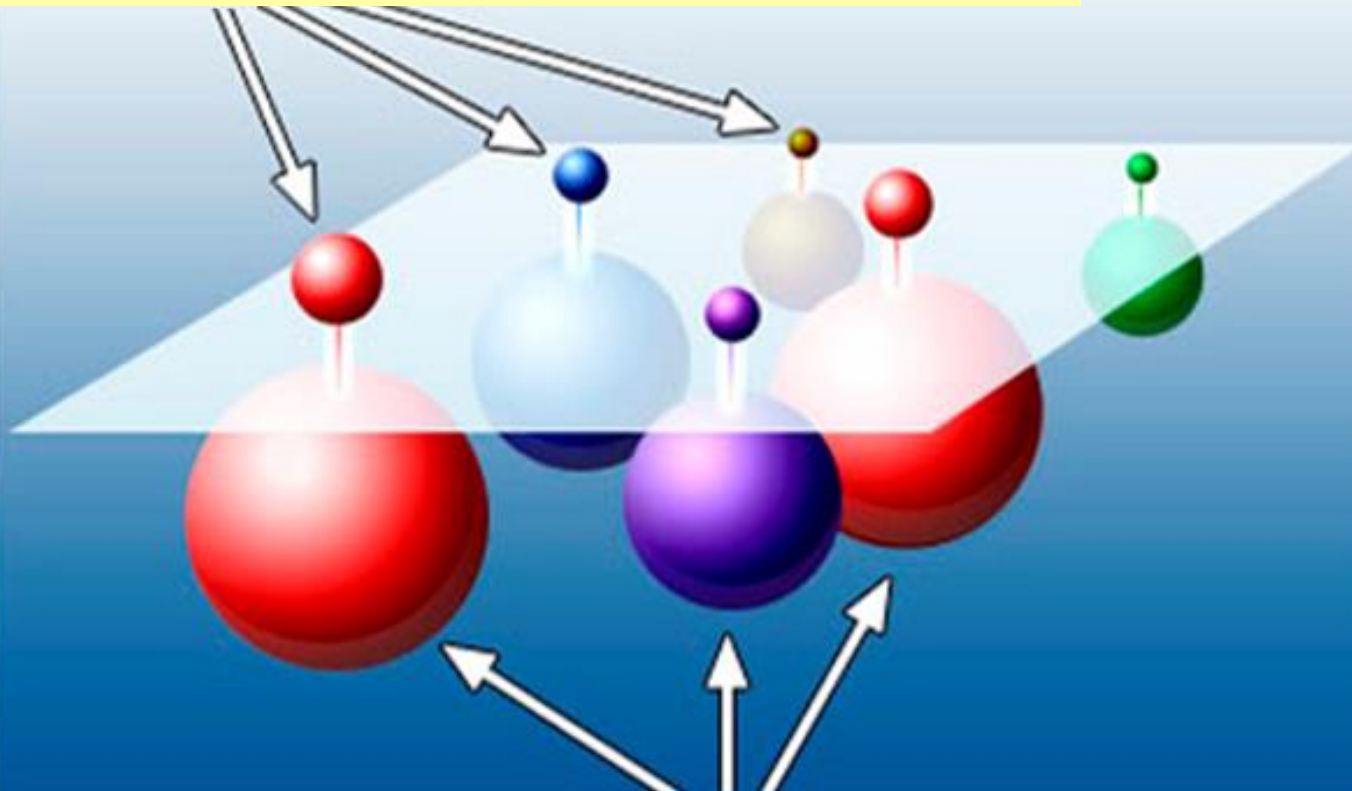


# *CPT*-симметрии и объединение взаимодействий

Частицы стандартной модели



Суперсимметричные частицы

# Темы лекции

1. Зарядовое сопряжение.
2.  $CP$ -преобразование и  $CP$ -инвариантность.
3.  $CPT$ -теорема.
4. Нарушение  $CP$ -инвариантности.
5. Объединение взаимодействий. Первые этапы.
6. Пропагатор переносчика взаимодействий.  
Переопределение константы слабых сил.
7. «Бегущие» константы взаимодействий.
8. Великое объединение взаимодействий.  
Симметрии Великого объединения.  
Распад протона.
9. Спонтанное нарушение симметрии.
10. Планковский масштаб. Суперсимметрия.
11. Суперструны.
12. Распад единого взаимодействия при охлаждении.  
«Вымораживание» отдельных фундаментальных взаимодействий.

# Зарядовое сопряжение

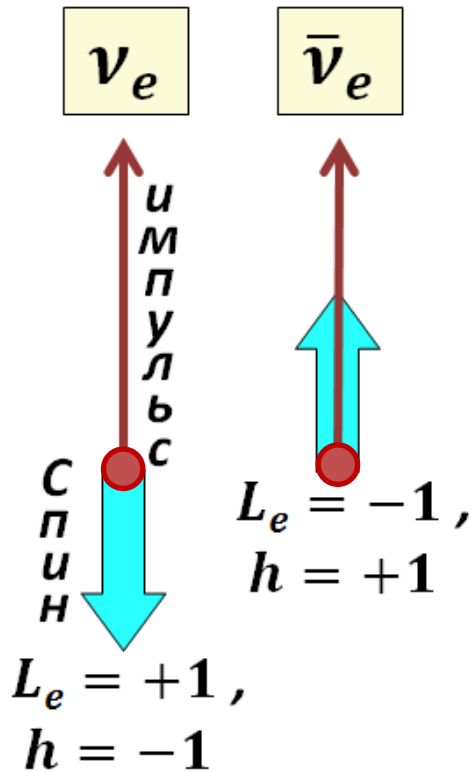
Операция зарядового сопряжения  $\hat{C}$  (*charge*) сводится к изменению знаков всех аддитивных квантовых чисел (зарядов). При этом *масса*, *импульс* и *спин* не меняются.

Это операция, переводящая частицу в античастицу и наоборот:

$$\hat{C} | \text{частица} \rangle = | \text{античастица} \rangle,$$
$$\hat{C} | \text{античастица} \rangle = | \text{частица} \rangle,$$

Зарядовая симметрия означает, что если существует какой-либо процесс с участием частиц, то при замене их на античастицы (*зарядовом сопряжении*) процесс также существует и с той же вероятностью.

# Разная поляризация нейтрино и антинейтрино означает, что зарядовой симметрии нет в слабых взаимодействиях.



Совершим зарядовое сопряжение над нейтрино и антинейтрино:

$$\hat{C}\nu_e = \hat{C} |L_e = +1, h = -1\rangle =$$

$$= \cancel{|L_e = -1, h = -1\rangle},$$

$$\hat{C}\bar{\nu}_e = \hat{C} |L_e = -1, h = +1\rangle =$$

$$= \cancel{|L_e = +1, h = +1\rangle}$$

Итак, получаем несуществующие объекты. Таким образом, в слабых взаимодействиях нарушаются одновременно  $P$ - и  $C$ -инвариантность.

$C$ -инвариантность имеет место в сильных и электромагнитных взаимодействиях (уравнения Максвелла не меняются при замене знаков зарядов).

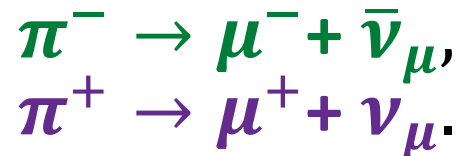
Анимация на Лекции

Однако, последовательность операций  $\hat{P}$  и  $\hat{C}$   
 (или в обратном порядке –  $\hat{C}$  и  $\hat{P}$ ),  
 Называемая **CP**-преобразованием,  
 применённая к нейтрину и антинейтрину,  
 приводит их к реальным,  
 т.е. к существующим в природе объектам:

$$\hat{P}\hat{C} |L_e = +1, h = -1\rangle = |L_e = -1, h = +1\rangle$$

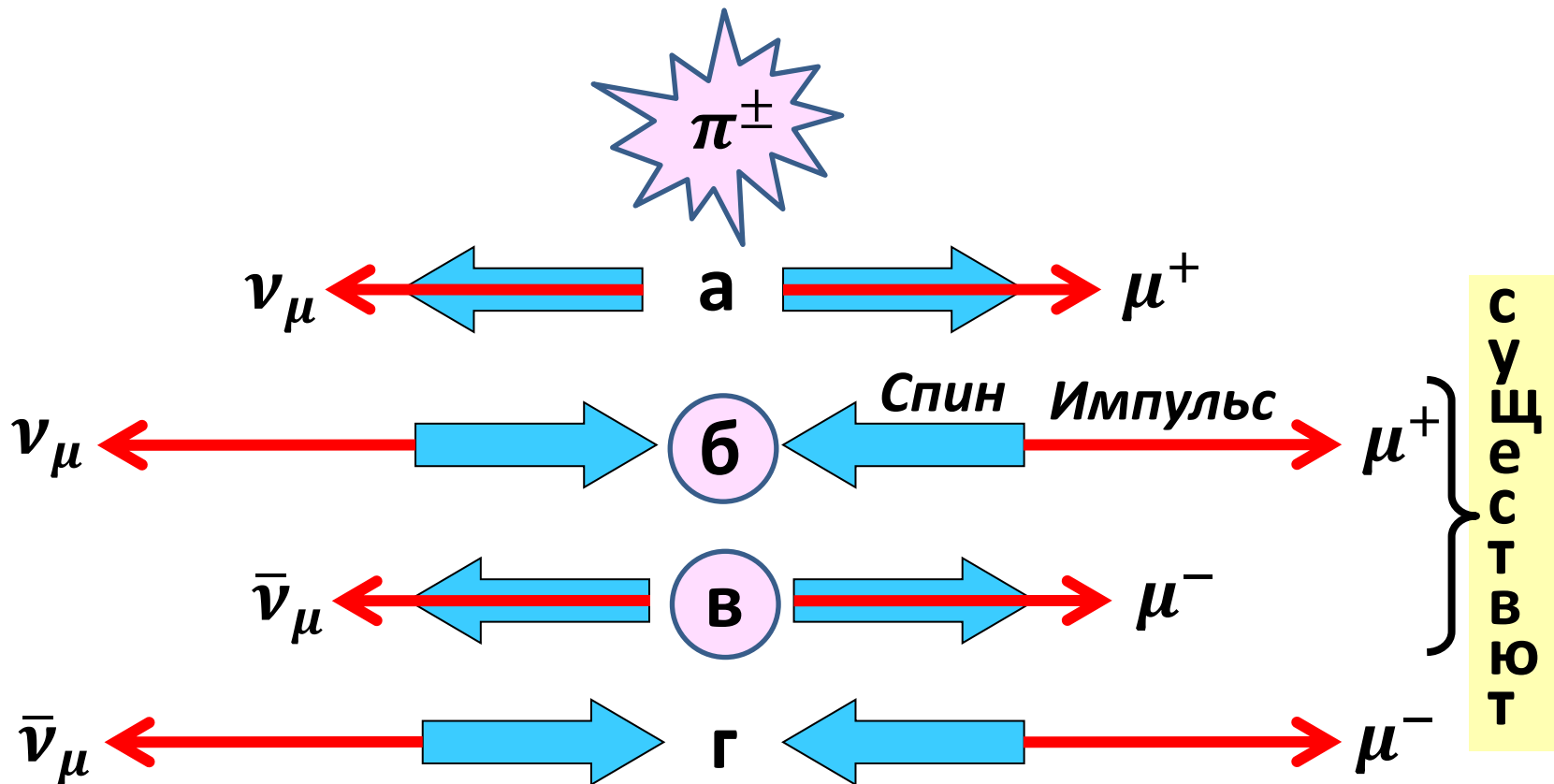
$$\hat{P}\hat{C} |L_e = -1, h = +1\rangle = |L_e = +1, h = -1\rangle$$

Было высказано предположение,  
 что хотя в слабых взаимодействиях нет отдельно  
**P**- и **C**-инвариантности, но есть **CP**-инвариантность.  
 Было выполнено много экспериментов по проверке  
 этого предположения. В частности, изучались  
**CP**-сопряжённые распады заряженных пионов:



Анимация на Лекции

Существуют следующие четыре варианта распада заряженных покоящихся пионов (их спин нулевой), удовлетворяющих законам сохранения импульса и углового момента:

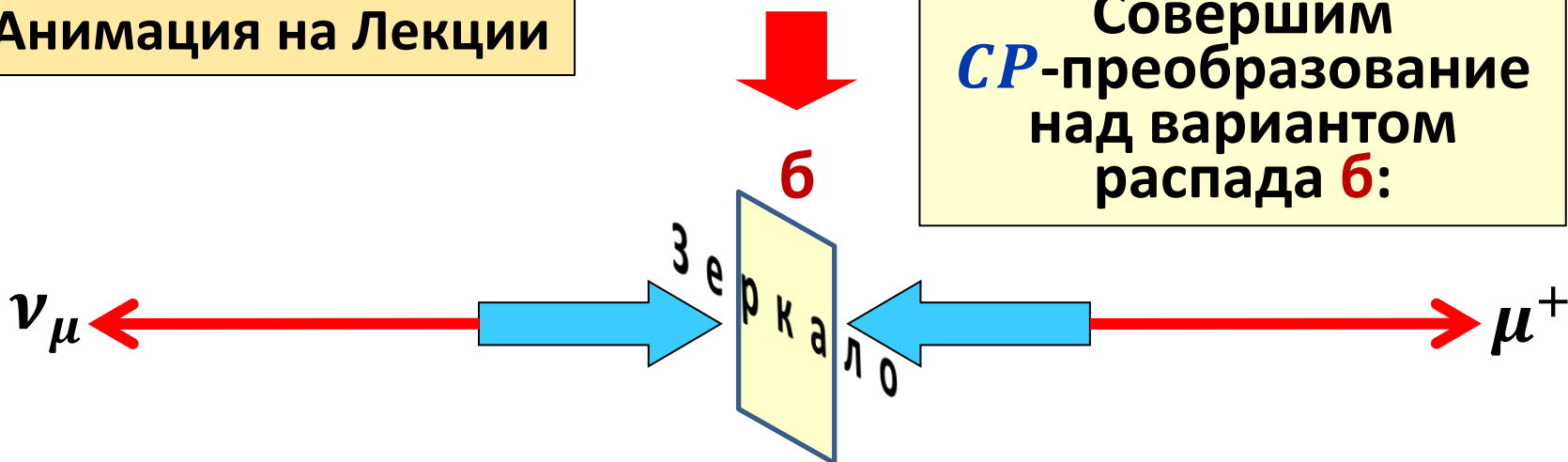


В природе реализуются лишь варианты распада **б** и **в**

Анимация на Лекции

Анимация на Лекции

Совершим  $CP$ -преобразование над вариантом распада  $\beta$ :



$P$ -преобразование



$C$ -преобразование



Поворот на  $180^\circ$



Получили вариант распада  $\bar{\beta}$

Таким образом,  
разрешённые варианты распада  
заряженного пиона (**б** и **в**)  
связаны друг с другом  
*CP*-преобразованием:

$$\hat{C}\hat{P}|\mathbf{b}\rangle = |\mathbf{v}\rangle,$$

$$\hat{C}\hat{P}|\mathbf{v}\rangle = |\mathbf{b}\rangle.$$

Итак, распад заряженного пиона  
*CP*-инвариантен.

До 1964 г. все опыты подтверждали  
*CP*-инвариантность слабых сил.



## Обращение времени ( $T$ -преобразование)

Операция обращения времени ( $T$ -преобразование) сводится к преобразованиям:

$$t \xleftrightarrow{\hat{T}} -t, \quad \vec{r} \xleftrightarrow{\hat{T}} \vec{r}.$$

Импульс и момент количества движения меняют знаки при  $T$ -преобразовании:

$$\vec{p} \xleftrightarrow{\hat{T}} -\vec{p}, \quad \vec{J} \xleftrightarrow{\hat{T}} -\vec{J}.$$

При  $T$ -преобразовании любой объект очерчивает траекторию своего движения в обратном порядке.

**Симметрия к обращению времени означает симметрию к обращению порядка событий**

**Симметрия по отношению к обращению времени не означает, что само время разворачивается и течёт назад.**

**Время течёт в прежнем направлении.**

**Вместо этого указанная симметрия означает, что события, которые происходят во времени в одном порядке, могут происходить с тем же успехом и в обратном порядке. Более точно нужно говорить о симметрии к обращению порядка событий.**

**Чтобы заставить объект очерчивать траекторию в обратном направлении, следует обратить его скорость в любой точке этой траектории.**

**Процедура обращения скорости объекта вдоль его траектории вынудит объект совершать движение, которое воспроизводится на кино-плёнке, прокручиваемой в обратном направлении.**

При  $T$ -симметрии  
вероятности прямых ( $a + b \rightarrow c + d$ )  
и обратных ( $c + d \rightarrow a + b$ ) реакций одинаковы:

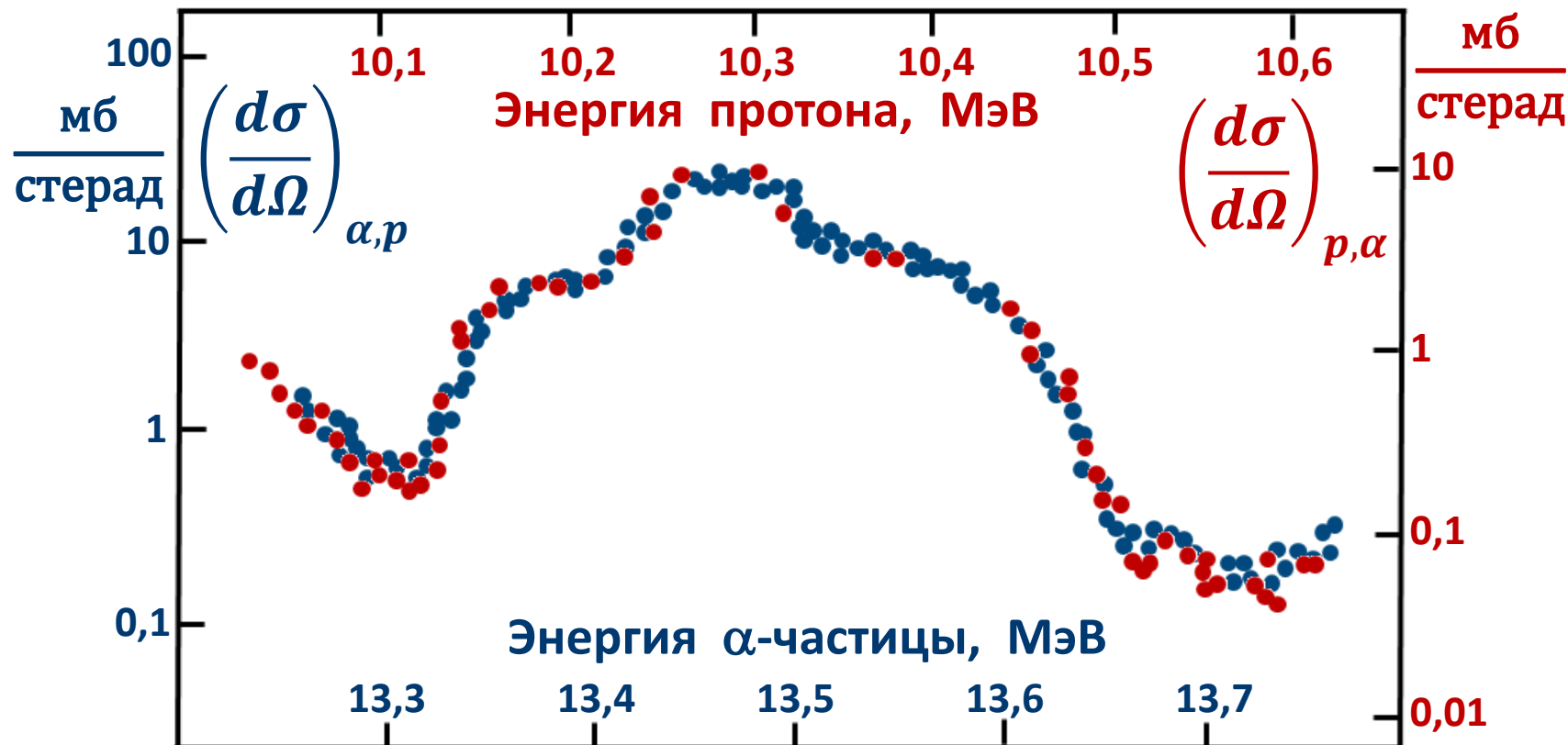
$$a + b \leftrightarrow c + d.$$

С точностью  $10^{-2} - 10^{-3}$   
(доступной в настоящее время)  
вероятности прямых и обратных реакций совпадают.

Уравнения классической физики  
(Ньютона и Максвелла)  $T$ -инвариантны

**Сильное и электромагнитное взаимодействия  
 $T$ -инвариантны**

# Сравнение дифференциальных сечений реакций



**Вероятность нарушения  $T$ -инвариантности из этих экспериментальных данных  $< 0,1\%$**

**Анимация на Лекции**

# *CPT*-теорема

Наш мир и мир, полученный из нашего путём зарядового сопряжения, пространственной инверсии и обращения времени, физически идентичны (т.е. «живут» по одним и тем же физическим законам).

**или**

Наш мир и мир, являющийся его зеркальным отражением с заменой всех частиц на античастицы и движением всех объектов в обратном направлении, идентичны.

*CPT*-теорема доказана

**Швингером (1951 г.), Людерсом (1954) и Паули (1955)**

**Schwinger**



**Lüders**



**Pauli**



Все известные факты свидетельствуют в пользу справедливости ***CPT***-теоремы.

***CPT***-инвариантность следует из самых общих принципов квантовой теории поля.

Её нарушение потребовало бы радикального изменения таких основ этой теории, как принцип причинности

и связь спина с квантовой статистикой.

Простейшие тесты ***CPT***-инвариантности – равенство масс и времён жизни частиц и античастиц.

Лучший известный тест – ограничение на разность масс  $\bar{K}^0$  и  $K^0$ :

$$\left| \frac{m_{\bar{K}^0} - m_{K^0}}{m_{K^0}} \right| \leq 10^{-18}$$

Нарушение ***CP***-инвариантности (при справедливости ***CPT***-теоремы) убедительно, хотя и косвенно, доказывает нарушение ***T***-инвариантности.

До 1964 г. полагали, что  $T$ -инвариантность имеет место во всех взаимодействиях в том числе и слабых.

В 1964 г. было обнаружено нарушение  $CP$ -инвариантности в распадах нейтральных каонов (Кронин и Фитч – Принстон, США). В 2001-2004 гг. нарушение  $CP$ -инвариантности обнаружено и в процессах с участием  $B^0$  и  $\bar{B}^0$ -мезонов.

В 1998 г. нарушение  $T$ -симметрии в процессах с нейтральными каонами было установлено в прямых экспериментах (не как неизбежное следствие нарушения  $CP$ -инвариантности).

Cronin



Nobel Prize  
1980



Fitch

## Нарушение $CP$ -инвариантности в распадах $K^0$

Электрически нейтральный каон  $K^0$  проявляет себя либо в виде «долгоживущей» частицы  $K_L^0$  ( $5,2 \cdot 10^{-8}$  сек), либо в виде «короткоживущей» частицы  $K_S^0$  ( $0,9 \cdot 10^{-10}$  сек).

Кронин и Фитч в 1964 г. обнаружили, что  $K_L^0$  с вероятностью  $\approx 10^{-3}$  испытывает  $CP$ -запрещённые распады:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- (\approx 2 \cdot 10^{-3}),$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 (\approx 9 \cdot 10^{-4}).$$

Кроме того, обнаружено, что в  $CP$ -сопряжённых распадах

$$\begin{array}{l} K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e \\ K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e \end{array} \leftarrow \text{CP-преобразование}$$

первый несколько (на 0,3%) вероятнее. При  $CP$ -инвариантности они должны быть равновероятны.  $K_L^0$  – истинно нейтральная частица и при  $CP$ -инвариантности должно быть:

$$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e \xleftarrow{\text{вероятность 50\%}} K_L^0 \xrightarrow{\text{вероятность 50\%}} \pi^- e^+ \nu_e$$

Итак, небольшое нарушение  $CP$ -инвариантности в распадах нейтральных каонов свидетельствует о нарушении  $T$ -инвариантности в слабых процессах.



# Объединение взаимодействий

Сила Лоренца, действующая на заряд  $q$   
в электромагнитном поле:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c} [\vec{v} \times \vec{B}]$$

При  $v \ll c$  магнитная сила много меньше электрической. При  $v \approx c$  они одного порядка.

Пройденные этапы объединения взаимодействий:

1. Объединение электрических и магнитных сил  
(Максвелл, 1864).
2. Объединение электромагнитных и слабых сил  
(Вайнберг, Салам, Глэшоу, 1967).

# Константы взаимодействий

Ранее использовались следующие константы взаимодействий:

$$\alpha_s = 1, \quad \alpha_e \approx 10^{-2}, \quad \bar{\alpha}_w \approx 10^{-6}, \quad \alpha_G \approx 10^{-38}$$

Для безмассовых переносчиков взаимодействий (*глюон, фотон, гравитон*):

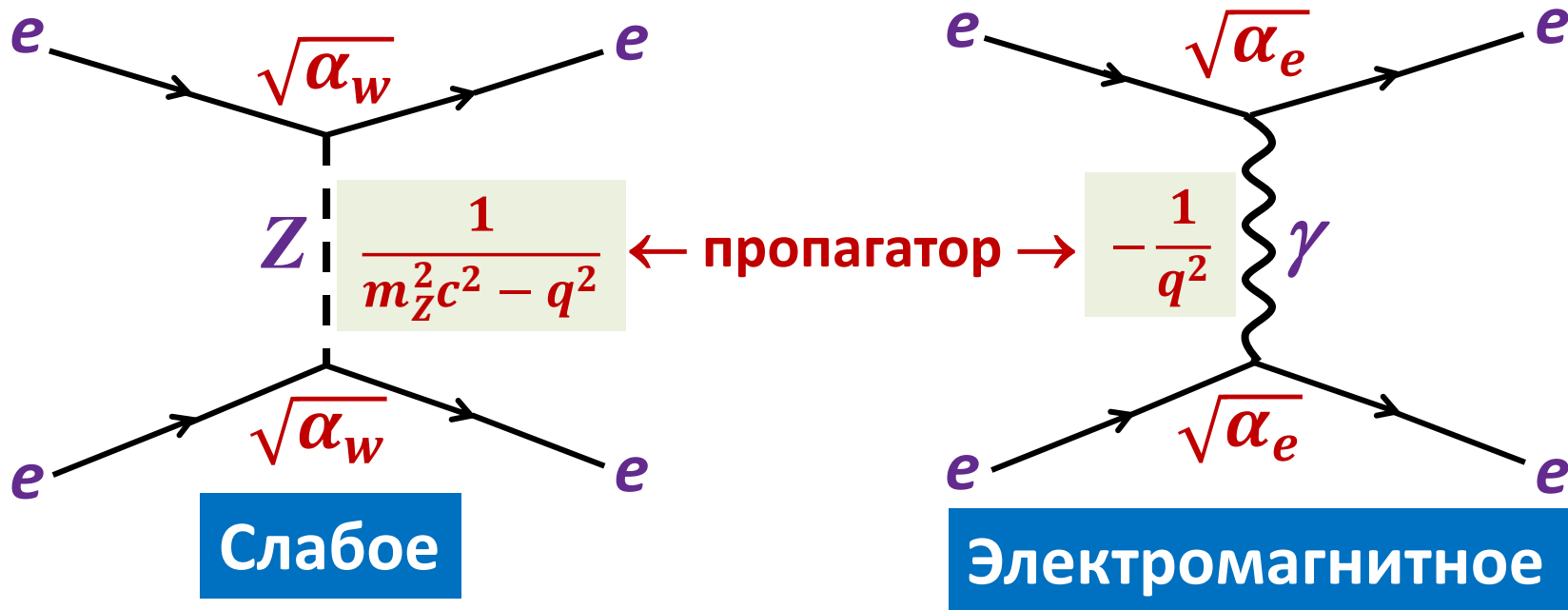
$$\alpha_i = \frac{(g_i)^2}{\hbar c},$$

где  $i = s, e, G$  и единичные заряды  $g_i$  относятся к протону (в частности  $g_e \equiv e$ ).

В случае массивных переносчиков ( $W^\pm, Z$ ), т.е. в случае слабых сил, на вероятность взаимодействия, существенно её снижая, влияет и масса виртуальной частицы – переносчика взаимодействия. Чем больше эта масса, тем сильнее нарушается энергетический баланс и тем ниже вероятность рождения такого переносчика.

Константа  $\bar{\alpha}_w \approx 10^{-6}$  включает массу переносчика слабых сил. Получим оценку константы слабых сил  $\alpha_w$  без участия массы переносчика.

# Диаграммы взаимодействия двух электронов:



Линиям реальных частиц отвечают их волновые функции

Вершинам (узлам) – константы связи  $\sqrt{\alpha_i}$

Виртуальным частицам – функции их распространения, пропагаторы (*to propagate – распространяться*)

Анимация на Лекции

Пропагатор  $\sim \frac{1}{m_i^2 c^2 - q^2}$ , где  $m_i$  - масса переносчика сил, а  $q^2 = q_0^2 - \vec{q}^2$  - квадрат 4-импульса переносчика,  $q_0 = E/c$ .

Амплитуда вероятности двухузловой диаграммы:

$$A_2(i) \sim \sqrt{\alpha_i} \cdot \text{пропагатор} \cdot \sqrt{\alpha_i} = \alpha_i \frac{c^2}{m_i^2 c^4 - q^2 c^2}$$

При  $qc \ll m_i c^2$  величина пропагатора определяется массой переносчика  $m_i$ . Пусть  $qc \approx 1 \text{ ГэВ} \approx m_p c^2$ , тогда для слабого взаимодействия двух электронов имеем

$$A_2(\text{weak})_{\text{переносчик с массой}} \sim \frac{\alpha_w c^2}{m_Z^2 c^4 - q^2 c^2} \approx \frac{\alpha_w c^2}{m_Z^2 c^4}. \quad (1)$$

Если бы масса переносчика слабого взаимодействия  $m_Z$  была нулевой, то при  $qc \approx 1 \text{ ГэВ} \approx m_p c^2$  мы имели бы

$$A_2(\text{weak})_{\text{переносчик без массы}} \sim \frac{\alpha_w c^2}{m_Z^2 c^4 - q^2 c^2} \approx -\frac{\alpha_w c^2}{m_p^2 c^4}. \quad (2)$$

Итак, амплитуда двухузловой диаграммы слабого взаимодействия при малых энергиях за счет массы его переносчика  $m_Z \approx 91 \text{ ГэВ}$  уменьшается в  $(m_Z/m_p)^2 \approx (91 \text{ ГэВ}/0,94 \text{ ГэВ})^2 \approx 10^4$  раз.

А значит и константа слабого взаимодействия при низких энергиях за счёт массы переносчика уменьшается примерно в такое же число раз т. е. в  $10^4$  раз.

Связь между старой слабой константой  $\bar{\alpha}_w$  и новой (освобожденной от влияния массы переносчика) константой  $\alpha_w$  выглядит так:

$$\alpha_w \approx \bar{\alpha}_w \left( \frac{m_{Z,W}}{m_p} \right)^2 \approx 10^{-6} \cdot 10^4 = 10^{-2}.$$

Более точно при энергии 1 ГэВ  $\alpha_w \approx 1/28$

Итак,  $\alpha_w > \alpha_e = 1/137$ ,  
т.е. «слабость» слабого взаимодействия по сравнению с электромагнитным – следствие большой массы промежуточных бозонов. Сам единичный слабый заряд  $g_w$  больше электромагнитного ( $g_e \equiv e$ ) почти в 2 раза.

## Изменение констант взаимодействия с энергией

Константы взаимодействий  $\alpha_i$ , строго говоря, не являются константами, а зависят от энергии:

*экранировка*



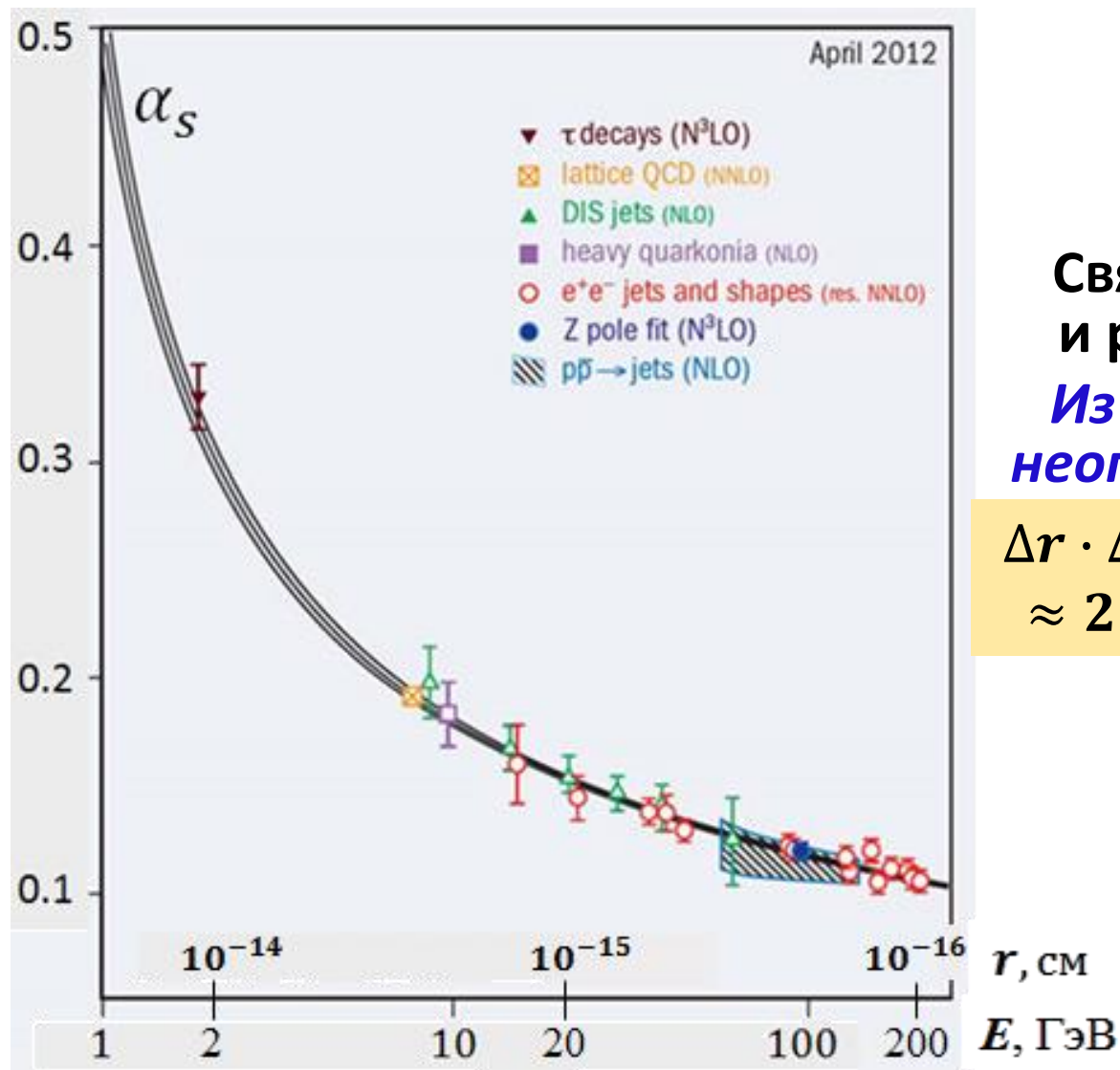
| Энергия, ГэВ | $\alpha_s$ | $\alpha_e$ | $\alpha_w$ |
|--------------|------------|------------|------------|
| 0,01         | 10         | 1/137      | 1/26       |
| 0,1          | 1          | 1/135      | 1/27       |
| 1            | 0,5        | 1/133      | 1/28       |
| 100          | 0,12       | 1/128      | 1/30       |

$\bar{\alpha}_w \approx 10^{-6}$



*антиэкранировка*

# Экспериментальная зависимость константы сильного взаимодействия от энергии (расстояния между кварками):



Связь энергии  $E$   
и расстояния  $r$  :

*Из соотношения  
неопределённости:*

$$\Delta r \cdot \Delta E \approx r \cdot E \approx \hbar c \approx$$

$$\approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ} \cdot \text{см}$$

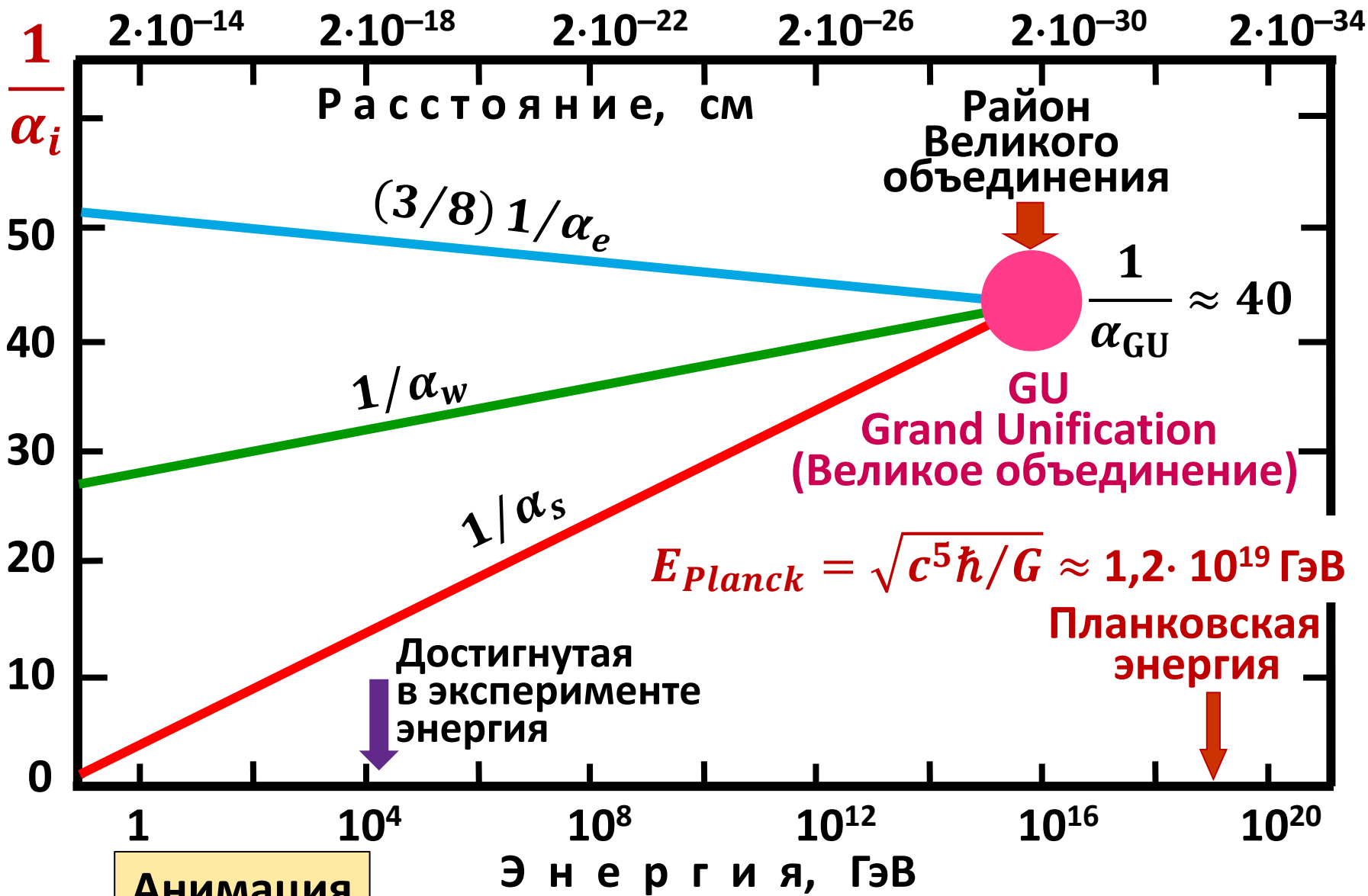
**Понижение с ростом энергии  
константы сильного взаимодействия –  
следствие антиэкранировки  
«сильного» (цветового) заряда, приводящей  
к асимптотической свободе с ростом энергии.**

**Антиэкранировка имеет место  
и для слабого заряда и понижает его константу  
с ростом энергии.**

**Для константы  
электромагнитного взаимодействия  
из-за экранировки имеет место рост с энергией.**



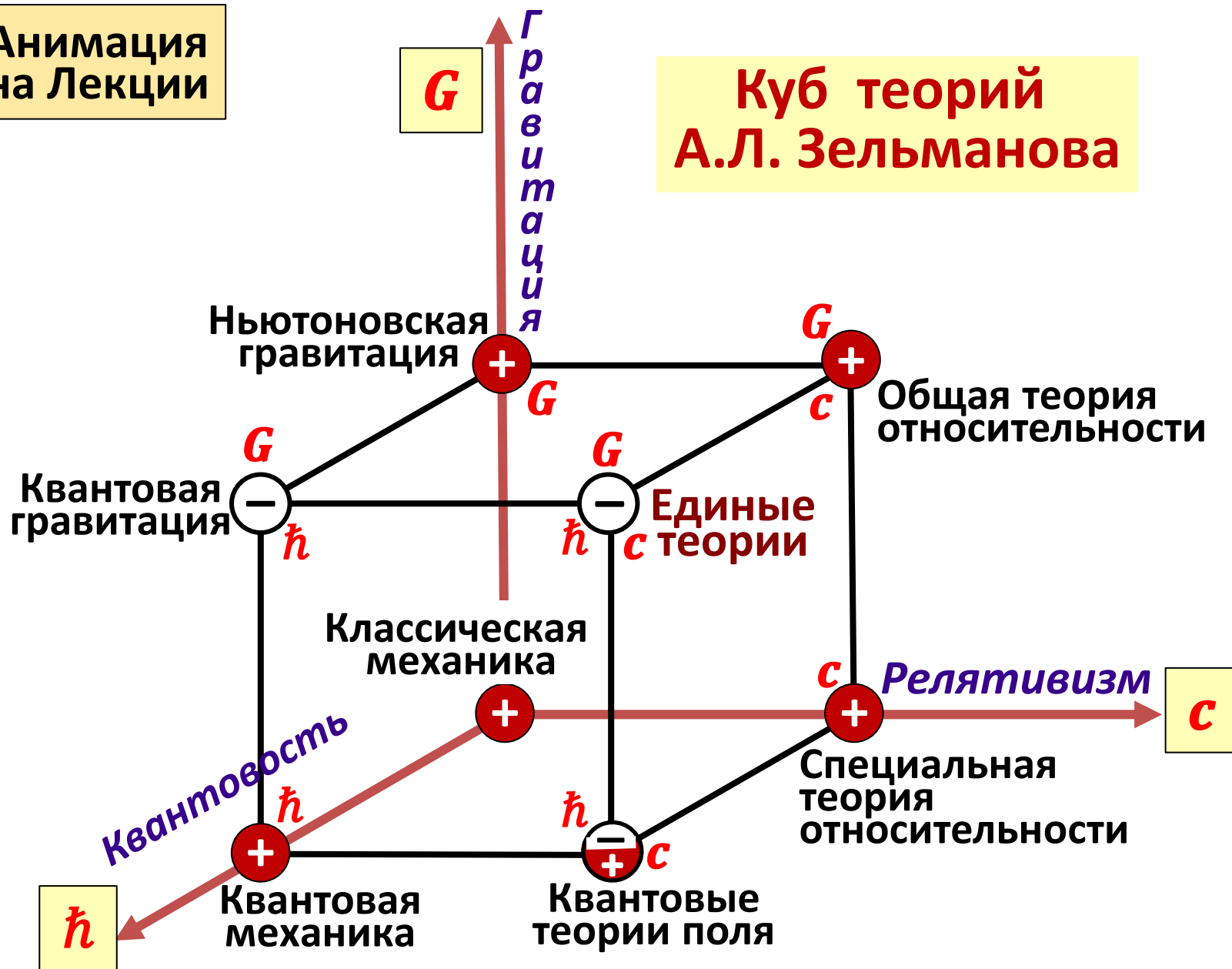
# Сбегающиеся константы взаимодействия



Анимация на Лекции

Анимация  
на Лекции

# Куб теорий А.Л. Зельманова



# Теории Великого объединения

*Великое объединение* –

это объединение трёх взаимодействий – **сильного**, **электромагнитного** и **слабого**.

Полагают, что оно возникает при энергиях  $\approx 10^{16}$  ГэВ (температурах  $\approx 10^{28}$  К), т.е.

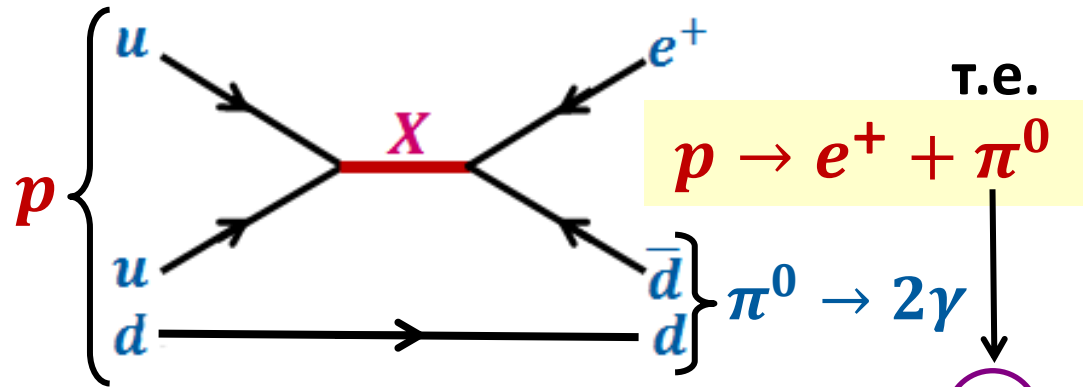
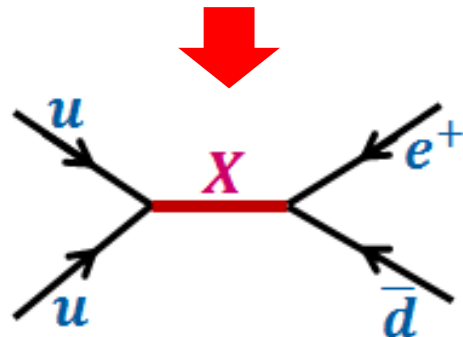
на 12 порядков выше достижимых в настоящее время. Симметрия единого поля (поля Великого объединения) выражается в том, что кварки и лептоны безмассовы и неразличимы перед лицом этого поля и ведут себя как компоненты единого объекта, образующего общий мультиплет фундаментальных фермионов.

В одной из первых теорий Великого объединения (*Georgi, Glashow, 1974*) переносчиками единого поля являются бозоны **X** и **Y**, имеющие **спин 1**, дробные электрические заряды  $+\left(\frac{4}{3}\right)e$  и  $+\left(\frac{1}{3}\right)e$  и цвет как у кварков (**красный**, **зелёный** и **синий**).

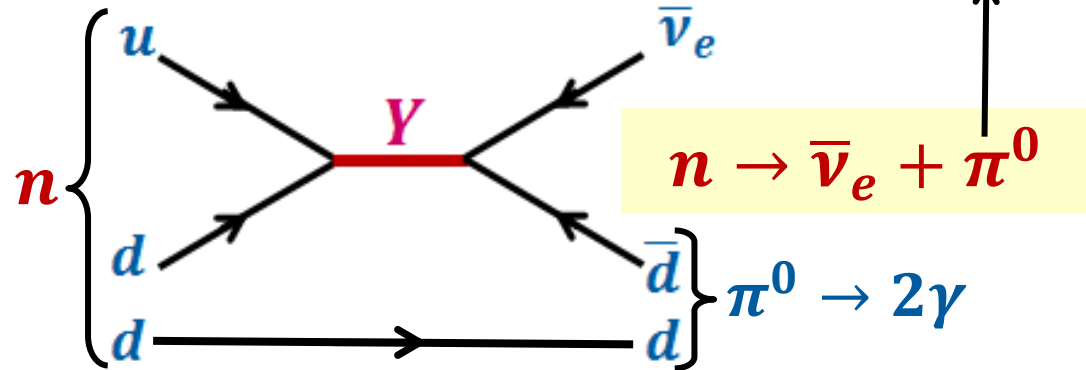
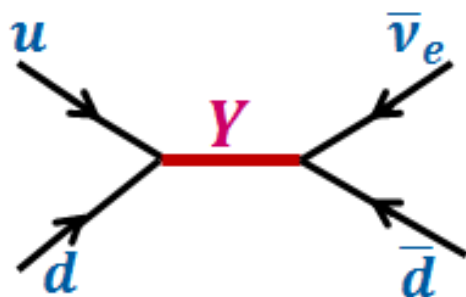
# Распад протона

$X$ - и  $Y$ -бозоны участвуют в процессах, переводящих кварки в лептоны и наоборот, т.е. не сохраняющих ни барионный, ни лептонный заряды, например:

*Это приводит к распаду нуклона:*



т.е.



Анимация на Лекции

*Время жизни  
относительно гипотетического распада протона*



$2\gamma$

$\tau_p$  (теория): от  $10^{31}$  до  $10^{32}$  лет,

что при массе в 1 тонну  
даёт примерно один распад за десятилетие.

Предсказываемый простейшими  
**Теориями Великого Объединения** распад протона  
искался во многих низкофоновых (подземных)  
экспериментах, но так и не был обнаружен.  
Эксперименты проводились под землёй на глубинах  
от **0,5** до **2,3 км** с массами вещества  
от **60** до **22 000 тонн**. Было установлено, что время жизни  
относительно рассматриваемого возможного распада

$\tau_p > 10^{33}$  лет.

Если систему частиц, нагретую до температур выше точки Великого объединения ( $>10^{28} \div 10^{29}$  К), подвергнуть охлаждению, то она, согласно ТВО (Теориям Великого Объединения), испытает по крайней мере два фазовых перехода с понижением степени симметрии:

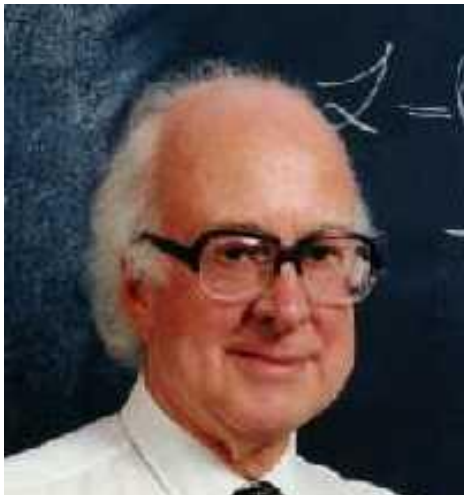
1. При температуре  $\approx 10^{28}$  К (энергии  $\approx 10^{16}$  ГэВ) наступит конец Великого объединения.  $X$ - и  $Y$ -бозоны приобретают массы  $\approx 10^{16}$  ГэВ/ $c^2$ . Остальные частицы остаются безмассовыми.
2. При температуре  $\approx 10^{15}$  К (энергии  $\approx 100$  ГэВ) разрушится электрослабая симметрия и слабое взаимодействие отделится от электромагнитного. В этот момент кварки, лептоны и бозоны  $W^\pm$  и  $Z$  приобретают массы.

Оба фазовых перехода с понижением степени симметрии происходят самопроизвольно (спонтанно) и поэтому носят название

***спонтанного нарушения симметрии.***

Для этого постулируют существование особых полей, квантами которого являются частицы типа **бозонов Хиггса.**

Установлено, что именно механизм Хиггса ответственен за появление масс у фундаментальных частиц. При спонтанном нарушении симметрии симметричные состояния (расположенные выше основного, т.е. при более высоких энергиях, за счёт сверхмалых возмущений переходят в несимметричные устойчивые состояния.

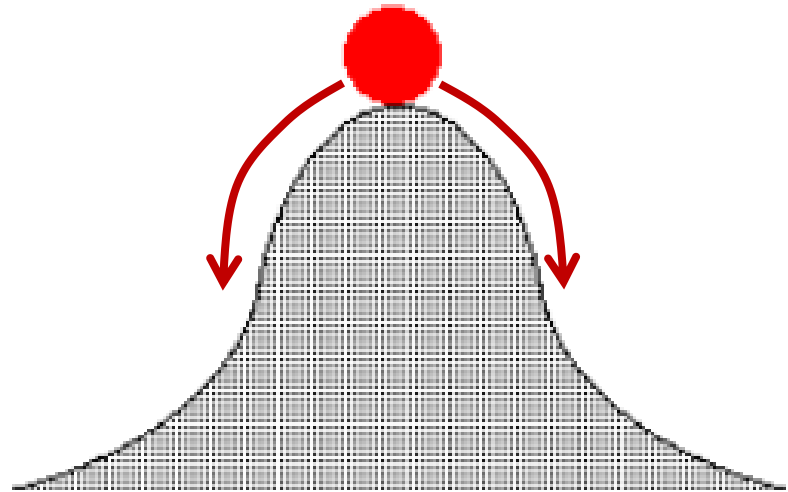
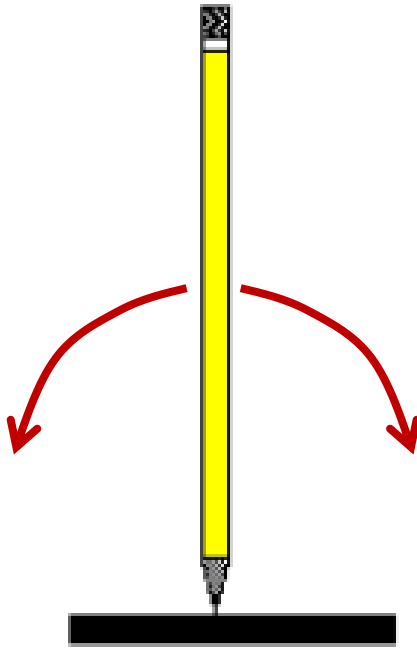


**Peter Higgs**

**Примеры:**

- 1. Спонтанное намагничивание твёрдого тела ниже температуры Кюри – ферромагнетизм.**
- 2. Кристаллизация жидкости ниже критической температуры.**
- 3. Конденсация паров жидкости.**
- 4. Сверхпроводимость.**

# Простейшие примеры спонтанного нарушения симметрии:





# Суперсимметрия

Объединение всех взаимодействий, включая гравитацию, как полагают, происходит при **Планковской энергии**:

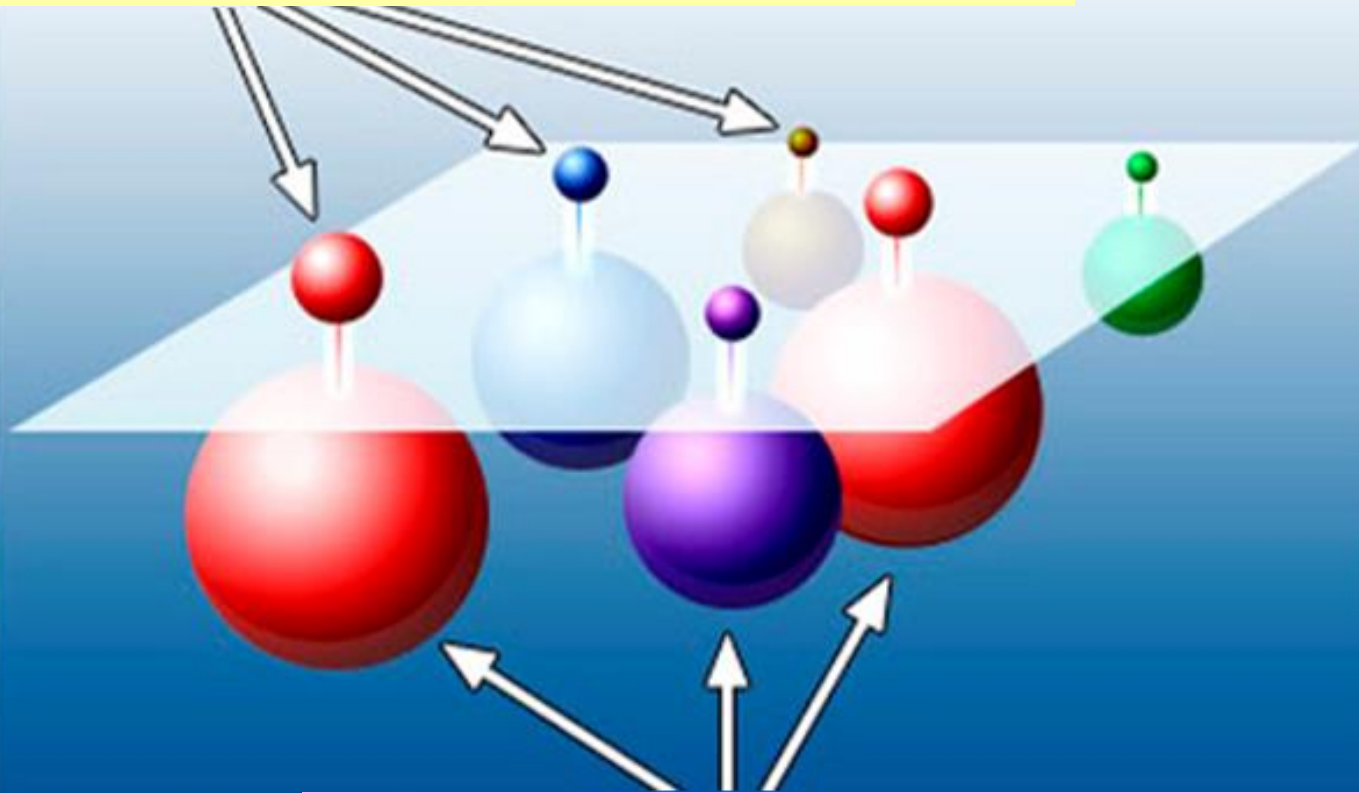
$$E_{Planck} = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 1,2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$$

Теоретические модели, посвящённые такому объединению, имеют дело с **суперсимметрией (SUSY)** – симметрией между фермионами и бозонами (теории Великого объединения рассматривают симметрию между кварками и лептонами). Этой (**SUSY**) более высокой симметрии отвечает инвариантность к преобразованию, меняющему спин частицы. У каждого фермиона появляется партнёр – бозон и наоборот.

# Суперсимметричные частицы

| № | Частица         | Спин | SUSY-партнёр | Спин |
|---|-----------------|------|--------------|------|
| 1 | кварк           | 1/2  | скварк       | 0    |
| 2 | лептон          | 1/2  | слептон      | 0    |
| 3 | нейтрино        | 1/2  | снейтрино    | 0    |
| 4 | фотон           | 1    | фотино       | 1/2  |
| 5 | глюон           | 1    | глюино       | 1/2  |
| 6 | <i>W</i> -бозон | 1    | вино         | 1/2  |
| 7 | <i>Z</i> -бозон | 1    | зино         | 1/2  |
| 8 | хиггс           | 0    | хиггсино     | 1/2  |
| 9 | гравитон        | 2    | гравитино    | 3/2  |

## Частицы стандартной модели



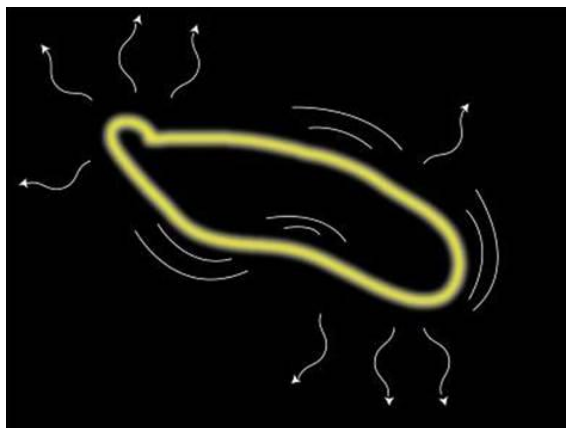
Суперсимметричные частицы

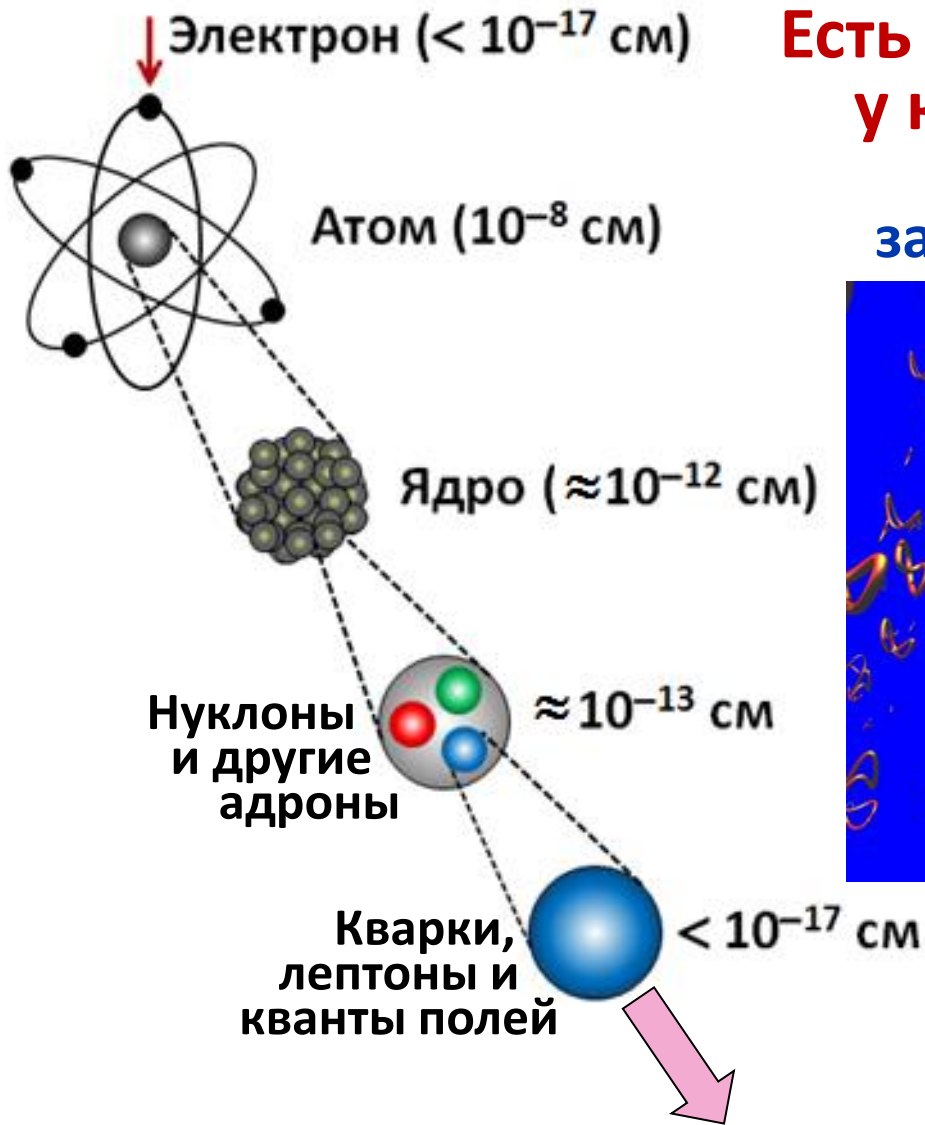
Возможно единой теорией станет  
теория *суперструн*

– одномерных объектов

планковского масштаба ( $10^{-33}$  см).

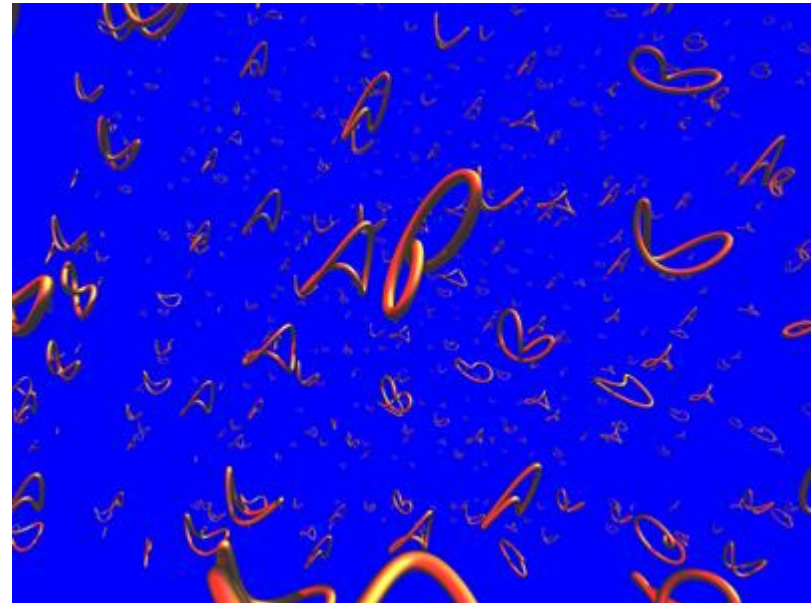
Все известные частицы согласно теории  
суперструн это различные способы  
колебаний элементарной струны.





**Есть ли следующая ступень у квантовой лестницы?**

**Полагают, что есть замкнутые струны – петли**



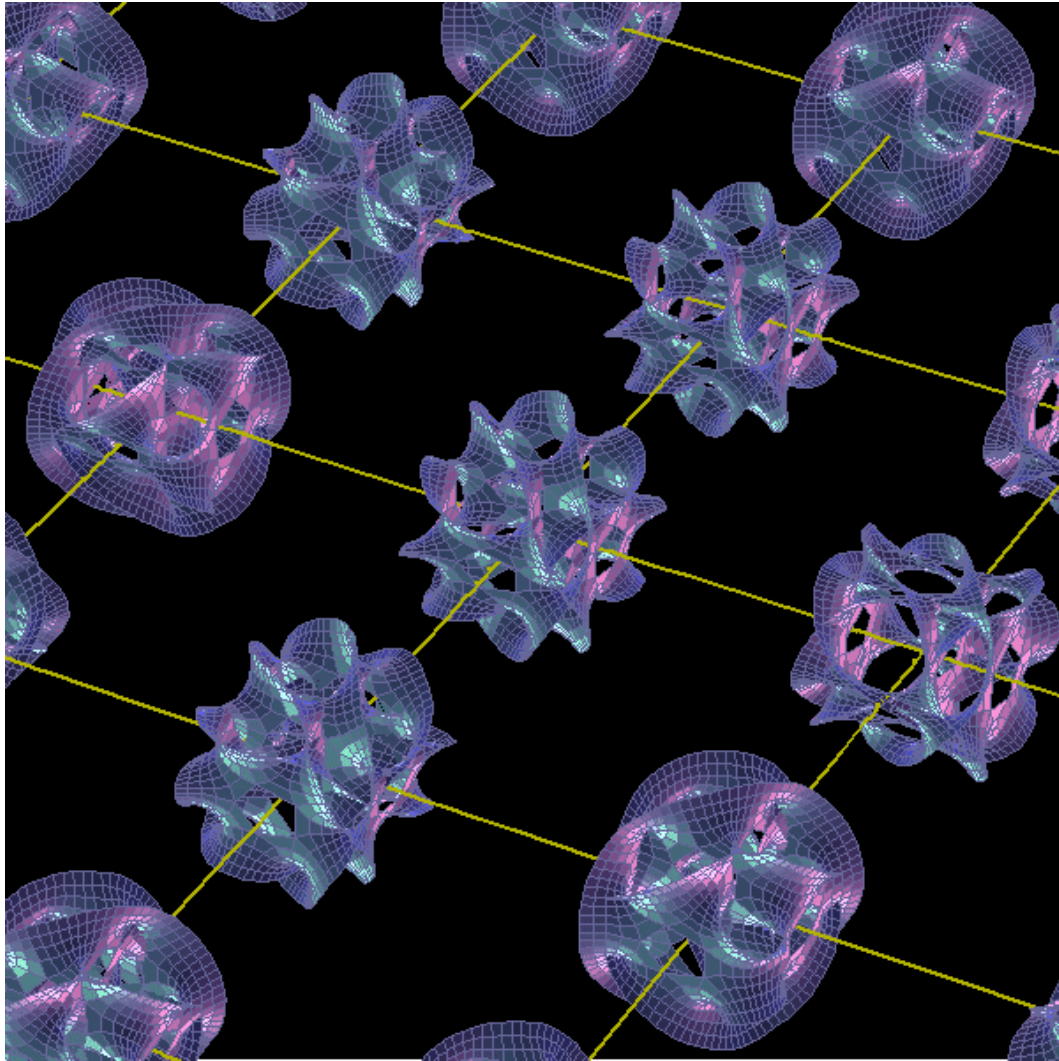
**и струны с открытыми концами**

**Суперструны ( $10^{-33}$  см) ??**

Наряду с одномерными могут быть и многомерные струны (поверхности) – **браны**: **2-браны** (мембраны), **3-браны**, **4-браны** и так далее.

Теория струн также утверждает, что Вселенная имеет гораздо больше измерений, чем доступно нашему глазу, но дополнительные измерения по выражению Брайана Грина *«туго скручены и спрятаны в складчатой структуре космического пространства»*. Теория требует минимум **6** дополнительных пространственных измерений.

# Соединение Вселенной с тремя обычными измерениями, представленными сеткой,



и сильно увеличенные участки пространства с дополнительными измерениями в форме гипотетических мельчайших пространств.

**Видео  
на Лекции**

Теория струн разрабатывается с **1968 г.**

Она сложна, далека от завершения и пока не имеет никаких наблюдательных подтверждений.

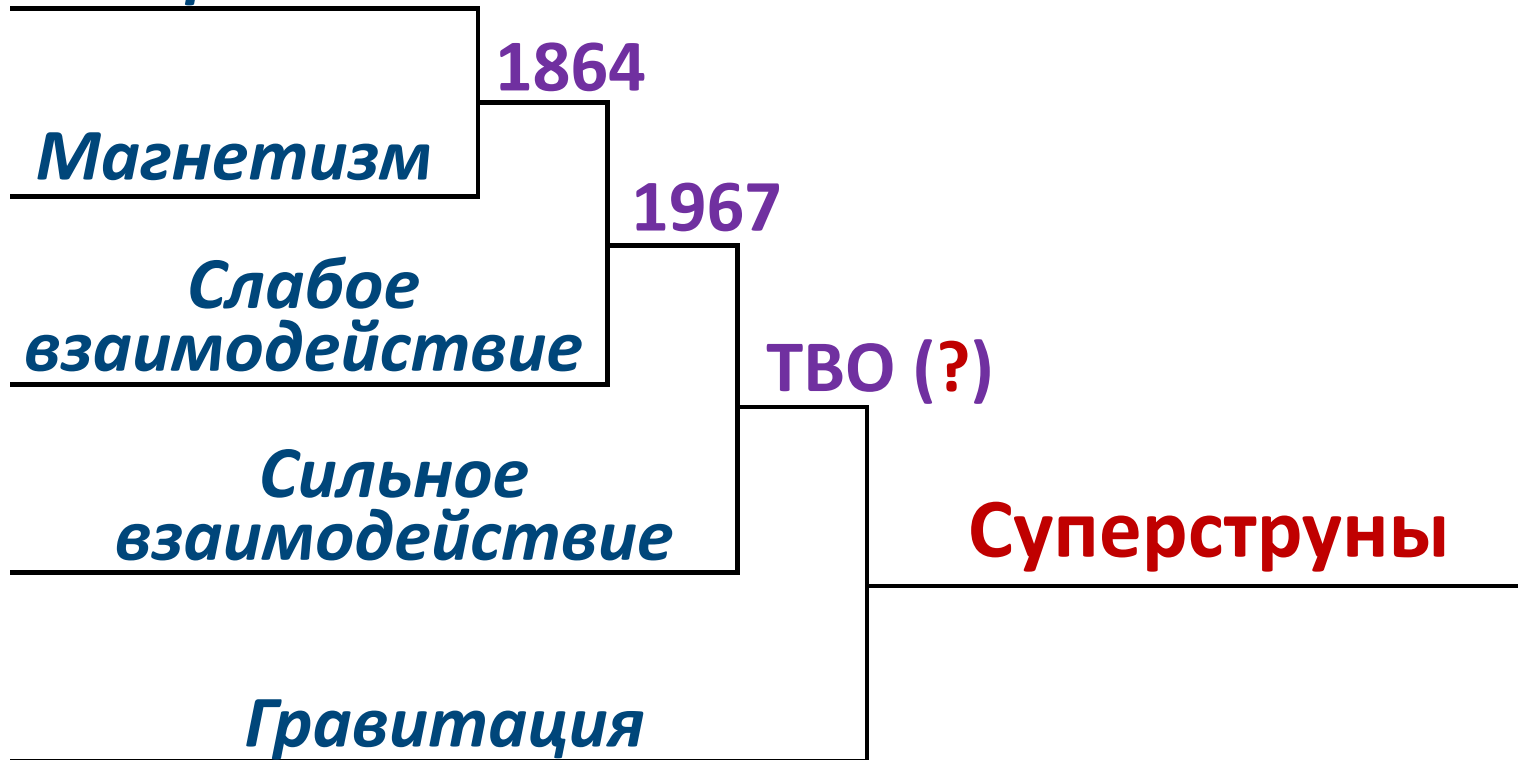
По выражению **Эдварда Виттена**, одного из ведущих специалистов в теории струн,

*«Теория струн – эта часть физики двадцать первого века, случайно попавшая в двадцатый век».*



Если теория струн действительно окажется единой теорией всех сил (взаимодействий), то последовательность исторических этапов объединения взаимодействий будет выглядеть следующим образом:

## Электричество



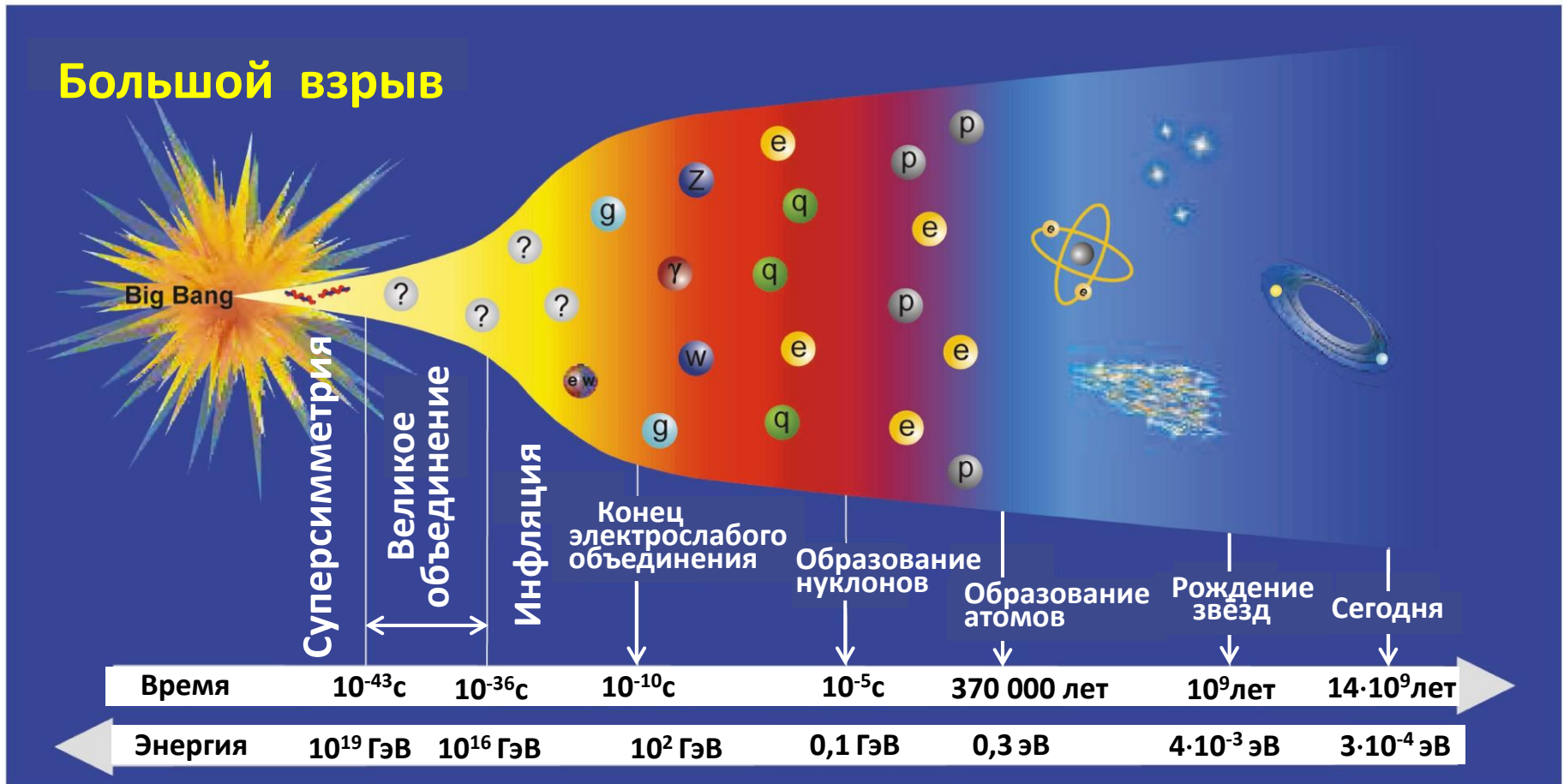
Анимация на Лекции

# Гипотетический распад единого взаимодействия на отдельные составляющие по мере охлаждения физической системы, сопровождаемый снижением степени симметрии:



Анимация на Лекции

**Мы не в состоянии достичь энергий Великого объединения и Суперсимметрии. Однако Вселенная после Большого Взрыва, охлаждаясь, должна была пройти все стадии фазовых переходов с понижением степени симметрии.**



**Анимация на Лекции**