

Сегодня: \*

# Лекция

## Тема: ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### Содержание лекции:

- 1. Краткая классификация и свойства**
- 2. Квантовые поля**
- 3. Слабое взаимодействие**
- 4. Закон сохранения барионов**
- 5. Антивещество**

*продолжение на следующем слайде...*

**6. Сохранение лептонов**

**7. Адроны**

**8. Кварки**

**9. Кварковая модель адронов**

**10. Симметрия античастиц. Несохранение четности**

**11. Нейтринные осцилляции**

**12. Проблемы будущего**

**Основные выводы**

# 1. Краткая классификация и свойства

Одна из главных задач физики описать разнообразие природы единым способом.

В ряду обобщающих теорий – **Стандартная модель** взаимодействия элементарных частиц (**СМ**), включающая в себя минимальную **модель Электрослабого взаимодействия** и **Квантовую хромодинамику (КХД)**.

**СМ** является реальным **итогом многолетней работы сотен тысяч людей**. Эта математическая модель с набором из 20 с небольшим чисел позволяет описать **результаты миллионов проведённых к настоящему времени в физике экспериментов**.

## **2. Квантовые поля**

Стандартная Модель – квантово-полевая теория. Основные объекты такой теории – поля, включая электромагнитное поле. Колебания таких полей переносят энергию и импульс. Эти волны собираются в пакеты, или кванты, которые наблюдаются в лаборатории как элементарные частицы. В частности, квант электромагнитного поля – частица, известная как фотон.

Стандартная Модель включает в себя поля для каждого типа элементарных частиц.

Имеются лептонные поля, кванты которых представляют собой знакомые нам электроны

**Стандартная модель** — теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц.

Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает тёмную материю, тёмную энергию и не включает в себя гравитацию.

Три поколения  
материи (Фермионы)

|            | I                    | II               | III            |                      |
|------------|----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| масса →    | 2.4 МэВ              | 1.27 ГэВ         | 171.2 ГэВ      | 0                    |
| заряд →    | $\frac{2}{3}$        | $\frac{2}{3}$    | $\frac{2}{3}$  | 0                    |
| спин →     | $\frac{1}{2}$        | $\frac{1}{2}$    | $\frac{1}{2}$  | 1                    |
| название → | верхний              | средний          | истинный       | фотон                |
| Кварки     | 4.8 МэВ              | 104 МэВ          | 4.2 ГэВ        | 0                    |
|            | $-\frac{1}{3}$       | $-\frac{1}{3}$   | $-\frac{1}{3}$ | 0                    |
|            | $\frac{1}{2}$        | $\frac{1}{2}$    | $\frac{1}{2}$  | 1                    |
|            | нижний               | странный         | прелестный     | глюон                |
| Лептоны    | <2.2 эВ              | <0.17 МэВ        | <15.5 МэВ      | 91.2 ГэВ             |
|            | 0                    | 0                | 0              | 0                    |
|            | $\frac{1}{2}$        | $\frac{1}{2}$    | $\frac{1}{2}$  | 1                    |
|            | электронное нейтрино | мюонное нейтрино | тау нейтрино   | Z бозон              |
|            | 0.511 МэВ            | 105.7 МэВ        | 1.777 ГэВ      | 80.4 ГэВ             |
|            | -1                   | -1               | -1             | $\pm 1$              |
|            | $\frac{1}{2}$        | $\frac{1}{2}$    | $\frac{1}{2}$  | 1                    |
|            | электрон             | мюон             | тау            | $W^{\pm}$<br>W бозон |

Калибровочные Бозоны  
(переносчики взаимодействия)

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ физики элементарных частиц описывает каждую частицу материи и каждую силу как квантовые поля. Элементарные частицы материи – три поколения фермионов (a). Каждое поколение этих частиц имеет сходную структуру свойств. Фундаментальные взаимодействия переносятся бозонами (b), которые организованы согласно трем близко родственным симметриям. Кроме того, одна или большее количество частиц или полей Хиггса (c) порождают массы других полей.

Всё вещество состоит из 12 фундаментальных квантовых полей спина  $\frac{1}{2}$ , квантами которых являются фундаментальные частицы-фермионы, которые можно объединить в *три поколения фермионов*: 6 лептонов (электрон, мюон, таулептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау - нейтрино ), 6 кварков (u, d, s, c, b, t) и 12 соответствующих им античастиц.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряжённые лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях.

Фермионы подчиняются статистике Ферми — Дирака: в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частицы (принцип Паули). Принцип запрета Паули ответственен за устойчивость электронных оболочек атомов, делая возможным существование сложных химических элементов. Он также позволяет существовать вырожденной материи под действием высоких давлений (нейтронные звёзды). Квантовая система, состоящая из нечётного числа фермионов, сама является фермионом (например, ядро с нечётным массовым числом  $A$ ; атом или ион с нечётной суммой  $A$  и числа электронов).



Три типа взаимодействий возникают как следствие постулата, что наш мир симметричен относительно трёх типов калибровочных преобразований.

Частицами-переносчиками взаимодействий являются бозоны:

8 Глюонов для сильного взаимодействия (группа симметрии  $SU(3)$ );

3 тяжёлых калибровочных бозона ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z_0$ ) для слабого взаимодействия (группа симметрии  $SU(2)$ );

один фотон для электромагнитного взаимодействия (группа симметрии  $U(1)$ ).

Слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших, и к таким эффектам, как нарушение CP-инвариантности и нейтринные осцилляции.

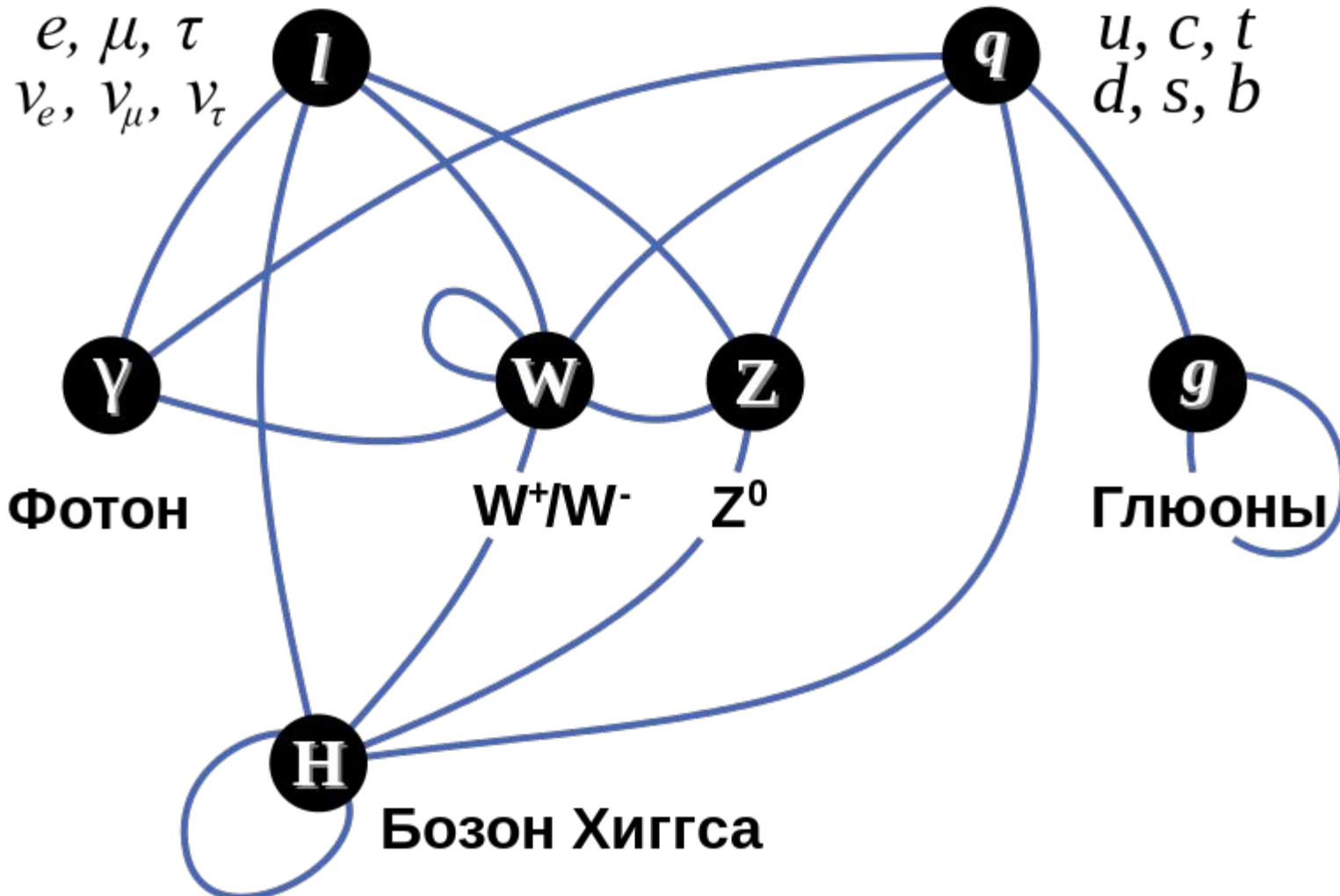
Слабые взаимодействия отдельно описать как калибровочные не получается, однако существует неожиданно изящный метод описания электромагнитного и слабого взаимодействий одновременно как двух разных проявлений некоторого калибровочного электрослабого поля.

# Лептоны

# Кварки

$e, \mu, \tau$   
 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

$u, c, t$   
 $d, s, b$



Взаимодействие между различными частицами в Стандартной модели

Таким образом, получается, что все фундаментальные взаимодействия выводятся на основании калибровочной инвариантности. С точки зрения построения физической теории, это крайне экономная и удачная схема.

Особняком стоит гравитационное взаимодействие. Оно также оказывается калибровочным полем, причём общая теория относительности как раз и является калибровочной теорией гравитационного взаимодействия.

Однако она формулируется, **не на квантовом уровне**, и до сих пор непонятно, как именно проквантовать её, а кроме того, пространством, в котором мы производим вращения, является наше привычное четырёхмерное пространство-время, **а не внутреннее пространство симметрии взаимодействия.**

**Внешними параметрами** стандартной модели являются:

**массы лептонов** (3 параметра, нейтрино принимаются безмассовыми) и **кварков** (6 параметров), **интерпретируемые как константы взаимодействия их полей с полем бозона Хиггса,**

**параметры СКМ-матрицы смешивания кварков** — три угла смешивания и одна комплексная фаза, нарушающая *CP-симметрию* — **константы взаимодействия кварков с электрослабым полем,**

два параметра поля Хиггса, которые связаны однозначно с его вакуумным средним и массой бозона Хиггса,

три константы взаимодействия, связанные соответственно с калибровочными группами  $U(1)$ ,  $SU(2)$  и  $SU(3)$ , и характеризующие относительные интенсивности электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий.

Стандартная модель – теория, обобщающая современные представления об элементарном устройстве материи и взаимодействиях между частицами

## Фермионы – мельчайшие «кирпичики» материи

Большая часть фермионов не присутствует в обычной материи и рождается лишь в условиях очень высоких энергий (на ускорителях)

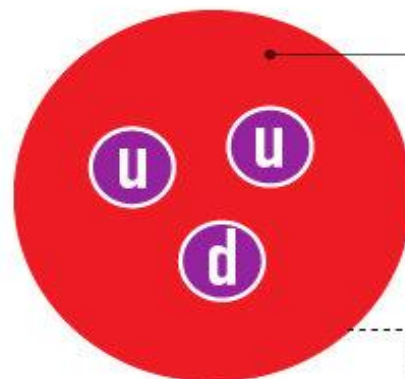
Окружающий нас мир практически полностью построен из трёх фермионов

### Кварки

| Кварк       | Заряд | Кварк      | Заряд | Кварк    | Заряд |
|-------------|-------|------------|-------|----------|-------|
| <b>c</b>    | +2/3  | <b>t</b>   | +2/3  | <b>u</b> | +2/3  |
| ОЧАРОВАННЫЙ |       | ИСТИННЫЙ   |       | ВЕРХНИЙ  |       |
| <b>s</b>    | -1/3  | <b>b</b>   | -1/3  | <b>d</b> | -1/3  |
| СТРАННЫЙ    |       | ПРЕЛЕСТНЫЙ |       | НИЖНИЙ   |       |

### Лептоны

| Лептон               | Заряд | Лептон               | Заряд | Лептон               | Заряд |
|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| <b>μ</b>             | -1    | <b>τ</b>             | -1    | <b>e</b>             | -1    |
| МЮОН                 |       | ТАУ                  |       | ЭЛЕКТРОН             |       |
| <b>ν<sub>μ</sub></b> | 0     | <b>ν<sub>τ</sub></b> | 0     | <b>ν<sub>e</sub></b> | 0     |
| МЮОННОЕ НЕЙТРИНО     |       | ТАУ-НЕЙТРИНО         |       | ЭЛЕКТРОННОЕ НЕЙТРИНО |       |



Протон

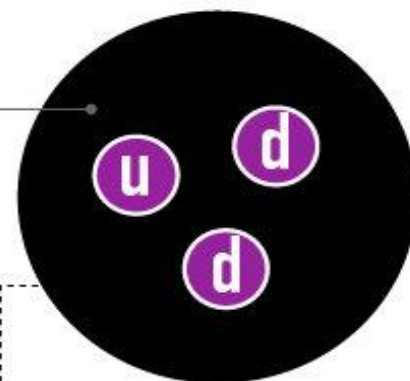
Состоит из двух u-кварков и одного d-кварка. Таким образом, заряд протона равен:

$$1 = 2/3 + 2/3 - 1/3$$

Нейтрон

Состоит из одного u-кварка и двух d-кварков. Таким образом, заряд нейтрона равен:

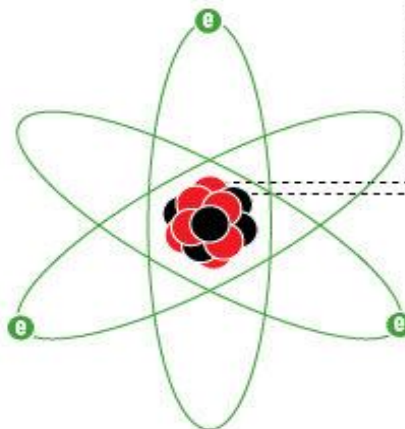
$$0 = 2/3 - 1/3 - 1/3$$



АТОМ

Состоит из атомного ядра, образованного протонами и нейтронами, и электронов.

Атом является наименьшей химически неделимой частью, входящей в состав как простых, так и сложных веществ





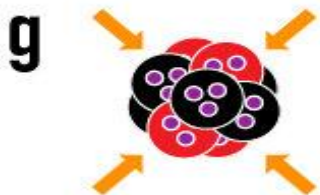
## Бозоны – переносчики взаимодействия между фермионами

Все взаимодействия между фермионами происходят путём обмена бозонами.

Всего существует четыре фундаментальных взаимодействия, объясняющие все физические явления на микро- или макроуровне.

### Глюоны

ОБЕСПЕЧИВАЮТ СИЛЬНОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



Радиус  
воздействия

$10^{-15}$  м

Сильное взаимодействие отвечает за связь между кварками в адронах и за притяжение между протонами и нейтронами в атомном ядре

### Фотон

ОБЕСПЕЧИВАЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



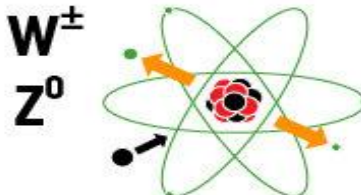
Радиус  
воздействия

БЕСКОНЕЧНОСТЬ

Электромагнитное взаимодействие существует между частицами, обладающими электрическим зарядом. Отвечает за связь электронов и ядер в атомах и атомов в молекулах, а также за электромагнитное излучение

### Тяжёлые бозоны

ОБЕСПЕЧИВАЮТ СЛАБОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



Радиус  
воздействия

$10^{-18}$  м

Слабое взаимодействие проявляется на расстояниях значительно меньше размера атомного ядра. Отвечает за распадные процессы, например, бета-распад некоторых элементарных частиц и ядер

### Гравитон\*

ОБЕСПЕЧИВАЕТ ГРАВИТАЦИОННОЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ\*\*

Гравитационное взаимодействие обуславливает притяжение, зависящее от массы частиц и расстояния между ними. На микроуровне практически не проявляется, но становится преобладающим на макроуровне – в космических масштабах

Радиус  
воздействия

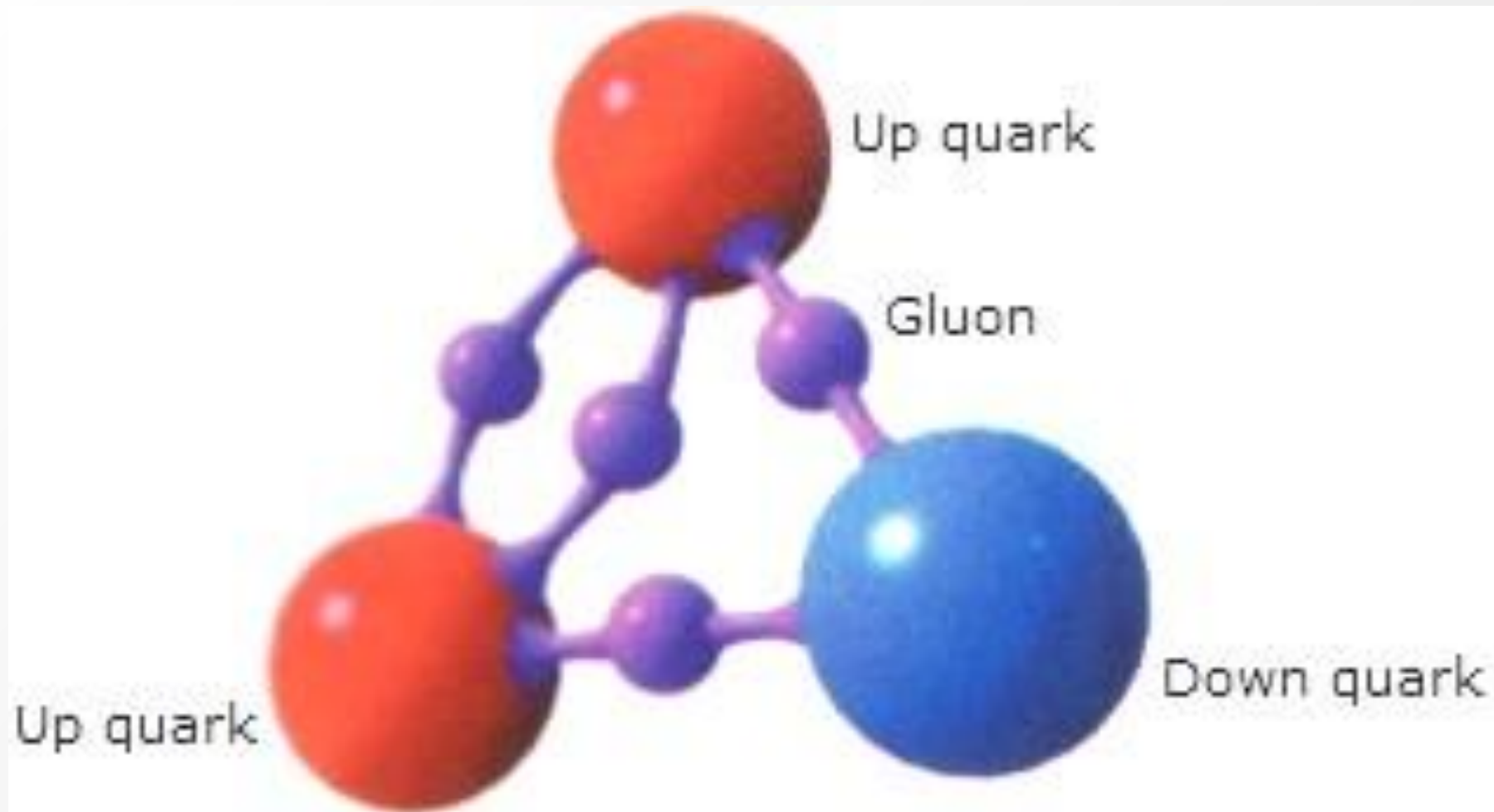
БЕСКОНЕЧНОСТЬ

### Бозон Хиггса\*

ОТВЕЧАЕТ ЗА МАССУ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ  
ЧАСТИЦ

\* Неоткрытые, гипотетические бозоны

\*\* Не имеет в стандартной модели



Gluons holding quarks together to form a proton  
(diagram from *Scientific American*)

Согласно Стандартной модели, существует 12 ароматов элементарных фермионов: **шесть кварков и шесть лептонов.**

**Аромат** — общее название для ряда квантовых чисел, характеризующих тип кварка или лептона.

Существует шесть кварковых ароматов, по числу типов кварков: *u, d, s, c, b, t*. Аромат кварков сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняется в слабых взаимодействиях.

Для всех именованных ароматов кварков (странность, очарование, прелесть и истинность) правило следующее: значение аромата и электрический заряд кварка имеют одинаковый знак. По этому правилу любой аромат, переносимый заряженным мезоном, имеет тот же знак, что и его заряд.

Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях.

Экспериментальное подтверждение существования промежуточных векторных бозонов в середине 80-ых годов завершило построение Стандартной модели и её принятие как основной. Необходимость расширения модели возникла в 2002 году после обнаружения нейтринных осцилляций, а подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году завершило экспериментальное обнаружение предсказываемых Стандартной моделью элементарных частиц.

Есть идеи относительно того, как теория сильных взаимодействий может быть объединена с теорией слабых и электромагнитных взаимодействий – такое объединение часто называется Великим Объединением, но они могут сработать, только если подключить гравитацию. Это само по себе является тяжелой задачей.

В теории ненарушенной калибровочной симметрии, которая лежит в основе Стандартной модели сильного и электрослабого взаимодействий, массы всех фундаментальных частиц равны нулю.

Ненулевыми они становятся в результате спонтанного нарушения симметрии в процессе взаимодействия с хиггсовым полем, квантами которого являются бозоны Хиггса с нулевым спином и массой около 125 ГэВ. Существование бозонов Хиггса предсказано в теории электрослабого взаимодействия, а их поиск являлся одной из важнейших задач физики элементарных частиц.

# Элементарные частицы

Материя — Бозон Хиггса — Переносчики взаимодействий

Кварки — Лептоны  
— Электроны

Фотоны —  $W_{\pm}$ - и  $Z_0$ -бозоны — Глюоны — Гравитоны (?)

Адроны  
— Мезоны — Барионы  
— Нуклоны  
— Атомы  
— Молекулы

Электромагнетизм — Слабое — Сильное — Гравитация  
— Квантовая электродинамика — Квантовая хромодинамика — Квантовая гравитация (?)  
— Электрослабая теория  
— Теория Великого объединения (?)  
— Теория всего (?)

*Составные частицы*

*Взаимодействия и теории*



## Классификация барионов.

Наиболее стабильными барионами являются протон (самый лёгкий из барионов) и нейтрон (вместе они составляют группу нуклонов). Первый из них, насколько это сегодня известно, стабилен, второй испытывает бета-распад с временем жизни, близким к 1000 с. Более тяжёлые барионы распадаются за время от  $10^{-23}$  до  $10^{-10}$  с.

Нуклоны имеют кварковый состав  $uud$  (протон) и  $udd$  (нейтрон). Их спин равен  $1/2$ , странность нулевая. Масса близка к 940 МэВ. Вместе со своими короткоживущими возбуждёнными состояниями нуклоны относятся к группе *N-барионов*.

Барионы, содержащие как минимум один странный кварк (но не содержащие более тяжёлых кварков), называются гиперонами.

В семействе барионов, кроме нуклонов, выделяют группы  $\Delta$ -,  $\Lambda$ -,  $\Sigma$ -,  $\Xi$ - и  $\Omega$ -барионов.

*$\Delta$ -барионы* ( $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{+}$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^{-}$ ), как и нуклоны, состоят из  $u$ - и  $d$ -кварков, но, в отличие от нуклонов, их спин равен  $3/2$ . Распадаются они главным образом на нуклон и пион. Время жизни  $\Delta$ -барионов близко к  $10^{-23}$  с.

*$\Lambda$ -барионы* ( $\Lambda^0$ ) — нейтральные (но не истинно нейтральные) частицы со спином  $1/2$  и странностью  $-1$  (то есть их можно называть  $\Lambda$ -гиперонами), состоящие из  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварка. В них  $u$ - и  $d$ -кварки находятся в *синглетном* по изоспину состоянии ( $I=0$ ). Масса 1117 МэВ. Распадаются преимущественно на протон и отрицательный пион или на нейтрон и нейтральный пион с временем жизни  $2,6 \cdot 10^{-10}$  с. Открыты также тяжёлые  $\Lambda$ -барионы ( $\Lambda^+c$  и  $\Lambda^0b$ ), в которых странный кварк заменён очарованным ( $c$ -кварком) или красивым ( $b$ -кварком).

*$\Sigma$ -барионы* ( $\Sigma^{+}$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^{-}$ ) имеют спин  $1/2$ , странность  $-1$ . Как и  $\Lambda$ -барион, состоят из  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварка, но триплетны по изоспину ( $I=1$ ). Нейтральный  $\Sigma^0$ -барион имеет тот же кварковый состав, что и  $\Lambda^0$ -барион ( $uds$ ), но тяжелее, в связи с этим он очень быстро распадается в  $\Lambda^0$  с вылетом фотона (время жизни составляет лишь  $6 \cdot 10^{-20}$  с, поскольку распад происходит за счёт электромагнитного взаимодействия).  $\Sigma^{+}$  ( $uus$ ) и  $\Sigma^{-}$  ( $dds$ ) распадаются за примерно  $10^{-10}$  с на пион и нуклон. Следует отметить, что  $\Sigma^{+}$  и  $\Sigma^{-}$  *не являются* частицей и античастицей — это самостоятельные частицы, каждая из них (как, кстати, и  $\Sigma^0$ ) имеет свою античастицу. Массы  $\Sigma$ -гиперонов составляют около 1200 МэВ. Обнаружены также тяжёлые  $\Sigma$ -барионы, не являющиеся гиперонами (то есть содержащие вместо  $s$ -кварка более тяжёлый кварк).

## Классификация барионов.

*Ξ-барионы* ( $\Xi^0$  и  $\Xi^-$ ) имеют спин  $1/2$ , странность  $-2$ . Они содержат по два странных кварка; кварковый состав  $uss$  ( $\Xi^0$ ) и  $dss$  ( $\Xi^-$ ). Их масса близка к  $1,3$  ГэВ. Распадаются (с временем жизни около  $10^{-10}$  с) на пион и  $\Lambda^0$ -гиперон. Существуют тяжёлые  $\Xi$ -барионы, не являющиеся гиперонами (один из странных кварков заменен  $c$ - или  $b$ -кварком).

*Ω-барионы* (существует лишь один тип этих частиц,  $\Omega^-$ -гиперон) имеют спин  $3/2$  и странность  $-3$ , состоят из 3 странных кварков ( $sss$ ). Масса частицы  $1,672$  ГэВ. Преимущественные моды распада — на  $\Lambda^0$ -гиперон и отрицательный каон или на  $\Xi^0$  и отрицательный пион (время жизни около  $10^{-10}$  с). Открыты некоторые тяжёлые  $\Omega$ -барионы, отличающиеся заменой одного из  $s$ -кварков на тяжёлый кварк.

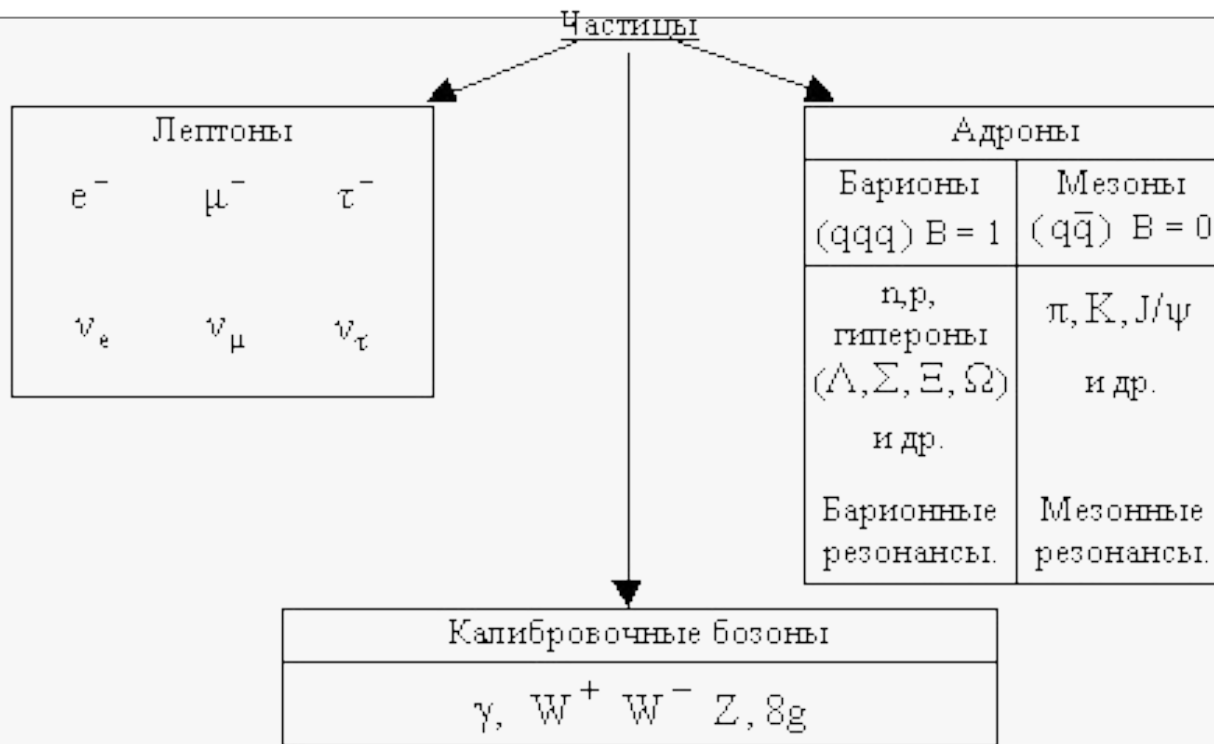
Существует также широкий спектр короткоживущих возбуждённых состояний этих барионов.

Большинство лёгких барионов в основном состоянии распадаются за счёт слабого взаимодействия, поэтому их время жизни относительно велико (исключение составляет, как было отмечено выше,  $\Sigma^0$ -гиперон).

Лёгкие барионы (гипероны,  $\Delta$ -барионы и нуклоны) в зависимости от спина входят в состав одного из двух *мультиплетов*: декуплета со спином  $3/2$  ( $\Delta$ -барионы,  $\Omega$ -гипероны и возбуждённые состояния  $\Sigma$ - и  $\Xi$ -гиперонов) и октета со спином  $1/2$  (нуклоны,  $\Sigma$ -,  $\Lambda$ - и  $\Xi$ -гипероны).

**Барионная материя** — материя, состоящая из барионов (нейтронов, протонов) и электронов. То есть, привычная форма материи, вещество.

Существует также *барионная антиматерия*, или **антивещество**. **Барионное число**. Барионы подчиняются эмпирически установленному закону сохранения барионного числа: в замкнутой системе величина, равная разности количества барионов и количества антибарионов, сохраняется. Эта величина называется барионным числом. Причины сохранения барионного числа пока неизвестны (во всяком случае, с ним не связано какое-либо *калибровочное поле*, как с электрическим зарядом), однако во многих вариантах современных (пока не подтверждённых) теорий, расширяющих Стандартную Модель, этот закон может нарушаться. Если барионное число не сохраняется, то протон (самый лёгкий из барионов) может распадаться; однако пока распад протона не обнаружен — установлено только нижнее ограничение на время жизни протона (от  $10^{29}$  до  $10^{33}$  лет, в зависимости от канала распада). Предсказываются и другие процессы, не сохраняющие барионное число, например, *нейтрон-антинейтронные осцилляции*.



Все частицы, наблюдаемые в настоящее время можно разбить на три большие группы:

1. **Лептоны** – частицы участвующие в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях.
2. **Адроны** – частицы участвующие в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях. Сегодня известно свыше сотни адронов.

**Барионы** – адроны, состоящие из трёх кварков ( $qqq$ ) и имеющие барионное число  $B = 1$ .

**Мезоны** – адроны, состоящие из кварка антикварка ( $q$ ) и имеющие барионное число  $B = 0$ .

3. **Калибровочные бозоны** – частицы переносящие взаимодействие между фундаментальными фермионами (кварками и лептонами).

**Каждая частица описывается набором физических величин - квантовых чисел – определяющих её свойства.** Наиболее часто употребляемые характеристики частиц:

**Масса частицы,  $m$ .** Массы частиц меняются в широких пределах от 0 (фотон) до 90 ГэВ (Z-бозон). Z-бозон – наиболее тяжелая из известных частиц. Однако могут существовать и более тяжелые частицы. Массы адронов зависят от типов входящих в их состав кварков, а также от их спиновых состояний.

**Время жизни,  $\tau$ .** В зависимости от времени жизни частицы делятся на стабильные частицы, имеющие относительно большое время жизни, и нестабильные.

**К стабильным частицам принадлежат такие частицы как электрон, протон, для которых в настоящее время распады не обнаружены, так и  $\pi^0$ -мезон, имеющий время жизни  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-16}$  с.**

**К нестабильным частицам относят частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют резонансами. Характерное время жизни резонансов –  $10^{-23}$ – $10^{-24}$  с.**

**Спин  $J$ .** Величина спина измеряется в единицах  $\hbar$  и может принимать 0, полуцелые и целые значения. Например, спин  $\pi$ , K-мезонов равен 0. Спин электрона, мюона равен 1/2. Спин фотона равен 1. Существуют частицы и с большим значением спина. **Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми–Дирака, с целым спином – Бозе–Эйнштейна.**

**Электрический заряд  $Q$ .** Электрический заряд является целой кратной величиной от  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кулон (или  $48 \cdot 10^{-10}$  ед. СГСЕ), называемой элементарным электрическим зарядом. Частицы могут иметь заряды  $0, \pm 1, \pm 2$ .

**Внутренняя четность  $P$ .** Квантовое число  $P$  характеризует **свойство симметрии волновой функции относительно пространственных отражений**. Квантовое число  $P$  имеет значение  $+1, -1$ .



Наряду с общими для всех частиц характеристиками, используют также квантовые числа, которые приписывают только отдельным группам частиц.

**Квантовые числа:** барионное число  $B$ , странность  $s$ , очарование (*charm*)  $c$ , красота (*bottomness* или *beauty*)  $b$ , верхний (*topness*)  $t$ , изотопический спин  $I$  приписывают только сильно взаимодействующим частицам – адронам.

Лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов. Лептоны  $e, \mu$  и  $\tau$  участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны  $\nu_e, \nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  участвуют только в слабых взаимодействиях. Лептонные числа имеют значения  $L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1$ . Например,  $e^-, \nu_e$  имеют  $L_e = +1$ ;  $e^+, \bar{\nu}_e$  имеют  $L_e = -1$ . Все адроны имеют  $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$ .

Барионное число  $B$ . Барионное число имеет значение  $B = 0, +1, -1$ . Барионы, например,  $p, n, \Lambda, \Sigma$ , нуклонные резонансы имеют барионное число  $B = +1$ . Мезоны, мезонные резонансы —  $B = 0$ , антибарионы  $B = -1$ .

**Странность  $s$ .** Квантовое число  $s$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$  и определяется кварковым составом адронов. Например, гипероны  $\Lambda, \Sigma$  имеют  $s = -1$ ;  $K^+, K^-$ -мезоны имеют  $s = +1$ .

**Charm  $c$ .** Квантовое число  $c$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $c = 0, +1$  и  $-1$ . Например, барион  $\Lambda^+ c$  имеет  $c = +1$ .

**Bottomness  $b$ .** Квантовое число  $b$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $b = 0, +1, -1$ . Например,  $B^+$ -мезон имеет  $b = +1$ .

**Topness  $t$ .** Квантовое число  $t$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружено всего одно состояние с  $t = +1$ .

**Изоспин  $I$ .** Сильно взаимодействующие частицы можно разбить на группы частиц, обладающих схожими свойствами (одинаковое значение спина, чётности, барионного числа, странности и др. квантовых чисел, сохраняющихся в сильных взаимодействиях) – изотопические мультиплеты. Величина изоспина  $I$  определяет число частиц, входящих в один изотопический мультиплет.  $p$  и  $n$  составляют изотопический дуплет  $I = 1/2$ ;  $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$  входят в состав изотопического триплета  $I = 1$ ,  $\Lambda$  – изотопический синглет  $I = 0$ , число частиц, входящих в один изотопический мультиплет,  $2I + 1$ .

**$G$  – четность** – это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения  $C$  и изменения знака третьей компоненты  $I_z$  изоспина.  $G$  – четность сохраняется только в сильных взаимодействиях



# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

**matter constituents**  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

| Leptons spin = 1/2           |                         |                 | Quarks spin = 1/2 |                                 |                 |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Flavor                       | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Electric charge | Flavor            | Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup> | Electric charge |
| $\nu_e$ electron neutrino    | $<1 \times 10^{-8}$     | 0               | <b>u</b> up       | 0.003                           | 2/3             |
| <b>e</b> electron            | 0.000511                | -1              | <b>d</b> down     | 0.006                           | -1/3            |
| $\nu_\mu$ muon neutrino      | $<0.0002$               | 0               | <b>c</b> charm    | 1.3                             | 2/3             |
| <b><math>\mu</math></b> muon | 0.106                   | -1              | <b>s</b> strange  | 0.1                             | -1/3            |
| $\nu_\tau$ tau neutrino      | $<0.02$                 | 0               | <b>t</b> top      | 175                             | 2/3             |
| <b><math>\tau</math></b> tau | 1.7771                  | -1              | <b>b</b> bottom   | 4.3                             | -1/3            |

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$  GeV s =  $1.05 \times 10^{-34}$  J s.

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ), where 1 GeV =  $10^9$  eV =  $1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c<sup>2</sup> =  $1.67 \times 10^{-27}$  kg.

## BOSONS

**force carriers**  
spin = 0, 1, 2, ...

| Unified Electroweak spin = 1 |                         |                 | Strong (color) spin = 1 |                         |                 |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Name                         | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Electric charge | Name                    | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Electric charge |
| $\gamma$ photon              | 0                       | 0               | <b>g</b> gluon          | 0                       | 0               |
| <b>W<sup>-</sup></b>         | 80.4                    | -1              |                         |                         |                 |
| <b>W<sup>+</sup></b>         | 80.4                    | +1              |                         |                         |                 |
| <b>Z<sup>0</sup></b>         | 91.187                  | 0               |                         |                         |                 |

### Color Charge

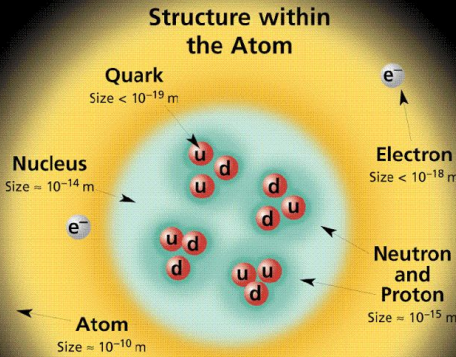
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

### Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ .

### Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

| Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$                |             |                         |                 |                         |      |
|--|-------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|------|
| Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons. |             |                         |                 |                         |      |
| Symbol   | Name        | Quark content           | Electric charge | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Spin |
| <b>p</b>   | proton      | <b>uud</b>              | 1               | 0.938                   | 1/2  |
| $\bar{p}$  | anti-proton | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1              | 0.938                   | 1/2  |
| <b>n</b>   | neutron     | <b>udd</b>              | 0               | 0.940                   | 1/2  |
| $\Lambda$  | lambda      | <b>uds</b>              | 0               | 1.116                   | 1/2  |
| $\Omega^-$   | omega       | <b>sss</b>              | -1              | 1.672                   | 3/2  |

| Property  | Interaction                                  | Gravitational   | Electromagnetic                                  |                      | Strong                                |                                      |
|---|--|---|--|----------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
|   |  |   | Weak   | (Electroweak)        | Fundamental                           | Residual                             |
| <b>Acts on:</b>   |  | Mass - Energy   | Flavor   | Electric Charge      | Color Charge                          | See Residual Strong Interaction Note |
| <b>Particles experiencing:</b>                              |  | All   | Quarks, Leptons                                  | Electrically charged | Quarks, Gluons                        | Hadrons                              |
| <b>Particles mediating:</b>                                 |  | Graviton (not yet observed)                                 | <b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b> | $\gamma$             | Gluons                                | Mesons                               |
| <b>Strength relative to electromag for two u quarks at:</b> | 10 <sup>-18</sup> m<br>3x10 <sup>-17</sup> m | 10 <sup>-41</sup><br>10 <sup>-41</sup><br>10 <sup>-36</sup> | 0.8<br>10 <sup>-4</sup><br>10 <sup>-7</sup>      | 1<br>1<br>1          | 25<br>60<br>Not applicable to hadrons | Not applicable to quarks<br>20       |

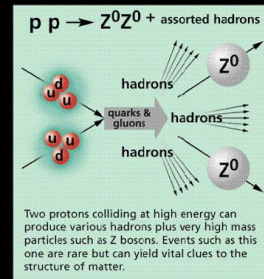
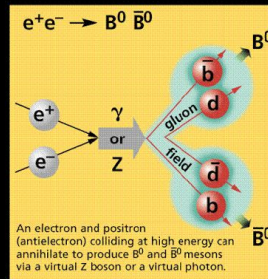
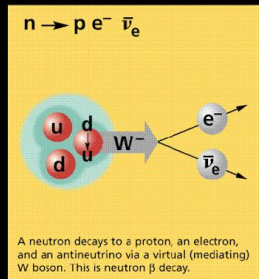
| Mesons $q\bar{q}$  |        |                              |                 |                         |      |
|--|--------|------------------------------|-----------------|-------------------------|------|
| Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons. |        |                              |                 |                         |      |
| Symbol   | Name   | Quark content                | Electric charge | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Spin |
| $\pi^+$  | pion   | <b>u<math>\bar{d}</math></b> | +1              | 0.140                   | 0    |
| $K^-$  | kaon   | <b>s<math>\bar{u}</math></b> | -1              | 0.494                   | 0    |
| $\rho^+$   | rho    | <b>u<math>\bar{d}</math></b> | +1              | 0.770                   | 1    |
| $B^0$  | B-zero | <b>d<math>\bar{b}</math></b> | 0               | 5.279                   | 0    |
| $\eta_c$   | eta-c  | <b>c<math>\bar{c}</math></b> | 0               | 2.980                   | 0    |

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



### The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particles and Fields  
**BURLE** INDUSTRIES, INC.

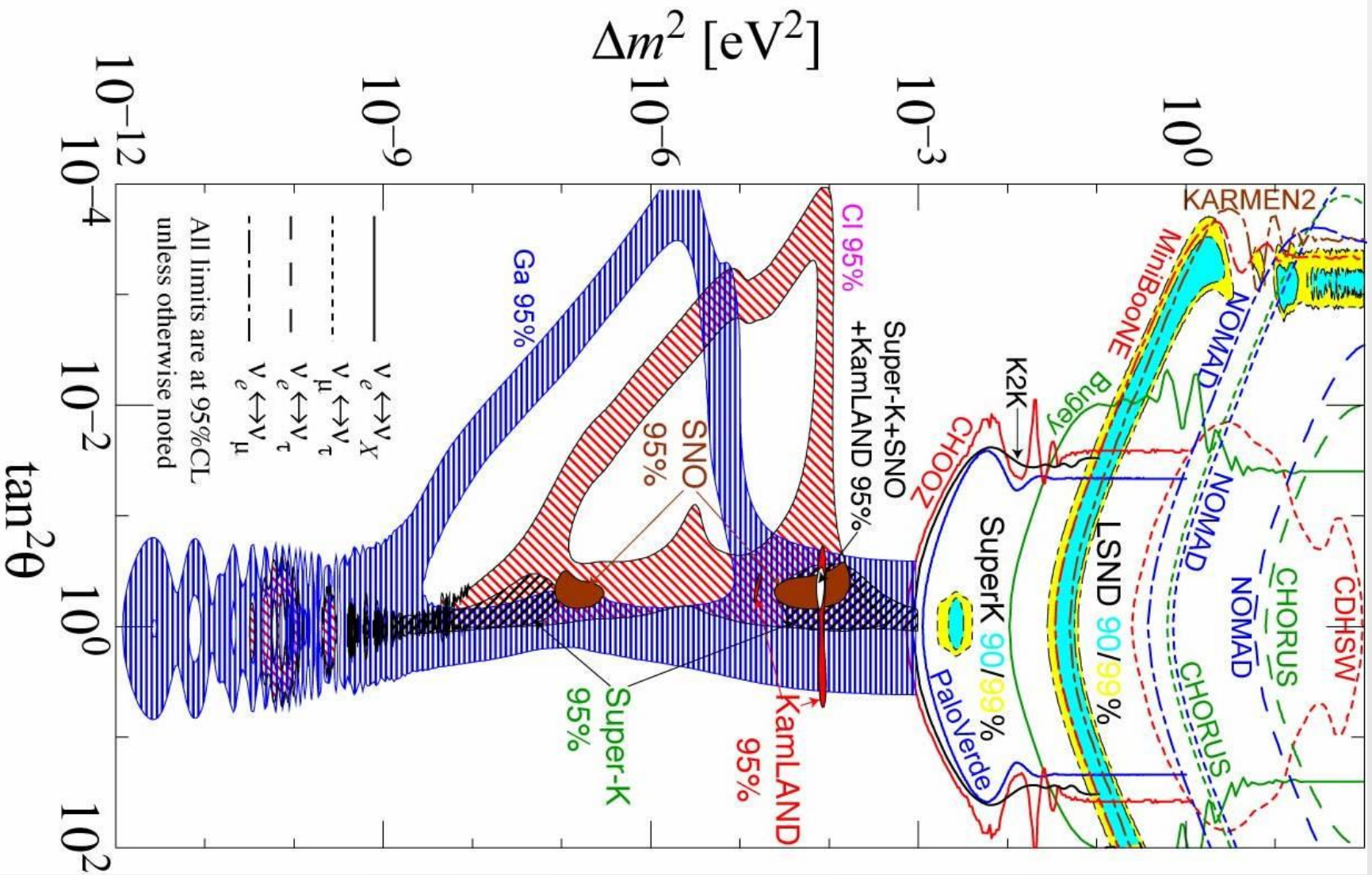
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

По состоянию на конец XX века все предсказания Стандартной модели подтверждались экспериментально, иногда с очень высокой точностью в миллионные доли процента. Но в 2000-е годы стали появляться результаты, в которых предсказания Стандартной модели слегка расходятся с экспериментом, и даже явления, крайне трудно поддающиеся интерпретации в её рамках. С другой стороны, очевидно, что Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров, а также не включает гравитацию.

Поиск отклонений от Стандартной модели (так называемой «*новой физики*») — одно из самых активных направлений исследования в 2010-х годах. Ожидалось, что эксперименты на Большом адронном коллайдере смогут зарегистрировать множество отклонений от Стандартной модели (с добавлением массивных нейтрино), однако по состоянию на конец 2012 года после двух лет экспериментов таких отклонений обнаружено не было.





Более тяжелые частицы, известные как мю-мезоны ( $\mu$ ) и тау-мезоны ( $\tau$ ), а также соответствующие им электрически нейтральные частицы, известные как нейтрино ( $\nu$ ). Имеются также поля для кварков различных типов, некоторые из которых связаны вместе внутри протонов и нейтронов, составляющих ядра обычных атомов. Силы между этими частицами обусловлены процессами обмена фотонами и калибровочными бозонами  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , передающих слабые взаимодействия, а также восемью типами глюонов, ответственных за сильное взаимодействие. Эти частицы демонстрируют широкое разнообразие масс, в котором скрыта еще не открытая закономерность, где электрон 350 000 раз легче, чем самый тяжелый кварк, а нейтрино еще легче, чем электрон.

Стандартная Модель не позволяет рассчитать любую из этих масс, пока мы не введем в нее дополнительные скалярные поля. «Скаляр» означает, что эти поля не чувствительны к направлению в пространстве, в отличие от электрических, магнитных и других полей Стандартной Модели. Скалярные поля могут заполнять все пространство, не противореча изотропным свойствам пространства. Взаимодействие других полей Стандартной Модели со скалярными полями, как полагают, дает массы частицам Стандартной Модели.

Чтобы завершить Стандартную Модель, необходимо подтвердить существование скалярных полей и выяснять, сколько существует типов полей. Это – проблема обнаружения новых элементарных частиц, часто называемых частицами Хиггса, которые могут быть зарегистрированы как кванты этих полей. Должна быть обнаружена единственная электрически нейтральная скалярная частица. В 2012г. обнаружили новую частицу с массой около 125—126 ГэВ. Есть веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса

# Объединение

|                   |                                |                              |   |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|---|
| электричество     | электромагнетизм               | электрослабое взаимодействие | ? |
| магнетизм         |                                |                              |   |
| свет              |                                |                              |   |
| бета распад       | слабое взаимодействие          | Стандартная Модель           |   |
| нейтрино          |                                |                              |   |
| протоны           | сильное взаимодействие         |                              |   |
| нейтроны          |                                |                              |   |
| пионы             |                                |                              |   |
| земное притяжение | универсальная гравитация       | Общая Теория Относительности |   |
| небесная механика |                                |                              |   |
|                   | геометрия пространства-времени |                              |   |

Объединение разнородных явлений в одной теории уже долгое время является центральной темой физики. Стандартная Модель физики частиц успешно описывает три (электромагнетизм, слабые и сильные взаимодействия) из четырех известных науке сил, но впереди еще окончательное объединение с общей теорией относительности, которая описывает гравитацию и природу пространства и времени

Самая тяжелая из известных частиц Стандартной Модели – высший кварк ( *top quark* ), с массовым эквивалентом в 175 ГэВ. (1 ГэВ =  $10^9$  эВ – немного больше чем энергия, содержащаяся в протонной массе).

Но имеется основание считать, что шкала масс, которые будут появляться в уравнениях еще не сформулированной объединенной теории, будет намного большей.

В Стандартной Модели взаимодействия полей глюонов, W-бозонов, Z-бозонов и фотонов с другими полями этой модели имеют различную интенсивность; именно поэтому силы, произведенные обменом глюонами – приблизительно 100 раз больше, чем другие при обычных условиях. Гравитация – значительно более слабое взаимодействие: гравитационное взаимодействие между электроном и протоном в атоме водорода составляет приблизительно  $10^{-39}$  от кулоновского.

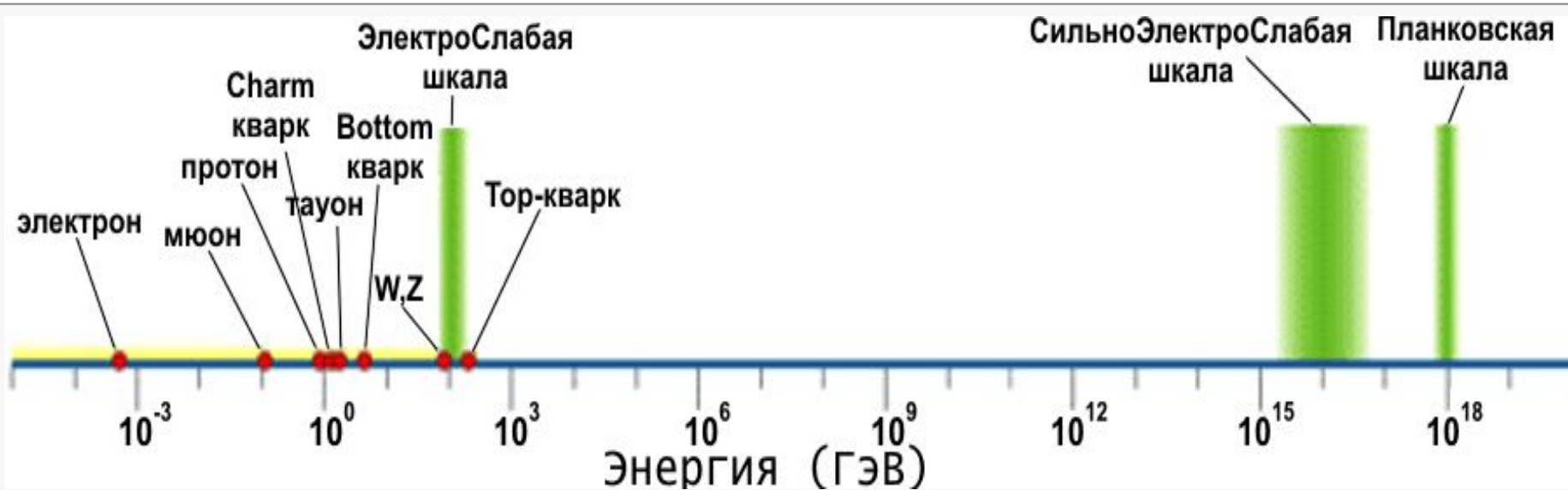
# Главные достижения

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| Квантовая Механика:<br>корпускулярно-волновой дуализм, суперпозиция, вероятность             | Квантовая Теория Поля:<br>виртуальные частицы, перенормировка | ? | Главные достижения фундаментальной физики сближаются, когда принципы различных теорий приводятся в соответствие в рамках новой единой структуры. Пока еще не известен принцип, лежащий в основе объединения квантовой теории поля (в лице Стандартной Модели) с общей теорией относительности |
| Специальная Теория Относительности: геометрия пространства-времени, относительность движения |   |   |   |
| Ньютоновская Механика:<br>универсальная гравитация, сила и ускорение                         |   |   |   |



Силы взаимодействия зависят от энергии, при которой они измерены. Когда взаимодействия полей Стандартной Модели экстраполируются в область высоких энергий, они все становятся равными друг другу при энергиях немного больше, чем  $10^{16}$  ГэВ. Сила гравитации имеет ту же самую величину при энергиях не намного выше, чем  $10^{18}$  ГэВ. Предложенные уточнения в теории гравитации показывают, что величина силы гравитации может сравняться с другими силами при  $10^{16}$  ГэВ.

Мы привыкли к довольно большим массовым отношениям в физике элементарных частиц, примерно от 1 до 350000 раз в отношении массы высшего кварка к электронной массе, но это ничто по сравнению с огромным отношением фундаментальной шкалы энергии Великого Объединения  $10^{16}$  ГэВ (возможно  $10^{18}$  ГэВ) к энергетической шкале приблизительно 100 ГэВ, типичной для Стандартной Модели. Основная задача проблемы иерархии – объяснить столь огромное соотношение от одного уровня до следующего в последовательности энергетических шкал. Причем это отношение должно быть следствием фундаментальных принципов.



**ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИИ** – мера нашего незнания. В экспериментах, имеющих дело с энергиями приблизительно до 200 ГэВ, регистрируется целый ассортимент масс частицы и шкал энергии взаимодействия, которые весьма хорошо описаны Стандартной Моделью. Загадкой является промежуток между двумя дальнейшим энергетическим шкалами, а именно сильно-электрослабого объединения ( $10^{16}$  ГэВ) и планковской шкалы, характерной для квантовой гравитации ( $10^{18}$  ГэВ)

Предложено несколько идей для решения проблемы иерархии, включая новый принцип симметрии известный как **суперсимметрия** (который также улучшает точность, с которой силы взаимодействий сближаются при  $10^{16}$  ГэВ), или новое сильное взаимодействие, известное как **техниколор**.

Эти теории содержат дополнительные силы, которые объединены с сильными, слабыми и электромагнитными силами при энергиях приблизительно  $10^{16}$  ГэВ. **Новые взаимодействия** становятся преобладающими при энергиях намного ниже  $10^{16}$  ГэВ. Но их нельзя наблюдать непосредственно, поскольку они не действуют на известные частицы Стандартной Модели.

Вместо этого они действуют на другие частицы, которые являются слишком массивными, чтобы они могли быть получены в наших лабораториях. Эти «очень тяжелые» частицы, тем не менее, намного легче, чем  $10^{16}$  ГэВ, потому что они приобретают свою массу из энергии нового взаимодействия, которое является сильным только далеко ниже  $10^{16}$  ГэВ. В этой картине, известные частицы Стандартной Модели взаимодействовали бы с самыми тяжелыми частицами, и их массы возникнут как вторичный эффект этого относительно слабого взаимодействия. Этот механизм решил бы проблему иерархии, делая известные частицы легче, чем самые тяжелые частицы, которые сами намного легче, чем  $10^{16}$  ГэВ.

Все эти идеи имеют общую черту: они требуют существования набора новых частиц с массами немного больше чем 1000 ГэВ. Если эти частицы будут обнаружены и их свойства измерены, удастся узнать, пережила ли какая-либо из них ранние моменты Большого Взрыва, чтобы теперь стать «темной материей» (*dark matter*) в межгалактическом пространстве, которая, как считается, составляет основную часть существующей массы вселенной.

**Подавленные взаимодействия.** Практически нет шанса, что удастся ставить эксперименты при энергиях частиц  $10^{16}$  ГэВ. Диаметр ускорителя пропорционален энергии, сообщенной ускоренным частицам. Для разгона частицы до энергии  $10^{16}$  ГэВ необходим ускоритель диаметром в несколько световых лет. Но даже при том, что мы не можем изучать процессы при энергиях порядка  $10^{16}$  ГэВ непосредственно, **имеется очень хороший шанс, что эти процессы производят эффекты при доступных энергиях, которые могут быть зафиксированы экспериментально, потому что они выходят за рамки дозволенного Стандартной Моделью.**

Стандартная Модель – квантовая теория поля специального вида, а именно «перенормируемая» теория. В 40 гг. XX в., когда физики использовали первые квантово-полевые теории для вычисления тонкой структуры атомных уровней оказалось, что теория дает бесконечные величины. Был найден способ обращения с бесконечными величинами, включая их при помощи переопределения или «перенормировки» в некоторые физические постоянные типа заряда и массы электрона. (Минимальная версия Стандартной Модели с одной скалярной частицей имеет 18 таких констант). Теории, в которых эта процедура работала, назывались перенормируемыми и имели более простую структуру, чем неперенормируемые теории.



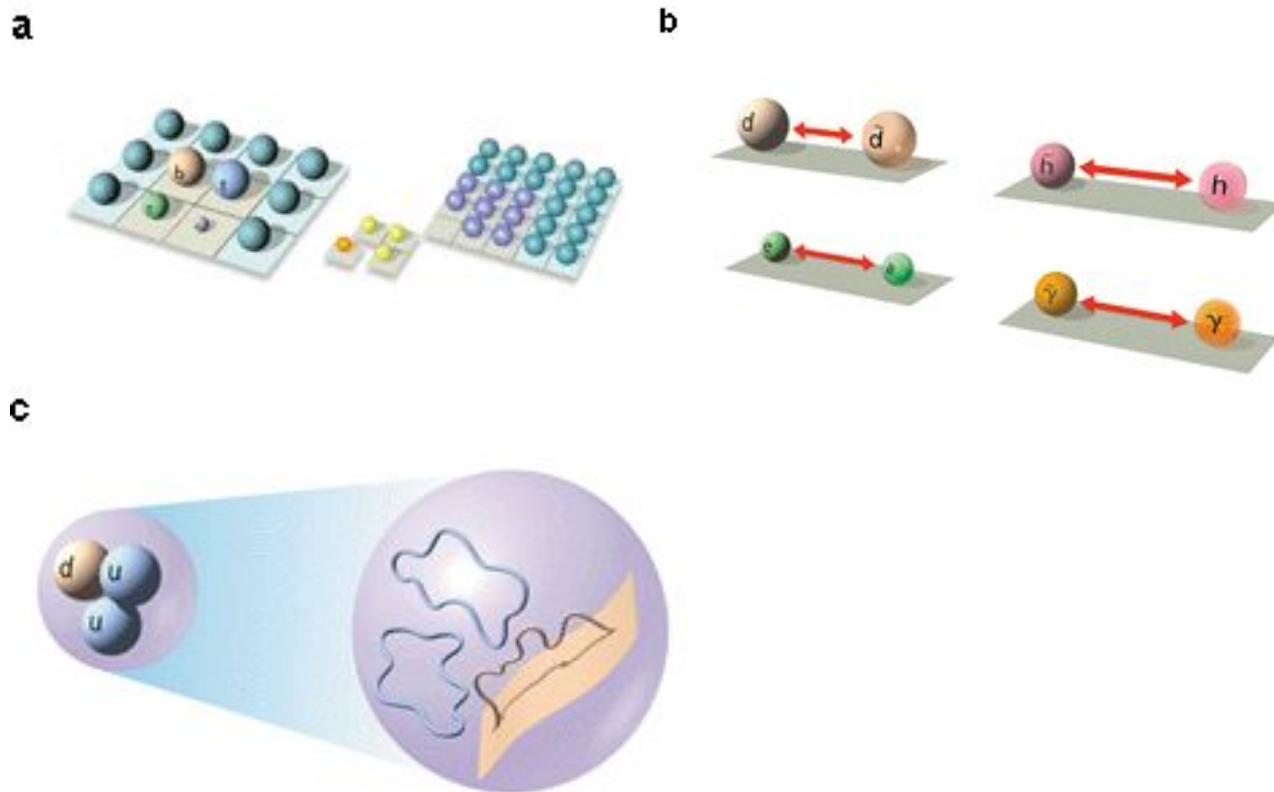
Именно простая перенормируемая структура Стандартной Модели позволяют получать точные количественные предсказания экспериментальных результатов. В частности принцип перенормируемости совместно с различными принципами симметрии Стандартной Модели запрещает ненаблюдаемые процессы типа распада изолированных протонов и запрещает нейтрино иметь массу. Физики обычно имели обыкновение полагать, что квантовая теория поля, имеющая отношение к реальности должна быть перенормируема. Этот принцип был господствующим в формулировках Стандартной Модели. И тот факт, что по фундаментальным причинам, невозможно было сформулировать перенормируемую квантовую теорию гравитации, вселял в теоретиков большую тревогу.

Сегодня же положение дел изменилось. Разные теории в физике элементарных частиц различаются в зависимости от энергии рассматриваемых процессов и реакций. Взаимодействие, обусловленное обменом очень массивной частицы, будет чрезвычайно слабым при энергиях низких по сравнению с той массой. И другие эффекты также могут быть подавлены подобным образом, такая область низких энергий рассматривается в эффективной теории поля, в которой эти взаимодействия являются ничтожными.

Теоретики поняли, что **любая фундаментальная квантовая теория, совместимая со специальной теорией относительности, превращается при низких энергиях в перенормируемую теорию.** Но хотя бесконечности все еще не допускаются в теорию, эти эффективные теории не имеют простой структуры классической перенормируемой теории. Вместо того чтобы полностью исключать **дополнительные сложные взаимодействия,** их делают сильно подавленными в области ниже некоторого характерного энергетического порога. А гравитация и есть именно такое подавленное неперенормируемое взаимодействие. От его силы (или правильнее слабости) при низких энергиях мы делаем вывод, что его фундаментальная энергетическая шкала – примерно  $10^{18}$  ГэВ.

Другое подавленное неперенормируемое взаимодействие делало бы протон нестабильным с периодом полураспада в диапазоне от  $10^{31}$  до  $10^{34}$  лет, который возможно не удастся зафиксировать даже и к  $10^{50}$  лет. Другое же подавленное неперенормируемое взаимодействие сообщило бы нейтрино крошечные массы, приблизительно  $10^{-2}$  эВ. Уже сейчас имеются некоторые доказательства, что массы нейтрино имеют именно такой порядок. Такие наблюдения будут весьма полезны для объединенной теории всех сил, но открытие этой теории, вероятно, не будет возможно без появления радикально новых идей.

Некоторые из них уже выдвинуты и обсуждаются. Имеются пять различных теорий крошечных одномерных объектов известных как струны различные моды колебаний, которых проявляются при низкой энергии как различные виды частиц и очевидно представляют собой конечные теории гравитации и других сил в 10-мерном пространстве–времени.



Имеется несколько путей объединения физики, находящейся вне Стандартной Модели. Модели техникolorа (a) представляют новые взаимодействия, аналогичные «цветной» силе, которая связывает кварки. Как следствие этого, появление новых поколений частиц, отличающихся от трех известных. Суперсимметрия (b), связывающая фермионы с бозонами, добавляет к каждой известной частице суперсимметричного партнера. М-теория и теория струн (c) видоизменяют полную модель в терминах новых объектов типа крошечных струн, петель и мембран, которые ведут себя подобно частицам при низких энергиях

Конечно, мы не живем в 10 измерениях, но вероятно, что шесть из этих измерений могут быть свернуты настолько сильно, что они не наблюдаются в процессах при энергиях ниже  $10^{16}$  ГэВ, приходящейся на одну частицу. Ясность во всем этом появилась лишь в последние несколько лет, когда оказалось, что эти пять струнных теорий (а также квантовая теория поля в 11 измерениях) есть не что иное, как приближенные версии единственной фундаментальной теории (иногда называемой М-теорией).

*Вне пространства и времени.* Два больших препятствия стоят на пути к решению этой задачи. Первое – мы не знаем, какие физические принципы управляют такой фундаментальной теорией. В разработке общей теории относительности Эйнштейн руководствовался принципом, который он вывел из известных свойств гравитации, – принципом эквивалентности сил тяготения и инерционных эффектов типа центробежной силы.



Развитие Стандартной Модели исходило из принципа калибровочной симметрии (*gauge symmetry*), который является обобщением известного свойства электричества, заключающегося в том, что физический смысл имеет только разность потенциалов, но не сам потенциал непосредственно.

Но пока еще не обнаружен какой-либо фундаментальный принцип, исходя из которого можно было бы построить М-теорию (M-theory «Матричная», «Мембранная»). Различные аппроксимации к этой теории напоминают струнные или полевые теории в пространстве-времени различной размерности, **но возможно, что новая фундаментальная теория вообще не должна формулироваться в терминах пространства-времени.** Квантовая теория поля довольно сильно ограничена принципами, лежащими в основе природы четырехмерного пространства-времени, которые включены в специальную теорию относительности.

Неизвестно каким образом мы можем получить идеи, необходимые для верной формулировки новой фундаментальной теории, если эта теория должна описывать область, где все интуитивные представления, приобретенные нами из жизни в пространстве-времени, станут неподходящими?

Другое препятствие состоит в том, что, даже если мы были бы и способны сформулировать фундаментальную теорию, мы не могли бы знать, как ее использовать, чтобы делать предсказания, подтверждающие ее истинность. Большинство успешных предсказаний Стандартной Модели были основаны на методе вычисления, известном как теория возмущений (*perturbation theory*). В квантовой механике вероятности физических процессов вычисляются суммированием по всем возможным последовательностям промежуточных шагов, через которые может происходить процесс.

Используя теорию возмущений, вначале рассматривают только самые простые промежуточные шаги, потом более сложные, и так далее. Этот способ работает только в том случае, если все более и более сложные промежуточные шаги дают уменьшающиеся вклады в вероятность, это обычно имеет место в том случае, если константа связи достаточно мала. Иногда теория с очень сильными взаимодействием эквивалентна другой теории с очень слабым взаимодействием, в которой применимы методы теории возмущений.

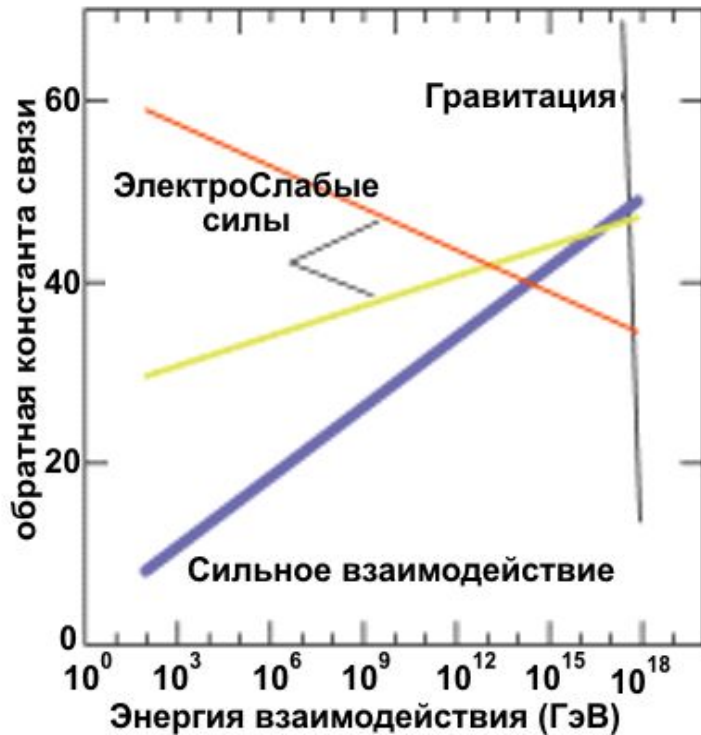
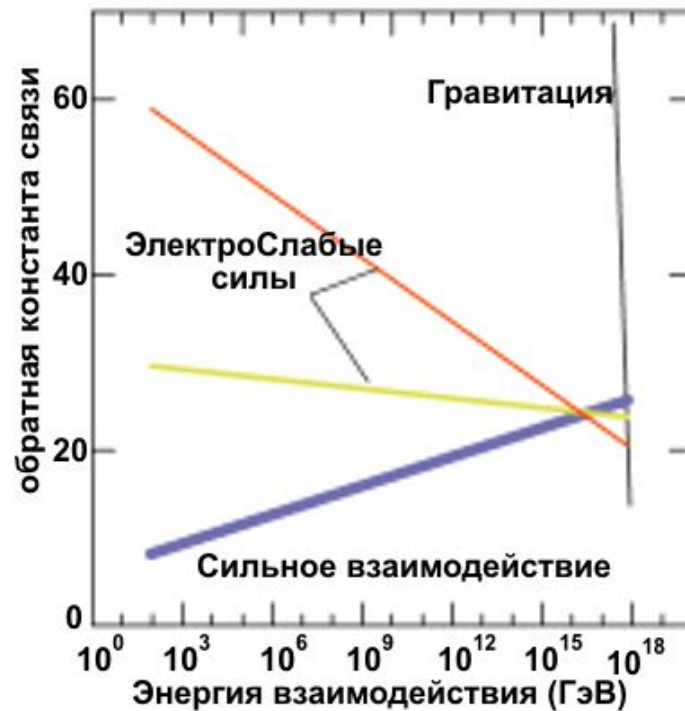
Такое отношение эквивалентности действует для некоторых пар из пятиструнных теорий в 10 измерениях и теории поля в 11 измерениях, упомянутых ранее. К сожалению, взаимодействия фундаментальной теории, очевидно, не являются ни очень сильными, ни очень слабыми, исключая тем самым любое использование теории возмущений.

**Поиск ответа.** Мы не можем сейчас сказать, когда будут решены эти проблемы. Но даже когда они и будут решены, пока мы не сможем ставить эксперименты при энергиях  $10^{16}$  ГэВ или изучать более высокие измерения, нас не будет беспокоить проблема проверки истинности фундаментальной объединенной теории. Помимо проверки того, правильно ли теория объясняет измеренные значения физических постоянных Стандартной Модели, будущие эксперименты должны выявить новые эффекты, не предусмотренные в Стандартной Модели.

Возможно, что, когда мы наконец поймем, как частицы и силы ведут себя при энергиях до  $10^{18}$  ГэВ, мы только столкнемся с новыми тайнами, а до заключительного объединения будет гораздо дальше, чем когда-либо до этого.

Пока еще нет никаких намеков на то, что фундаментальная энергетическая шкала простирается дальше  $10^{18}$  ГэВ, а теория струн даже предполагает, что более высокие энергии не имеют физического смысла.



**а.****Стандартная Модель****б.****Стандартная Модель плюс Суперсимметрия**

КОНСТАНТЫ СВЯЗИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ не остаются постоянными, а медленно изменяются в зависимости от энергии, этот процесс точно описан квантовой теорией поля и проверен экспериментом вплоть до 200 ГэВ. Теоретическая экстраполяция показывает, что три взаимодействия Стандартной Модели (сильное и объединенные слабое и электромагнитное) имеют приблизительно равную интенсивность при очень высоких энергиях (а), а при учете суперсимметрии (б) это равенство становится еще более точным. Толщина кривой указывает приблизительно неопределенность в константах связи

Открытие объединенной теории, описывающей природу в условиях любых энергий, позволит нам ответить на самые глубокие вопросы космологии: имеет ли расширяющееся облако галактик, которое мы называем Большим Взрывом, начало во времени? Является ли Большой Взрыв только одним эпизодом истории вселенной, в которой большие и маленькие взрывы происходят вечно? Изменяются ли физические константы или даже законы природы от одного взрыва к другому?

Это не будет концом физики. Это, вероятно, даже не поможет нам в решении некоторых еще не решенных проблем сегодняшней физики, типа понимания турбулентности и высокотемпературной сверхпроводимости. Но это будет конец физики определенного типа, а именно поиска объединенной теории, которая влечет за собой все другие факты физической науки.

Физики, работающие на детекторе LHCb Большого адронного коллайдера, впервые смогли пронаблюдать крайне редкое событие - распад странного В-мезона на два мюона, параметры этого события очень точно совпали с предсказаниями СМ.

Нейтральный странный В-мезон состоит из s-кварка ("странного", strange) и b-кварка ("прелестный" - "beauty"). Стандартная модель с очень хорошей точностью предсказывала, что распад этой частицы на два мюона должен быть крайне редким событием, вероятность  $3 \cdot 10^{-9}$ .





### 3. Слабое взаимодействие

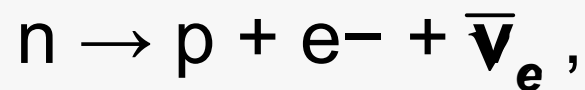
Элементарные частицы в большинстве нестабильны – они распадаются, превращаясь в другие элементарные частицы с меньшей массой. Прежде чем обсуждать свойства новых частиц, необходимо более подробно познакомиться с бета-распадом и тем, что называется слабым взаимодействием. Это взаимодействие стремится превратить в конечном счете все элементарные частицы в электроны и нейтрино. Исторически электроны, образующиеся при таком распаде, получили название  $\beta$ -частиц.

Поскольку в бета-распаде всегда участвуют нейтрино, их описание является весьма существенным.

Нейтрино – элементарная частица, не имеющая электрического заряда. Более того, нейтрино взаимодействует с веществом настолько слабо, что оказывается почти ненаблюдаемым. Если представить себе, что на Землю падает пучок, содержащий  $10^{12}$  нейтрино, то все они, за исключением одного, прошли бы через Земной шар без всяких последствий.

Было высказано предположение о существовании специфического взаимодействия, способного превращать частицы в электроны и нейтрино. Теория этого взаимодействия, названного универсальным взаимодействием Ферми, была разработана Р. Фейнманом и рядом других ученых. Новая теория, например, точно предсказывает время жизни мюона.

Одним из примеров слабого взаимодействия является бета-распад свободного нейтрона:



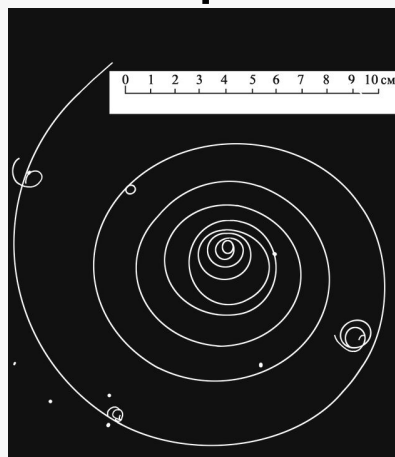
который происходит с периодом полураспада 12 мин и сопровождается выделением энергии 1,3 МэВ.



Поскольку масса покоя электрона составляет 0,5 МэВ, то избыток энергии 0,8 МэВ выделяется в виде кинетической энергии электрона и антинейтрино (символом  $\nu_e$  обозначено  $\bar{\nu}_e$  антинейтрино, сопровождающее рождение электрона).

Кинетическая энергия 0,8 МэВ может распределяться между образующимися в результате распада электроном и нейтрино любым способом. При распаде большого числа нейтронов удастся обнаружить электроны с кинетическими энергиями от нуля до 0,8 МэВ.

Если бы нейтрон распадался только на протон и электрон, то электрон всегда уносил бы всю кинетическую энергию 0,8 МэВ. Энергию электрона можно определить экспериментально, измеряя радиус кривизны его траектории в магнитном поле. Оказывается, что  $\beta$ -частицы редко приобретают максимально возможную кинетическую энергию. Именно «исчезновение» кинетической энергии послужило причиной «изобретения» нейтрино.



След электрона в жидководородной пузырьковой камере. След закручен в однородном магнитном поле, направленном на рисунке из плоскости чертежа. Радиус кривизны уменьшается по мере того, как скорость электрона в жидком водороде уменьшается.

## 4. Закон сохранения барионов

Поскольку свободный нейтрон распадается благодаря слабым взаимодействиям, можно было бы предполагать, что и свободный протон будет также испытывать распад. Однако тщательные измерения показали, что свободные протоны стабильны. Этот факт, а также наблюдение за процессами с участием сильно взаимодействующих частиц привели к установлению закона сохранения барионов.

К барионам относятся протон, нейтрон и примерно половина всех сильно взаимодействующих частиц. Закон сохранения барионов утверждает, что в замкнутой системе разность полного числа барионов и полного числа антибарионов сохраняется неизменной. И поскольку протон самый легкий из барионов, ему не во что распадаться.

Самое интересное, что в кварковой модели протоны, составляющие большую часть массы обычного вещества, могут спонтанно распадаться на более легкие частицы, такие, как антиэлектроны. Причина в том, что при энергии великого объединения нет существенной разницы между кварком и антиэлектроном. Три кварка внутри протона обычно не обладают достаточным количеством энергии для превращения в антиэлектроны, но один из кварков может в силу принципа неопределенности получить энергию, достаточную для этого превращения.

Тогда протон должен распасться, но вероятность того, что кварк будет иметь достаточную энергию, столь мала, что ждать этого придется по крайней мере  $10^{30}$  лет, что гораздо больше времени, прошедшего с момента большого взрыва, которое не превышает миллиардов лет. Можно, однако, увеличить вероятность наблюдения распада протона, изучая очень большое число протонов. Наблюдая  $10^{30}$  протонов в течение года, можно надеяться обнаружить, согласно одной из простейших теорий великого объединения, более одного распада протона.

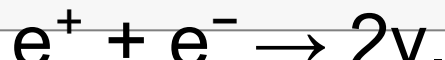
Несколько таких экспериментов уже выполнено, но они не дали определенных сведений о распадах протона. Один из экспериментов, в котором использовалось восемь тысяч тонн воды, проводился в соляной шахте штата Огайо (для того, чтобы исключить космические помехи, которые можно принять за распад протона). Поскольку в течение всего эксперимента не было зарегистрировано ни одного распада протона, можно вычислить, что время жизни протона должно быть больше, чем  $10^{30}$  лет. Этот результат превышает предсказания простейшей теории великого объединения, но есть и более сложные теории, дающие более высокую оценку. Для их проверки потребуются еще более точные эксперименты с еще большими количествами вещества.

## 5. Антивещество

В 1928 г. П. Дираком на основании анализа релятивистского уравнения было предсказано существование позитрона или положительного электрона. Позитрон имеет ту же массу, что и электрон, но противоположный электрический заряд. В 1932 г. позитрон был обнаружен в космических лучах К. Андерсоном. Античастицы были открыты у лептонов ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) и мезонов ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ).

Античастица должна иметь в точности ту же массу, что и частица, но противоположный электрический заряд. Античастица может аннигилировать с соответствующей ей частицей. В результате обе массы покоя непосредственно превращаются в энергию – в форме других частиц, например фотонов.

Тормозясь в веществе, позитрон быстро аннигилирует с электроном и превращается, как правило, в два фотона:



**Каждый из фотонов должен иметь энергию 0,51 МэВ, которая равна массе покоя электрона. Позитроны легко возникают в так называемом процессе рождения пар (при соударении с ядром фотон с высокой энергией превращается в пару электрон–позитрон):**



**Эта реакция служит одним из множества примеров прямого превращения энергии в массу покоя.**

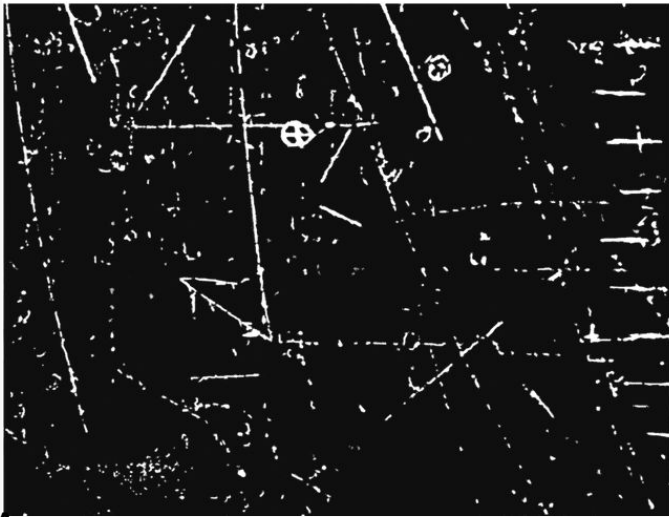
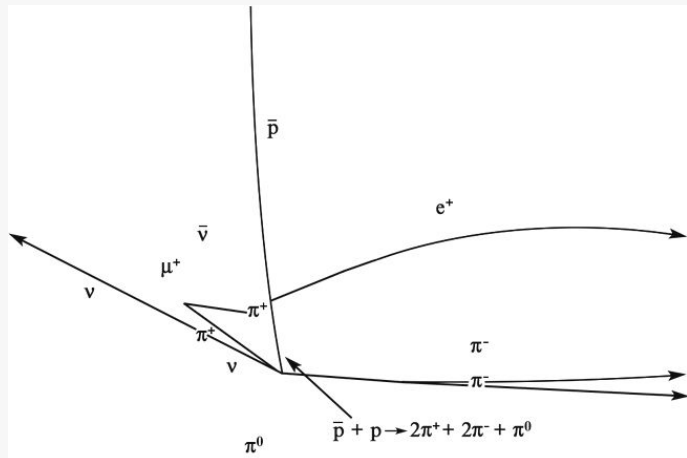


Античастица протона всегда называется антипротоном или отрицательным протоном . Обычно античастицы обозначаются символом частицы с черточкой наверху. Таким образом,  $\bar{p}$  это антипротон, а  $\bar{n}$  антинейтрон. Антиэлектрон (позитрон) должен был бы обозначаться как  $\bar{e}^-$ , однако его принято обозначать  $e^+$ . После открытия в 1933 г. позитрона стало ясно, что должен также существовать и антипротон. Антипротоны могли бы рождаться при бомбардировке ядер протонами с кинетической энергией 6 млрд. эВ. Одна из реакций рождения антипротонов имеет вид



Энергия 6 ГэВ непосредственно превращается в энергию покоя пары протон–антипротон  $\bar{p} + p$ .

В 1955 г. был открыт антипротон. Через год был открыт антинейтрон. Поскольку нейтрон электрически нейтрален, то нейтральным должен быть и антинейтрон. Однако антинейтрон быстро аннигилирует либо с нейтроном, либо с протоном. Продуктами аннигиляции антинуклонов обычно являются пионы.



Антипротон в жидководородной пузырьковой камере останавливается и аннигилирует с протоном. Продуктами аннигиляции являются пять пионов: два положительных, два отрицательных и один нейтральный. Один из положительных пионов также тормозится и останавливается, распадаясь при этом на  $\mu^+$ , который в свою очередь останавливается и распадается на позитрон.

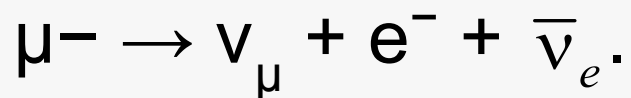
Вещество, построенное из антинуклонов и орбитальных позитронов, называется антивеществом. Из общих соображений симметрии следовало бы ожидать, что половина атомов во Вселенной должна была бы представлять собой антивещество. Если бы на Земле или даже в нашей Галактике имелось бы антивещество, то оно не могло бы просуществовать очень долго. Антивещество довольно скоро аннигилировало бы; при этом выделилась бы энергия, почти в 1000 раз более эффективно, чем при взрыве водородной бомбы.

Наиболее сложной формой антивещества, полученной и идентифицированной в лабораторных условиях, являются антиядра трития, гелия. Эти эксперименты были выполнены на серпуховском ускорителе в 1970–74 гг. В 1998 г. были получены первые атомы антиводорода.

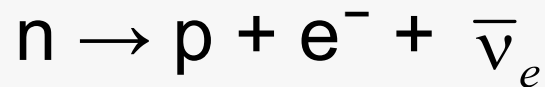
## 6. Сохранение лептонов

Слабые взаимодействия вызывают распады тяжелых частиц не только с испусканием электрона и нейтрино, но в некоторых случаях вместо этих частиц возникают мюон и нейтрино. Мюон – это элементарная частица, тождественная с электроном во всех отношениях, за исключением массы покоя. Мюон имеет массу покоя в 207 раз больше электронной. Мюон следует рассматривать как тяжелый электрон.

Слабое взаимодействие вызывает распад мюонов с периодом полураспада  $1,5 \cdot 10^{-6}$  с :



Электрону  $e^-$  и его нейтрино  $\nu_e$  приписывается электронное лептонное число (или «заряд»)  $+1$ , а соответствующим античастицам  $e^+$  и  $\bar{\nu}_e$  электронное лептонное число  $-1$ . В любой замкнутой системе полное число лептонов электронного семейства должно сохраняться. Например, при распаде нейтрона



лептонное число

$$(0) \rightarrow (0) + (1) + (-1).$$

Поскольку суммарное лептонное число до распада равно нулю, то суммарное лептонное число и в правой части уравнения, описывающего распад нейтрона, также должно быть равно нулю.

Лептоны считаются бесструктурными частицами. Размер их  $< 10^{-16}$  см. Детальное изучение свойств лептонов показывает, что они группируются парами, каждая пара состоит из заряженного лептона и нейтрино. Таким образом, 6 лептонов образуют 3 поколения.

| 1-е поколение | 2-е поколение | 3-е поколение |
|---------------|---------------|---------------|
| $e^-$         | $\mu^-$       | $\tau^-$      |
| $\nu_e$       | $\nu_\mu$     | $\nu_\tau$    |

## 7. Адроны

Если лептоны – это частицы, участвующие в слабых взаимодействиях, то адроны – частицы, участвующие в сильных или ядерных взаимодействиях.

К адронам относятся все барионы (в т.ч. нуклоны – протон и нейтрон) и мезоны. Адроны обладают сохраняющимися в процессах сильного взаимодействия квантовыми числами: странностью, очарованием, красотой и др. Близкие по массе адроны, имеющие одинаковые значения указанных квантовых чисел, а также барионного числа и спина могут быть объединены в изотопические мультиплеты, включающие в себя адроны с различными электрическими зарядами.

В свободном состоянии все адроны (за исключением, возможно, протона) нестабильны.



Адроны представляют собой составные системы. Большинство известных барионов состоит из трех кварков, а мезоны – из кварка и антикварка (хотя возможны состояния, имеющие в своем составе дополнительные пары кварк–антикварк, например мезоны из 2 кварков и 2 антикварков). Значения странности, очарования и др. подобных квантовых чисел адронов определяются числом входящих в их состав странных ( $s$ ), очарованных ( $c$ ), красивых ( $b$ ) и др. возможных типов (ароматов) кварков и соответствующих антикварков.

## 8. Кварки

На современном уровне знания фундаментальными частицами вещества считаются кварки. Они имеют полуцелый спин и являются фермионами. Из кварков состоят адроны.

### **Основные положения модели кварков:**

Все сильно взаимодействующие частицы состоят из кварков; кварки являются фермионами; по современным представлениям они бесструктурны.

Кварки имеют внутренние квантовые числа: электрический заряд  $Q$ , спин  $1/2$ , четность  $P$ , барионное число  $B$ , изоспин  $I$ , проекцию изоспина  $I_3$ , странность  $s$ , шарм  $c$ , bottomness  $b$ , topness  $t$ .

Совокупность этих внутренних квантовых чисел, характеризующих определенный тип кварка, называется также «ароматом» кварка.

Характеристики кварков приведены в таблице.

Квантовые числа кварков определяют характеристики адронов.

Барионы (фермионы с барионным числом  $B = 1$ ) строятся из трех кварков.

Антибарионы (фермионы с барионным числом  $B = -1$ ) строятся из трех антикварков.

Мезоны (бозоны с барионным числом  $B = 0$ ) строятся из кварка и антикварка.

| Характеристика                 | Тип кварка |       |      |      |         |      |
|--------------------------------|------------|-------|------|------|---------|------|
|                                | d          | u     | s    | c    | b       | t    |
| Электрический заряд $Q$        | -1/3       | +2/3  | -1/3 | +2/3 | -1/3    | +2/3 |
| Барионное число $B$            | 1/3        | 1/3   | 1/3  | 1/3  | 1/3     | 1/3  |
| Спин $J$                       | 1/2        | 1/2   | 1/2  | 1/2  | 1/2     | 1/2  |
| Четность $P$                   | +1         | +1    | +1   | +1   | +1      | +1   |
| Изоспин $I$                    | 1/2        | 1/2   | 0    | 0    | 0       | 0    |
| Проекция изоспина $I_3$        | -1/2       | +1/2  | 0    | 0    | 0       | 0    |
| Странность $s$                 | 0          | 0     | -1   | 0    | 0       | 0    |
| <i>Charm</i> (очарование) $c$  | 0          | 0     | 0    | +1   | 0       | 0    |
| <i>Bottomness (beauty)</i> $b$ | 0          | 0     | 0    | 0    | -1      | 0    |
| <i>Topness (truth)</i> $t$     | 0          | 0     | 0    | 0    | 0       | +1   |
| Масса в составе адрона, ГэВ    | 0,33       | 0,33  | 0,51 | 1,8  | 5       | 180  |
| Масса «свободного» кварка, ГэВ | 0,007      | 0,005 | 0,15 | 1,3  | 4,1–4,4 | 174  |

Главная особенность всех кварков в том, что они являются обладателями соответствующих сильных зарядов. Заряды сильного поля имеют три равноправные разновидности (вместо одного электрического заряда в теории электрических сил). В исторически сложившейся терминологии эти три разновидности заряда называют цветами кварков, а именно: условно красным, зеленым и синим. Таким образом, каждый кварк в табл. 1 и 2 может быть в трех ипостасях и является цветной частицей. Смешение всех трех цветов, подобно тому, как это имеет место в оптике, дает белый цвет, то есть обесцвечивает частицу. Все наблюдаемые адроны бесцветны.

Взаимодействия кварков осуществляют восемь разных глюонов. Термин «глюон» означает в переводе с английского языка клей, то есть эти кванты поля есть частицы, которые как бы склеивают кварки между собой. Как и кварки, глюоны являются цветными частицами, но поскольку каждый глюон изменяет цвета сразу двух кварков (кварка, который испускает глюон, и кварка, который поглотил глюон), то глюон окрашен дважды, неся на себе цвет и антицвет, как правило, отличный от цвета.

Масса покоя глюонов, как и у фотона, равна нулю. Кроме того, глюоны электрически нейтральны и не обладают слабым зарядом.

Глюоны взаимодействуют только с кварками и с другими глюонами. У сильного взаимодействия есть одно необычайное свойство – оно обладает конфайнментом (*confinement* – ограничение, удержание (англ.)).

Конфайнмент состоит в том, что частицы всегда удерживаются в бесцветных комбинациях. Один кварк не может существовать сам по себе, потому что тогда он должен был бы иметь цвет (красный, зеленый или синий). Поэтому красный кварк должен быть соединен с зеленым и синим посредством глюонной «струи» (красный + зеленый + синий = белый). Такой триплет оказывается протоном или нейтроном.

Существует и другая возможность, когда кварк и антикварк объединяются в пару (красный + антикрасный, или зеленый + антизеленый, или синий + антисиний = белый).

Мы не можем наблюдать отдельный кварк или глюон из-за конфайнмента. Не означает ли это, что само представление о кварках и глюонах как о частицах несколько метафизично? Нет, потому что сильное взаимодействие характеризуется еще одним свойством, которое называется асимптотической свободой. Благодаря этому свойству понятие кварков и глюонов становится вполне определенным. При обычных энергиях сильное взаимодействие действительно является сильным и плотно прижимает кварки друг к другу.



Но, как показывают эксперименты на мощных ускорителях, при высоких энергиях сильное взаимодействие заметно ослабевает, и кварки, и глюоны начинают вести себя почти как свободные частицы. На рис. представлен фотоснимок столкновения протона и антипротона высокой энергии. Видно, что несколько почти свободных кварков, родившихся в результате взаимодействия, образовали «струи» треков, которые видны на фотографии.

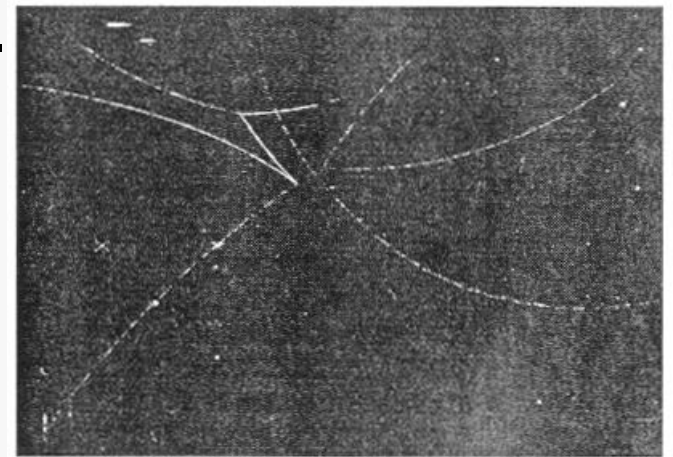


Рис. 5.2

## Фундаментальные взаимодействия.

Из характеристик переносчиков сильного  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$  – мезонов, слабого  $W^\pm$  и  $Z^0$  бозонов, электромагнитного  $\hbar\omega$  – фотонов и гравитационного  $\hbar\omega$  – гравитонов определите радиусы этих взаимодействий.

а) сильное взаимодействие осуществляется обменом нуклонов виртуальными  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$  – мезонами.

Виртуальными частицами называют частицы, которые в соответствии с принципом неопределенности, не могут быть обнаружены за время их существования. Согласно соотношению неопределенностей  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$  испущенный нуклоном виртуальный  $\pi$ -мезон с энергией  $m_{\pi} c^2$  ( $m_{\pi} c^2 = \Delta E$ ), если поблизости нет других частиц, может существовать только конечное время, не превышающее  $\Delta t = \hbar / (m_{\pi} c^2)$ . В течение этого временного интервала нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E = m_{\pi} c^2$  не может быть обнаружено.

По истечении этого интервала времени  $\pi$ -мезон поглощается испустившим его нуклоном. Тогда расстояние, на которое виртуальный  $\pi$ -мезон удаляется от нуклона, найдем из соотношения

$$r_{\pi} = c\Delta t = \hbar c / (m_{\pi} c^2).$$

Масса  $\pi^0$ -мезона – 135 МэВ/ $c^2$ , масса  $\pi^{\pm}$ -мезона – 139,6 МэВ/ $c^2$ .

Отсюда

$$r_{\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / (135 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}) \approx 10^{-15}$$

м

$$\approx 1 \text{ фм.}$$

б) слабое взаимодействие осуществляется обменом частиц, принимающих участие в слабых взаимодействиях, виртуальными промежуточными векторными бозонами  $Z^0$ ,  $W^\pm$ . Массы  $W$  и  $Z$  бозонов:

***W- и Z-бозоны*** — элементарные частицы, переносчики слабого взаимодействия. Их открытие (ЦЕРН, 1983) - главнейший успех Стандартной модели физики элементарных частиц.

**W-частица** названа по первой букве названия взаимодействия — **слабое (Weak)** взаимодействие. **Z-частица** получила такое имя, поскольку **Z-бозон имеет нулевой (Zero) электрический заряд**

$m_W \approx 80,4 \text{ ГэВ}/c^2$ ,  $m_Z \approx 91,2 \text{ ГэВ}/c^2$ . Подставив в уравнение

$$r = c\Delta t = \hbar c / (mc^2).$$

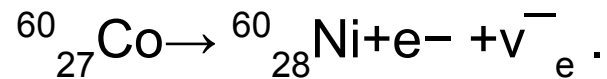
массы промежуточных бозонов, получим для радиуса слабого взаимодействия

$$r_W \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ м} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ фм}.$$

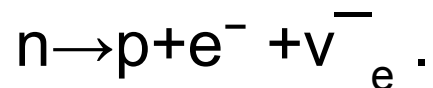
# Слабое взаимодействие

Диаграмма Фейнмана для бета-распада нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино посредством тяжелого  $W$ -бозона

$W$ - и  $Z$ -бозоны — это частицы-переносчики слабого взаимодействия, как фотон является частицей-переносчиком для электромагнитного взаимодействия.  $W$ -бозон играет важную роль в ядерном бета-распаде. Рассмотрим для примера бета-распад изотопа кобальта  $\text{Co}^{60}$ , важный процесс, происходящий при взрыве сверхновых:



В этой реакции участвует не всё ядро  $\text{Co}^{60}$ , а только один из его 33 нейтронов. Нейтрон превращается в протон, испуская электрон (называемый здесь бета-частицей) и электронное антинейтрино:



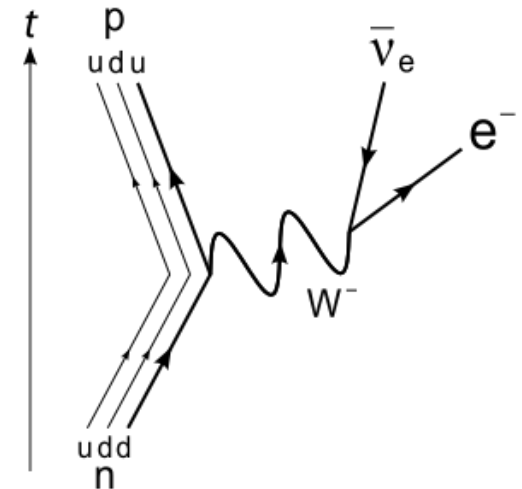
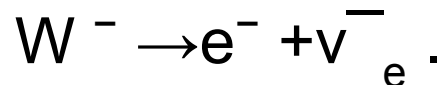
Нейтрон является состоит из  $u$ -кварка и двух  $d$ -кварков ( $udd$ ).

В бета-распаде участвует один из  $d$ -кварков, который превращается в  $u$ -кварк, чтобы сформировать

протон ( $uud$ ). На фундаментальном уровне слабое взаимодействие просто меняет аромат одного кварка:



за которым немедленно следует распад самого  $W^{-}$ :



# Слабое взаимодействие

Все квантовые числа  $Z$ -бозона равны нулю, поскольку он является античастицей сам для себя (т. н. истинно нейтральной частицей). Обмен  $Z$ -бозоном между частицами, названный взаимодействием нейтральных токов, не меняет взаимодействующие частицы.

В отличие от бета-распада наблюдения взаимодействий нейтральных возможны только в нескольких лабораториях физики высоких энергий в мире.



Тот факт, что  $W$ - и  $Z$ -бозоны имеют массу, в то время как фотон массы не имеет, был главным препятствием для развития теории электрослабого взаимодействия. Эти частицы точно описываются калибровочной симметрией  $SU(2)$ , но бозоны в *калибровочной теории* должны быть безмассовыми. Так, фотон является безмассовым бозоном, поскольку *электромагнетизм* описывается калибровочной симметрией  $U(1)$ . Необходим некоторый механизм, который бы нарушал симметрию  $SU(2)$ , в процессе придавая массу  $W$ - и  $Z$ -бозонам. Одно объяснение, механизм Хиггса, было предложено *Питером Хиггсом* в конце 1960-х. Оно предсказывает существование ещё одной новой частицы — бозона Хиггса.

Сочетание калибровочной теории  $SU(2)$  слабого взаимодействия, электромагнитного взаимодействия и механизма Хиггса известно как *модель Глэшоу — Вайнберга — Салама*. Сейчас это один из столпов Стандартной модели физики элементарных частиц

## в) электромагнитное взаимодействие

Осуществляется обменом заряженных частиц виртуальными фотонами  $\hbar\omega$ .

$$\text{За время } \Delta t = \hbar/(mc^2)$$

виртуальный фотон может передать взаимодействие на расстояние

$$r_v = c\Delta t = \hbar c/(\hbar\omega) = c/\omega.$$

Поскольку энергия фотона в принципе может быть любой, так как  $0 < \omega < \infty$ , то радиус электромагнитного взаимодействия не ограничен

$$0 < r_v < \infty .$$

## г) гравитационное взаимодействие

Может осуществляться гипотетическими гравитонами (экспериментально не обнаружены), частота которых также изменяется в пределах  $0 < \omega < \infty$ .

Поэтому радиус гравитационного взаимодействия, как и электромагнитного, не ограничен

$$r_g \rightarrow \infty.$$

**Гравитон** — гипотетическая элементарная частица — переносчик гравитационного взаимодействия без электрического заряда. Должен обладать спином  $2\hbar$ , нулевой массой и двумя возможными направлениями поляризации.

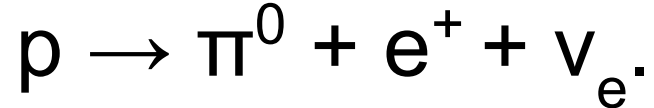
Термин «гравитон» был предложен в 1930-х годах, работа Д. И. Блохинцева и Ф. М. Гальперина.

Гипотеза о существовании гравитонов появилась благодаря успеху квантовой теории поля (Стандартная модель) в моделировании поведения остальных фундаментальных взаимодействий с помощью подобных частиц: фотоны в электромагнитном взаимодействии, глюоны в сильном взаимодействии,  $W^\pm$  и  $Z$ -бозоны в слабом взаимодействии.

Следуя этой аналогии — за *гравитационное взаимодействие* может отвечать некая элементарная частица. Ряд физиков отвергает гипотезу о гравитоне. Например, если гравитоны существуют, то они должны излучаться чёрными дырами, что, вероятно, противоречит Общей теории относительности. Возможно также, что гравитоны являются квазичастицами, удобными для описания слабых гравитационных полей в масштабах длины и времени, существенно больших планковской длины и планковского времени, но непригодными для описания сильных полей и процессов с характерными масштабами, близкими к планковским

# Задачи

В теории великого объединения (слабое, электромагнитное и сильное взаимодействия описываются единым зарядом) допускается распад свободного протона по реакции:



- 1) Установить закон сохранения какого заряда нарушался бы в этом случае;
- 2) опыты по определению времени жизни протона называют «экспериментом века». Теория великого объединения определяет время жизни протона равным  $\tau = 10^{31}$  лет. Оцените, какую массу  $m_{\text{Fe}}$  вещества железа необходимо использовать, чтобы за время эксперимента  $t = 1$  год зарегистрировать  $\Delta N = 10$  распадов.

## Решение.

1) Для решения задачи подставим значения электрического заряда  $Q$ , барионного заряда  $B$ , странности  $S$ , лептонного электронного заряда  $L_e$ , лептонного мюонного заряда  $L_\mu$  и спина в уравнение процесса и проверим выполнение законов сохранения, принимая во внимание, что квантовые заряды аддитивны: квантовый заряд системы равен сумме квантовых зарядов входящих в нее элементарных частиц. При проверке законов сохранения под  $\Delta$  понимается разность между суммой квантовых чисел частиц правой части уравнения процесса и суммой квантовых чисел частиц левой части уравнения.

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e.$$

$$Q \quad 1 \rightarrow 0 + 1 + 0, \quad \Delta Q = 0;$$

$$B \quad 1 \rightarrow 0 + 0 + 0, \quad \Delta B = -1;$$

$$S \quad 0 \rightarrow 0 + 0 + 0, \quad \Delta S = 0;$$

$$L_e \quad 0 \rightarrow 0 + (-1) + 1, \quad \Delta L_e = 0;$$

$$L_\mu \quad 0 \rightarrow 0 + 0 + 0, \quad \Delta L_\mu = 0;$$

$$\text{спин, } \hbar \quad 1/2 \rightarrow 0 + 1/2 + 1/2, \quad \Delta\hbar = 1/2.$$

Из приведенного расчета видно, что распад свободного протона привел бы к нарушению закона сохранения барионного заряда, а также спина.



2) Число  $\Delta N$  частиц, распавшихся за время  $t$ , может быть найдено из соотношения

$$\Delta N = N_0 (1 - e^{-t/\tau}),$$

$N_0$  – первоначальное число ядер (атомов) железа.

По условию задачи  $t \ll \tau$ . Поскольку при малых  $\alpha$ ,

$$\exp(-\alpha) \approx 1 - \alpha,$$

то выражение (1) можно представить в виде

$$\Delta N = N_0 \cdot t/\tau.$$

Масса распавшихся частиц

$$m_{\Delta N} = A \cdot \Delta N / N_A,$$

где  $A$  – атомная масса,  $N_A$  – число Авогадро.

Масса первоначального числа ядер

$$m_{\text{Fe}} = A \cdot N_0 / N_A. \quad (4)$$

Из уравнений (2) – (4) следует, что

$$m_{\text{Fe}} / m \Delta N = N_0 / \Delta N = \tau / t. \quad (5)$$

Подставив (3) в (5), получим

$$m_{\text{Fe}} = A \Delta N \tau / N_A t \approx 10^3 \text{ т.}$$

**Примечание.** Распад свободного протона в настоящее время экспериментально не обнаружен. Существующая оценка времени жизни свободного протона  $\approx 10^{32}$  лет расходится с выводом теории Великого объединения.

# **Лекция окончена**

Нажмите клавишу <ESC> для выхода