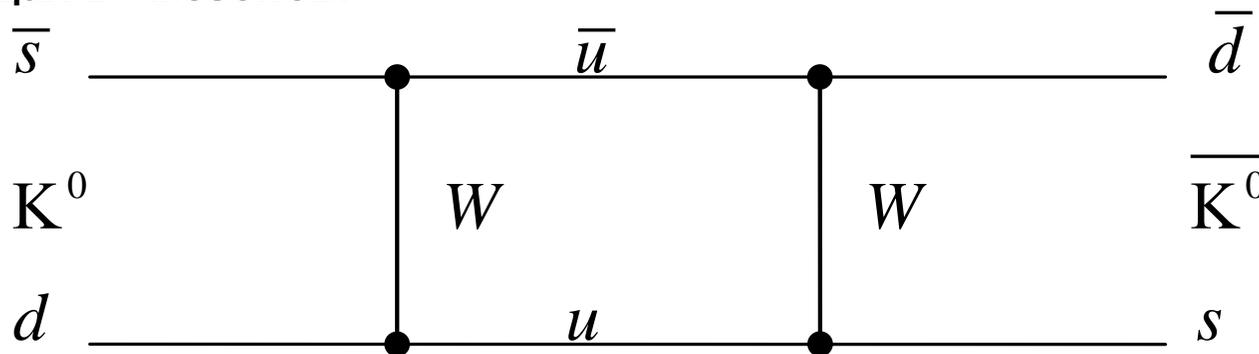
Нейтральные K^0 мезоны

$$K^+ (u\bar{s}) \quad K^0 (d\bar{s}) \quad \bar{K}^0 (\bar{d}s) \quad K^- (\bar{u}s)$$

Исследование процессов с участием нейтральных K_0 и \bar{K}_0 -мезонов позволяет изучить проявление принципа суперпозиции в квантовой механике.

- Линейные комбинации двух состояний также является состоянием системы. K_0 и \bar{K}_0 -мезоны можно представить как суперпозицию двух других состояний K_1 и K_2 .
- В слабых распадах K_0 и \bar{K}_0 -мезонов впервые было обнаружено, что CP-симметрия не является точной симметрией.

Нарушение CP-симметрии было обнаружено позднее и в слабых распадах B^0 -мезонов.



Механизм смешивания K^0 и \bar{K}^0

C, P, CP-преобразования K^0 и \bar{K}^0 -мезонов. K_1^0 , K_2^0 мезоны

Действие операторов \hat{C} , \hat{P} и $\hat{C}\hat{P}$ на волновые функции K^0 и \bar{K}^0 можно записать в виде:

$$\hat{C}|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle, \quad \hat{C}|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle,$$

$$\hat{P}|K^0\rangle = -|K^0\rangle, \quad \hat{P}|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle,$$

$$\hat{C}\hat{P}|K^0\rangle = +|\bar{K}^0\rangle, \quad \hat{C}\hat{P}|\bar{K}^0\rangle = +|K^0\rangle.$$

В результате CP-преобразования K^0 -мезон переходит в \bar{K}^0 -мезон, а \bar{K}^0 -мезон переходит в K^0 -мезон. То есть состояния K^0 и \bar{K}^0 не имеют определенного значения CP-четности. Однако из состояний K^0 и \bar{K}^0 можно построить линейную комбинацию K_1^0 и K_2^0 , имеющую определенные значения CP-четности:

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle),$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

CP-четность состояний K_1^0 и K_2^0

$$\hat{C}\hat{P}|K_1^0\rangle = +|K_1^0\rangle,$$

$$\hat{C}\hat{P}|K_2^0\rangle = -|K_2^0\rangle.$$

K_1 и K_2 не являются частицей и античастицей и поэтому могут иметь разные характеристики распада.

CP-преобразование $\pi^+\pi^-$ - $\pi^+\pi^-\pi^0$ -систем мезонов, $l = 0$

$$P|\pi^+\pi^-\rangle = P|\pi^+\rangle P|\pi^-\rangle (-1)^l = +|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$C|\pi^+\pi^-\rangle = |\pi^+\pi^-\rangle (-1)^l = +|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^{2l} |\pi^+\pi^-\rangle = +|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$P|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle = P|\pi^+\rangle P|\pi^-\rangle P|\pi^0\rangle (-1)^l = -|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle$$

$$C|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle = |\pi^+\pi^-\pi^0\rangle (-1)^l = +|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle$$

$$CP|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle = -|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle$$

Распады K_1 и K_2 на 2π- и 3π-мезона

В природе существует два независимых состояния K_L^0 и K_S^0 , которые отвечают частицам с различным средним временем жизни:

$$\tau(K_L^0) = 5,2 \cdot 10^{-8} \text{ с,}$$

$$\tau(K_S^0) = 0,9 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Основные каналы распада K_S^0

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad 68,6\%$$

$$\rightarrow \pi^0 \pi^0 \quad 31,4\%$$

Основные каналы распада K_L^0

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \quad 21,1\%$$

$$\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad 12,6\%$$

$$\rightarrow \pi^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu, \pi^- \mu^+ \nu_\mu \quad 27,1\%$$

$$\rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e, \pi^- e^+ \nu_e \quad 38,8\%$$

$$m(K^0) = 497,67 \text{ МэВ}$$

Рассчитанная в предположении сохранения CP-инвариантности разность масс K_L^0 и K_S^0

$$m(K_L^0) - m(K_S^0) = (3,491 + 0,009) \cdot 10^{-12} \text{ МэВ.}$$

Если CP-инвариантность имеет место, то состояния $|K_1^0\rangle$ и $|K_2^0\rangle$ следует отождествлять с состояниями $|K_S^0\rangle$ и $|K_L^0\rangle$ соответственно.

$$|K_S^0\rangle \equiv |K_1^0\rangle, \quad |K_L^0\rangle \equiv |K_2^0\rangle.$$

Распады K_L на 2 π -мезона

Однако, в 1964 г. Дж. Кронин и В.Фитч обнаружили, что в распадах нейтральных каонов происходит нарушение CP-инвариантности. Существует малая, но конечная вероятность распада:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- ,$$

в котором собственное значение $\hat{C}\hat{P}$ -оператора в конечном состоянии имеет CP=+1:

$$\frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_L \rightarrow all)} = (2.03 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} .$$

Этот результат означает, что нельзя отождествлять состояние K_S^0 с K_1^0 и K_L^0 с K_2^0 .

Вместо этого нужно следующим образом определить состояния K_L^0 и K_S^0 :

$$|K_L^0\rangle = \left(\frac{1}{1 + |\varepsilon_1|^2} \right)^{1/2} \left(|K_2^0\rangle + \varepsilon_1 |K_1^0\rangle \right),$$

$$|K_S^0\rangle = \left(\frac{1}{1 + |\varepsilon_2|^2} \right)^{1/2} \left(|K_1^0\rangle + \varepsilon_2 |K_2^0\rangle \right),$$

ε_1 и ε_2 – малые комплексные числа.

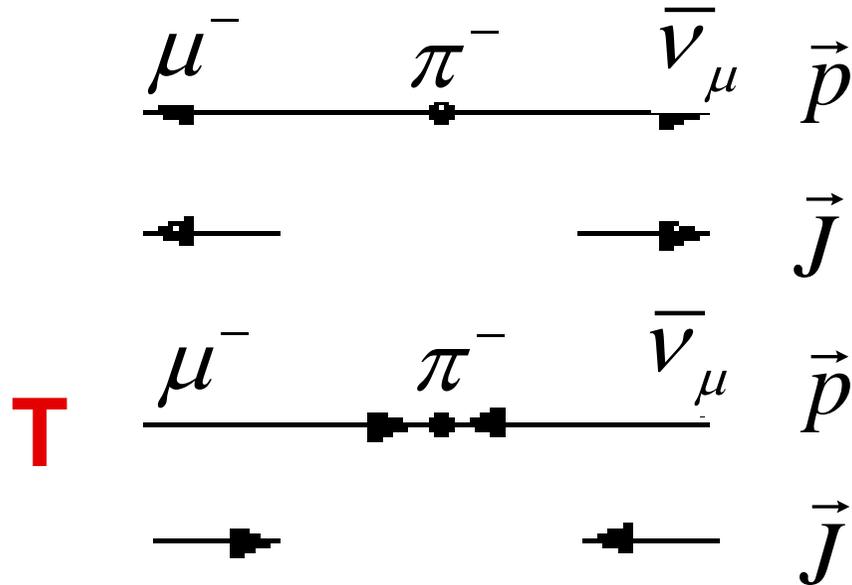
Обращение времени

Операция обращения времени T сводится к замене $t \rightarrow -t$. Преобразование пространственных координат \vec{r} , импульса \vec{p} и момента импульса \vec{J} при операции обращения времени:

$$\vec{r}, \vec{p}, \vec{J} \xrightarrow{T} \vec{r}, -\vec{p}, -\vec{J}.$$

В результате T -преобразования происходит изменение знаков импульса, момента импульса и меняются местами начальное и конечное состояния. Операция обращения времени превращает исходное движение в обратное.

T -преобразование процесса распада π^- -мезона:



Из требования T -инвариантности следует равенство сечений прямого и обратного процессов, что позволяет проверить выполнение T -инвариантности в различных процессах.

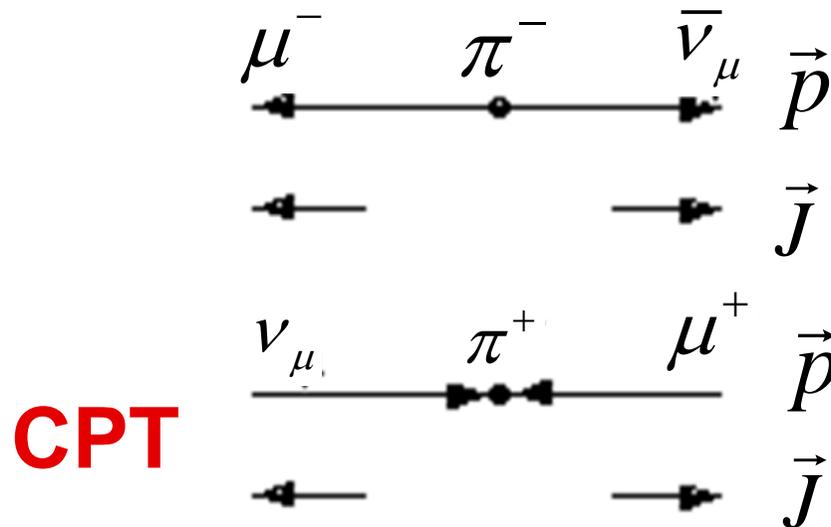
CPT - теорема

Людерсом и Паули была доказана фундаментальная теорема.

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ ИНВАРИАНТНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО CPT-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЛЮБОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.

Следствием CPT-инвариантности является равенство масс и времен жизни частицы и античастицы.

CPT-преобразование для распада π^- -мезона.



В силу CPT-инвариантности, если в природе происходит некоторый процесс, то точно с такой же вероятностью может происходить CPT-сопряженный процесс, в котором частицы заменены соответствующими античастицами, проекции их спинов и импульсов изменили знак, а начальное и конечное состояния поменялись местами. Вероятности распадов $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ и $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ одинаковы.

На опыте не обнаружено ни одного случая нарушения CPT-инвариантности.

Сохранение CPT-симметрии следует из самых общих принципов квантовой физики.

Если CPT-симметрия сохраняется, то из несохранения CP-симметрии следует несохранение

T-симметрии.

Объединение взаимодействий

Современные идеи объединения различных взаимодействий берут начало от работ Ньютона. Ньютон открыл простой закон, согласно которому сила взаимодействия между двумя массивными телами пропорциональна их массам m_1 , m_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

G – гравитационная постоянная Ньютона.

С помощью этого закона Ньютон сумел рассчитать как закономерности падения тел, согласующиеся с наблюдениями Галилея, так и закономерности движения планет, ранее установленные Кеплером. С помощью одного закона впервые удалось описать явления земных и космических масштабов.

Следующий шаг в объединении взаимодействий был сделан Максвеллом, который показал, что электричество, магнетизм и свет можно описать системой дифференциальных уравнений, которые носят его имя.

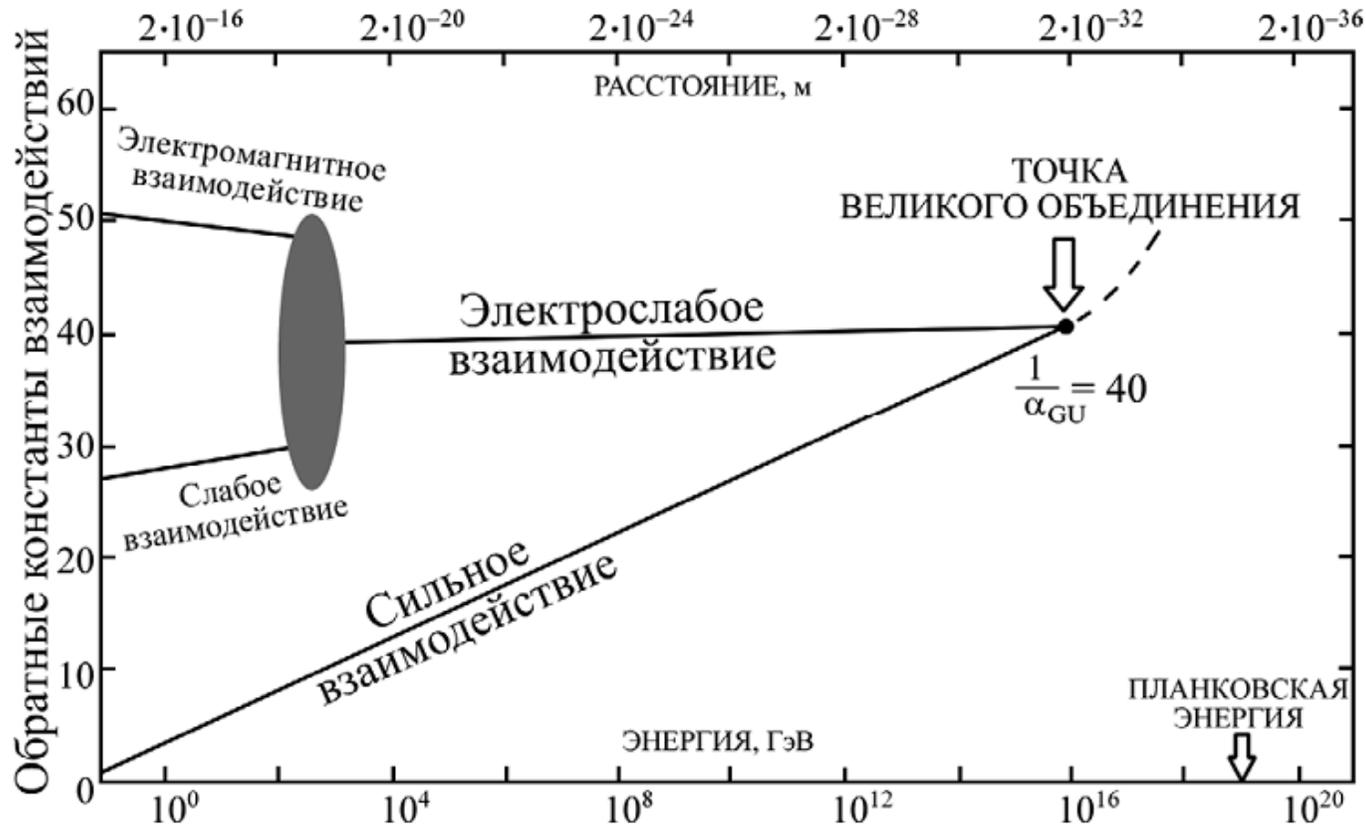
В картине объединения взаимодействий различают три порога.

Первый – 100 ГэВ – это порог электрослабого взаимодействия, который соответствует массе W -, Z -бозонов. При этих энергиях происходит объединение электромагнитного и слабого взаимодействий.

Второй — $\sim 10^{15}$ ГэВ. Это характерная величина энергии, при которой происходит объединение сильного и электрослабого взаимодействий. Такой массой должны обладать X - и Y -бозоны, обеспечивающие симметрию кварков и лептонов. X - и Y -бозоны могут превращать кварки в лептоны и лептоны – в кварки.

Третий — $\sim 10^{19}$ ГэВ — это энергия Планка. При этих энергиях в единое взаимодействие объединяются все известные взаимодействия, включая гравитационное.

Объединение взаимодействий



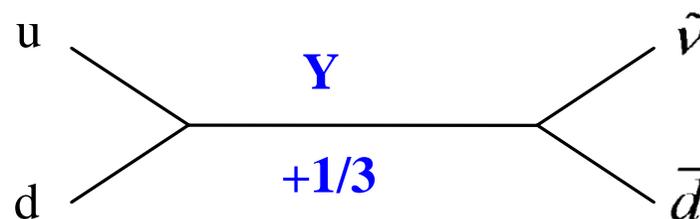
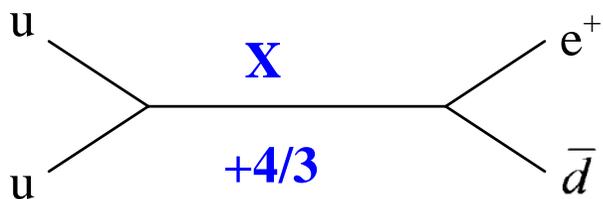
При уменьшении расстояния или, что эквивалентно, при увеличении энергии константа электромагнитного взаимодействия возрастает, в то время как константы сильного и слабого взаимодействия уменьшаются. Расчеты показывают, что если учесть влияние квантовых флуктуаций, константы взаимодействий начнут сближаться, 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	
$X(k,3,c)$	$\bar{X}(\bar{k},\bar{3},\bar{c})$
$Y(k,3,c)$	$\bar{Y}(\bar{k},\bar{3},\bar{c})$

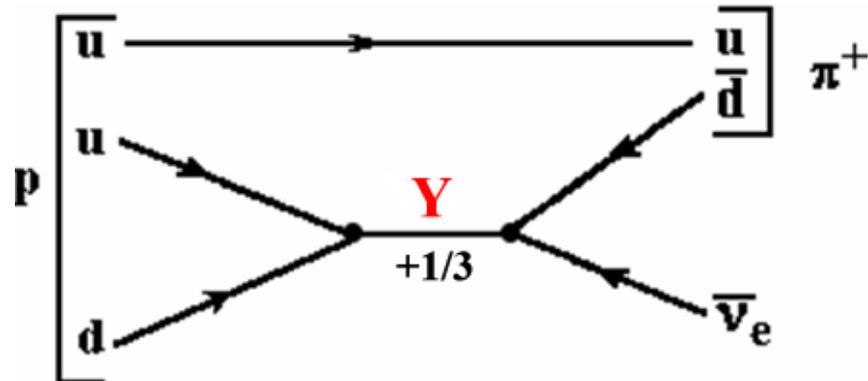
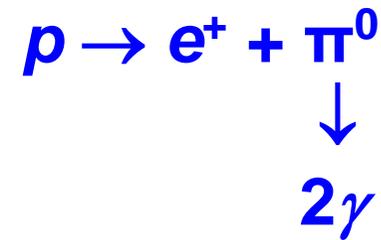
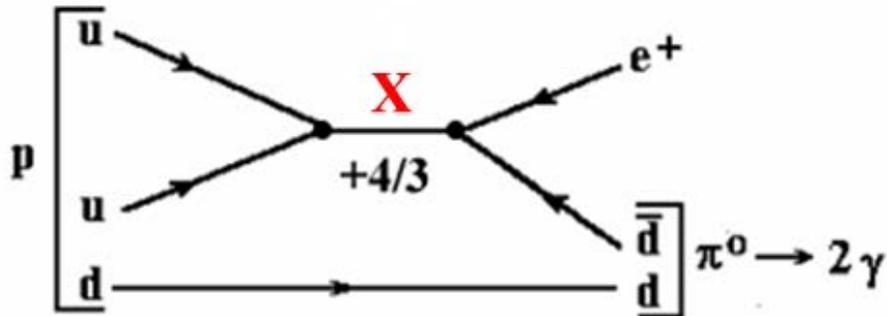
Бозон Хиггса

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.



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.



2012. Бозон Хиггса

Основные каналы образования и распада бозона Хиггса

$$pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$pp \rightarrow H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l \quad (l = e, \mu)$$

$$pp \rightarrow qqH \rightarrow qq\tau^+\tau^-$$

$$pp \rightarrow H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu, l\nu qq$$

$$pp \rightarrow \tilde{t}\tilde{t} H \rightarrow \tilde{t}\tilde{t} b\bar{b}$$

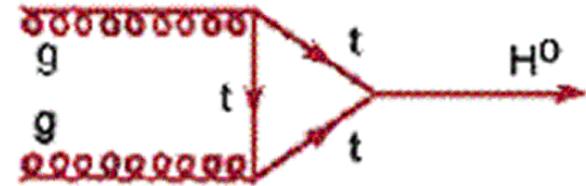
$$pp \rightarrow \tilde{t}\tilde{t} H \rightarrow \tilde{t}\tilde{t} W^+W^-,$$

$$pp \rightarrow ZH \rightarrow l+l^- W^+W^-.$$

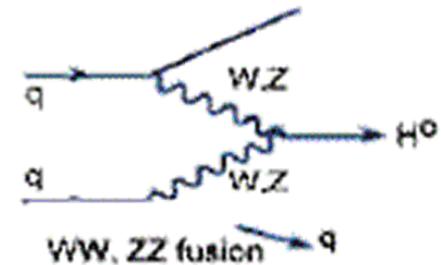
$$M(H) = 125 \text{ ГэВ}$$

$$J(H) = 0$$

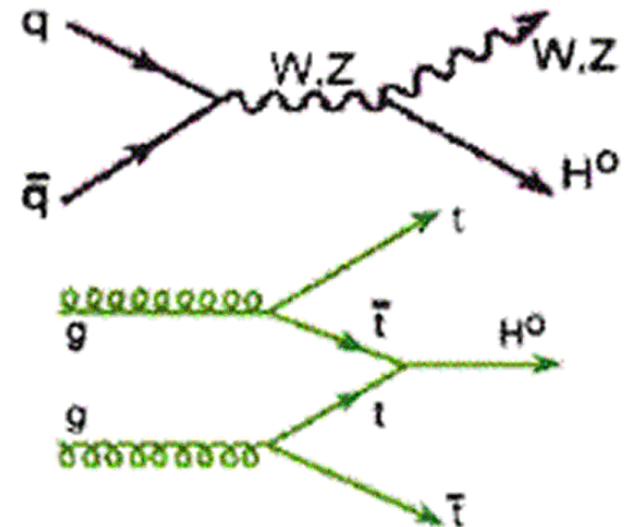
$$\tau > 10^{-24} \text{ с } (10^{-22} \text{ с})$$



Слияние глюонов



Совместное рождение с W^\pm, Z



Совместное рождение с кварками $t\bar{t}$

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

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)

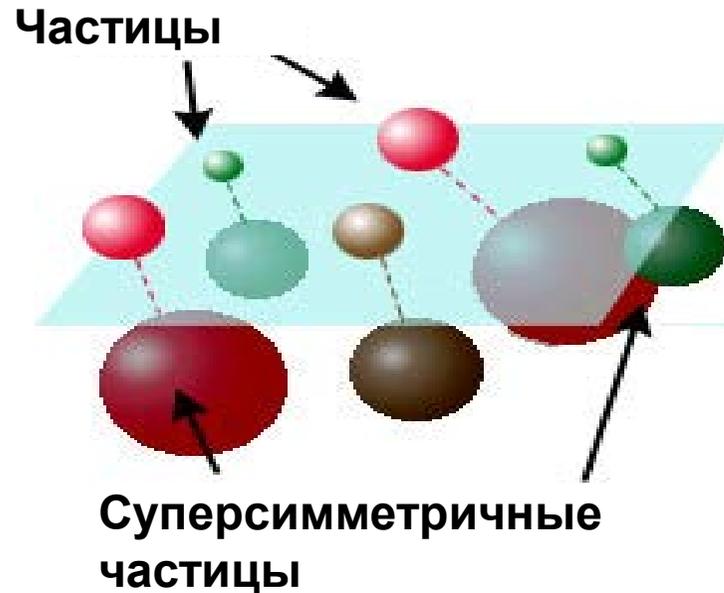
$$L_{\text{Pl}} = (G / c^3)^{1/2} \approx 10^{-33} \text{ см,}$$

планковская энергия

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

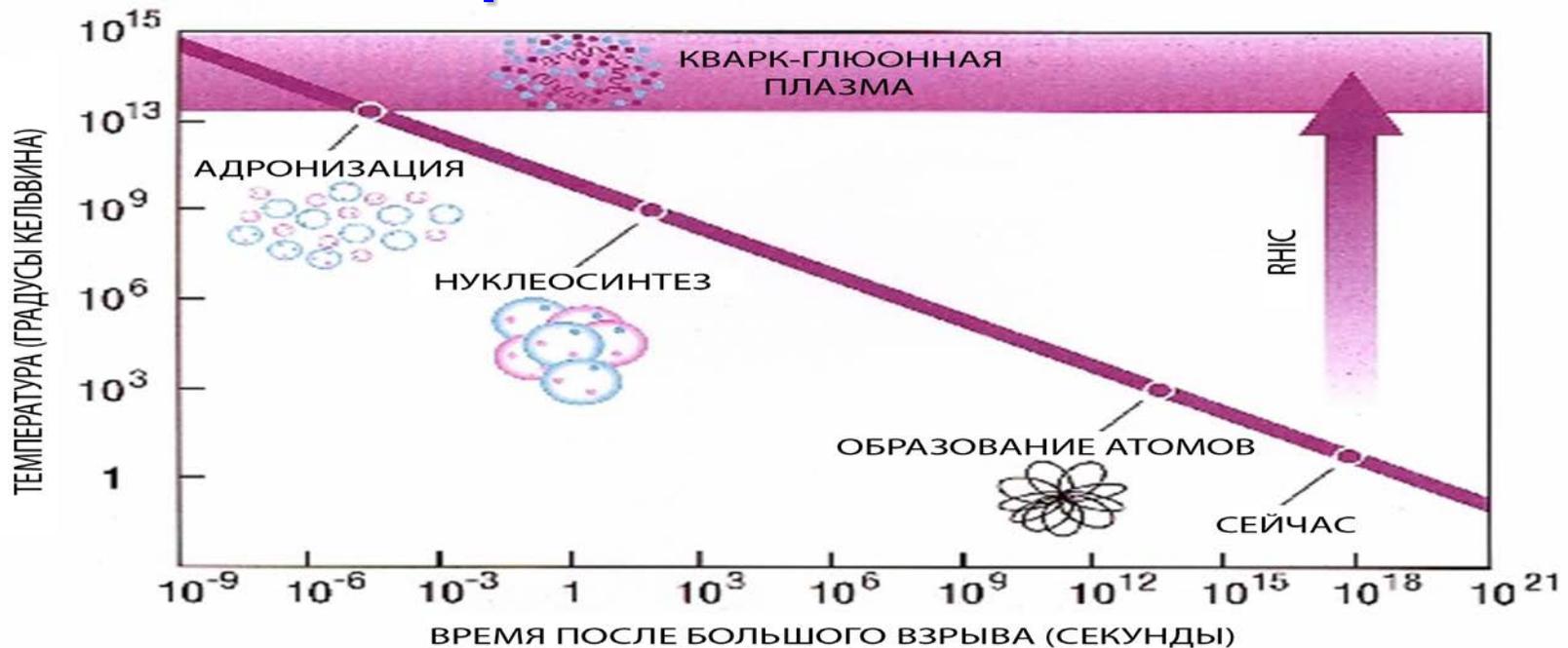
и температура $T_{\text{Pl}} \approx 10^{32}$ К.

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

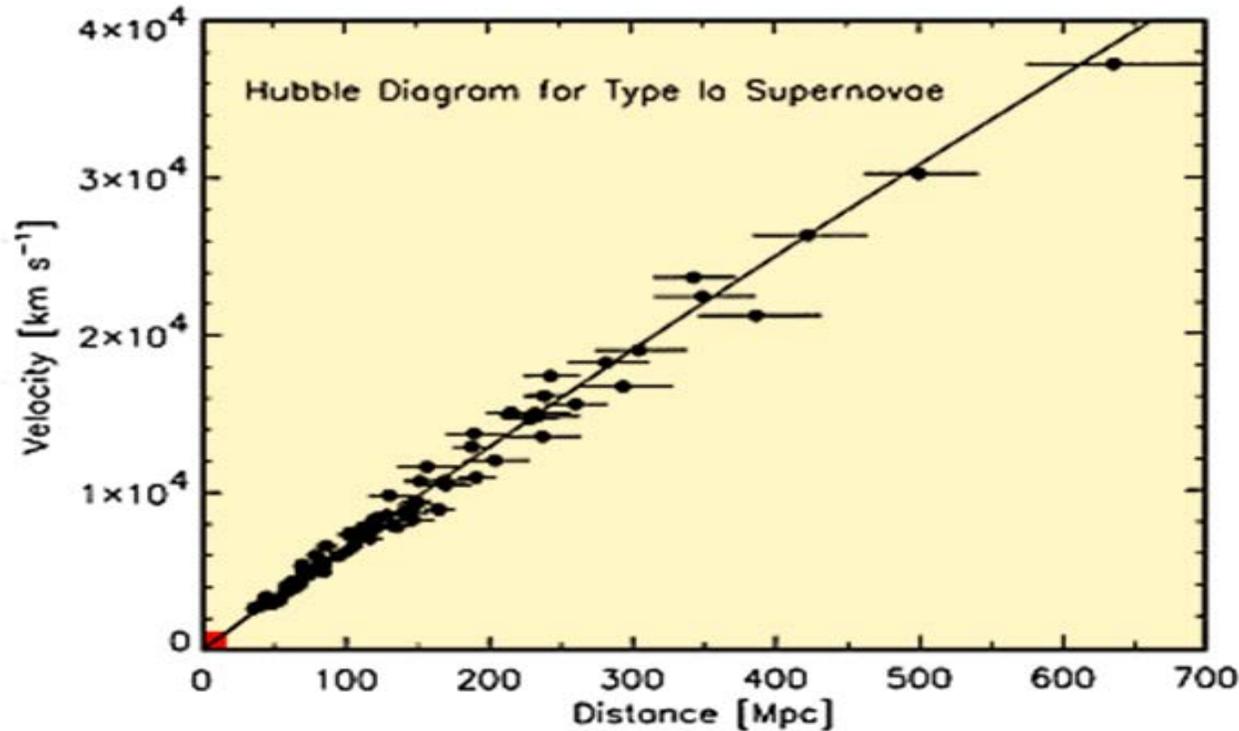
Кварк-глюонная плазма



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.

1929 г. Э. Хаббл. Расширяющаяся Вселенная



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

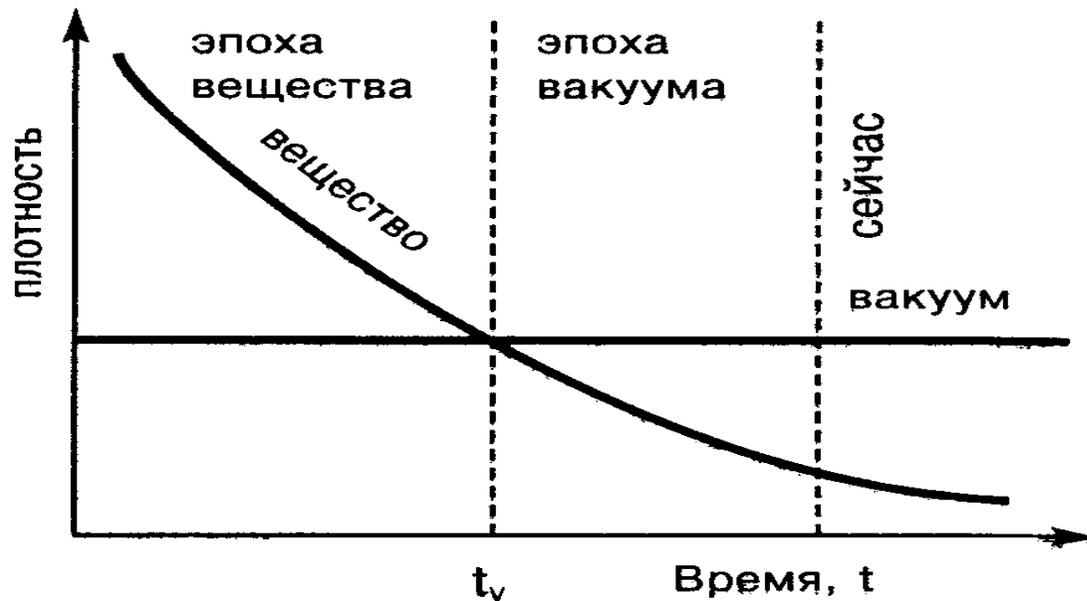
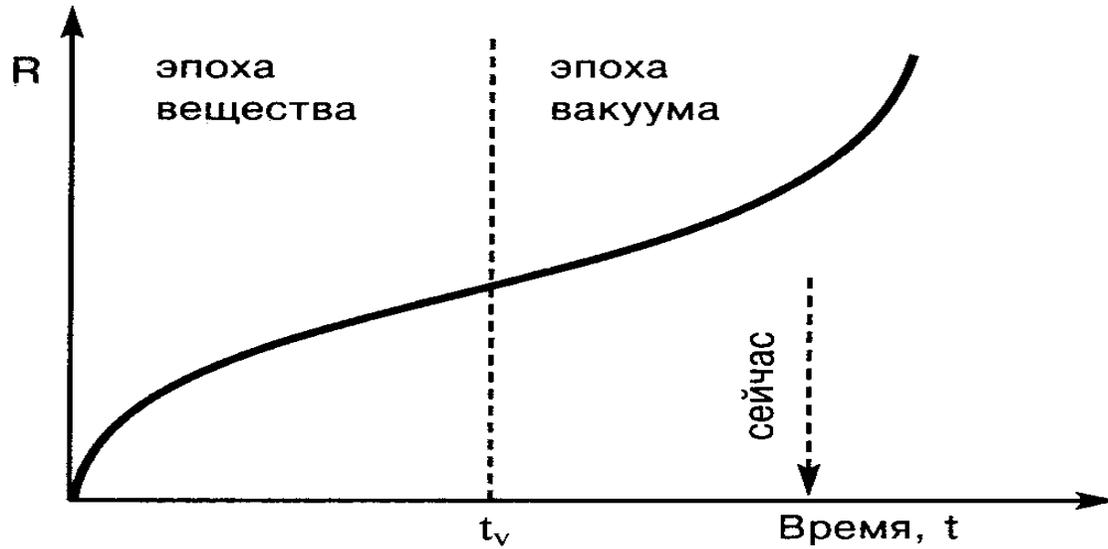
$$v = HR,$$

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.

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.

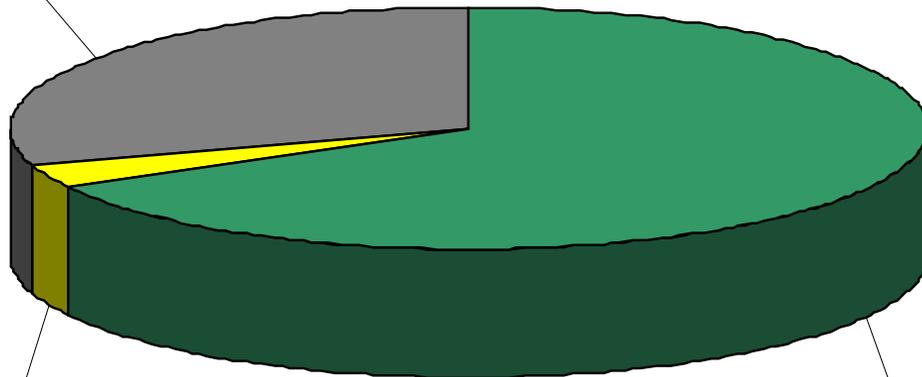
Характеристики Вселенной

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



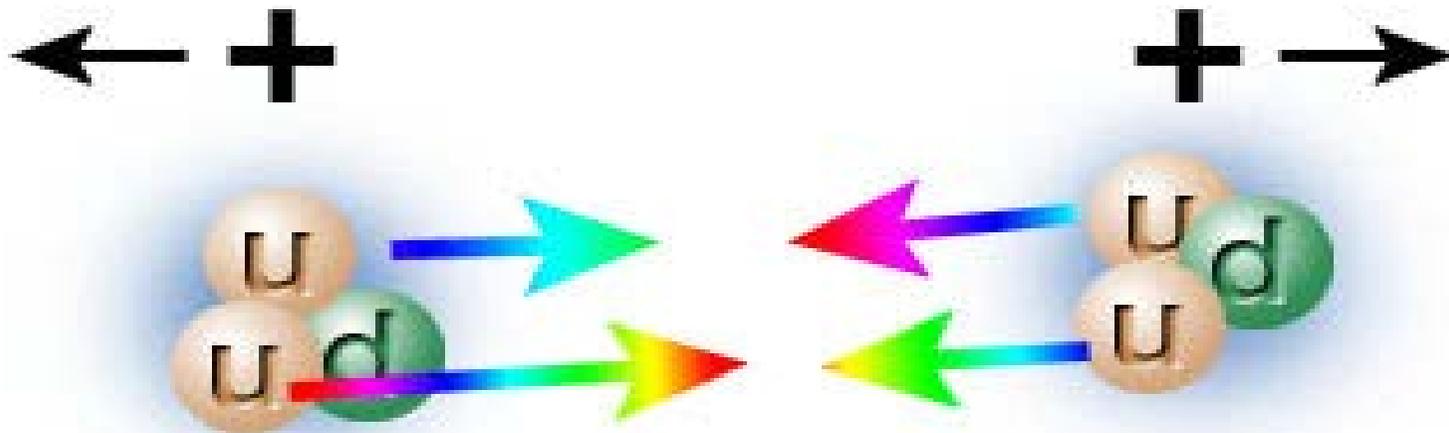
Космическая шкала времени

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

Кварки – Адроны – Ядра

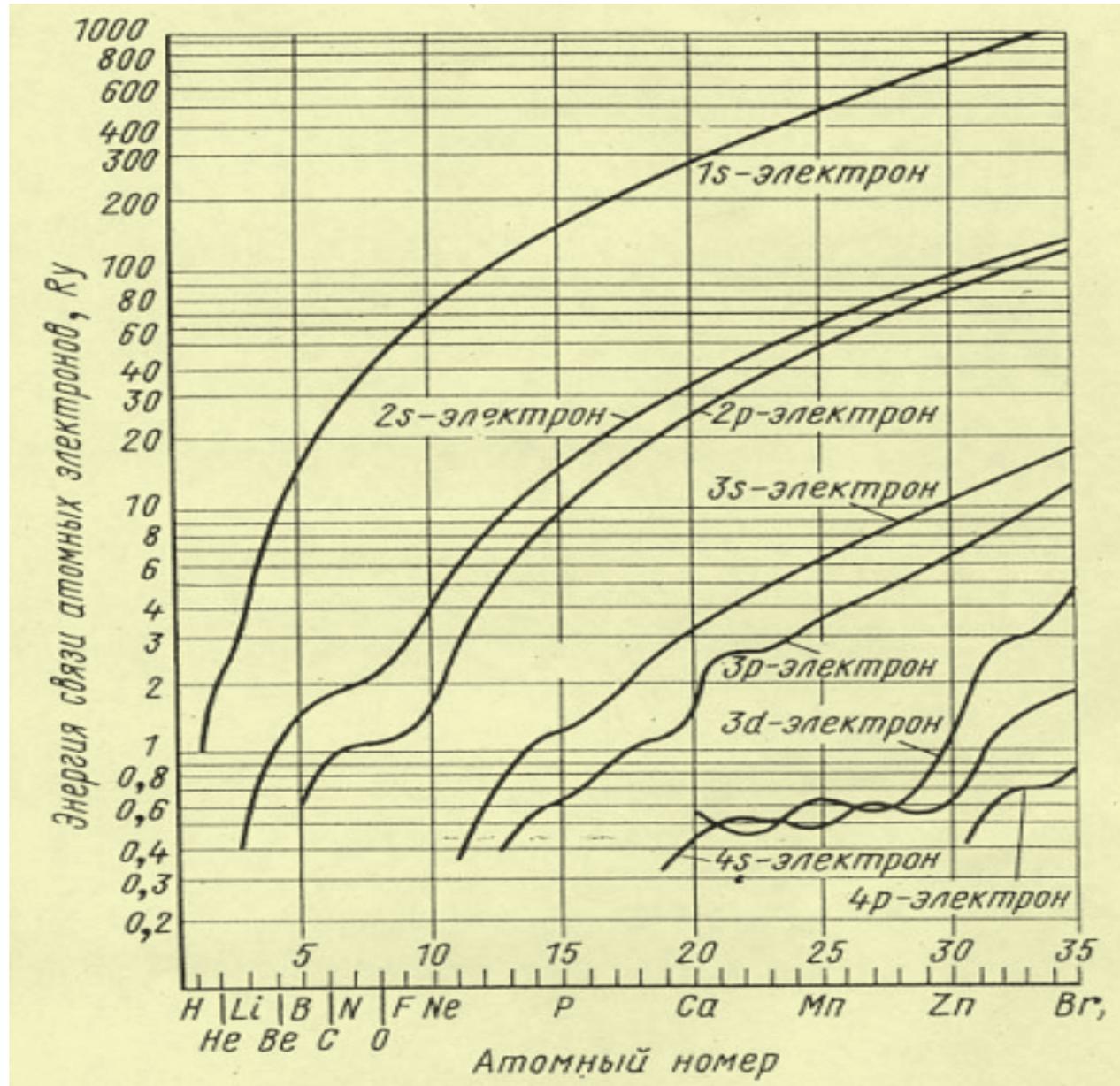
Расстояние, на котором проявляется цветное взаимодействие ≈ 1 Фм – характерный размер адрона. Цветные взаимодействия кварков и глюонов формируют адрон. Точно так же, как атом, состоящий из заряженных частиц, является электрически нейтральным образованием, адрон, состоящий из цветных объектов, является бесцветным объектом. Цвет проявляется только на расстоянии $< 10^{-13}$ см.

Бесцветные адроны связаны друг с другом ядерными силами, которые являются аналогом сил связывающих нейтральные атомы в молекулы. Ядерные силы – это слабый «отголосок» сильного взаимодействия между цветными кварками в адроне.



Атомные ядра

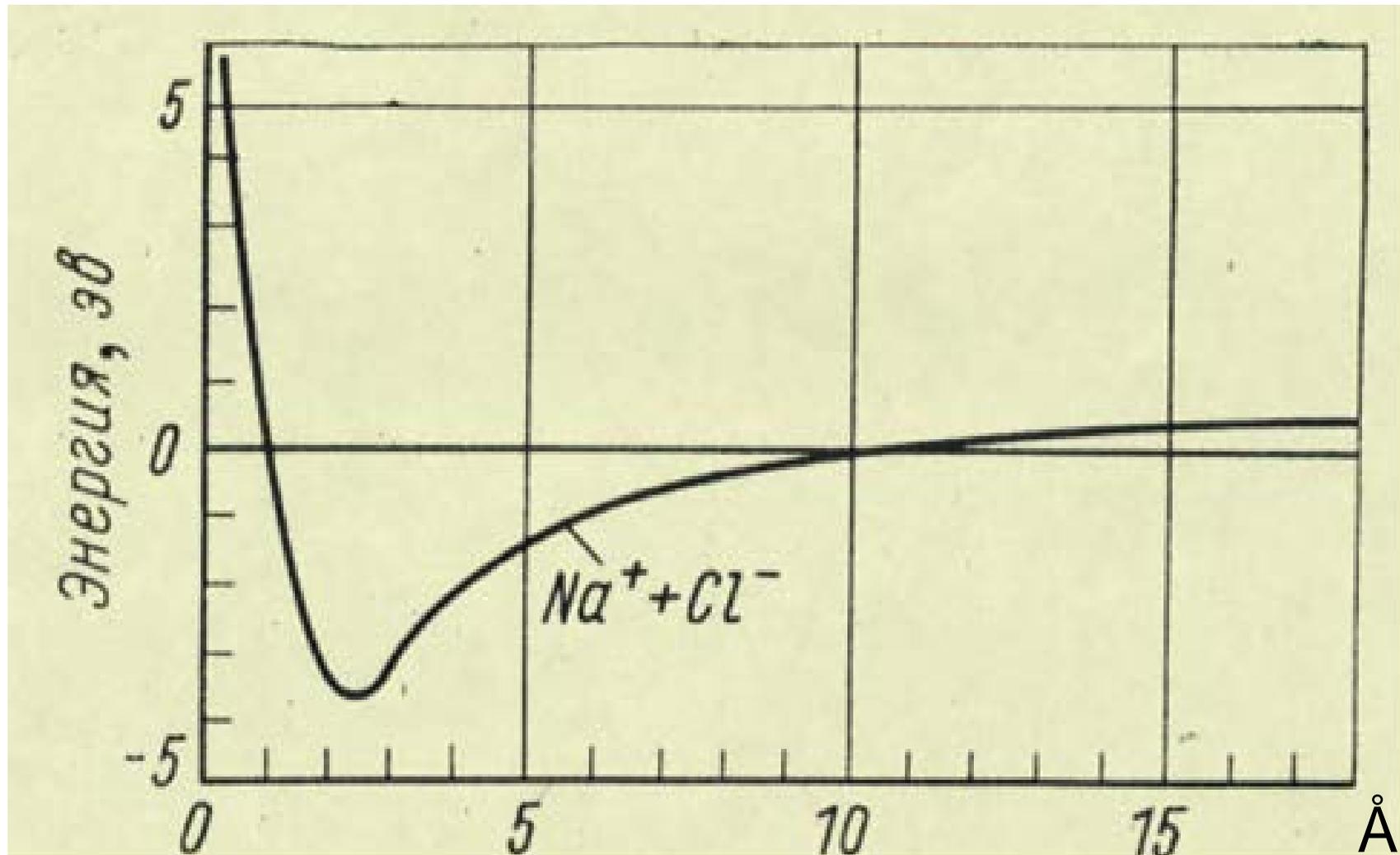
Атомы. Молекулы



Зависимость энергии связи электронов различных оболочек атома от атомного

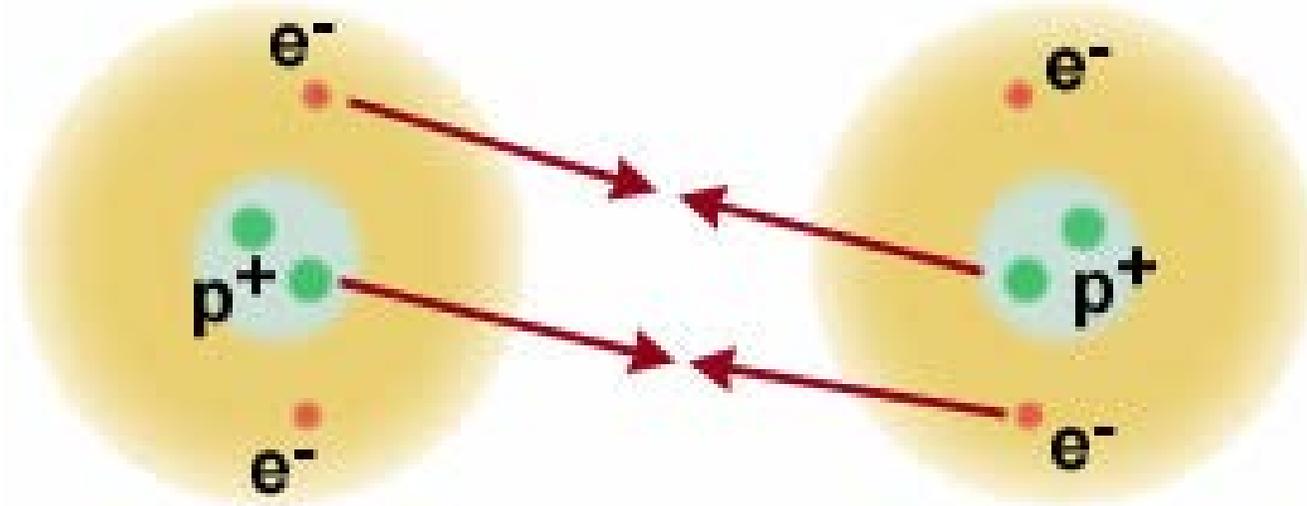
номера

Атомы. Молекулы



Изменение энергии системы $NaCl$ в зависимости от расстояния (Å) между ионами Na^+ и Cl^-

Атомы - Молекулы



Электромагнитное поле атома сосредоточено в области пространства размером 10^{-8} см. Для наблюдателя, находящегося на большом расстоянии, атом представляется нейтральной системой, так как положительный заряд ядра полностью компенсируется отрицательным зарядом электронной оболочки. При образовании молекулы прочно связанные внутренние оболочки атомов практически не изменяются. Химические и физические свойства молекул определяются относительно слабо связанными электронами внешней оболочки. Силы, связывающие атомы в молекулы, имеют электромагнитную природу. Однако это лишь слабый «отголосок» сил, связывающих электроны и атомное ядро.

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. ??????