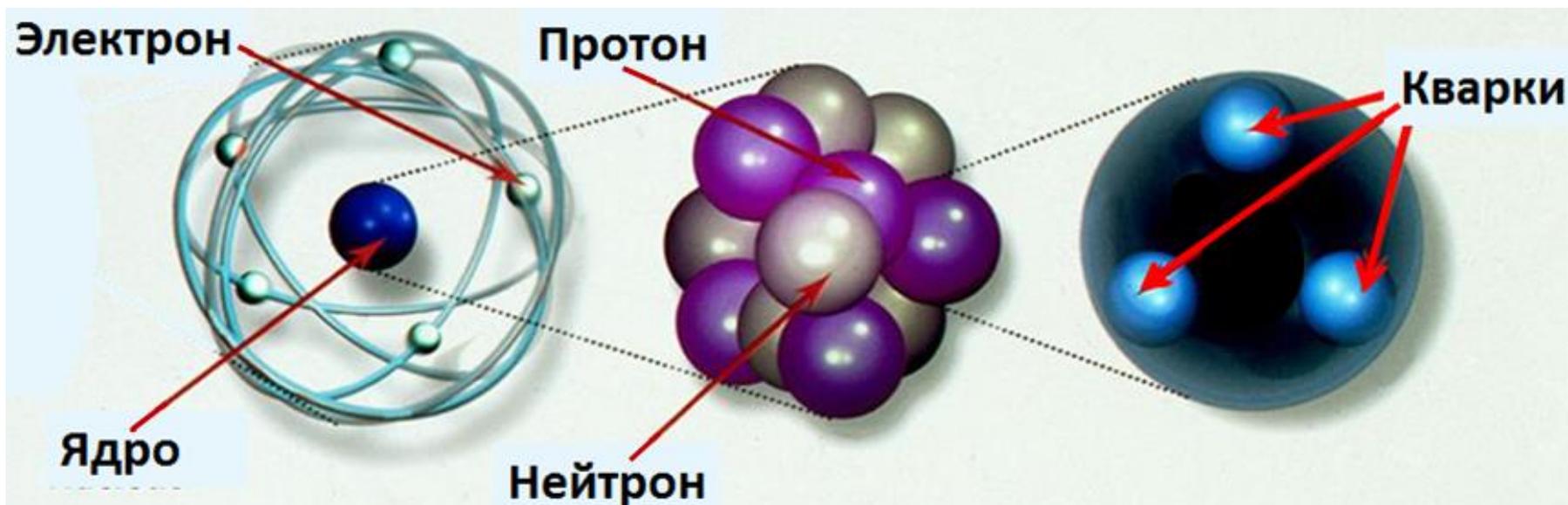


Элементарные частицы

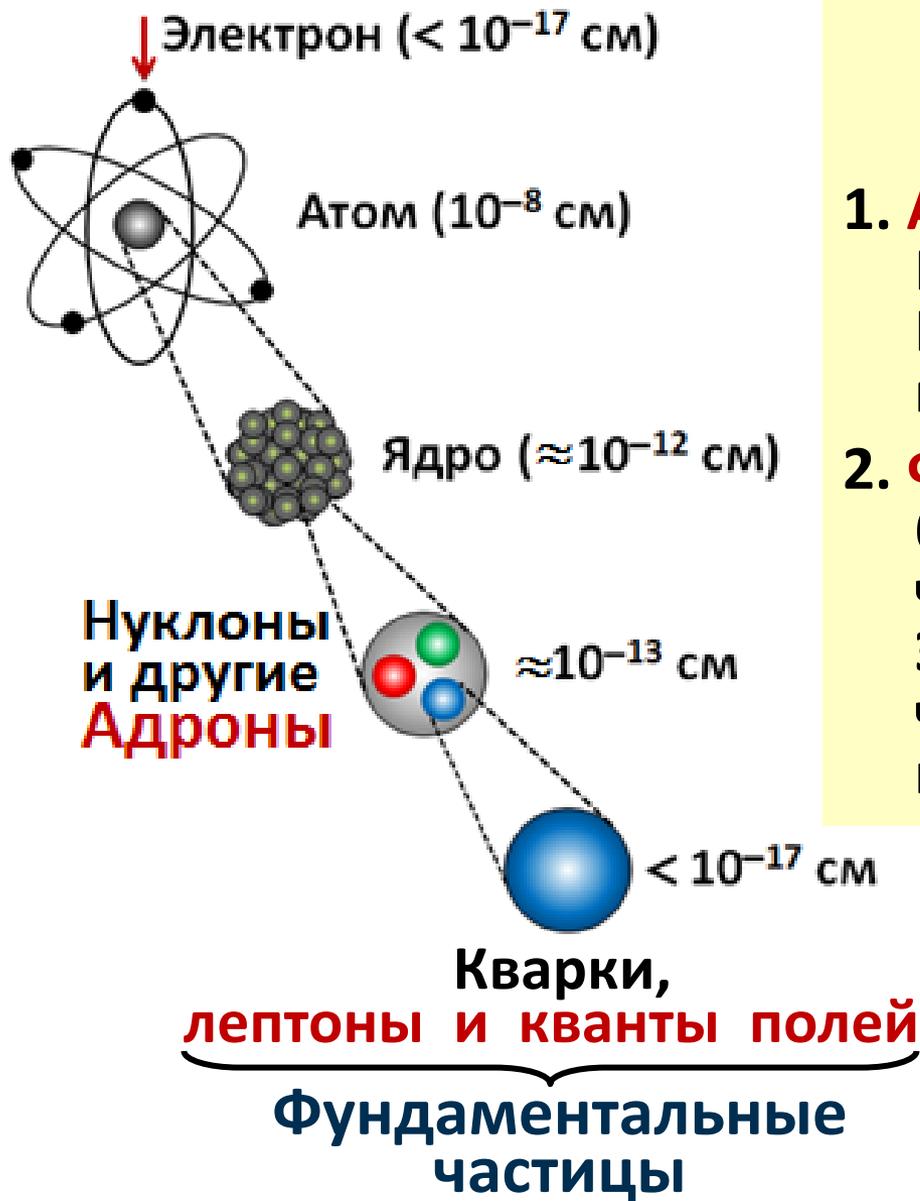


Темы лекции

1. Фундаментальные взаимодействия.
Переносчики и константы
четырёх традиционных взаимодействий.
2. Теории в мире частиц. Стандартная модель.
3. Квантовая электродинамика.
Диаграммы Фейнмана.
Виртуальные частицы.
4. Узлы фундаментальных взаимодействий.
5. Кварковые диаграммы.
6. Супермультиплеты и изомультиплеты
легчайших адронов. Их кварковая структура.

Приложение 1: Частицы-резонансы

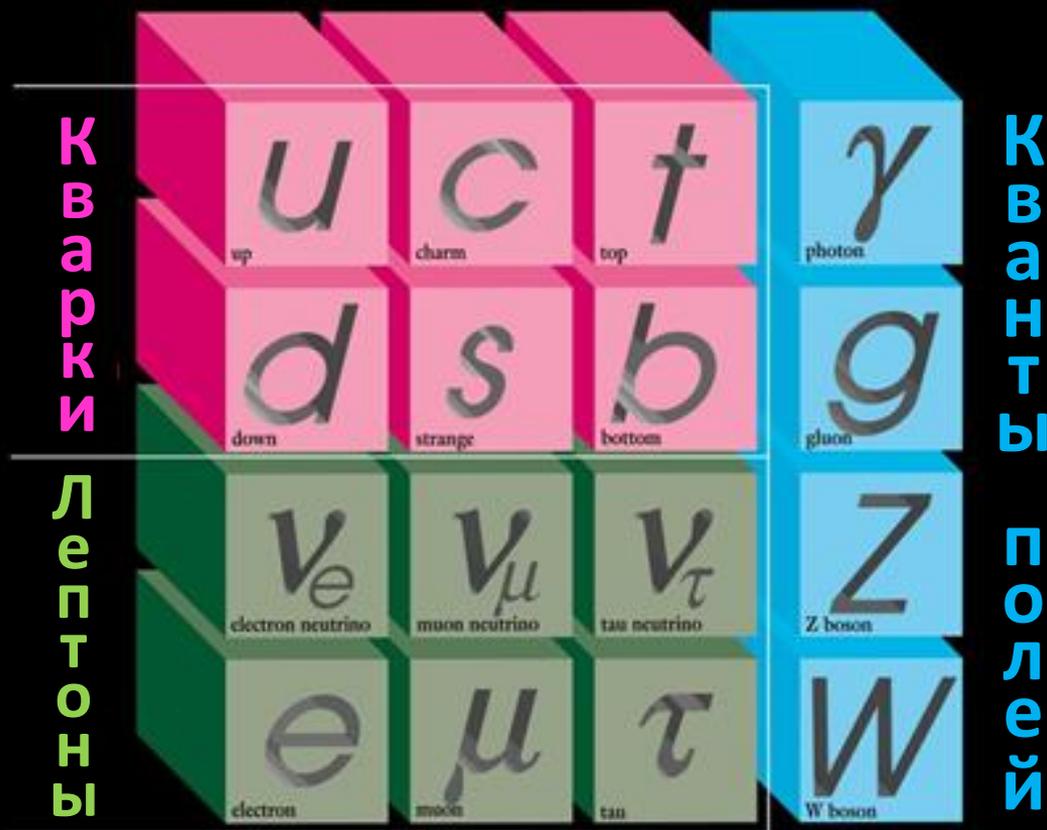
Приложение 2: 5-я сила - Хиггсовское взаимодействие



Различают
элементарные частицы
двух типов:

1. **Адроны**. Состоят из кварков. Размер адронов $\approx 10^{-13}$ см. К ним относятся нуклоны и пионы.
2. **Фундаментальные** или бесструктурные (точечные) частицы. Их размер $< 10^{-17}$ см. Это кварки, лептоны (в том числе электрон, нейтрино) и кванты полей (фотон и др.).

Фундаментальные частицы



К
в
а
н
т
ы
П
о
л
е
й



П
е
р
е
н
о
с
ч
и
к
и
в
з
а
и
м
о
д
е
л
ь
н
ы
в
з
а
и
м
о
д
е
л
ь
н
ы

I II III

Три поколения материи

Кванты четырёх традиционных физических полей:
Фундаментальные или калибровочные бозоны

Поле (взаимодействие)	Квант (бозон)	Масса (mc^2)	Спин	Радиус взаимо- действия
Сильное	ГЛЮОН (8 типов)	0	1	10^{-13} см
Электромагнитное	фотон	0	1	∞
Слабое	W^{\pm}, Z	80, 91 ГэВ	1	10^{-16} см
Гравитационное	гравитон	0	2	∞

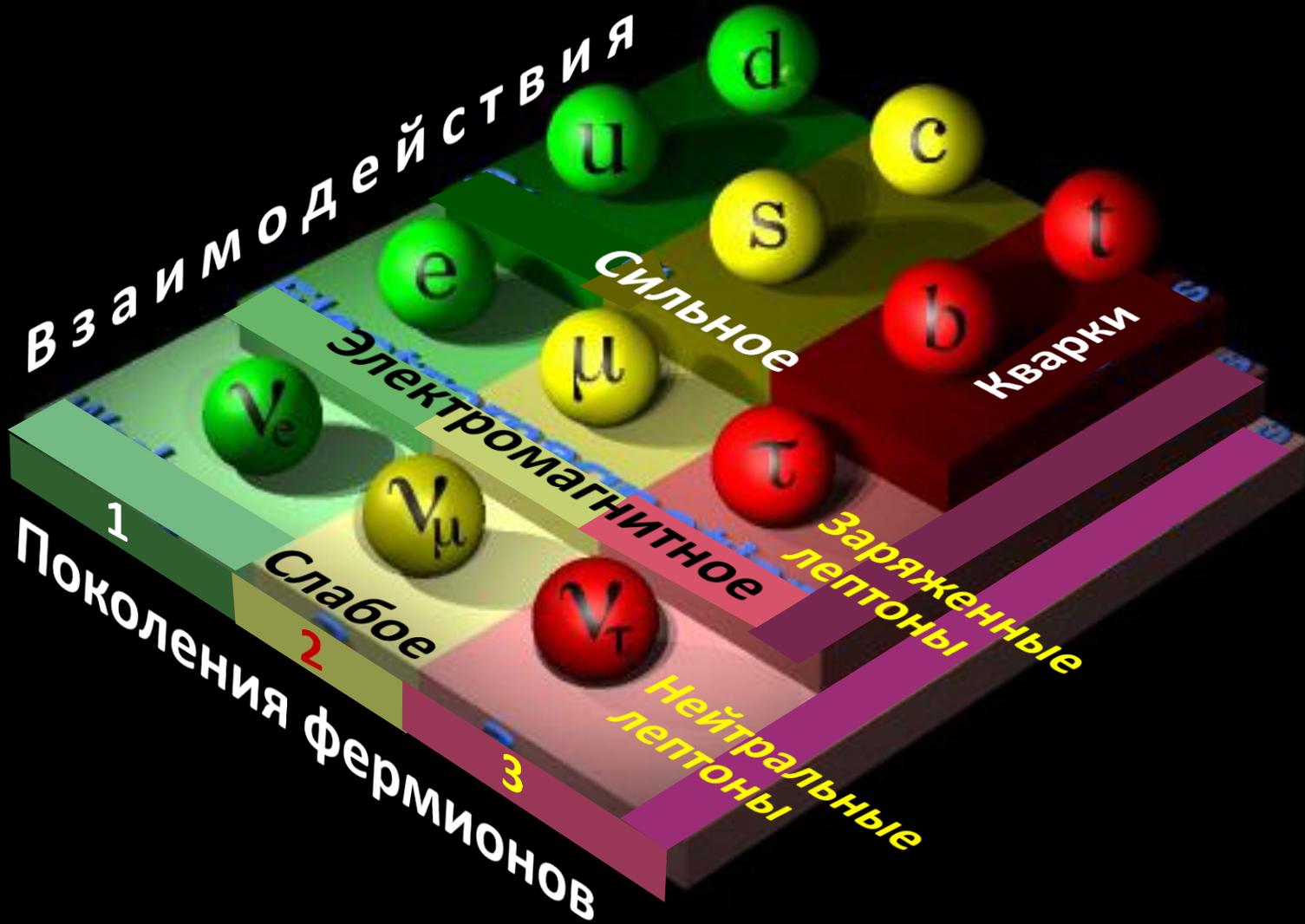
Пятое фундаментальное взаимодействие (*Хиггсовское*)
 обсуждается в **Приложении 2**

Участие фундаментальных фермионов в традиционных взаимодействиях

Взаимодействия

Фундаментальные фермионы	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитация
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: small; margin-right: 5px;">Имеют заряд</div> <div style="margin-left: 10px;"> <p>Кварки: d, u, s, c, b, t</p> <p>Лептоны: e, μ, τ ν_e, ν_μ, ν_τ</p> </div> </div>	Глюоны	Фотоны	W^\pm, Z	Гравитоны

Взаимодействия



1
2
3
Поколения фермионов

Слабое

Сильное

Электромагнитное

Кварки

Заряженные лептоны

Нейтральные лептоны

Типы традиционных фундаментальных взаимодействий. Константы этих взаимодействия

Тип взаимодействия	Теория	Константа	Радиус сил
Сильное	КХД	$\alpha_s \approx 1$	10^{-13} см
Электромагнитное Слабое	КЭД } ЭСМ	$\alpha_e \approx 1/137$ $\alpha_w \approx 10^{-6}$	∞ 10^{-16} см
Гравитационное		$\alpha_G \approx 10^{-38}$	∞

КЭД – квантовая электродинамика,

КХД – квантовая хромодинамика,

ЭСМ – электрослабая модель.

Эти теории
вместе с теорией
Хиггсовского
взаимодействия
составляют содержание
Стандартной Модели
элементарных
частиц

КЭД – квантовая электродинамика
(теория электромагнитного взаимодействия)
Nobel Prize 1965 г., Томонага, Швингер, Фейнман

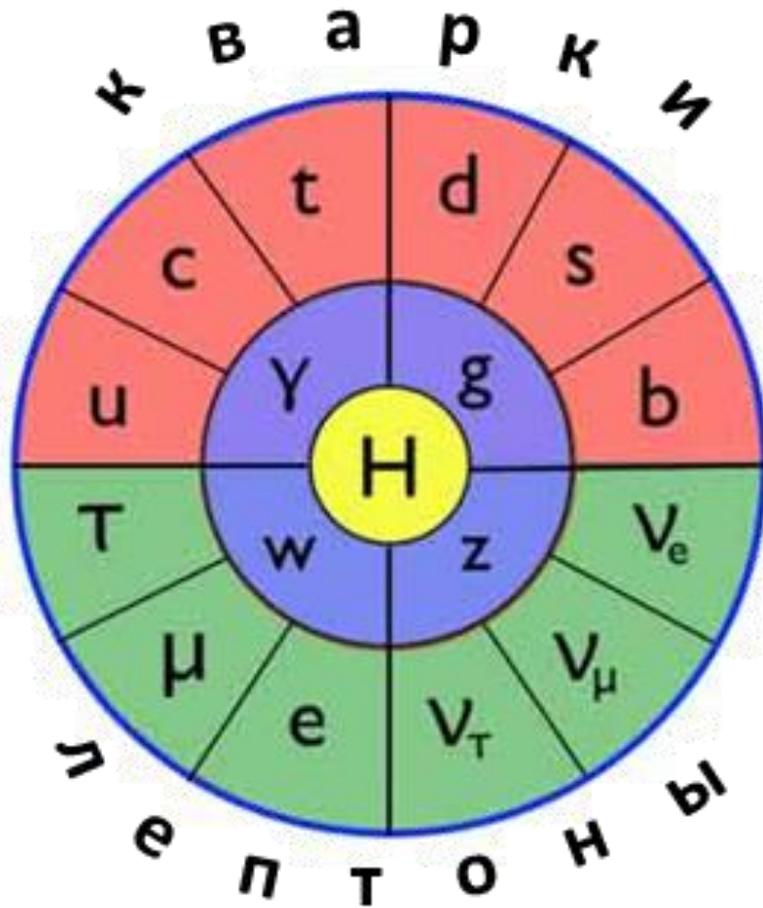
Магнитный момент электрона μ_e в магнетонах Бора (μ_B):

1,001159652181(4) КЭД
1,001159652180(91±26) Эксперимент

КХД – квантовая хромодинамика
(теория сильного взаимодействия)

ЭСМ – электрослабая модель
(теория объединённого слабого и
электромагнитного взаимодействия)
Nobel Prize 1979 г., Вайнберг, Глэшоу, Салам

Частицы Стандартной Модели элементарных частиц



Кварки

Лептоны

Кванты полей

H Бозон Хиггса

Смысл константы взаимодействия α :

Эта константа безразмерна и является характеристикой интенсивности фундаментального взаимодействия. Сила и энергия взаимодействия двух частиц пропорциональны α , а вероятность взаимодействия пропорциональна α^2 .

Пример:

Константа α_e электромагнитного взаимодействия. Рассмотрим кулоновское взаимодействие двух элементарных зарядов e :

$$F_{\text{кул}} = \frac{e^2}{r^2} = \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \frac{\hbar c}{r^2} = \alpha_e \frac{\hbar c}{r^2}.$$

$$E_{\text{кул}} = \frac{e^2}{r} = \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \frac{\hbar c}{r} = \alpha_e \frac{\hbar c}{r}.$$

Здесь безразмерная величина $\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ и есть

константа электромагнитного взаимодействия.

$$\hbar c = 197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм} \approx 200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}.$$

Численное выражение константы α :

1. Электромагнитное взаимодействие:

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137},$$

где e – величина элементарного электрического заряда (протона, электрона, позитрона).

2. Сильное взаимодействие:

$$\alpha_s = \frac{(\text{ядерный заряд протона})^2}{\hbar c} \approx 1.$$

3. Слабое взаимодействие (будет уточнено позже) :

$$\alpha_w = \frac{(\text{слабый заряд протона})^2}{\hbar c} \approx 10^{-6}.$$

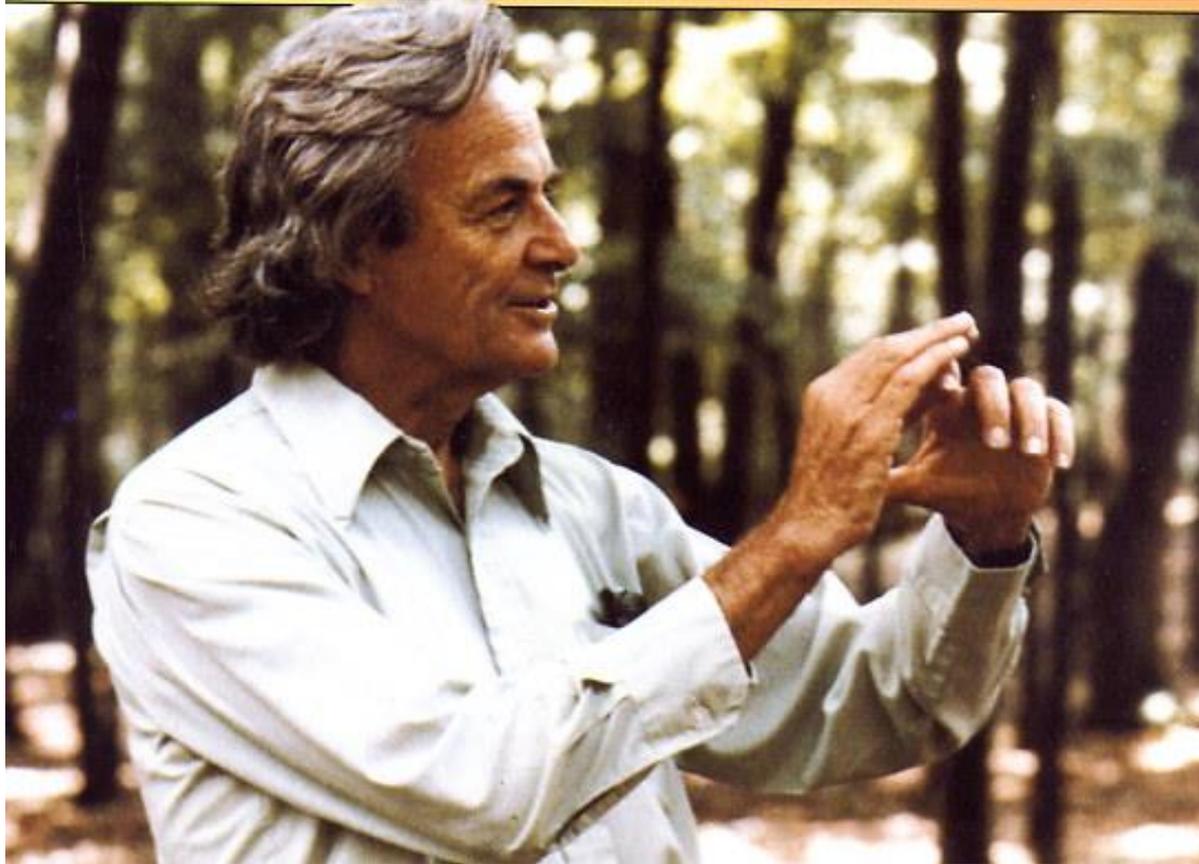
4. Гравитационное взаимодействие:

$$\alpha_G = \frac{(\text{гравитационный заряд протона})^2}{\hbar c} \approx 10^{-38}.$$

Гравитационный заряд протона есть $\sqrt{G} \cdot m_p$,
где G – гравитационная константа Ньютона,
а m_p – масса протона.

Диаграммы Фейнмана

Электромагнитное взаимодействие



Richard Feynman
(1918 – 1988), Nobel Prize 1965

Фейнман:

Квантовая электродинамика
даёт совершенно абсурдное
с точки зрения здравого смысла
описание Природы.

И оно полностью соответствует эксперименту.

Я не могу объяснить,
почему Природа ведёт себя так, а не иначе.

Фейнман:

Квантовая электродинамика (КЭД)

«описывает все явления физического мира за исключением гравитации и радиоактивных явлений.

**Итак, что у нас остается помимо гравитации и радиоактивности (более точно, ядерной физики)?
Бензин, сгорающий в автомобильных двигателях,
пена и пузыри, твердость соли и меди,
упругость стали.**

**Да и биологи пытаются при помощи химии
понять как можно больше свойств живого,
а теория, стоящая за химией,
— это квантовая электродинамика.**

**Квантовая электродинамика является также
прототипом новых теорий,
которые пытаются объяснить ядерные явления».**

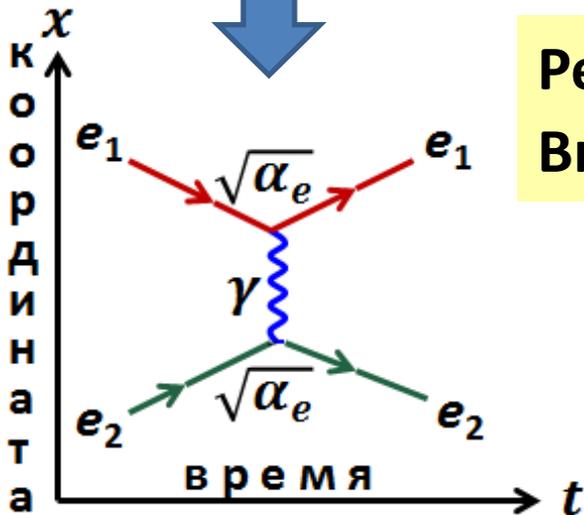
Диаграммы Фейнмана –

универсальный графический способ изображения развития во времени превращения элементарных частиц в терминах элементарных актов взаимодействия, дополненный алгоритмом расчёта вероятности этих превращений.

Своеобразие фейнмановской техники состоит в том, что с одной стороны эта техника является громоздкой и сложной, а с другой – внешней стороны – простой и наглядной.

Мы будем использовать эту вторую особенность диаграммной техники.

Взаимодействие
двух электронов
в плоскости рисунка:



Это диаграмма
Фейнмана!

Из соотношения неопределённости
«время-энергия» $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$
следует, что виртуальная частица
(переносчик взаимодействия)
существует в течение времени

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}$$

пролетает расстояние не большее

$$\Delta r = c \cdot \Delta t \approx \frac{\hbar c}{\Delta E}$$

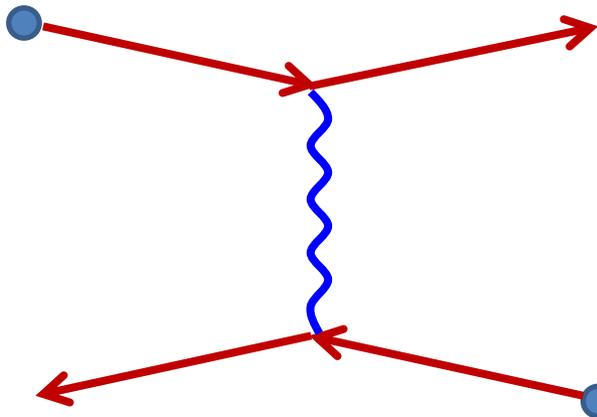
Реальная частица: $E^2 - (pc)^2 = m^2 c^4$.

Виртуальная частица: $E^2 - (pc)^2 \neq m^2 c^4$.

По каждой диаграмме по правилам
Фейнмана вычисляется
амплитуда вероятности A и затем
дифференциальное сечение:

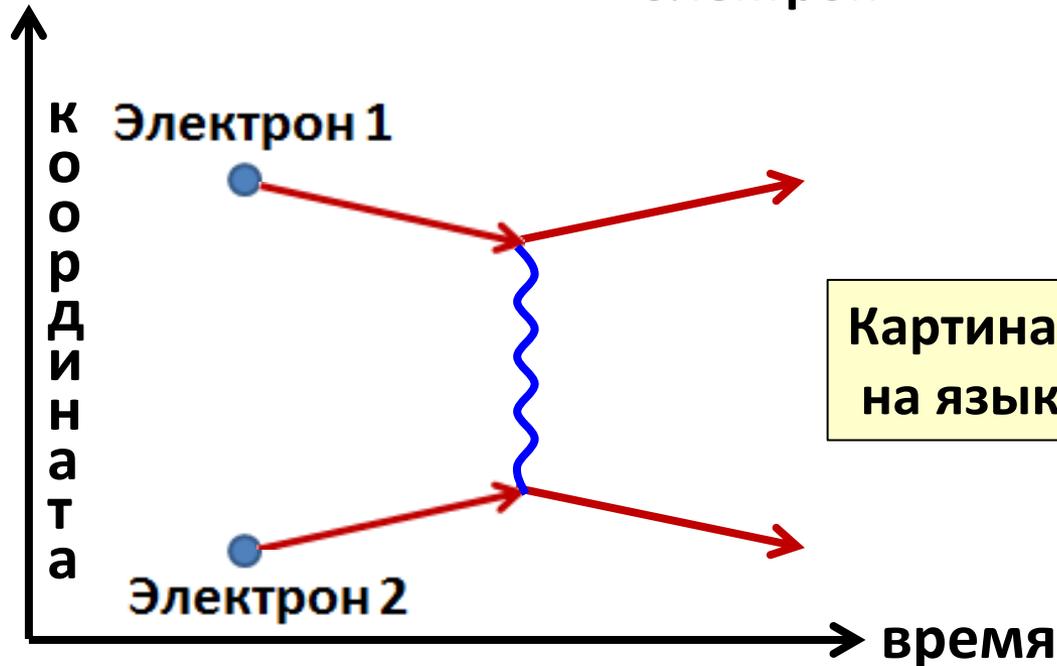
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |A|^2$$

Электрон 1



Электрон 2

Картина взаимодействия
двух электронов,
летающих навстречу друг другу
в плоскости рисунка.
Это не диаграмма Фейнмана.



Картина того же взаимодействия
на языке **диаграммы Фейнмана**

Радиус a взаимодействия зависит от массы m виртуальной частицы, переносящей это взаимодействие:

Соотношение неопределённости: $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$

Расстояние a , которое может преодолеть релятивистская виртуальная частица с массой m не больше:

$$a \approx c \cdot \Delta t = c \cdot \frac{\hbar}{\Delta E \approx mc^2} = \frac{\hbar c}{mc^2}.$$

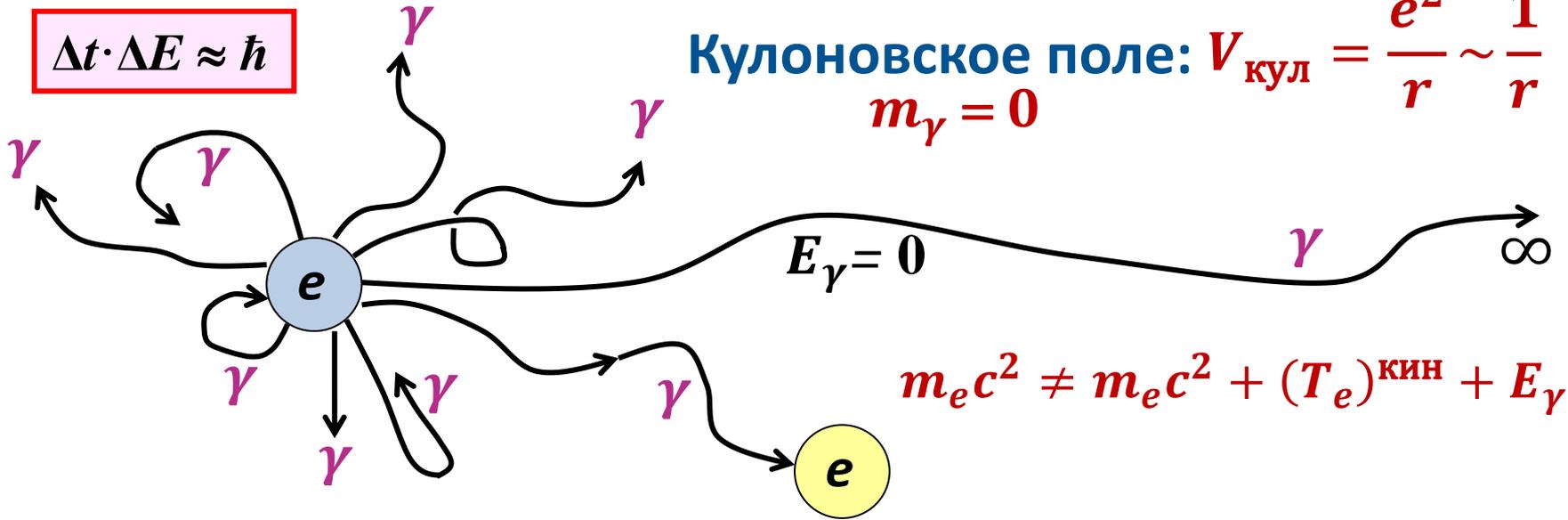
Итак, для радиуса взаимодействия имеем формулу:

$$a \approx \frac{\hbar c}{mc^2}$$

Два примера виртуальных частиц:

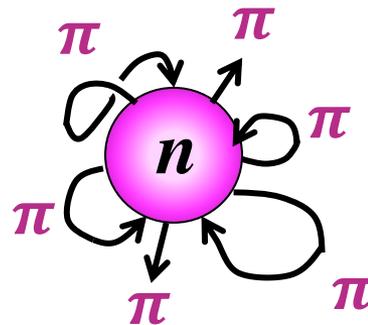
$$\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$$

Кулоновское поле: $V_{\text{кул}} = \frac{e^2}{r} \sim \frac{1}{r}$
 $m_\gamma = 0$



$$m_e c^2 \neq m_e c^2 + (T_e)^{\text{кин}} + E_\gamma$$

Ядерное (мезонное) поле: $V_{\text{ядерное}} \sim \frac{\exp(-r/a)}{r}$
 $m_\pi c^2 \approx 140 \text{ МэВ} \neq 0$



$$a_{\text{яд}} = \frac{\hbar}{m_\pi c} \approx 1,5 \text{ Фм}$$

$$a_{\text{эм}} = \frac{\hbar}{m_\gamma c} = \infty$$

Самый важный фактор, определяющий вероятность процесса, – константа взаимодействия α .

Амплитуда вероятности A_1 простейшего процесса с одним узлом из трёх линий

(т.е. амплитуда вероятности испускания или поглощения виртуальной частицы), пропорциональна $\sqrt{\alpha}$,

т. е. $A_1 \sim \sqrt{\alpha}$. Амплитуда вероятности A_2 двухузловой диаграммы (испускание и затем поглощение виртуальной частицы) в соответствии с правилом произведения вероятностей

даётся соотношением $A_2 \sim \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\alpha} = \alpha$.

Для диаграммы с N узлами амплитуда вероятности

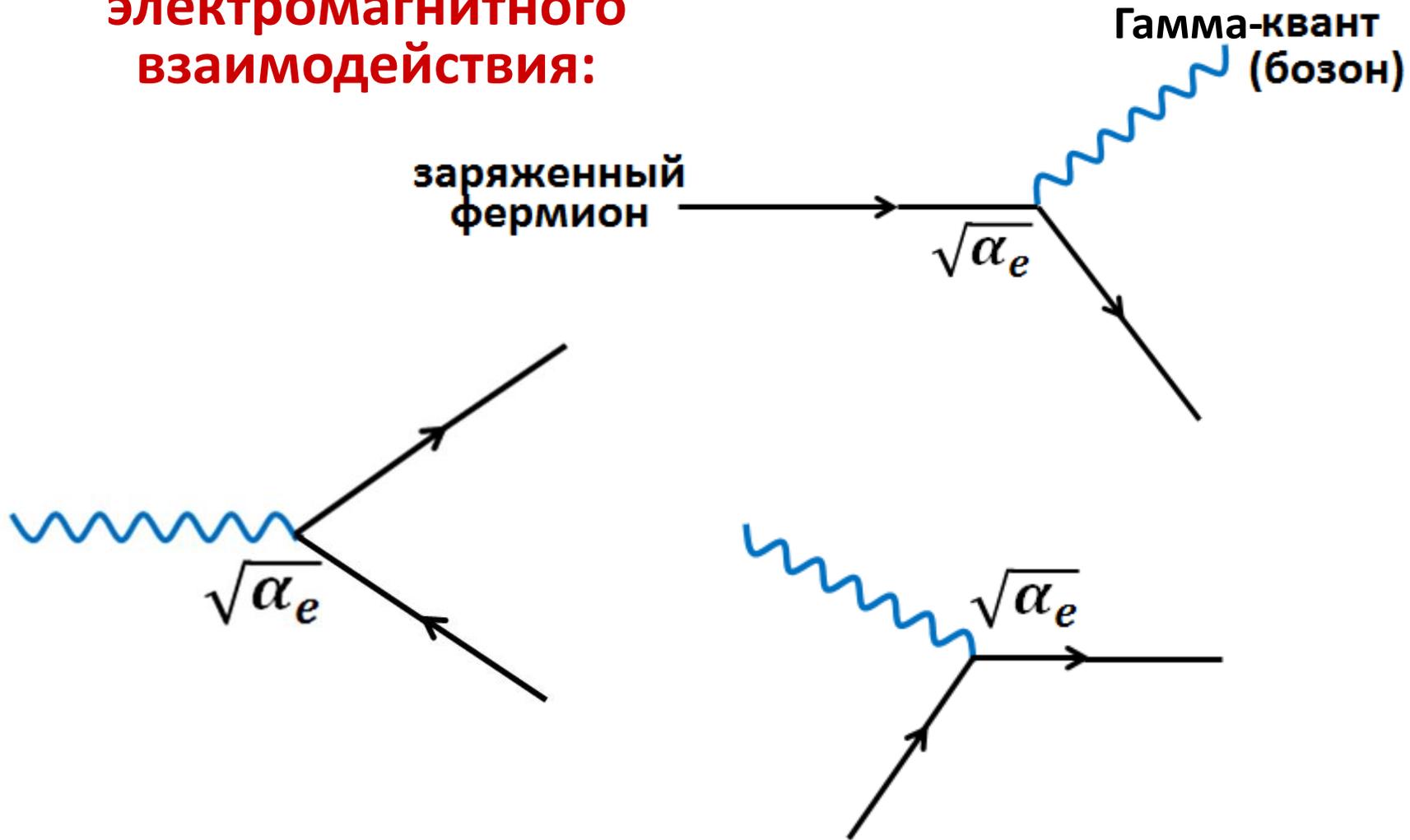
$A_N \sim (\sqrt{\alpha})^N$. Таким образом, для амплитуды A_{ee} электрон-электронного рассеяния, описываемой диаграммой с двумя узлами, имеем

$$A_{ee} \sim \sqrt{\alpha_e} \cdot \sqrt{\alpha_e} = \alpha_e.$$

Сама вероятность этого процесса

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{ee} = |A_{ee}|^2 \sim (\alpha_e)^2 = \left(\frac{e^2}{\hbar c}\right)^2 \approx \left(\frac{1}{137}\right)^2$$

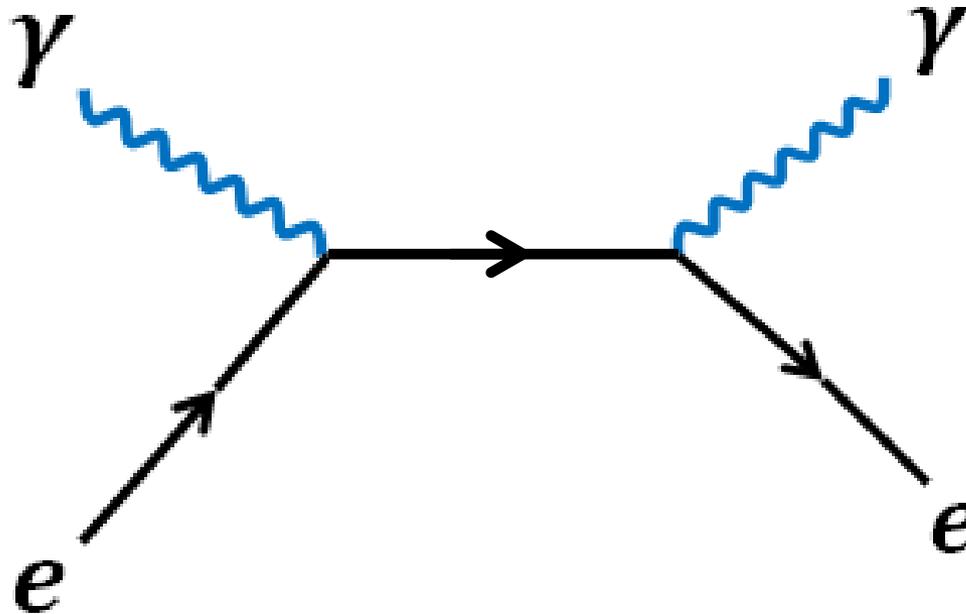
Фундаментальный узел электромагнитного взаимодействия:



Эффект Комптона –

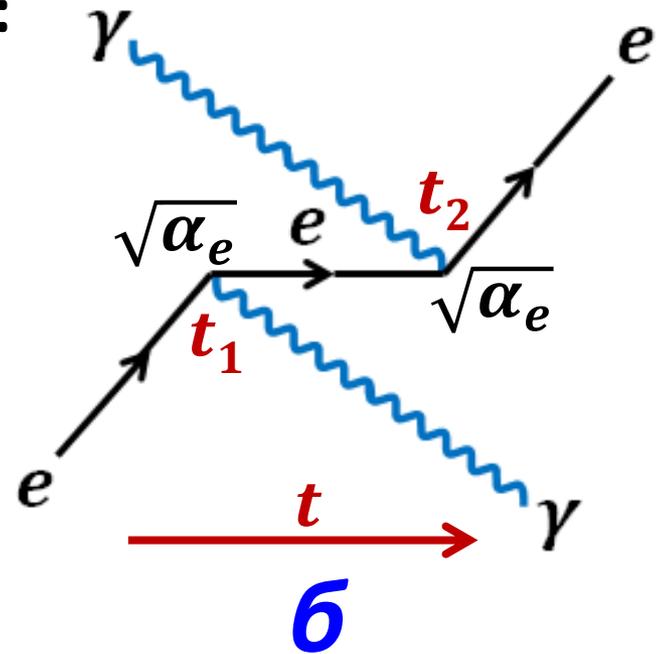
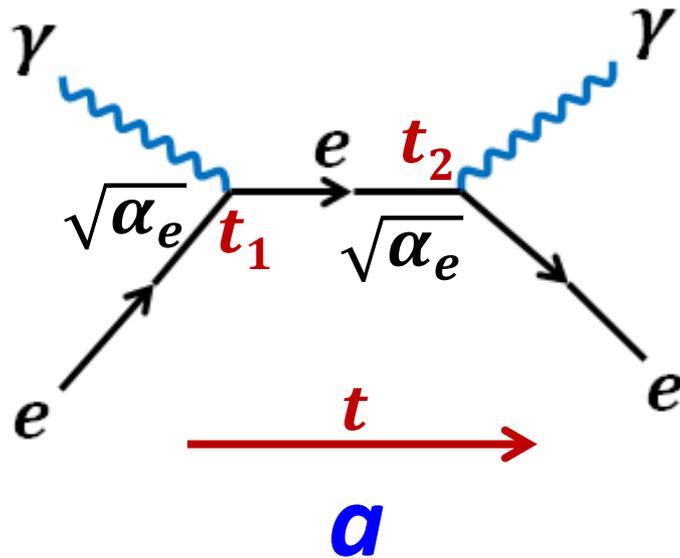
Рассеяние фотона на свободном электроне.

Один из двух возможных вариантов этого процесса:



Эффект Комптона

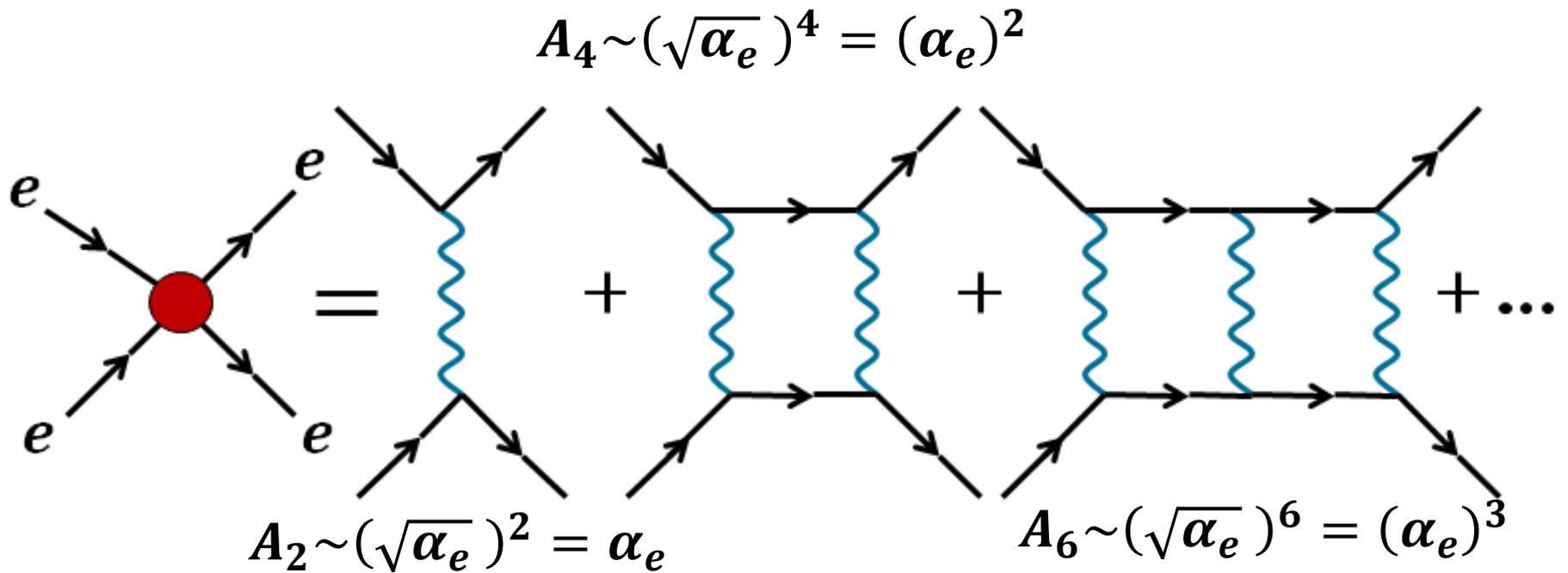
Возможны две диаграммы:



$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{КОМПТОН}} = |A|^2 = |A_a + A_b|^2 \sim (\alpha_e)^2 \sim e^4$$

$$A_a = A_b \sim (\sqrt{\alpha_e})^2 = \alpha_e$$

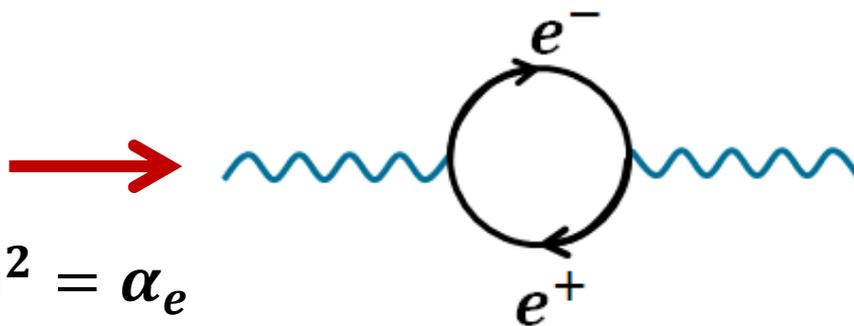
Рассеяние электрона на электроне



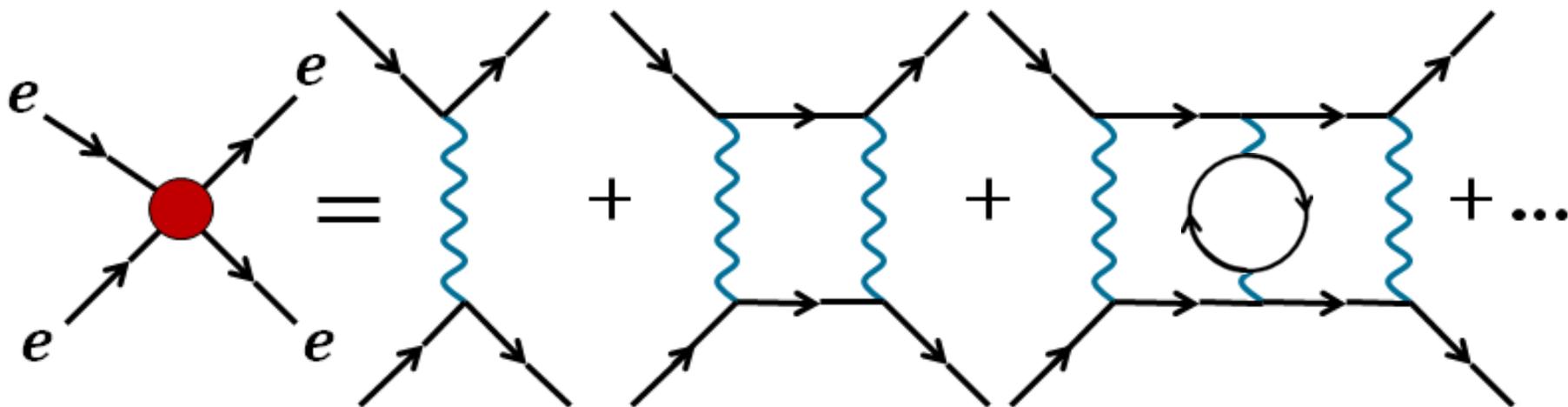
Рассеяние электрона на электроне

Возможна следующая
«петлевая» диаграмма:

Её амплитуда $A_2 \sim (\sqrt{\alpha_e})^2 = \alpha_e$



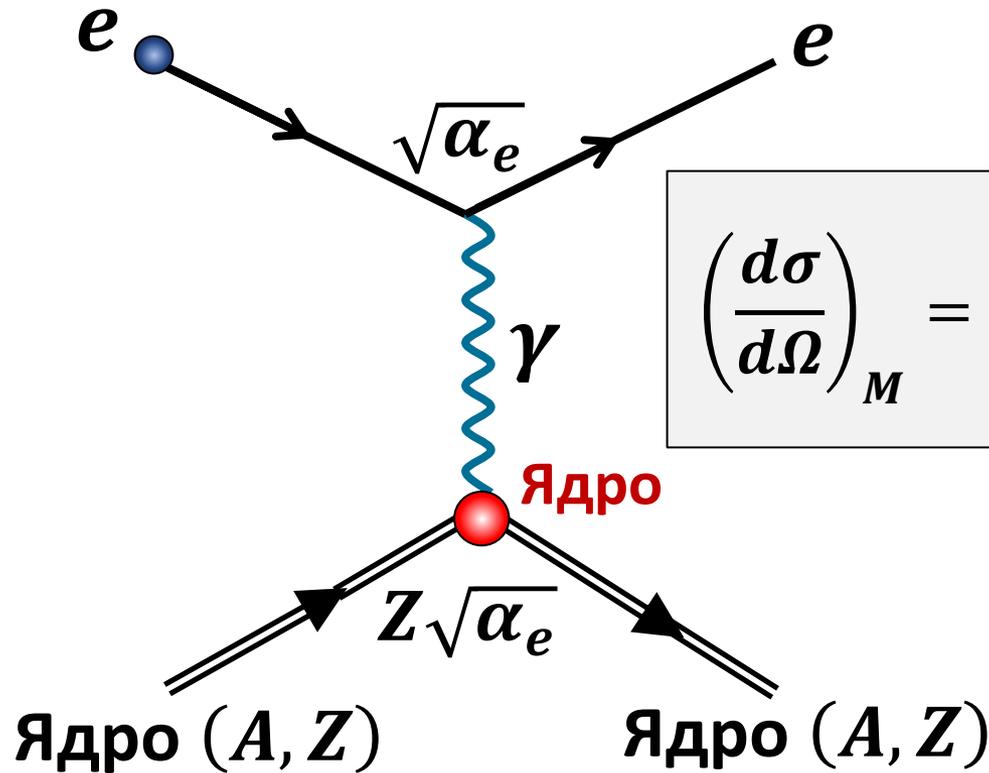
$$A_4 \sim (\sqrt{\alpha_e})^4 = (\alpha_e)^2$$



$$A_2 \sim (\sqrt{\alpha_e})^2 = \alpha_e$$

$$A_8 \sim (\sqrt{\alpha_e})^8 = (\alpha_e)^4$$

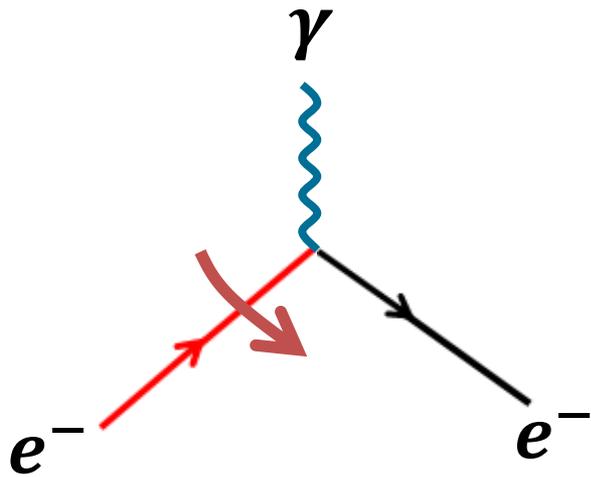
Рассеяние электрона на ядре



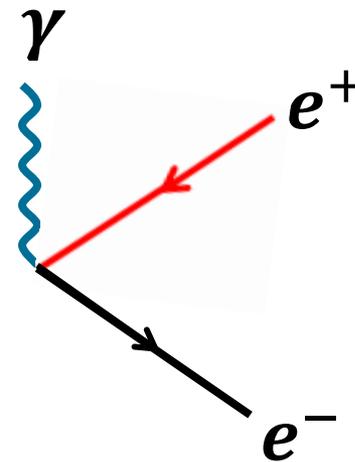
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \left(\frac{Z_{\text{я}}e^2}{2T_e}\right)^2 \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim (Z\sqrt{\alpha_e} \cdot \sqrt{\alpha_e})^2 \sim Z^2 e^4$$

Стрелки на линиях частиц и античастиц направлены в противоположные стороны



Рассеяние электрона



Рождение пары e^-e^+



Фейнман:

**... три основных действия,
из которых возникают все явления,
связанные со светом и электронами:**

Действие 1:

Фотон летит из одного места в другое.

Действие 2:

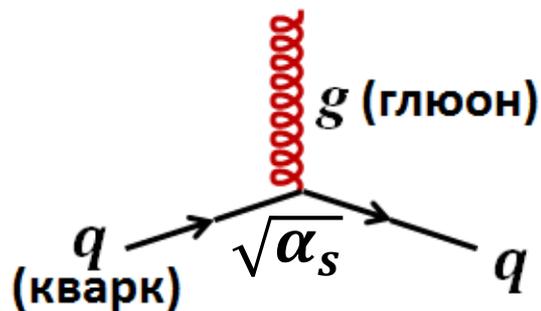
Электрон летит из одного места в другое.

Действие 3:

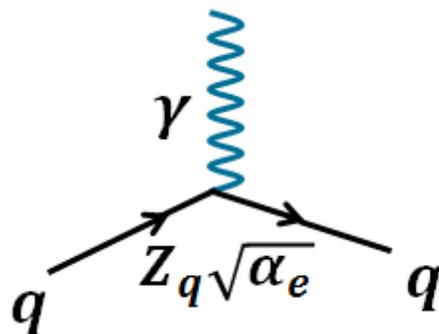
Электрон испускает или поглощает фотон.

**Трудно поверить, что почти все видимое
бесконечное разнообразие Природы
проистекает из монотонного
повторения трёх основных действий. Но это так.**

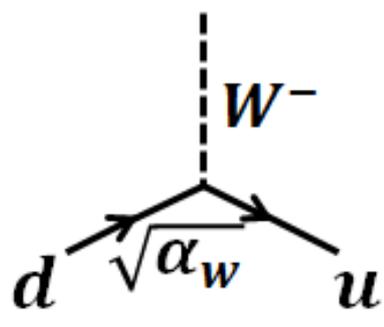
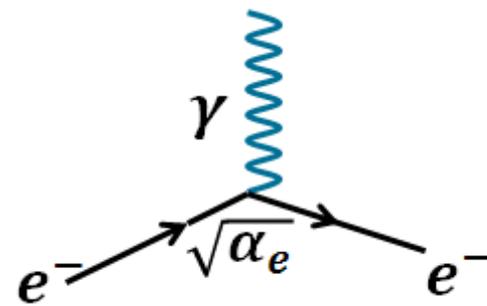
Типичные узлы традиционных фундаментальных взаимодействий



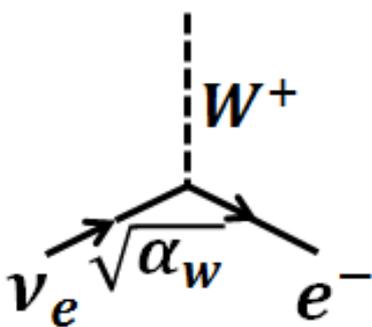
Сильное



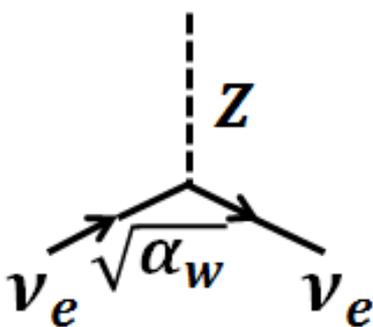
Электромагнитное



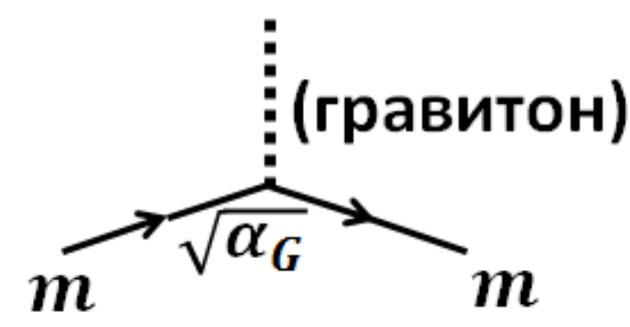
Слабое



Слабое



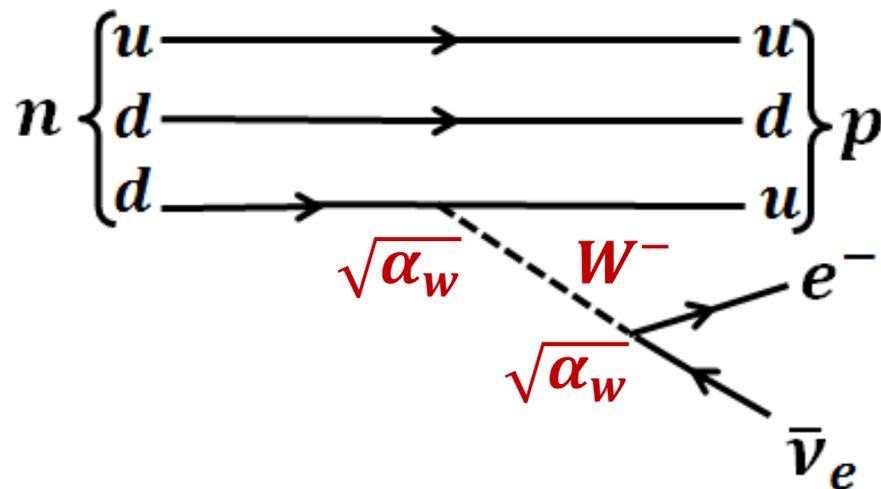
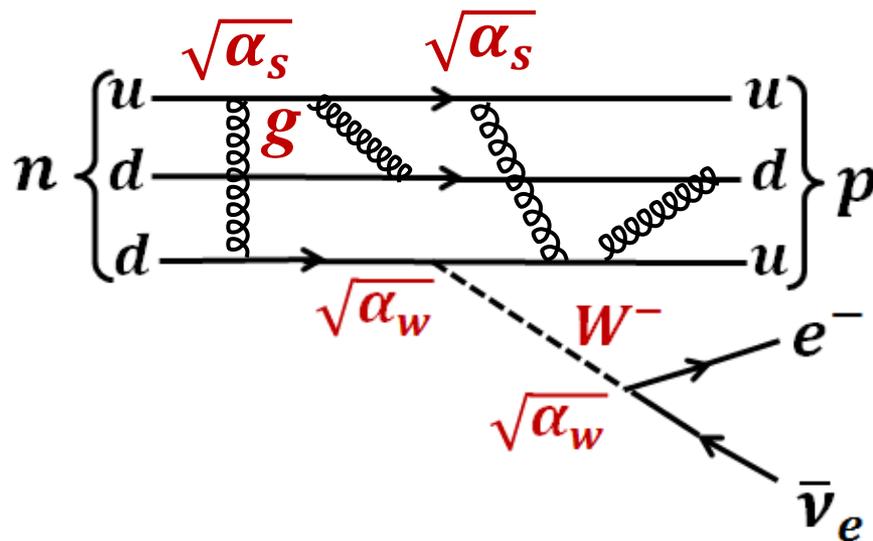
Слабое



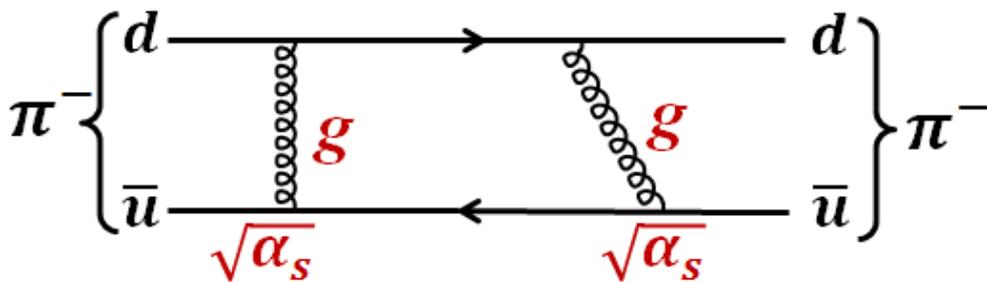
Гравитационное

Кварковые диаграммы

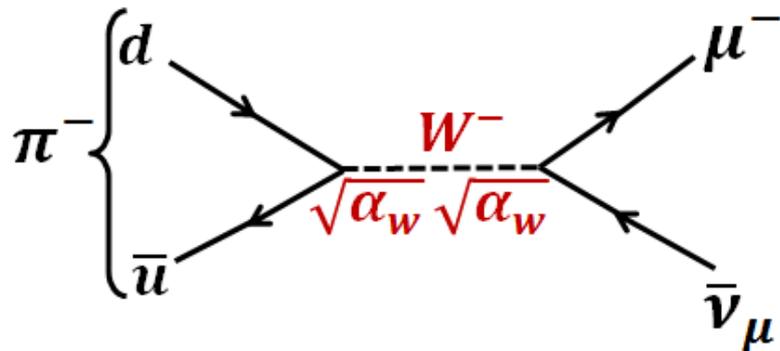
Распад нейтрона



Нераспавшийся отрицательный пион



Распад пиона



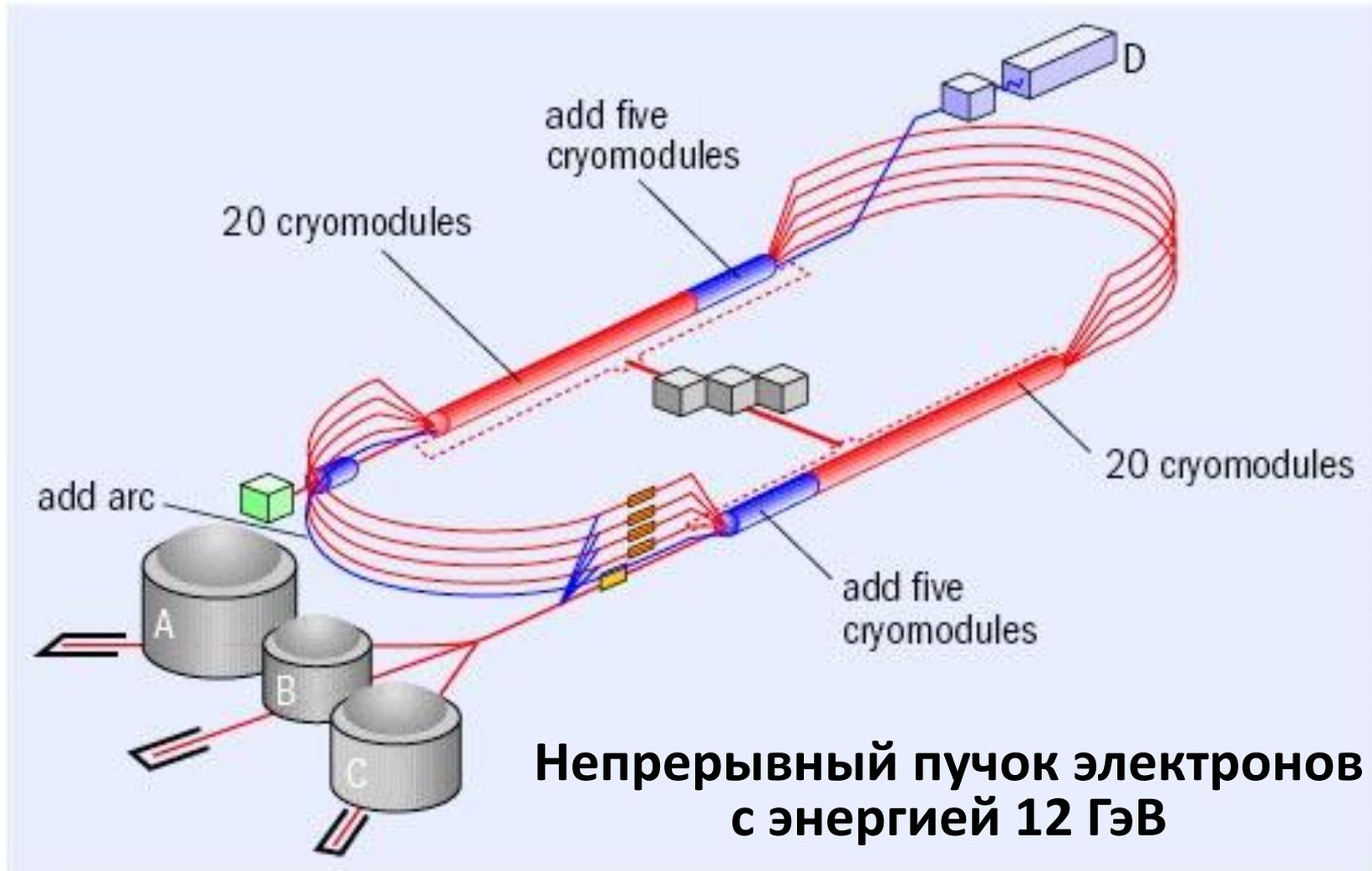
Сотни адронов,
к которым относятся *протон, нейтрон* и *π -мезоны*,
протяженны (не точечны). Их размер ≈ 1 Фм.
Кроме того, они имеют возбуждённые состояния
(так в настоящее время известно
около **30** возбуждённых состояний нуклона).
Это свидетельствует о сложной структуре адронов,
т. е. о том, что они состоят из более мелких частиц.
Различные состояния относительного движения
этих более фундаментальных частиц внутри адрона
и формируют его спектр возбуждения.
Этими составляющими адронов и являются кварки.

Сечение реакции

фотон + протон \rightarrow (возбуждение протона)*



Схема электронного ускорителя JLAB вблизи Вашингтона (США)

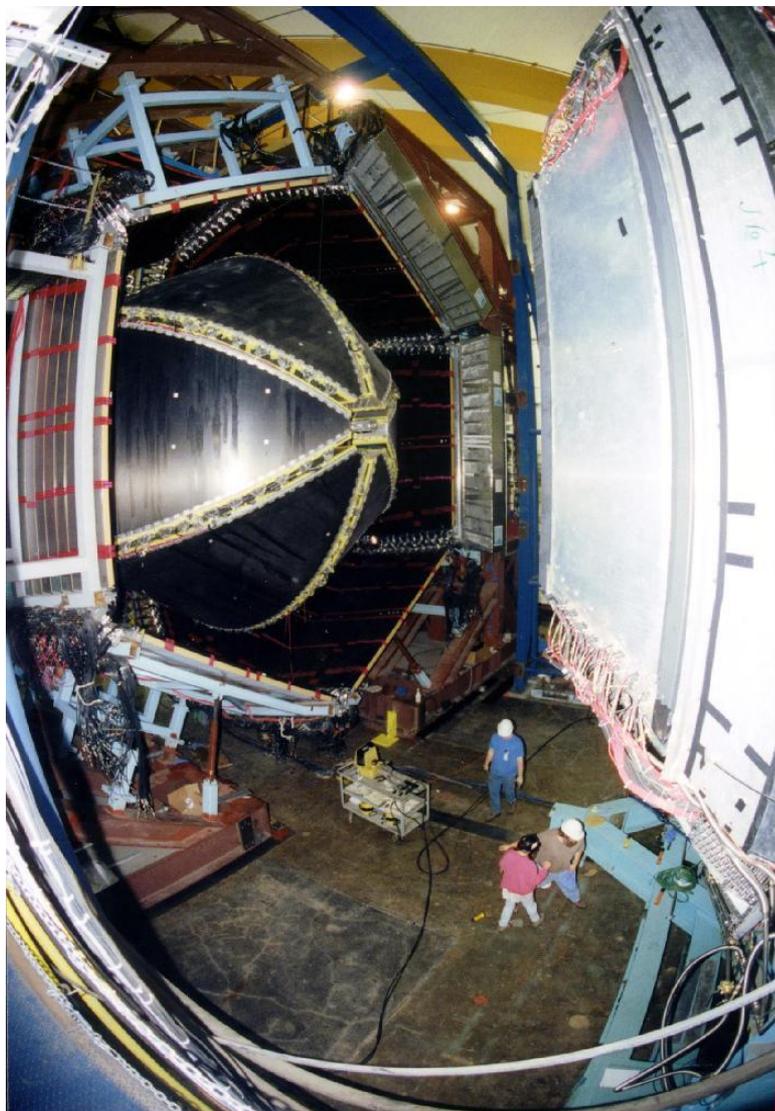


**Непрерывный пучок электронов
с энергией 12 ГэВ**

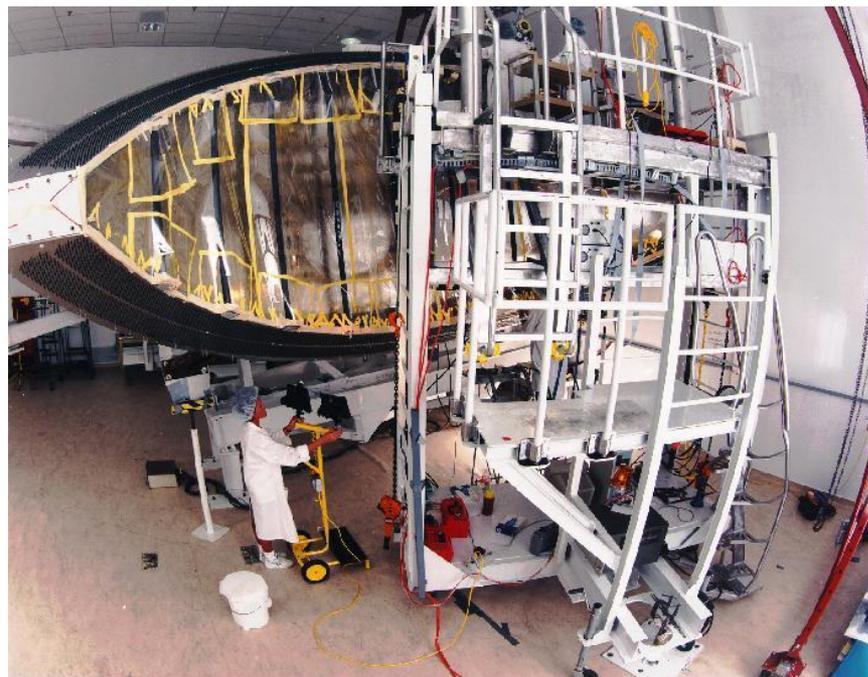
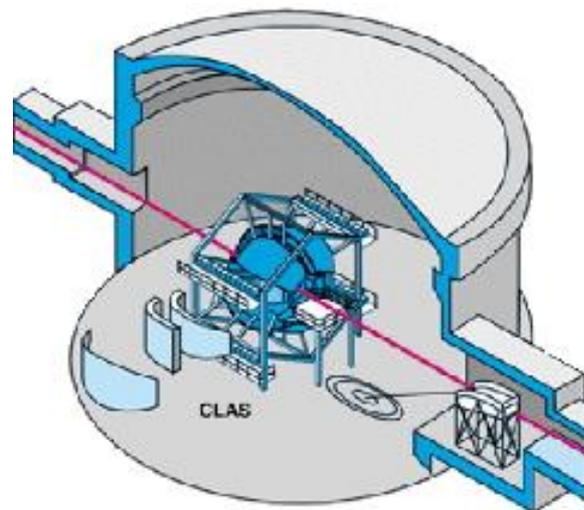
JLAB сверху



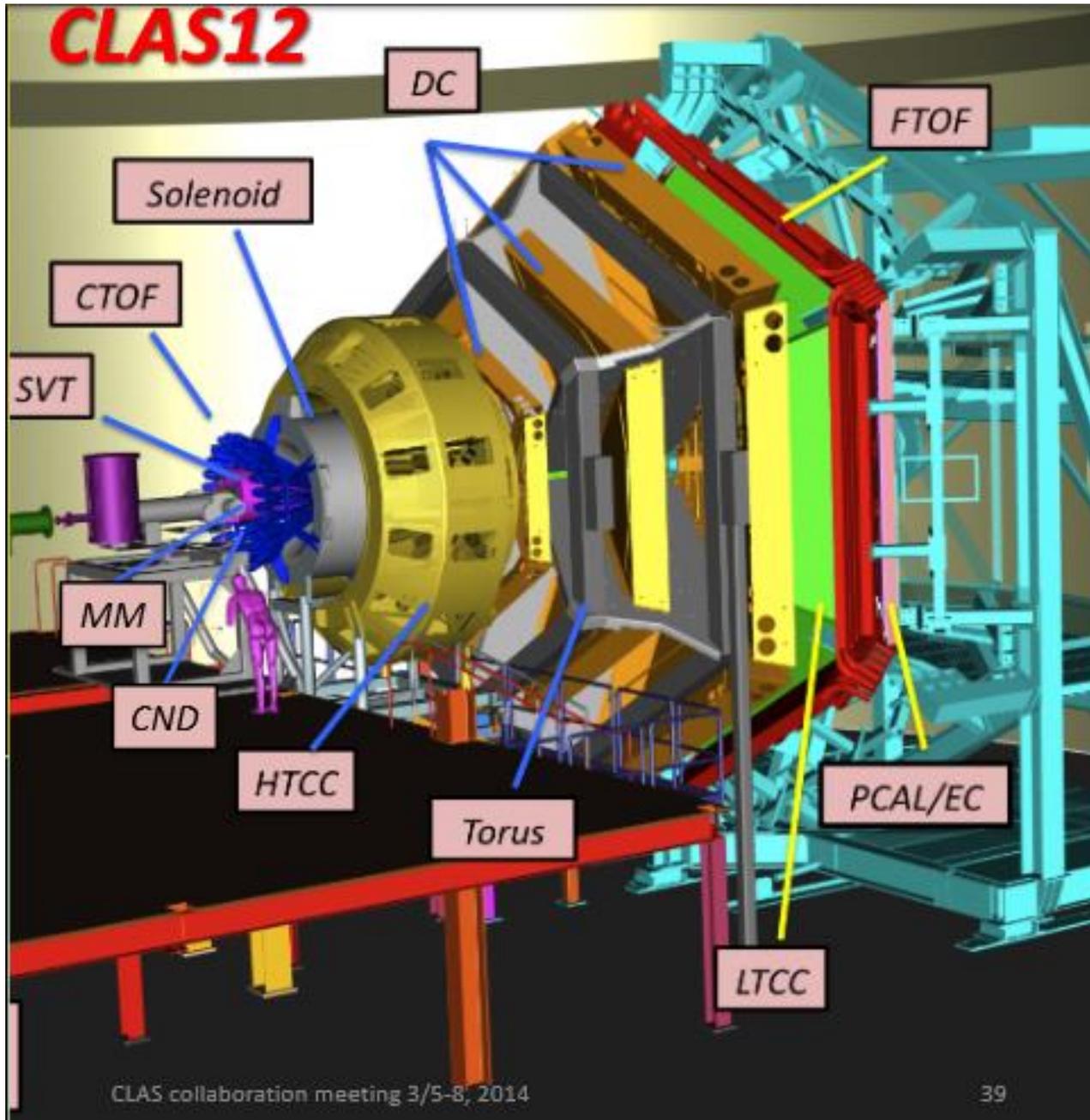
Монтаж детектора CLAS в JLAB



Пучок электронов →



CLAS12



К кварковой модели привели, в основном, два обстоятельства:

1. Барионы и мезоны образуют группы (так называемые **супермультиплеты**) по **8-10** частиц с одинаковой спин-чётностью, расположенные в ограниченном интервале масс.
2. Характеристики адронов связаны **правилом Накано – Нишиджимы – Гелл-Манна (ННГ) – 1953 г.:**

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2} = I_3 + \frac{Y}{2},$$

где Q – электрический заряд адрона (в e),
 I_3 – проекция изоспина, B – барионный заряд,
 S – странность, $Y = B + S$ – **гиперзаряд**.

Правило **ННГ** остаётся справедливым и с учётом квантовых чисел C (очарование), B (bottomness) и T (top), т. е. при

$$Y = B + S + C + B + T.$$

Характеристики кварков.

Для кварков $J^P = 1/2^+$ и барионный заряд $B = 1/3$

Характеристика	Тип кварка или аромат (flavor)					
	<i>d</i>	<i>u</i>	<i>s</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
Электрический заряд <i>Q</i>	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$
Изоспин <i>I</i>	$1/2$	$1/2$	0	0	0	0
Проекция изоспина I_3	$-1/2$	$+1/2$	0	0	0	0
Странность <i>S</i>	0	0	-1	0	0	0
Charm <i>C</i>	0	0	0	$+1$	0	0
Bottomness <i>B</i>	0	0	0	0	-1	0
Topness <i>T</i>	0	0	0	0	0	$+1$
Масса (mc^2)	$4,7 \pm 0,3$ МэВ	$2,2 \pm 0,4$ МэВ	93 ± 8 МэВ	$1,27 \pm 0,02$ ГэВ	$4,2 \pm 0,03$ ГэВ	$173,0 \pm 0,2$ ГэВ

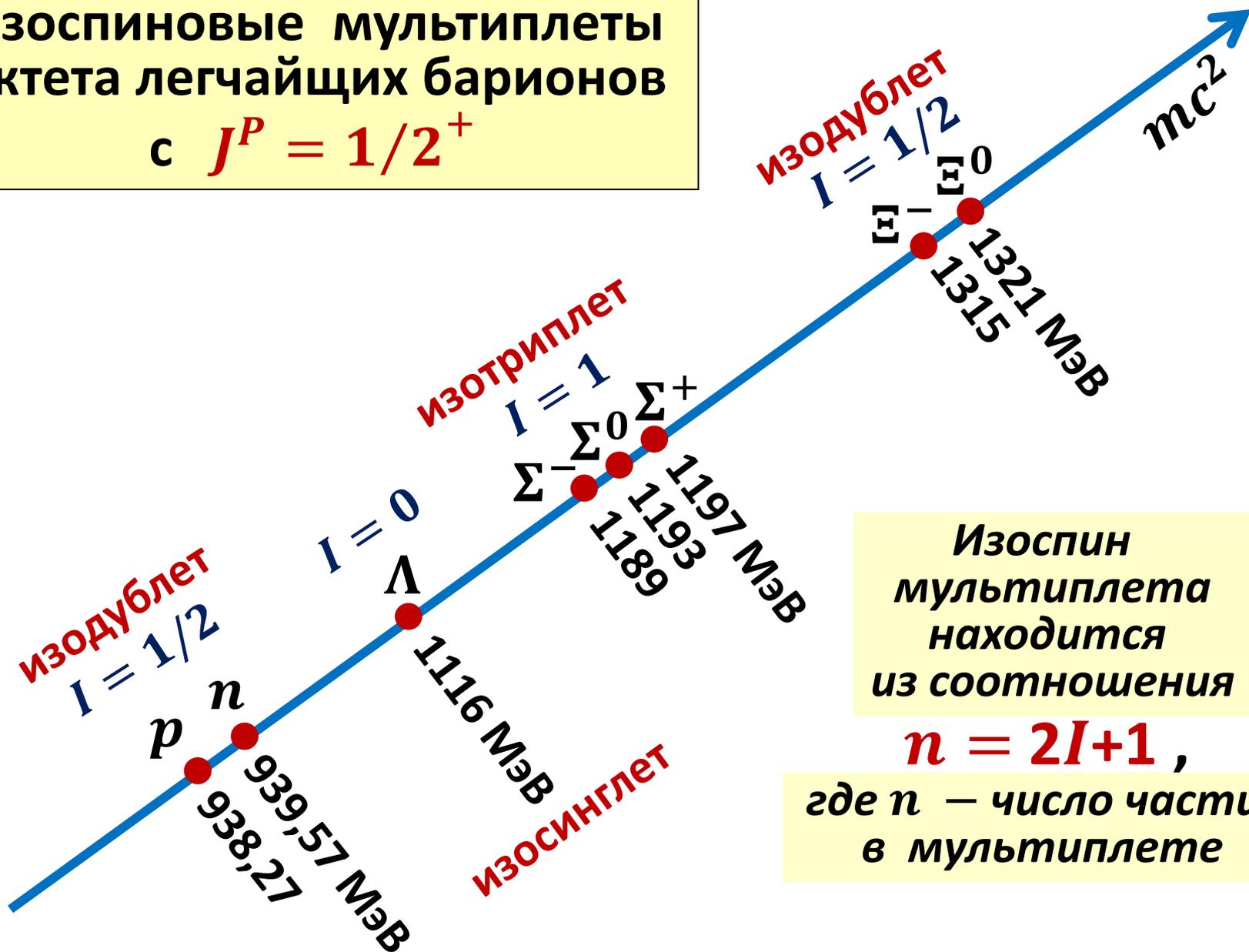
Октет легчайших барионов с $J^P = 1/2^+$

Барион	mc^2 , МэВ	$S(Y)$	I_3	I
p	938	0(+1)	+1/2	1/2
n	940	0(+1)	-1/2	
Σ^+	1189	-1(0)	+1	1
Σ^0	1193	-1(0)	0	
Σ^-	1197	-1(0)	-1	
Λ	1116	-1(0)	0	0
Ξ^0	1315	-2(-1)	+1/2	1/2
Ξ^-	1321	-2(-1)	-1/2	

S – странность, Y – гиперзаряд,
 I – изоспин, I_3 – проекция изоспина

Изоспиновые мультиплеты октета легчайших барионов

с $J^P = 1/2^+$



Изоспин мультиплета находится из соотношения

$$n = 2I + 1,$$

где n — число частиц в мультиплете

Появление нового квантового числа
изоспина I и его проекции I_3
есть следствие
зарядовой симметрии
сильного взаимодействия –
независимости сильного взаимодействия
частиц мультиплета адронов
от электрического заряда адрона мультиплета.
Более подробно об этом квантовом числе
сказано в **Приложении 1** к Лекции 5.

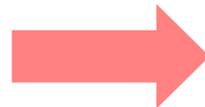
Носителем квантового числа **изоспина** на кварковом уровне является изодублет кварков ***u*** (*up* ↑) и ***d*** (*down* ↓). Эти кварки исполняют роль «**ИЗОСПИНОВЫХ КВАНТОВ**».

1950 г.
Изодублет
нуклонов

1964 г.
Изодублет
кварков

p (↑)

n (↓)



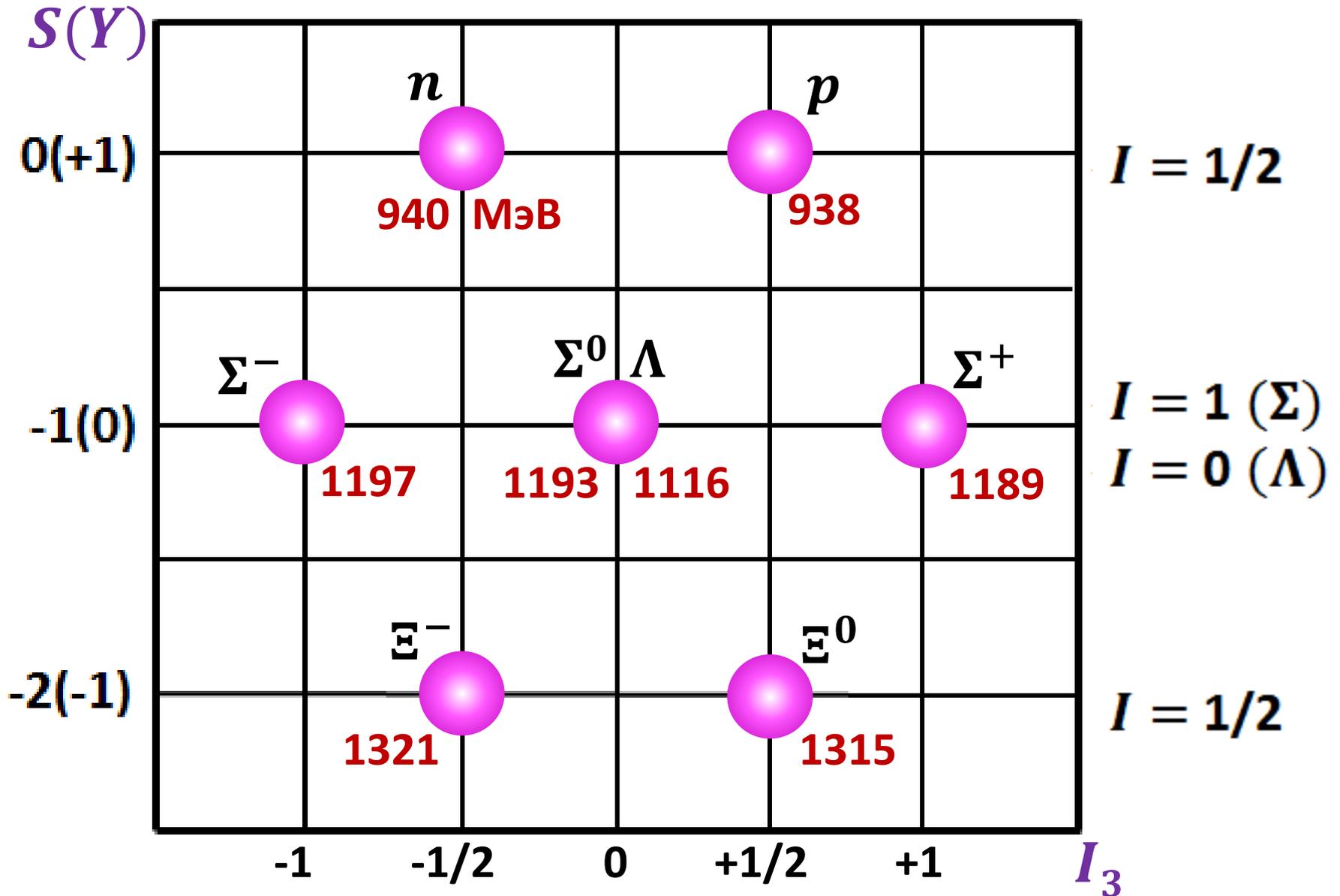
(↑) ***u***

(↓) ***d***

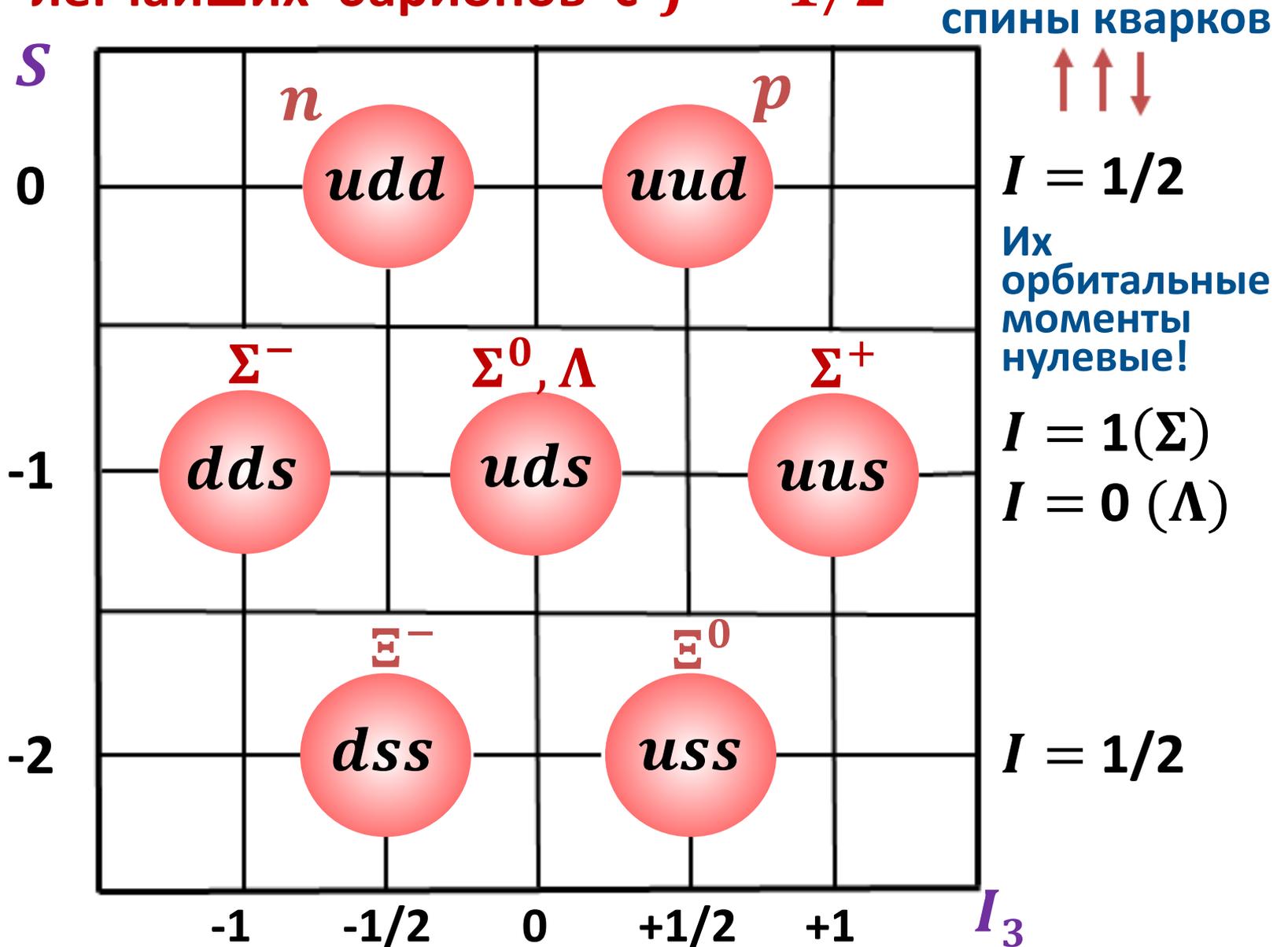
$$***p*** = ***uud***$$

$$***n*** = ***ddu***$$

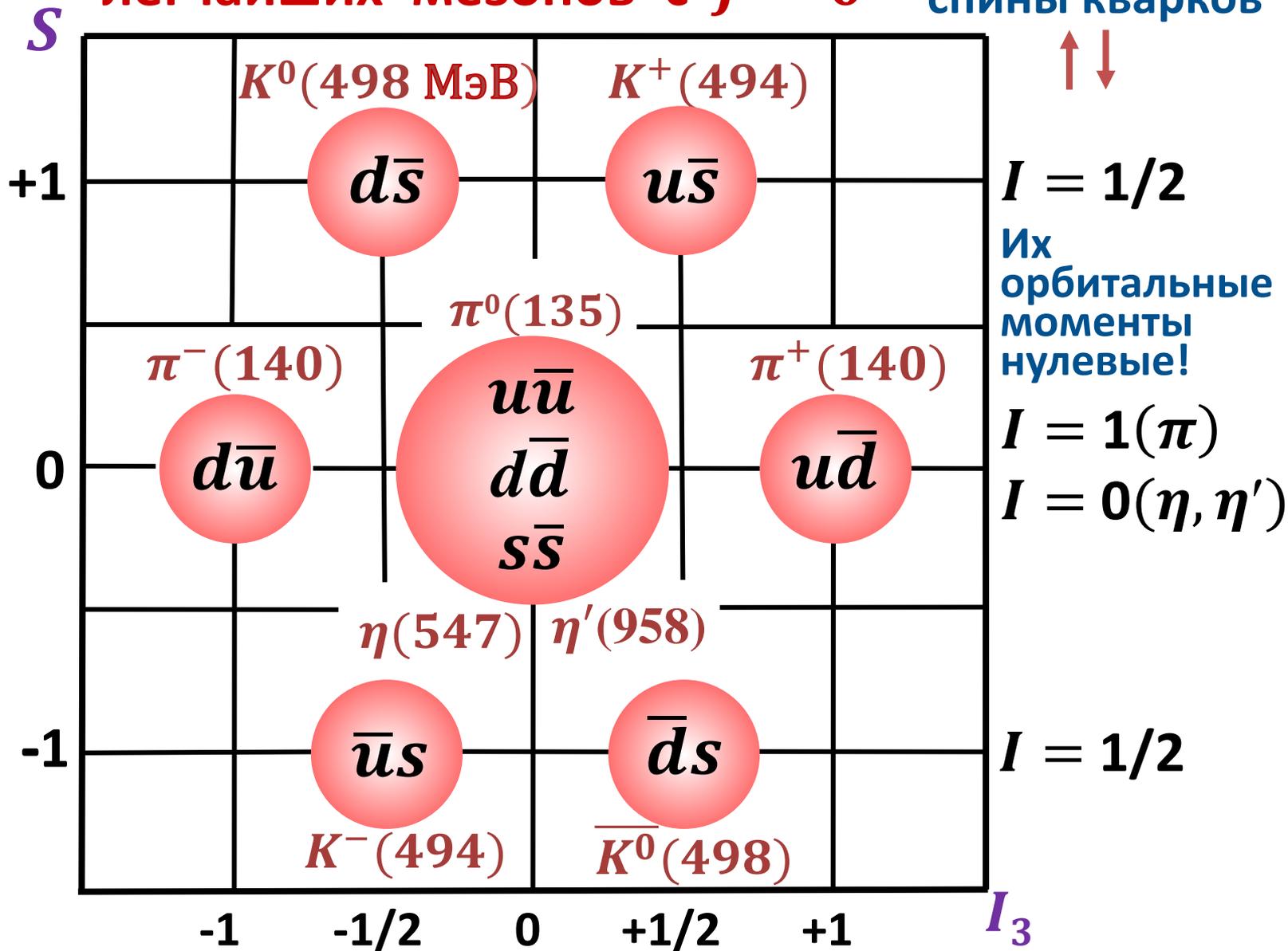
Октет легчайших барионов на плоскости «странность – проекция изоспина»



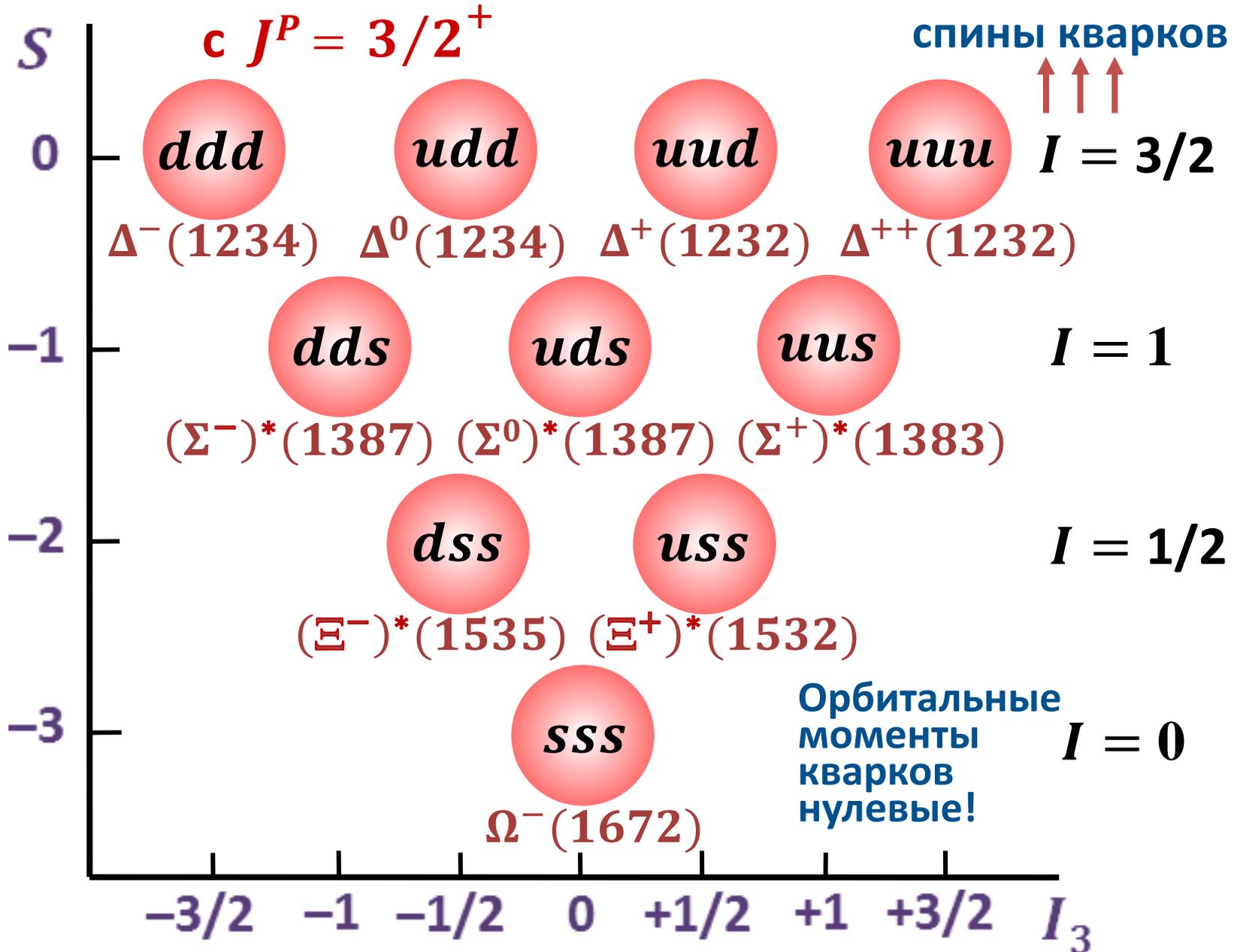
Кварковая структура октета легчайших барионов с $J^P = 1/2^+$



Кварковая структура нонета легчайших мезонов с $J^P = 0^-$

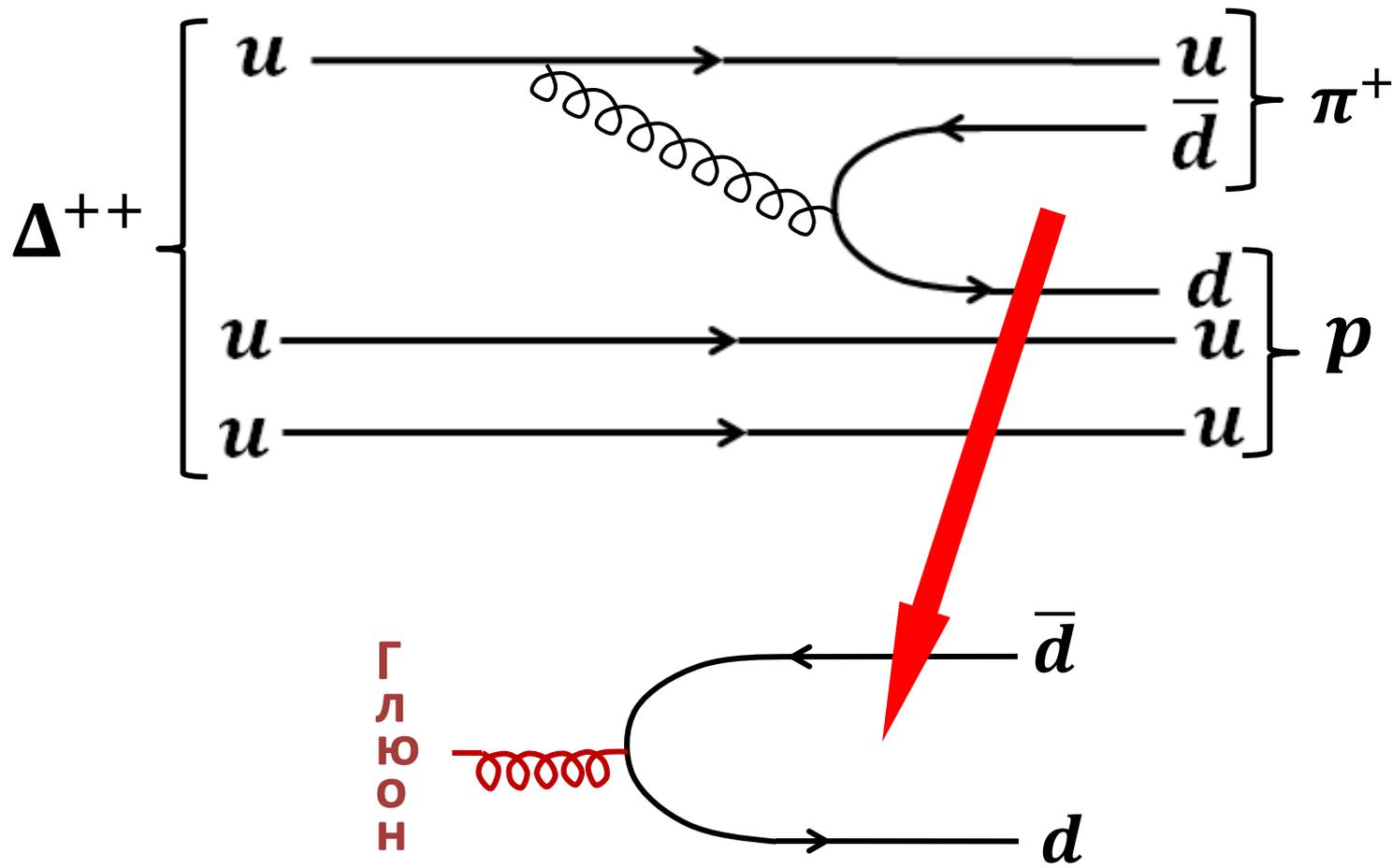


Кварковая структура декуплета барионов

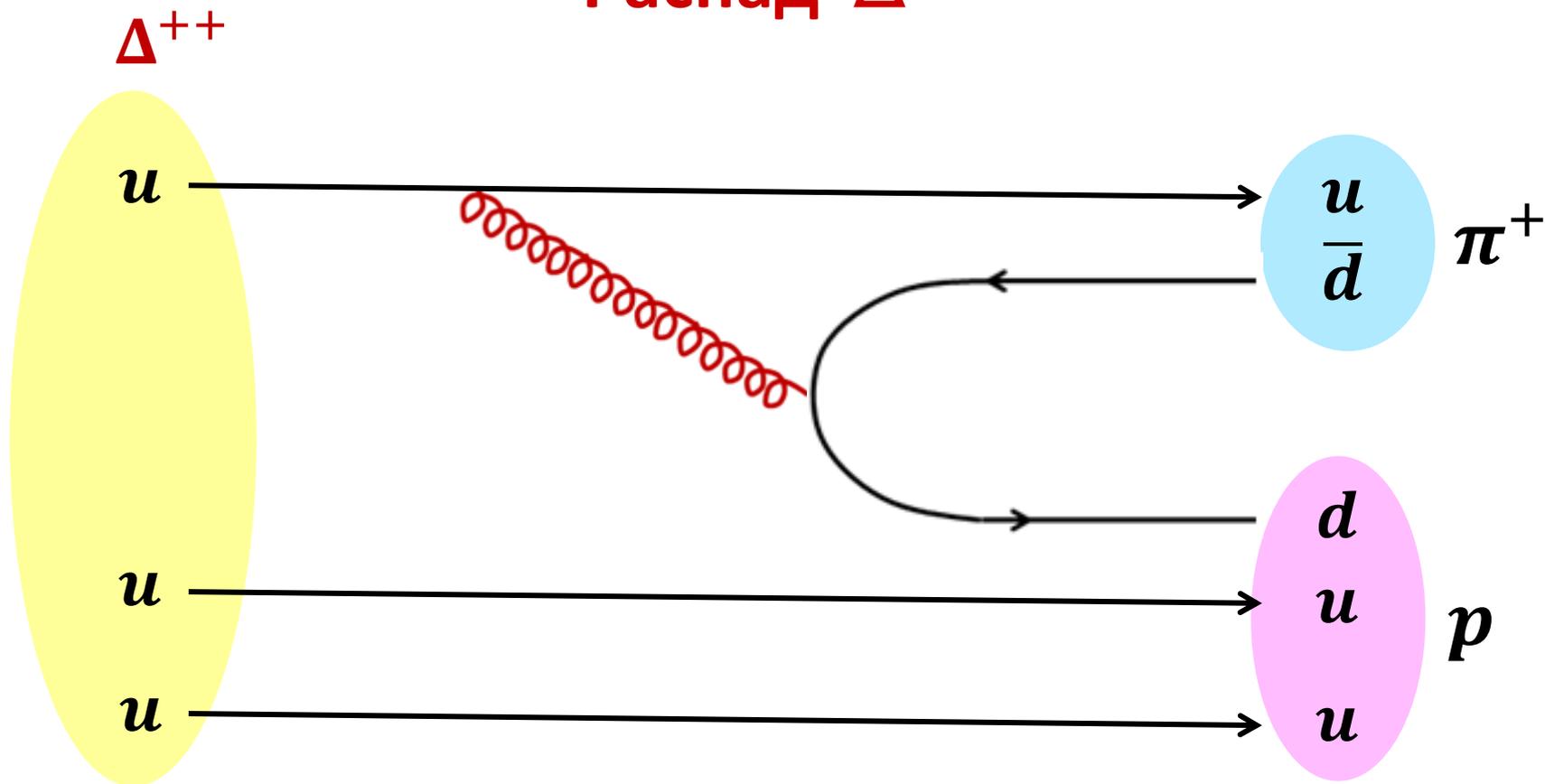


Распад Δ^{++}

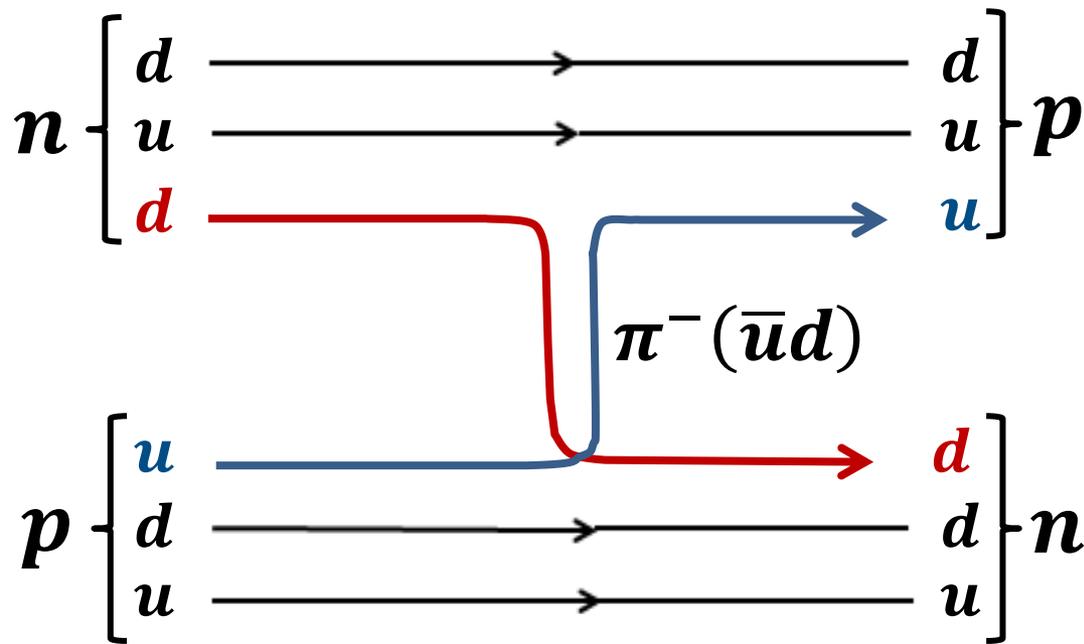
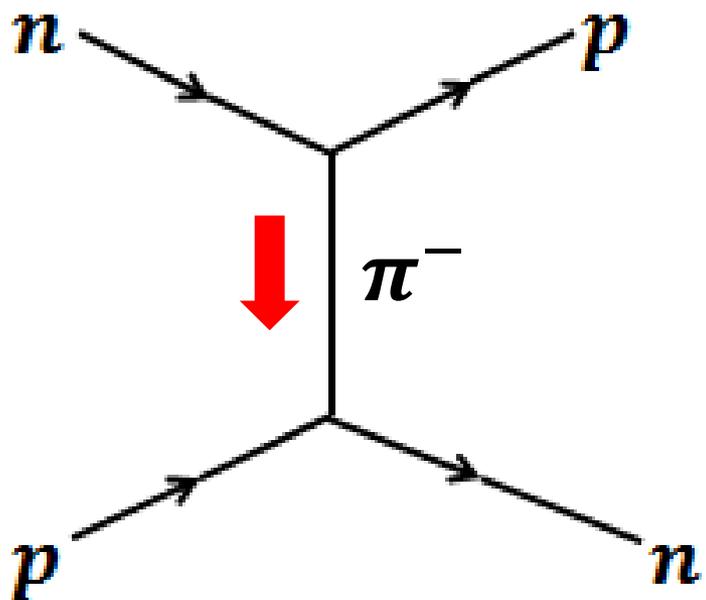
(время распада $\approx 10^{-23}$ сек)



Распад Δ^{++}



Ядерное (межнуклонное) взаимодействие как остаток сильного



Приложение 1:

Частицы-резонансы

Адроны состоят из двух (мезоны) или трёх (барионы) кварков. Всего известно 580 адронов, включая античастицы. Это число формируется из 212 барионов и такого же числа антибарионов, и 156-ти мезонов-антимезонов:

$$\begin{array}{r} 212 \text{ барионов} + \\ 212 \text{ антибарионов} + \\ 156 \text{ мезонов-антимезонов} \\ \hline 580 \text{ адронов} \end{array}$$

Если рассмотреть кварковый состав этого огромного числа адронов, то оказывается, что различных кварковых сочетаний оказывается всего 64 (по 20 для барионов и антибарионов и 24 для мезонов-антимезонов). У каждого из 580 адронов неизбежно встретится одна из этих базовых кварковых комбинаций. Таким образом, вся совокупность 580 адронов распадается на 64 семейства с одинаковым кварковым составом.

Внутри каждого из этих семейств адроны имеют различные массы и квантовые числа, в частности спин-чётность J^P .

Адрон с наименьшей массой для данного семейства отвечает нижней возможной энергии соответствующей кварковой комбинации и может считаться основным состоянием этой комбинации. Все остальные члены семейства – это возбужденные состояния рассматриваемой кварковой комбинации. Спектр таких возбуждений возникает в результате реализации различных взаимных состояний кварков внутри данной кварковой комбинации. Этим различным взаимным состояниям кварков отвечают, помимо разных энергий (масс), и разные квантовые числа (спиновые, орбитальные, изоспиновые, чётность и др.).

Так кварковая комбинация uud с наименьшей энергией соответствует протону. Протон – это основное состояние данной комбинации. Другие состояния этой комбинации имеют большие энергии и образуют спектр возбуждений протона.

Таких возбуждений у протона насчитывают около 30.

Нижайшее из них Δ^+ -резонанс (см. слайды 32 и 42 этой Лекции).

Основные состояния кварковых комбинаций отвечают наиболее устойчивым адронам. Остальные (возбужденные состояния кварковых комбинаций) отвечают менее устойчивым адронам, испытывающим распады с образованием этих комбинаций в более устойчивых основных состояниях. Эти распады очень быстрые, так как идут за счёт сильного взаимодействия.

Время жизни адронов относительно таких распадов

$$\tau_{\text{сильное}} = 10^{-20} - 10^{-24} \text{ сек.}$$

Адроны, отвечающие кварковым комбинациям в самых низких по энергии (основных) состояниях, также неустойчивы (кроме протона, распад которого никогда не наблюдался), но живут, как правило, значительно дольше, так как их распад в подавляющем числе случаев происходит за счёт слабого или электромагнитного взаимодействий. Времена жизни адронов относительно

этих распадов следующие:

$$\tau_{\text{эл.-магн.}} = 10^{-16} - 10^{-19} \text{ сек.}$$

$$\tau_{\text{слабое}} > 10^{-13} \text{ сек.}$$

Адроны, испытывающие распады за счёт сильного взаимодействия, и принято называть **резонансами**.

Природа этого названия связана с тем, что эти адроны проявляются в виде очень широких резонансов

в эффективных сечениях тех реакций, в которых они образуются.

Связь между шириной Γ резонанса и его временем жизни τ даётся соотношением неопределённости

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar .$$

Ширины адронов-резонансов с учётом того, что

$$\tau_{\text{сильное}} = 10^{-20} - 10^{-24} \text{ сек},$$

варьируются в пределах от десятков кэВ до сотен МэВ.

Так экспериментальная ширина Δ^+ -резонанса (первого возбуждённого состояния протона) близка к 120 МэВ, что для времени жизни этого резонанса даёт $0,3 \cdot 10^{-23}$ сек.

Итак,

1. **Резонансами** называют адроны, распадающиеся за счёт сильного взаимодействия.
2. Почти 90% адронов являются **резонансами**.

Приложение 2:

5-я сила – Хиггсовское взаимодействие

Хиггсовское взаимодействие – это взаимодействие фундаментальных частиц (кварков, лептонов и квантов 4-х традиционных физических полей – фотонов, глюонов, W^\pm и Z -бозонов, гравитонов) с полем Энглера-Браута-Хиггса (обычно именуемого «хиггсовским»), заполняющим всё пространство и во многом определяющим свойства физического вакуума.

Бозон Хиггса – это квант хиггсовского поля.

Какова роль этого поля?

Симметрии теорий микромира запрещают фундаментальным частицам иметь массы, а хиггсовское поле нарушает эти симметрии и обеспечивает возможность существования масс у фундаментальных частиц.

В этом главная роль хиггсовского поля.

Бозон Хиггса – последняя из фундаментальных частиц, предсказываемых Стандартной Моделью элементарных частиц, которую до 2012 г. не наблюдали.

Как формируется масса элементарной частицы ?

Существует два типа элементарных частиц:

1. Сложные частицы, имеющие внутреннюю структуру и видимый размер – это адроны, состоящие из двух или трёх кварков.
2. Бесструктурные, не имеющие размер частицы, – это кварки, лептоны и кванты физических полей. Они ведут себя как материальные точки и мы их называем фундаментальными.

Масса сложного объекта (адрона) формируется из масс покоя составляющих его фундаментальных частиц, а также энергий движения и взаимодействия этих частиц внутри адрона. При этом связь энергии и массы даётся соотношением $E = mc^2$.

Рассмотрим протон. Он состоит из двух u -кварков и одного d -кварка, взаимодействующих между собой посредством сильного поля, переносчиками которого являются безмассовые глюоны. Суммарная масса покоя невзаимодействующих (голых) кварков протона равна

$$(2m_u + m_d) \approx (2 \cdot 2,2 + 4,7) \text{ МэВ}/c^2 \approx 9,1 \text{ МэВ}/c^2,$$

что составляет $\approx 1\%$ массы протона ($938,3 \text{ МэВ}/c^2$). Т. е. около 99% массы протона формируется за счёт кинетической энергии кварков и энергии глюонного поля. И то и другое – результат сильного взаимодействия. Однако остается вопрос о природе суммарной массы покоя голых кварков. Они не имеют внутренней структуры и поэтому их массы не могут возникать за счёт кинетической и потенциальной энергии объектов этой структуры. Аналогичный вопрос о массе относится не только к кваркам, но и к другим фундаментальным, т. е. бесструктурным, частицам (лептонам и квантам полей). Ответ на вопрос о природе масс фундаментальных частиц был дан Стандартной Моделью. Согласно ей массы фундаментальных частиц являются результатом их взаимодействия с хиггсовским полем. Квантом этого поля является бозон Хиггса. Это поле присутствует всюду во Вселенной. Главная роль поля Хиггса – обеспечить массы всем фундаментальным частицам.

Каковы свойства хиггсовского поля ?

Во-первых, это поле однородно, т. е. равномерно «разлито» по всему пространству и оно неразрывно связано с понятием физического вакуума. Физический вакуум это не абсолютная пустота, это наинизшее энергетическое состояние полей пронизывающих пространство. Это вакуумное поле, обладая некоторыми свойствами обычной материальной среды, не создаёт связанной с ним выделенной системы отсчёта, не мешает движению тел и распространению других физических полей через заполненное им пространство.

Второе уникальное свойство поля Хиггса состоит в том, что его напряженность всюду отлична от нуля. Для обычных полей (электромагнитного, сильного и слабого) самое низкое энергетическое состояние соответствует нулевой напряженности поля, т. е. его отсутствию.

Третья особенность поля Хиггса состоит в том, что, взаимодействуя с фундаментальными частицами, оно наделяет их массами, величины которых пропорциональны напряженности (или потенциалу φ_0) этого поля, умноженному на силу (интенсивность) взаимодействия. Чем сильнее (интенсивнее) это взаимодействие, тем больше масса частицы.

Итак, хиггсовское поле, взаимодействуя с фундаментальными частицами, наделяет их массами. При этом величина массы частицы определяется интенсивностью этого взаимодействия или, что то же, константой ξ её связи с этим полем. По современным данным величина постоянного в пространстве хиггсовского поля

$$\varphi_0 = 174 \text{ ГэВ.}$$

Масса, приобретаемая фундаментальной частицей f в результате взаимодействия с полем Хиггса, даётся соотношением

$$m_f c^2 = \xi_f \cdot \varphi_0.$$

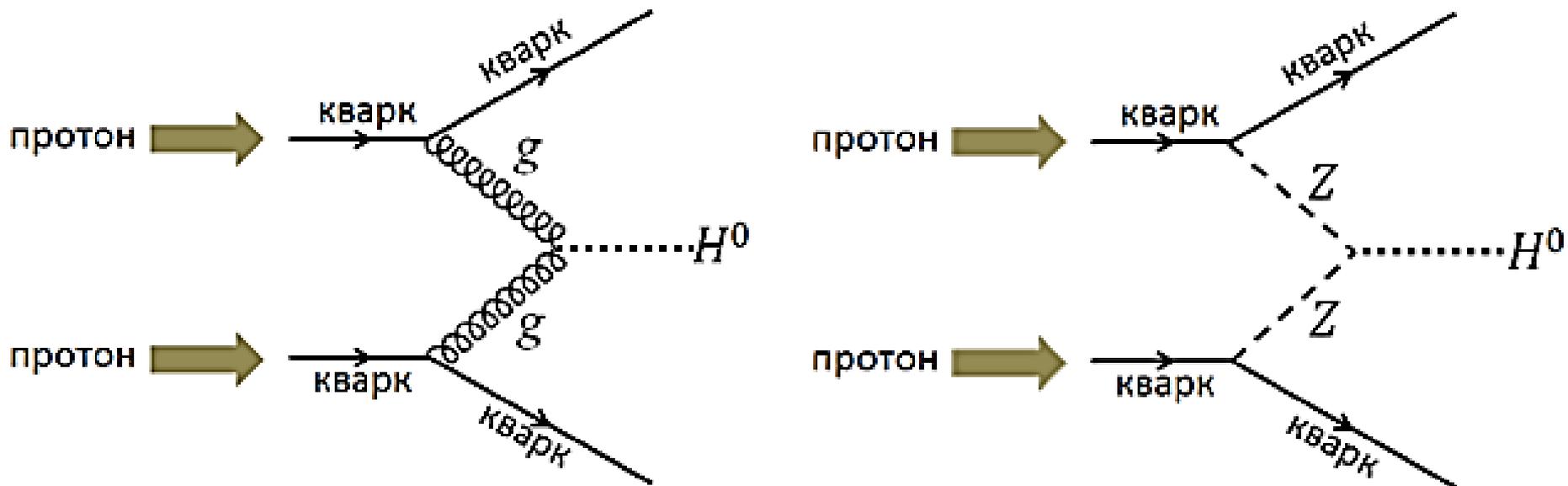
Из этого выражения следует, что для электрона $\xi_e \approx 3 \cdot 10^{-6}$, для топ-кварка $\xi_t \approx 1$, для нейтрино эта константа в районе 10^{-13} .

Зная массы фундаментальных фермионов, легко получить значение ξ для каждого из них. Хиггсовское поле даёт массы также W - и Z -бозонам и самому бозону Хиггса H^0 .

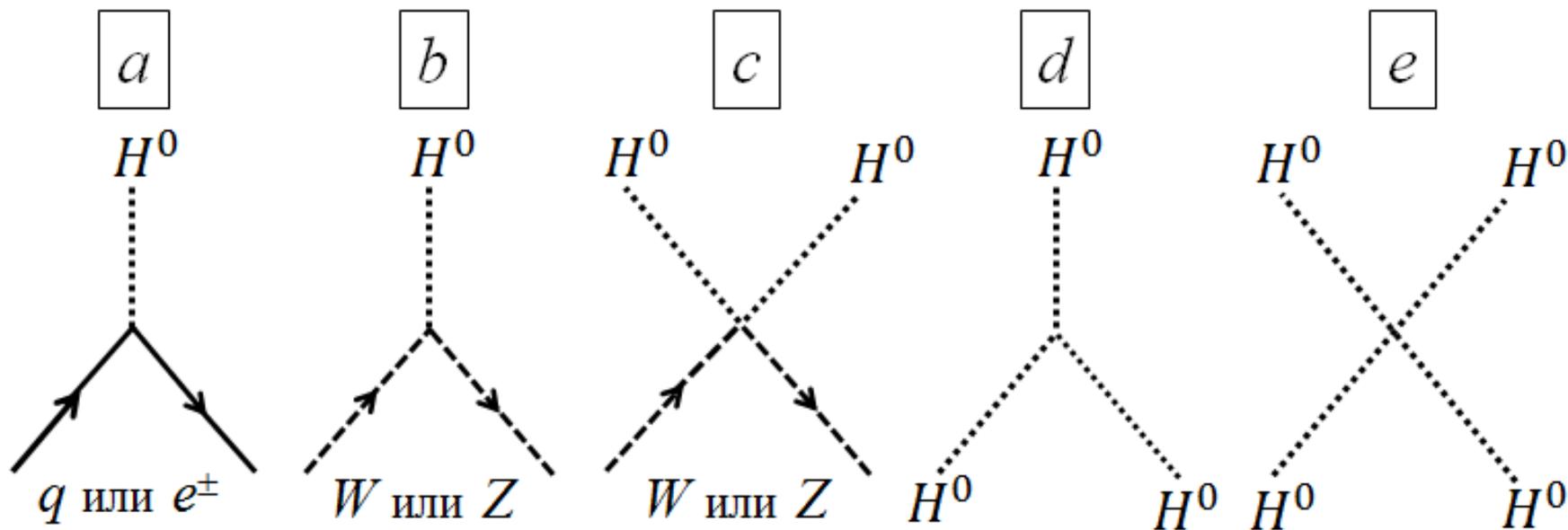
Фотон и глюон остаются безмассовыми.

При повышении температуры хиггсовское поле, плавно уменьшаясь, в конце концов обращается в нуль и соответственно исчезает его взаимодействие с фундаментальными частицами, придающее им массу. Несимметричное по массам состояние фундаментальных частиц переходит в симметричное безмассовое состояние, отвечающее объединению *электромагнитного* и *слабого* взаимодействий в более универсальное *электрослабое* (этот переход происходит при температуре $T \approx 10^{15} \text{ К}$ и энергиях частиц $\approx 100 \text{ ГэВ}$). Итак, хиггсовское поле нарушает симметрии, лежащие в основе объединённых теорий микромира, и запрещающие фундаментальным частицам иметь массы. Это поле, материализуясь при низких энергиях (говорят о повсеместно разлитом конденсате хиггсовской жидкости), наделяет массой изначально безмассовые фундаментальные частицы. Потерю масс фундаментальными частицам при исчезновении хиггсовского поля можно сравнить с потерей веса телами при исчезновении гравитационного поля. Также как в гравитационном поле (например, Земли) различные тела имеют, как правило, различные веса и теряют эти веса при отключении гравитационного поля, становясь одинаково невесомыми, так и в хиггсовском поле различные фундаментальные частицы имеют различные массы и теряют эти массы при выключении поля, становясь одинаково безмассовыми. Различные веса тел и различные массы фундаментальных частиц обусловлены различными энергиями взаимодействия тел (частиц) с соответствующими полями.

В столкновении двух протонов бозон Хиггса может возникать различными путями. Две возможности изображены следующими диаграммами. С наибольшей вероятностью H^0 возникает в столкновении двух глюонов: $gg \rightarrow H^0$.

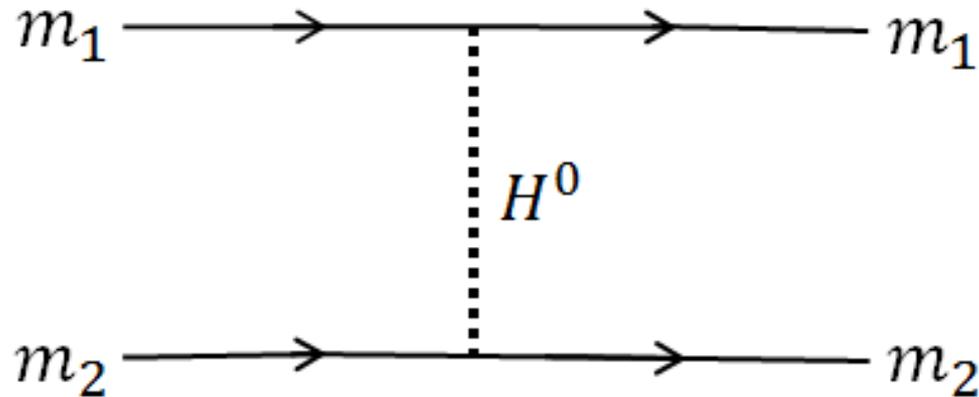


Основной способ распада бозона Хиггса – на пару b -кварк и его антикварк (вероятность $\approx 57\%$).



На этом рисунке показаны основные типы узлов диаграмм Фейнмана с участием бозона Хиггса. Узел **a** показывает испускание (или поглощение) бозона Хиггса фундаментальным фермионом, например, кварком или электроном (позитроном). Узел **b** описывает аналогичный процесс для W - или Z -бозона. Узел **c** показывает прямое рассеяние W - или Z -бозона на бозоне Хиггса. Узлы **a**, **b**, **c** ответственны за генерацию масс фундаментальных частиц. Бозоны Хиггса также могут взаимодействовать друг с другом (узлы **d** и **e**).

За счёт хиггсовского поля реализуется и новый тип взаимодействия между фундаментальными частицами, осуществляемый обменом бозонами Хиггса. Простейшая диаграмма такого взаимодействия (за счёт обмена одним бозоном Хиггса) имеет вид:



Таким образом, в Стандартной Модели имеется 6 кварков и 6 лептонов и **три** (до открытия хиггсовского механизма) вида взаимодействий: **сильное, слабое и электромагнитное**, переносимых квантами соответствующих полей: глюоном g , W - и Z -бозонами и фотоном γ . **Четвёртое - гравитационное** взаимодействие, переносимое **гравитоном**, ничтожно для фундаментальных частиц. К тому же гравитация описывается пока лишь в рамках классической теории. К этим четырём взаимодействиям теперь добавилось **пятое, переносимое хиггсовским бозоном**. Этим набором частиц и взаимодействий между ними исчерпываются все известные фундаментальные частицы и силы природы.

В заключение приведём таблицу видов и свойств всех пяти взаимодействий. Отметим, что хиггсовские силы, как и слабые, очень короткодействующие (следствие большой массы бозона Хиггса). Кроме того, константа взаимодействия этих сил на два порядка превосходит константу слабых сил.

Виды и свойства фундаментальных взаимодействий

Взаимодействие	Константа взаимодействия	Участвующие частицы	Кванты поля (бозоны)	Масса кванта поля, ГэВ	Характерное время взаимодействия, сек	Радиус взаимодействия, см
Сильное	1	кварки (адроны)	ГЛЮОН (8 видов)	0	$10^{-21} - 10^{-23}$	$\approx 10^{-13}$
Электромагнитное	10^{-2}	заряженные частицы	γ -квант	0	$\approx 10^{-18}$	∞
Слабое	10^{-6}	лептоны и кварки	W^{\pm} Z	80 91	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-16}$
Гравитационное	10^{-38}	все частицы	гравитон	0	∞	∞
Хиггсовское	10^{-4}	все частицы	бозон H^0 (ХИГГС)	125	$\approx 10^{-14}$	$\approx 10^{-16}$