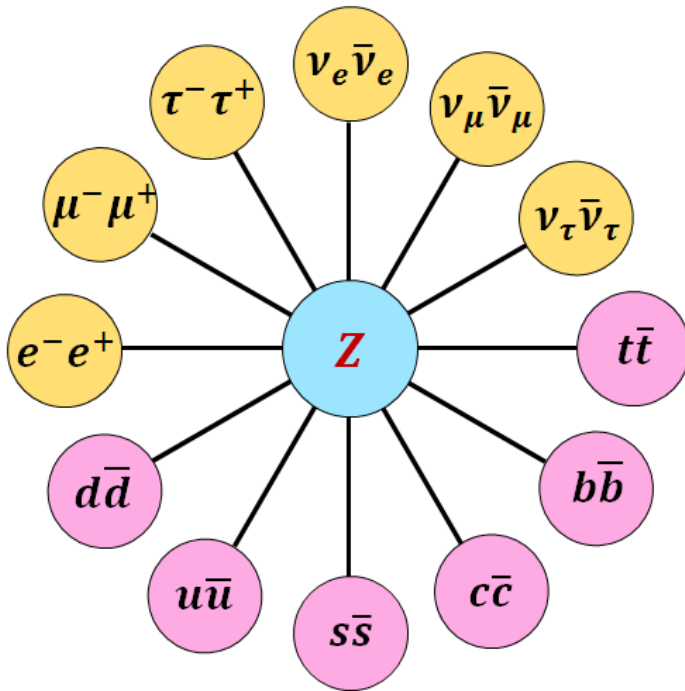
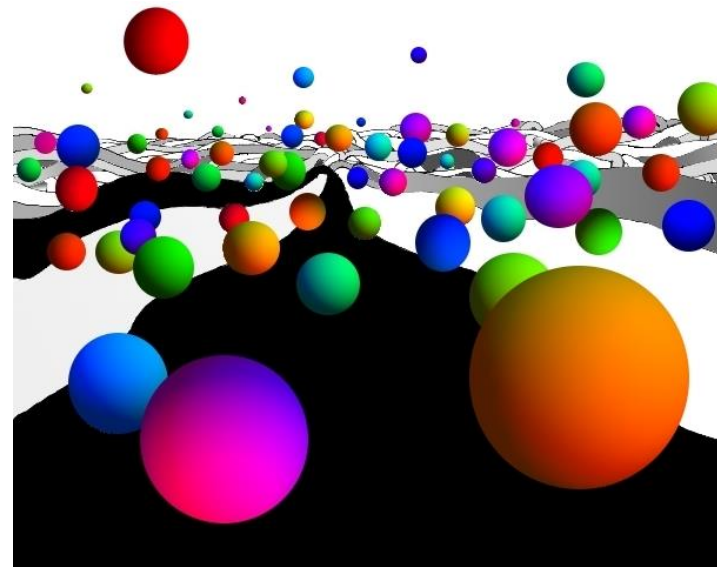


Слабое взаимодействие



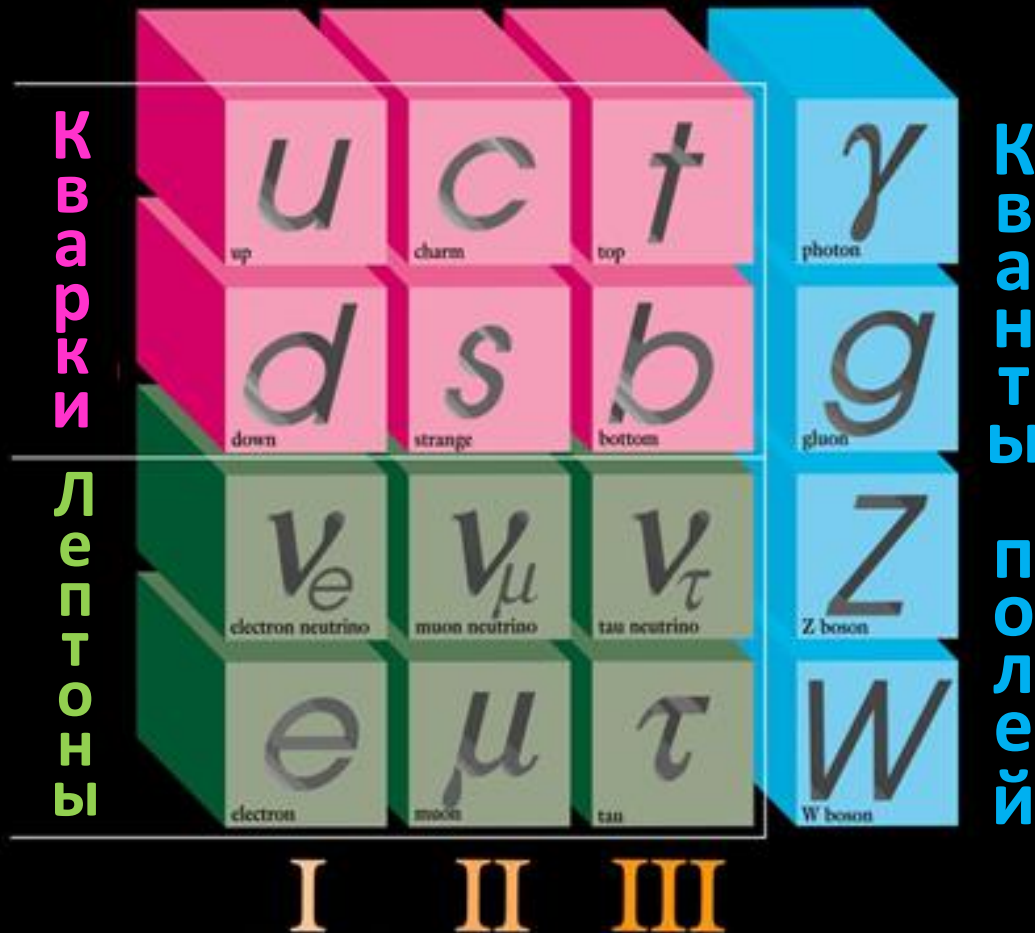
Квантовая хромодинамика



Темы лекции

1. Слабое взаимодействие.
Его константа и радиус.
Кванты слабого поля.
2. Лептоны. Лептонные заряды.
Типы нейтрино.
3. Слабые распады.
Заряженные и нейтральные слабые токи.
4. Новое квантовое число
сильного взаимодействия – «**цвет**».
Цветные кварки и бесцветные адроны.
5. Квантовая хромодинамика.
Квант сильного поля – глюон.
6. Цветовая структура глюона.

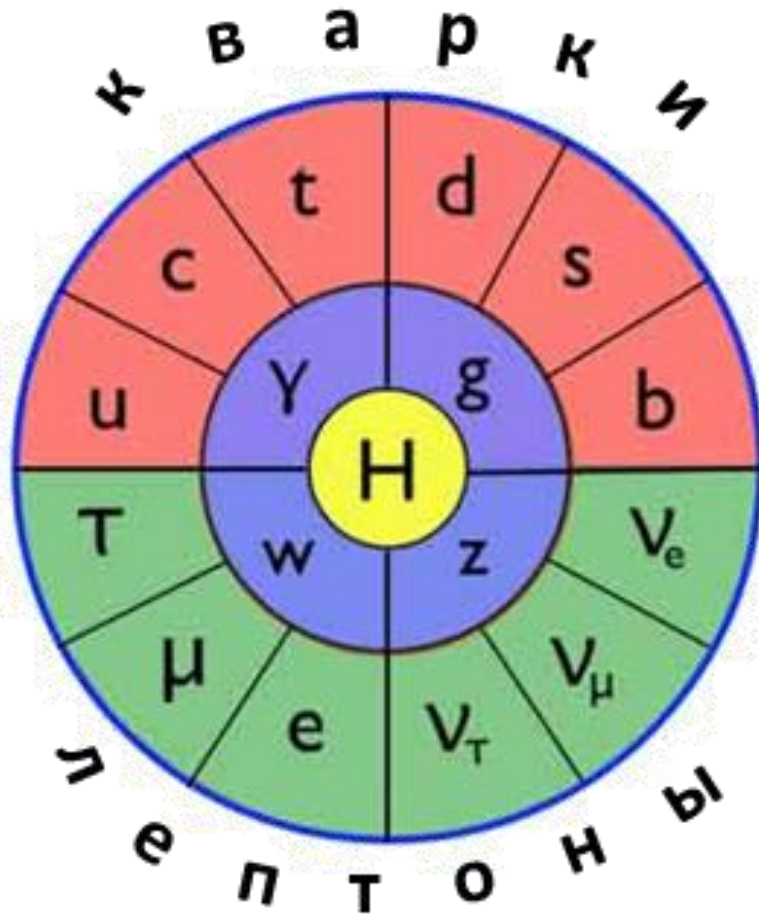
Фундаментальные частицы



Связи
взаимодействия

I II III
Три поколения материи

Частицы Стандартной Модели элементарных частиц



Кварки

Лептоны

Кванты полей

Н Бозон Хиггса

Фундаментальные частицы

Кварки, лептоны и кванты физических полей на современном уровне знаний бесструктурны (точечны), их размер $< 10^{-17}$ см.

Они образуют самый глубинный слой материи и мы будем называть их **фундаментальными частицами**.

Существует **6** кварков и **6** лептонов.

Они имеют спин **1/2**, т. е. являются фермионами.

Эти **12** фундаментальных фермионов делятся на **три поколения** (или семейства) по **2** кварка и лептона в каждом из них.

Поколения (семейства): 1 2 3 Заряд

Кварки	Верхние	u	c	t	$+\frac{2}{3}e$
	Нижние	d	s	b	$-\frac{1}{3}e$
Лептоны	Нейтрино	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	Заряженные	e	μ	τ	$-1e$

Фундаментальные взаимодействия (поля)

Поле Теория	Const α	Квант поля		Радиус сил (см)
		тип	Спин-чётность, масса	
Сильное КХД	1	глюон	1^- , $m = 0$	10^{-13}
Эл-магн. КЭД	10^{-2}	фотон	1^- , $m = 0$	∞
Слабое ЭСМ	10^{-6}	W^\pm, Z	Спин 1, масса = 80,4 и 91,2 ГэВ/ c^2	10^{-16}
Гравита- ционное	10^{-38}	гравитон	Спин 2, $m = 0$	∞

КХД – квантовая хромодинамика
 КЭД – квантовая электродинамика
 ЭСМ – электрослабая модель

Стандартная
 Модель
 элементарных
 частиц

Кванты слабого поля (W^{\pm}, Z) были открыты в историческом эксперименте в **CERN** в **1983 г.** на протон-антипротонном коллайдере **SPS** с энергиями частиц по **270 ГэВ.**

Описание эксперимента можно найти в учебнике Ишханова, Капитонова, Юдина «Частицы и атомные ядра», 2013, сс. 130-137; 2019, сс. 143-150.

Нобелевская премия 1984 г. за открытие квантов слабого поля присуждена итальянцу Карло Руббиа (лидер команды физиков) и голландцу Симону Ван дер Мееру (конструктор коллайдера):



Карло Руббиа



Симон Ван дер Меер



Характерные время и радиус слабого взаимодействия

Характерное время взаимодействия $\tau \sim \frac{1}{\alpha^2}$, где α – константа взаимодействия. Характерное время сильного взаимодействия $\tau_s \approx 10^{-22}$ сек. Откуда для электромагнитного взаимодействия получаем $\tau_e \approx \tau_s \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_e}\right)^2 \approx 10^{-22} \left(\frac{1}{10^{-2}}\right)^2$ сек $\approx 10^{-18}$ сек.
Для слабого: $\tau_w \approx \tau_s \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_w}\right)^2 \approx 10^{-22} \left(\frac{1}{10^{-6}}\right)^2$ сек $\approx 10^{-10}$ сек.

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

Для радиуса взаимодействия имеем формулу:

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

Откуда для характерного радиуса слабого взаимодействия получаем

$$a_w \approx \frac{\hbar c}{mc^2} \approx \frac{0,197 \text{ ГэВ} \cdot \text{Фм}}{(80 \div 91 \text{ ГэВ})} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Фм} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}.$$

Участие фундаментальных фермионов в различных 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: <i>d, u, s, c, b, t</i> }</p> <p>Лептоны: <i>e μ τ</i> <i>ν_e ν_μ ν_τ</i></p> </div> </div>	Глюоны	Фотоны	W^{\pm}, Z	Гравитоны

Взаимодействия

1
2
3
Поколения фермионов

Электромагнитное

Сильное

Слабое

Нейтральные лептоны

Заряженные лептоны

Кварки

ν_e

ν_μ

ν_τ

e

μ

τ

u

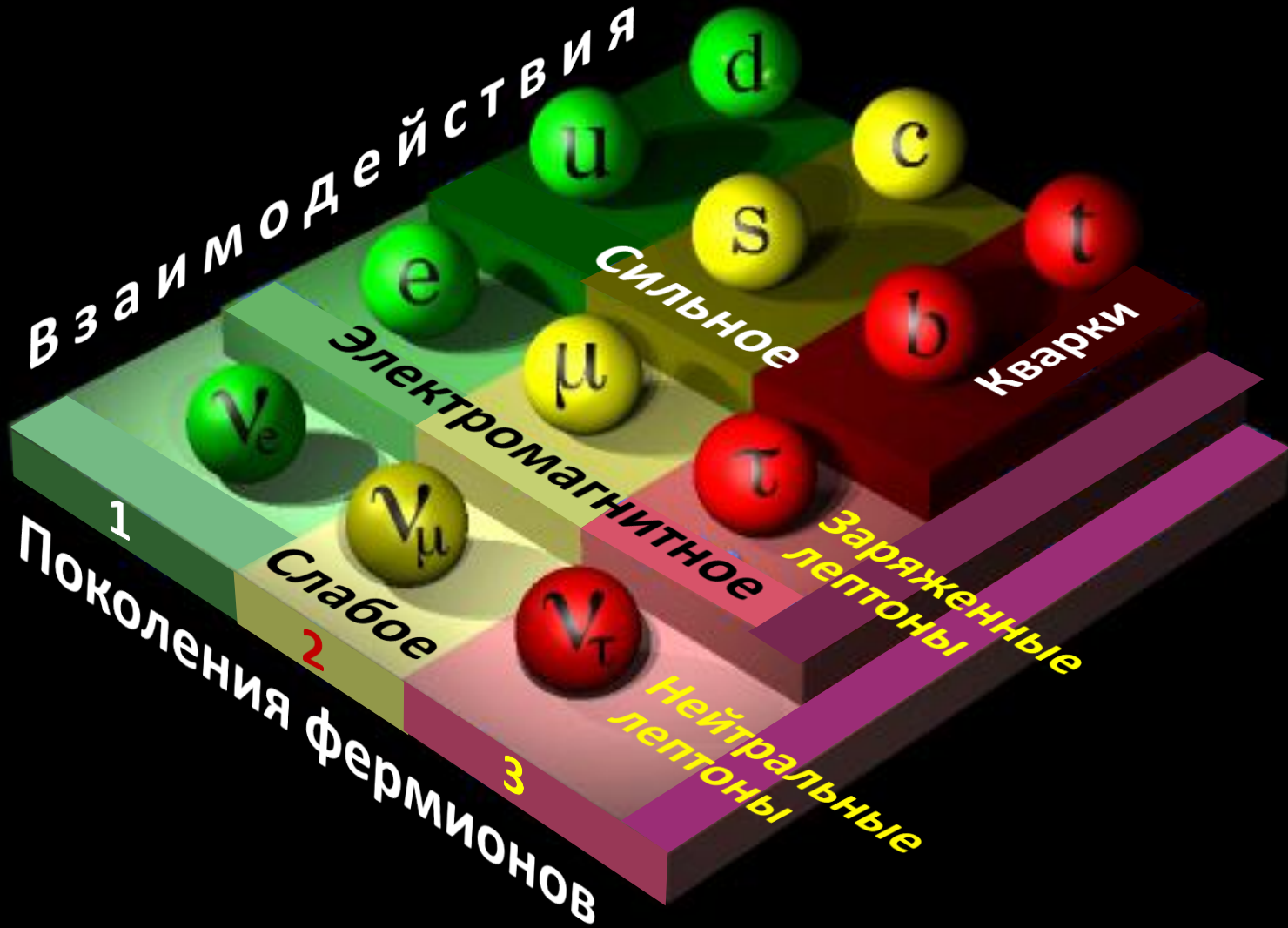
s

b

d

c

t



Для антилептонов
электрические и лептонные заряды меняют знак

Лептонные заряды. Типы нейтрино

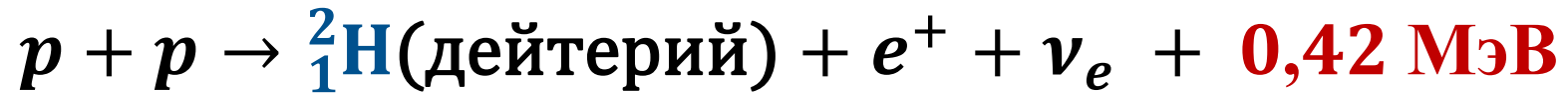
Характеристики лептонов (спин 1/2)

Лептон	Масса mc^2 , МэВ	Эл. заряд (e)	Лептонный заряд			Время жизни
			L_e	L_μ	L_τ	
e^-	0,511	-1	+1	0	0	$> 6,6 \cdot 10^{28}$ лет
ν_e	≈ 0	0	+1	0	0	Стабильно
μ^-	105,7	-1	0	+1	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$ с
ν_μ	≈ 0	0	0	+1	0	Стабильно
τ^-	1777	-1	0	0	+1	$2,9 \cdot 10^{-13}$ с
ν_τ	≈ 0	0	0	0	+1	Стабильно

Астрофизическая оценка суммарной массы всех сортов нейтрино:

$$0,06 \text{ эВ} < m_{\nu_e} c^2 + m_{\nu_\mu} c^2 + m_{\nu_\tau} c^2 < 0,12 \text{ эВ}$$

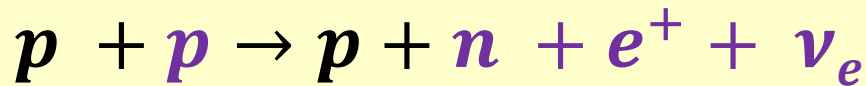
Ключевая термоядерная реакция на Солнце:



идёт за счёт слабых сил

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e + 0,78 \text{ МэВ},$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e - 1,81 \text{ МэВ}.$$

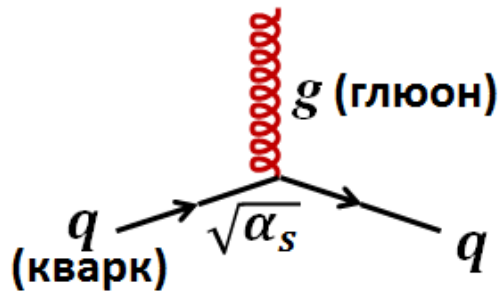


${}^2_1\text{H}$ (выделяется энергия связи **2,23 МэВ**)

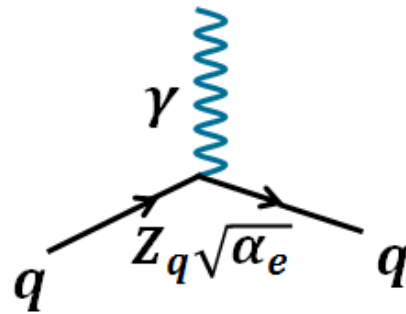
Выделяющаяся в одном акте ключевой термоядерной реакции на Солнце энергия:

$$(2,23 - 1,81) \text{ МэВ} = 0,42 \text{ МэВ}$$

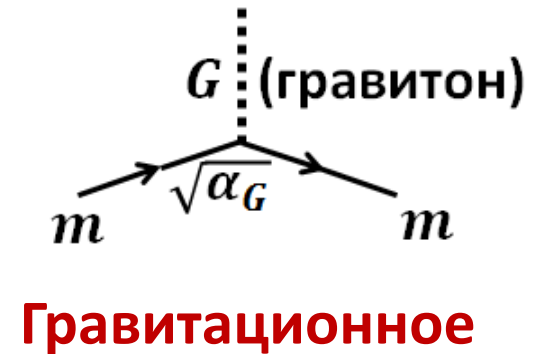
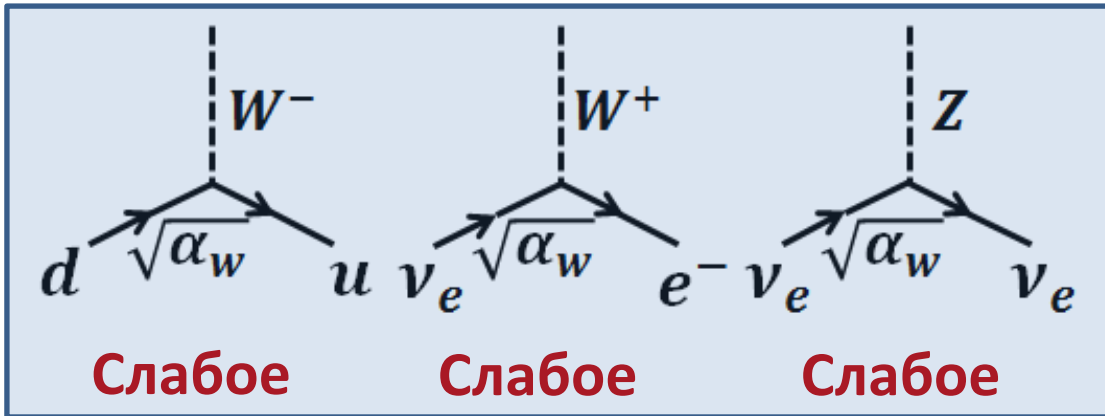
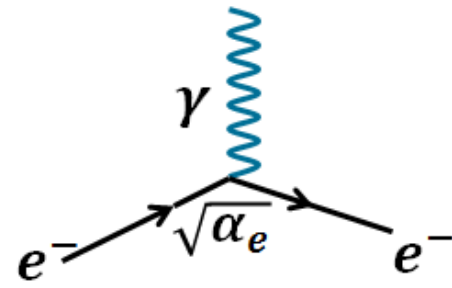
Типичные узлы фундаментальных взаимодействий



Сильное



Электромагнитное



Слабые распады

Распады за счёт слабых сил
идут через W^{\pm} -бозоны с сохранением
электрического, барионного и лептонного зарядов.

Однако чётность, изоспин, проекция изоспина,
странность (S), очарование (C),
Bottomness (B) и Topness (T),

т.е. кварковые квантовые числа (ароматы)
могут не сохраняться (при слабых распадах
что-то из них обязательно не сохраняется).

Примеры слабых распадов адронов:

1. **Распад нейтрона** ($\tau_n \approx 900$ сек): $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.
Это единственный распад нейтрона, допустимый законами сохранения энергии, электрического, барионного и лептонного зарядов.
2. **Распады π^\pm** ($\tau_\pi = 2,6 \cdot 10^{-6}$ сек):

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \quad \approx 100\%,$$

$$\pi^\pm \rightarrow e^\pm + \begin{pmatrix} \nu_e \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \quad \approx 10^{-4}.$$

Распад π^0 – электромагнитный ($\tau \approx 10^{-16}$ сек):

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma, \quad 98,8\%,$$

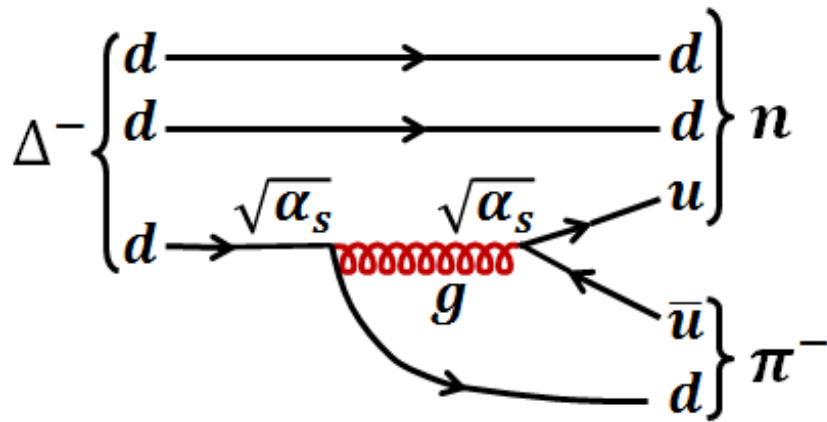
$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma, \quad 1,2\%.$$

Оценка константы слабого взаимодействия

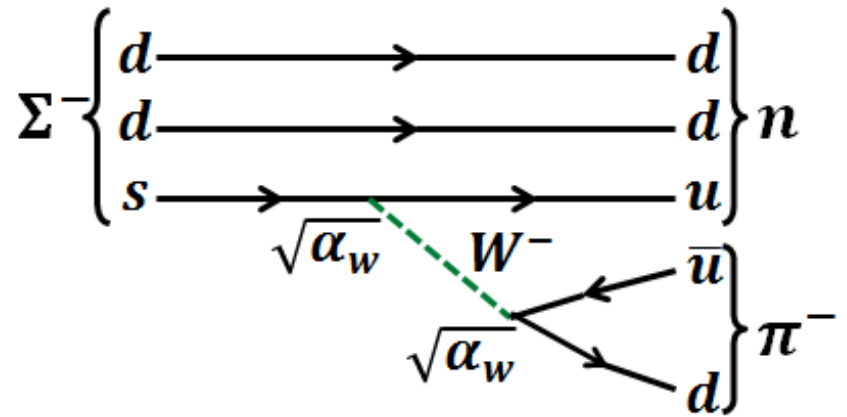
Для оценки используем следующие распады за счёт сильного и слабого взаимодействий, описываемые двухузловыми диаграммами:

$\Delta^- (1232 \text{ МэВ}) \rightarrow n + \pi^-$; $\tau \approx 10^{-23}$ сек (сильный распад),
 $\Sigma^- (1197 \text{ МэВ}) \rightarrow n + \pi^-$; $\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-10}$ сек (слабый распад).

Сильный распад: $\alpha_s \approx 1$



Слабый распад: $\alpha_w \approx ?$



Для двухузловой диаграммы имеем: $\tau = \frac{1}{\text{вероятность}} \sim \frac{1}{\alpha^2}$

$$\text{и } \frac{\tau(\Delta^-)}{\tau(\Sigma^-)} = \left(\frac{\alpha_w}{\alpha_s} \right)^2 = \frac{10^{-23} \text{ сек}}{1,5 \cdot 10^{-10} \text{ сек}} \approx 10^{-13}, \text{ т. е. } \alpha_w \approx 10^{-6}$$

Слабые распады через W^\pm - бозоны. Заряженные слабые токи

Слабые распады адронов и заряженных лептонов идут через заряженные кванты слабого поля – бозоны W^\pm .
Как уже отмечалось, в таких распадах не сохраняется по крайней мере одно из кварковых квантовых чисел – либо *изоспин I* , либо *его проекция I_3* , либо *странность S* , либо *Charm*, либо *Bottomness*, либо *Topness*.

Слабые распады могут быть трёх типов:

1. Безадронные (лептонные), например,

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu ,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu .$$

2. Лептон-адронные (полулептонные), например,

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e ,$$

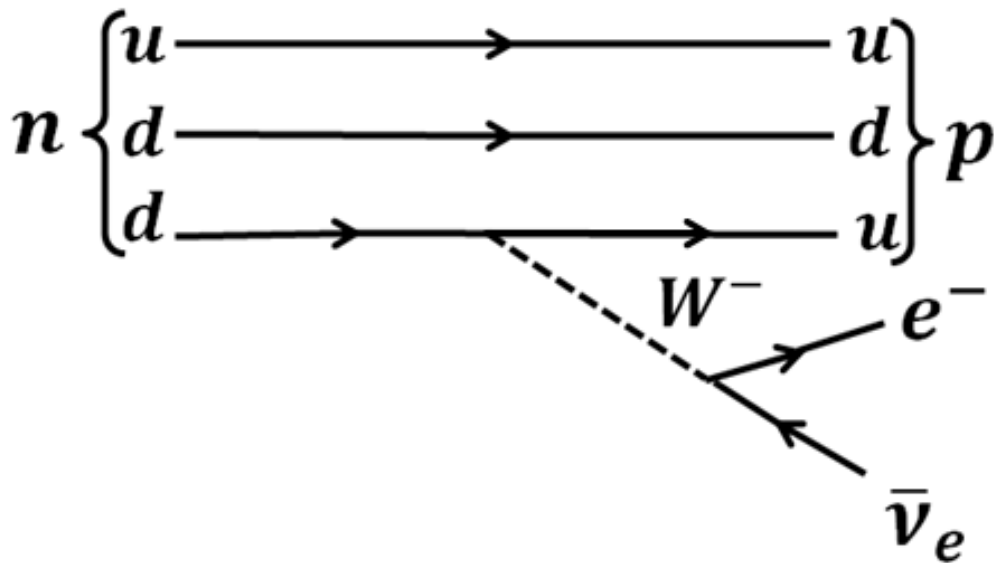
$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} .$$

3. Адронные (безлептонные), например,

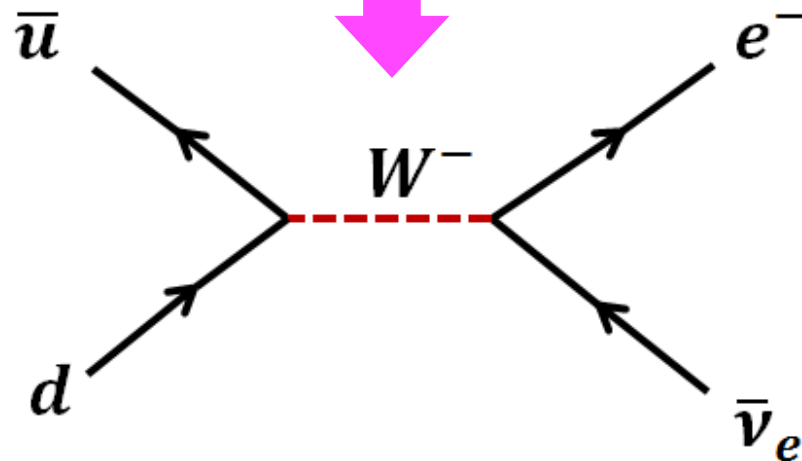
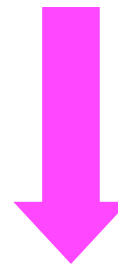
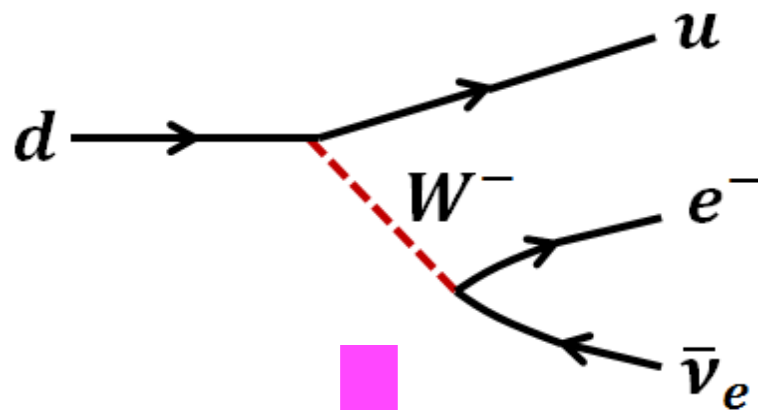
$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^- ,$$

$$\Omega^- \rightarrow \Sigma^0 + \pi^- .$$

Рассмотрим кварк-лептонную диаграмму распада нейтрона:

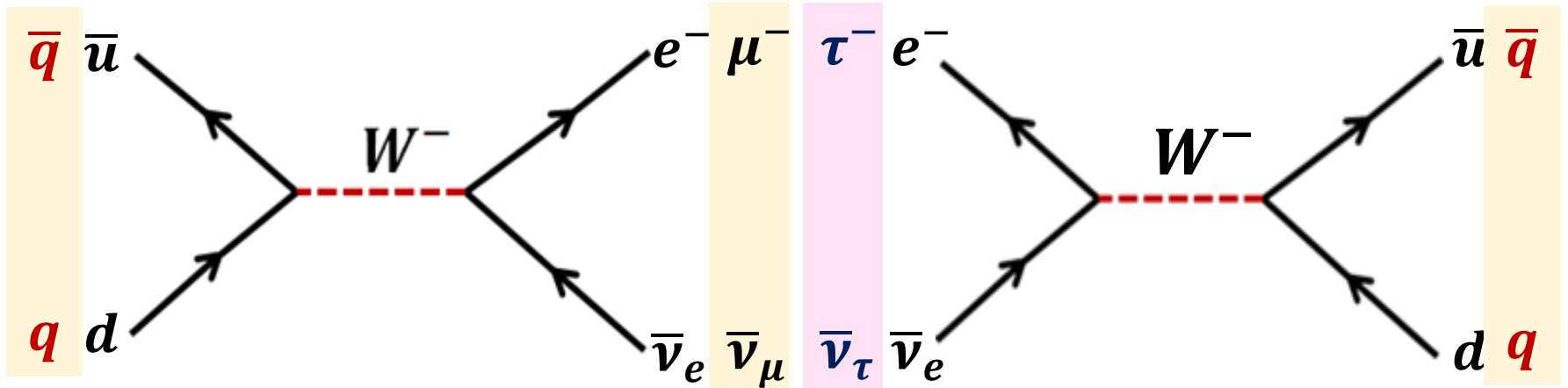


Она сводится к диаграмме распада d -кварка:



Видно, что заряженные слабые токи (т.е. W^\pm) меняют ароматы кварков, т.е. не сохраняют I, I_3, S, C, B, T

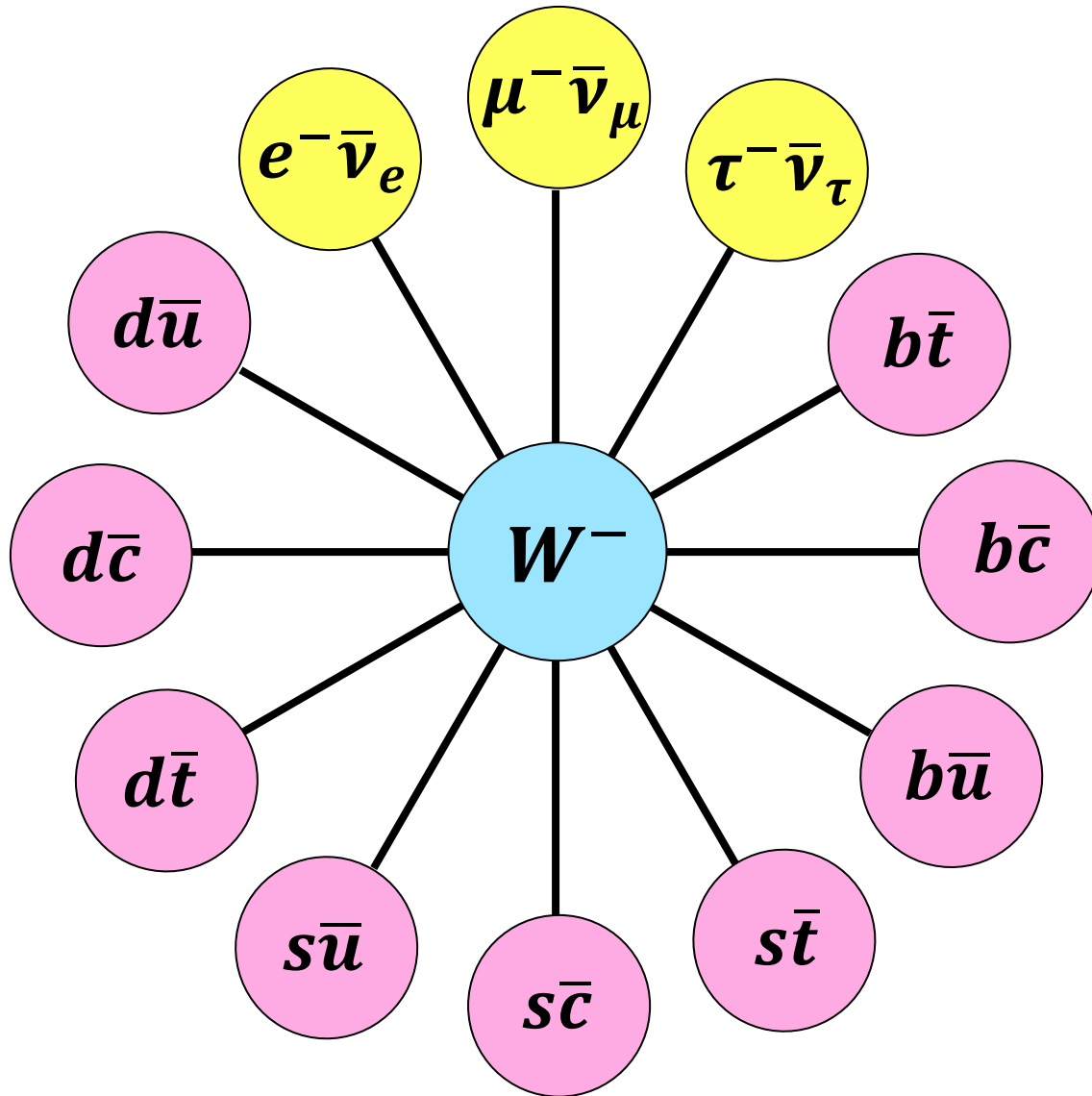
Кварк-лептонная структура W^- .
Или как появляется (исчезает)
отрицательно заряженный
слабый ток



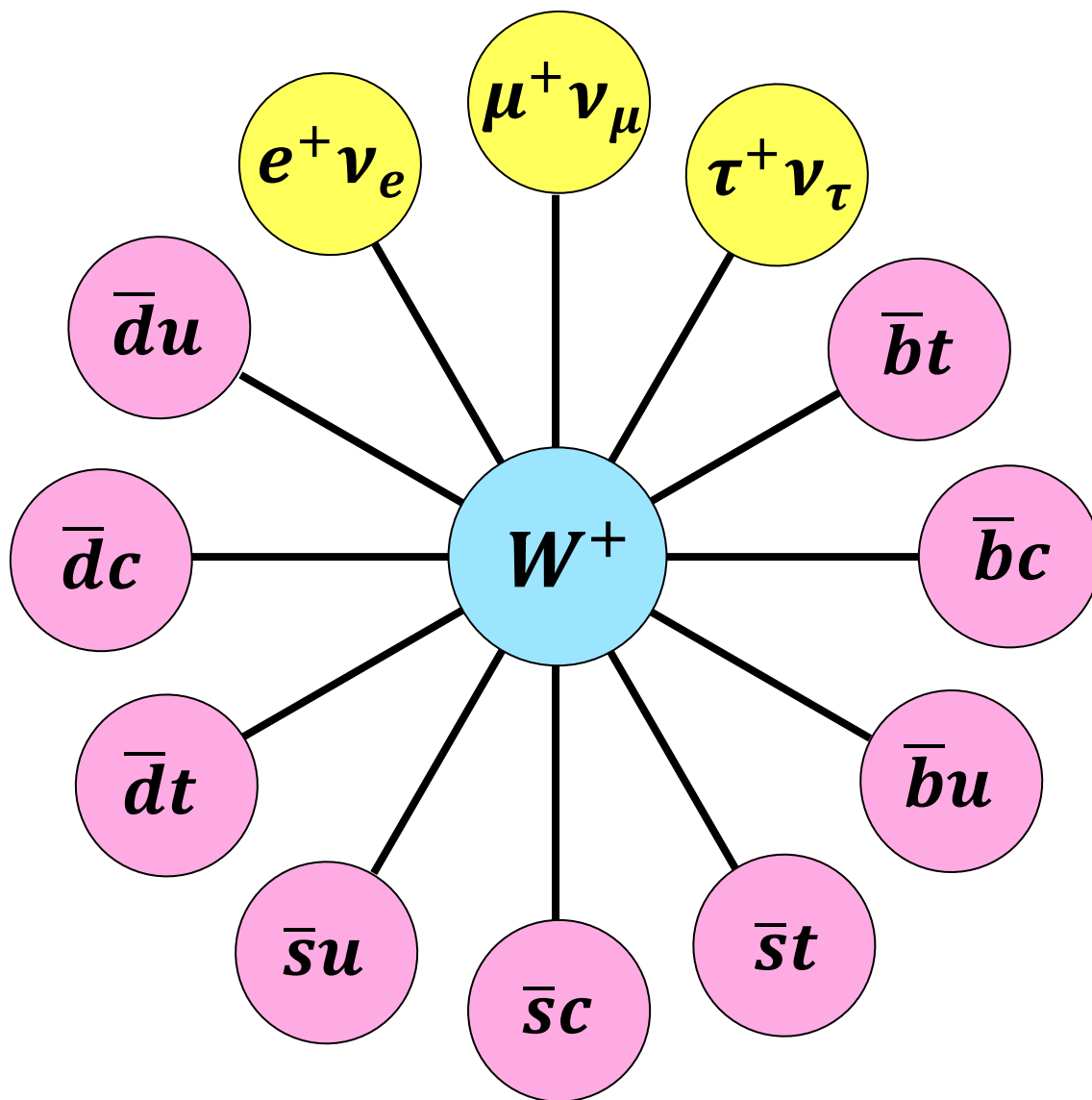
Видно, что за появление (исчезновение) W^- (как и W^+)
отвечает либо пара («вилка») **кварк-антикварк**
как одного, так и разных поколений,
либо пара («вилка»)
заряженный лептон – антинейтрино одного поколения.

Все варианты кварк-лептонных вилок для W^\pm
показаны на следующих двух слайдах

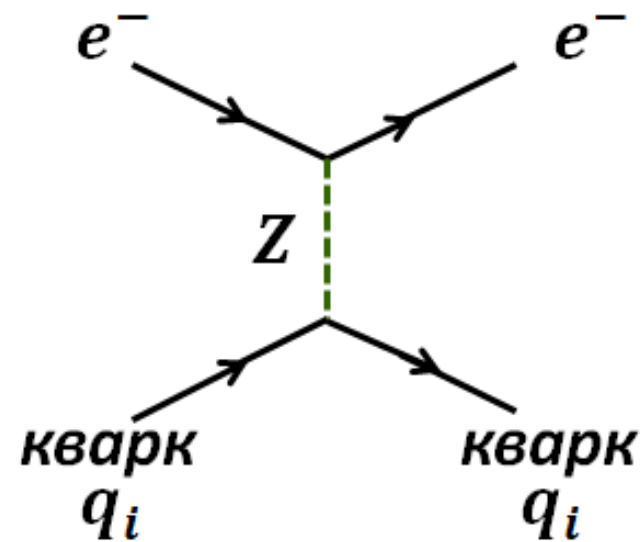
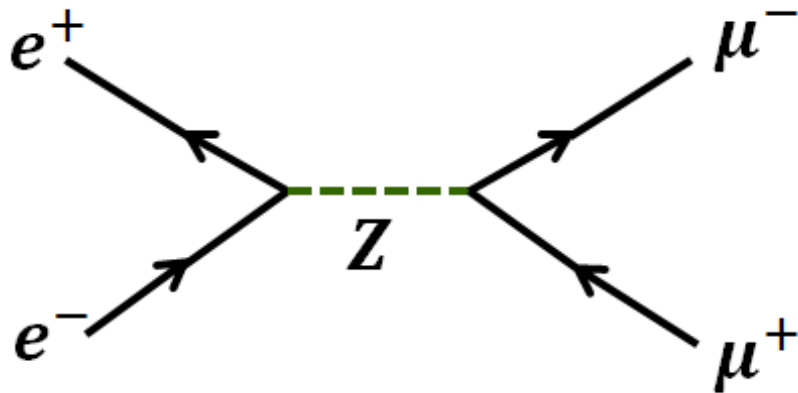
Цветок отрицательно заряженных слабых токов



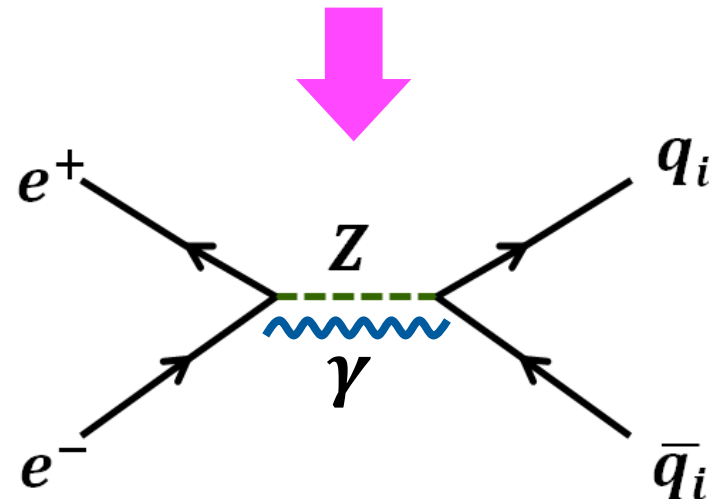
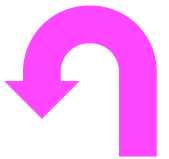
Цветок положительно заряженных слабых токов



Слабые процессы через Z -бозоны. Нейтральные слабые токи

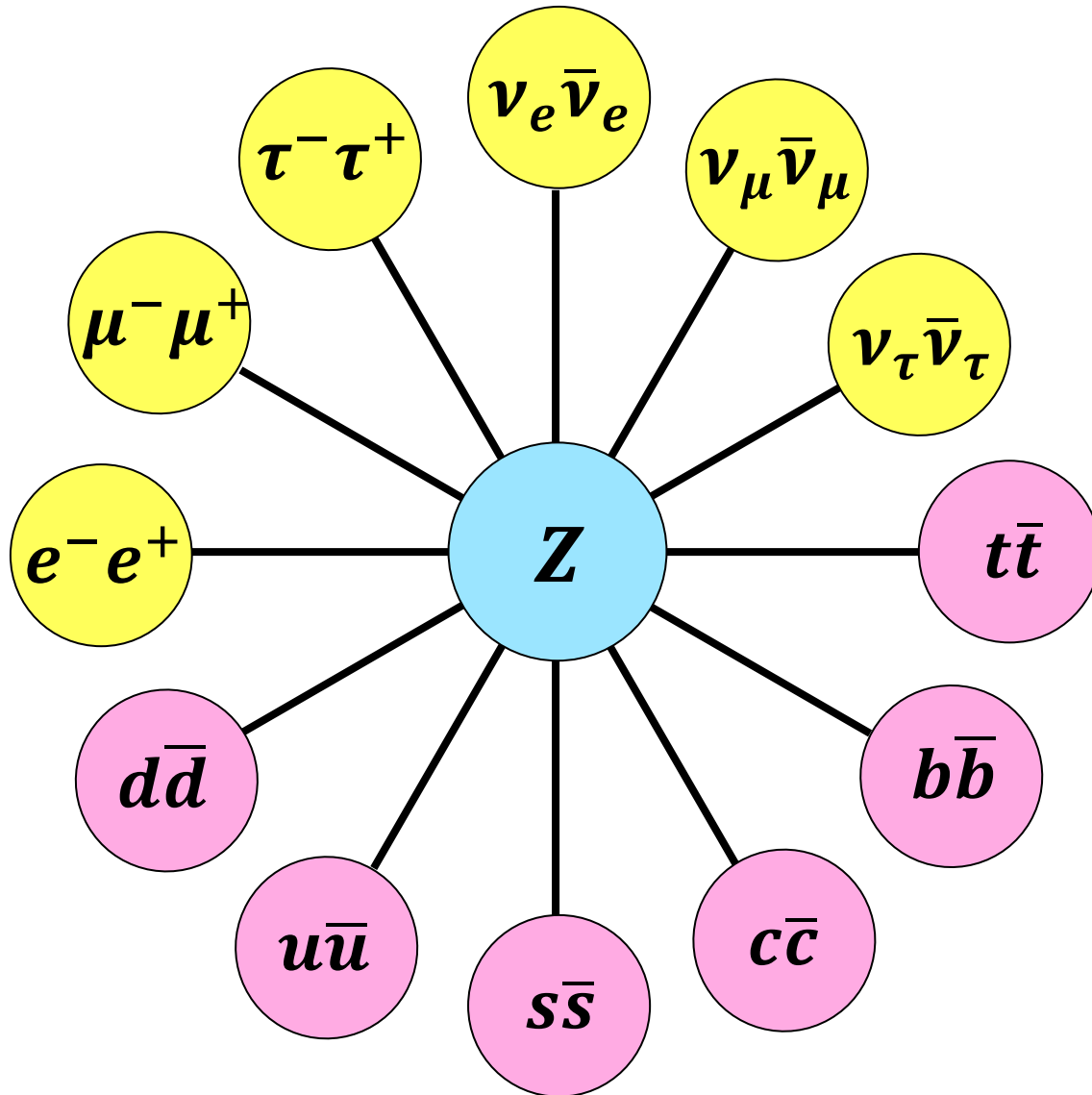


Повернём
диаграмму на 90°



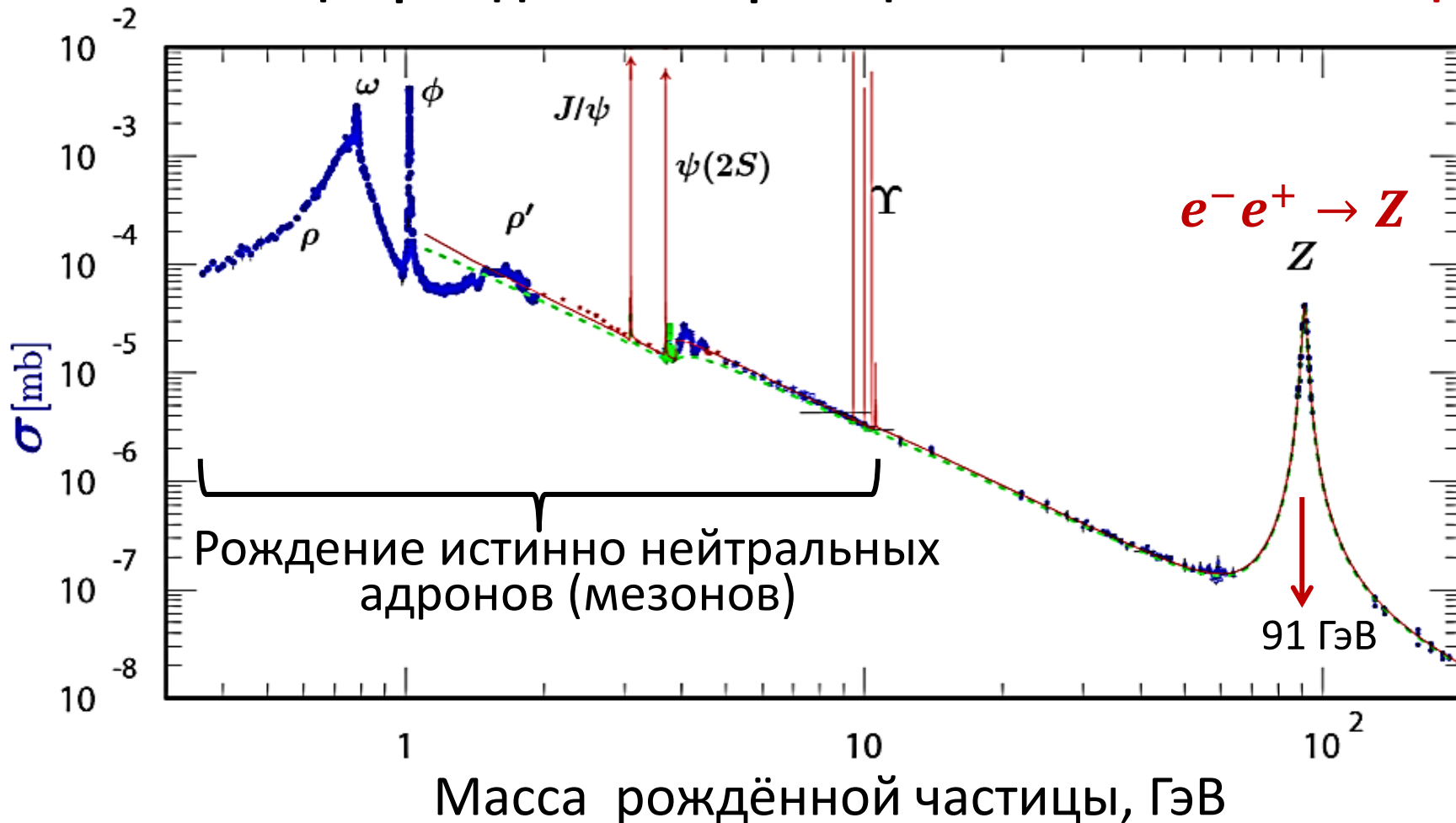
Видно, что
нейтральные слабые токи
не меняют аддитивных
квантовых чисел, т.е.
сохраняют I, I_3, S, C, B, T .
Они истинно нейтральны!

Цветок нейтральных слабых токов



Наблюдение рождения Z -бозонов и других истинно нейтральных частиц на электрон-позитронном (e^-e^+) коллайдере LEP в ЦЕРНе с энергиями частиц по 100 ГэВ.

Частицы рождаются в реакции: $e^- + e^+ \rightarrow \text{частица}$



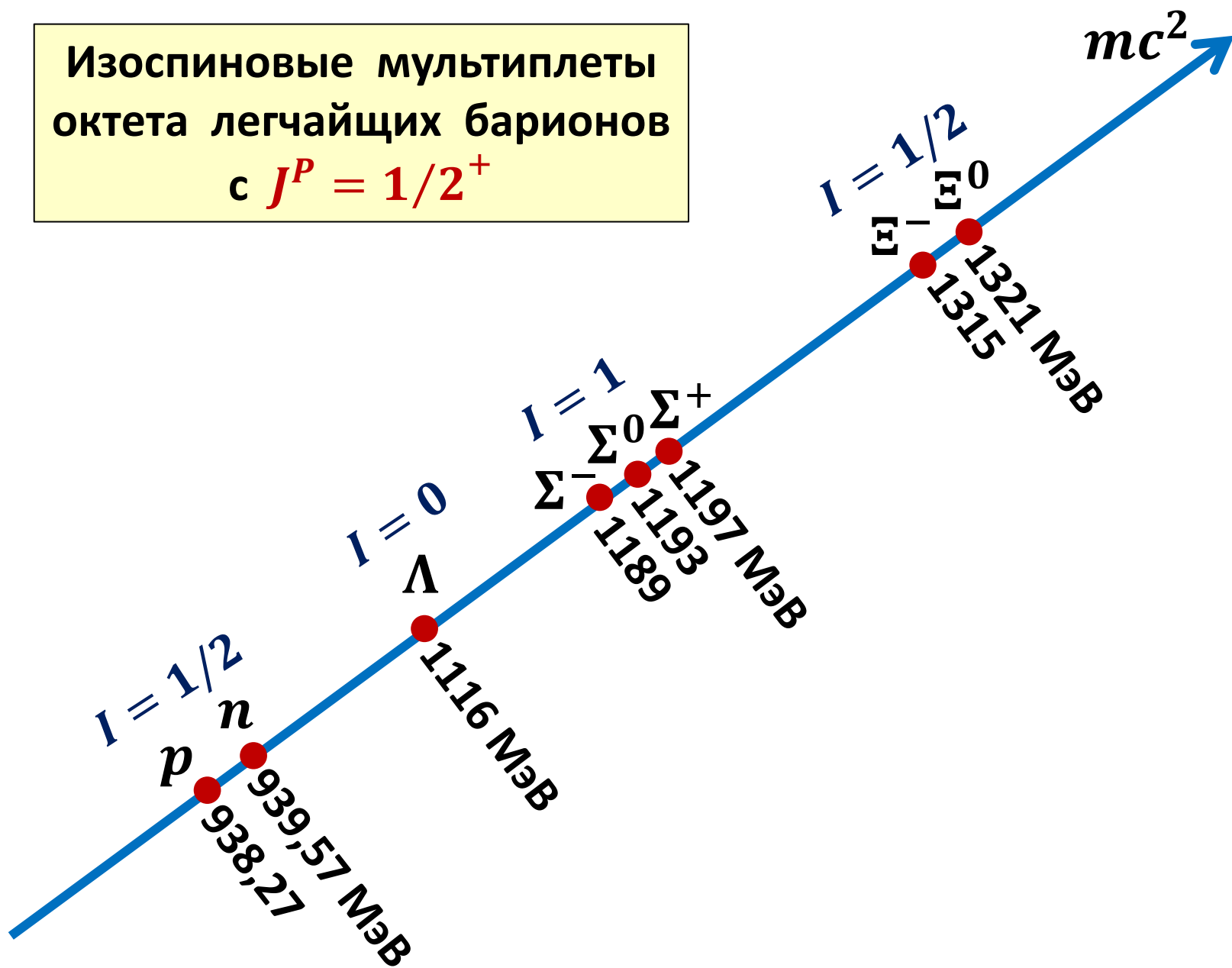
Изомультиплеты

Не только нуклонам, но и всем адронам можно приписать определённый изоспин I . Их можно разбить на группы (так называемые изомультиплеты), состоящие из частиц с одним и тем же I , но разными проекциями изоспина I_3 . Частицы, образующие изомультиплет, ведут себя одинаково в сильном взаимодействии и имеют приблизительно одинаковые массы (небольшие различия в массах имеют электромагнитную природу). Все члены изомультиплета соответствуют как бы одной частице, различным образом ориентированной в зарядовом (изоспиновом) пространстве, т.е. имеющим разные электрические заряды. Если известны все члены изомультиплета, то легко найти изоспин мультиплета из соотношения $2I + 1 = n$, где n – число частиц в изомультиплете (равное числу проекций изоспинового вектора на ось 3).

Изомультиплеты различной размерности

Размерность	Частица	Заряд, e	I_3	mc^2 , МэВ
Изосинглет ($I = 0$)	Λ	0	0	1115,7
Изодублет ($I = 1/2$)	p	+1	+1/2	938,3
	n	0	-1/2	939,6
Изотриплет ($I = 1$)	π^+	+1	+1	139,6
	π^0	0	0	135,0
	π^-	-1	-1	139,6
Изоквартет ($I = 3/2$)	Δ^{++}	+2	+3/2	} 1230-1234
	Δ^+	+1	+1/2	
	Δ^0	0	-1/2	
	Δ^-	-1	-3/2	

Изоспиновые мультиплеты
 октета легчайших барионов
 с $J^P = 1/2^+$



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

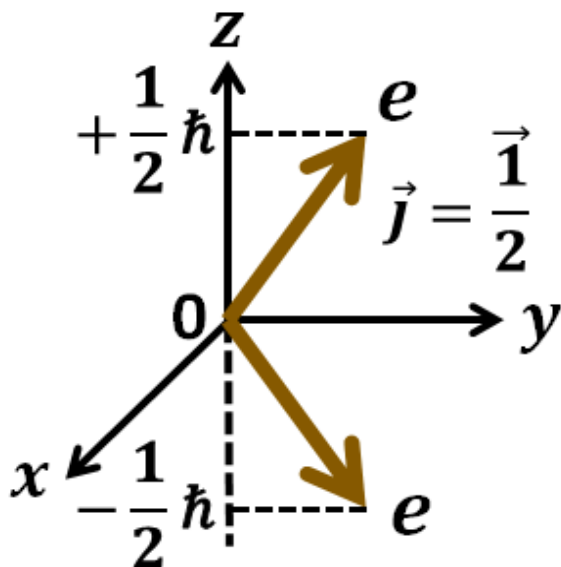
Барион	mc^2 , МэВ	$S(Y)$	I_3	I
p	938	0(+1)	+1/2	1/2
n	940	0(+1)	-1/2	
Σ^+	1189	-1(0)	+1	1
Σ^0	1193	-1(0)	0	
Σ^-	1197	-1(0)	-1	
Λ	1116	-1(0)	0	0
Ξ^0	1315	-2(-1)	+1/2	1/2
Ξ^-	1321	-2(-1)	-1/2	

S – странность, $Y = (B + S)/2$ – гиперзаряд,
 I – изоспин, I_3 – проекция изоспина

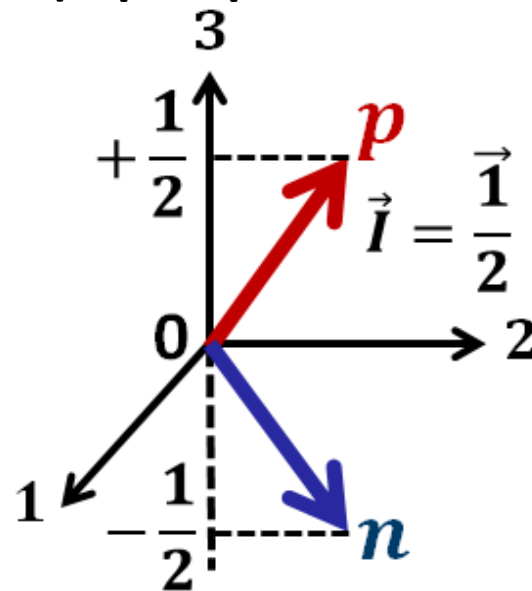
Аналогия спин-изоспин

Два состояния частицы (с обычным спином $1/2$), различающиеся проекцией спина на ось z ($+1/2$) или ($-1/2$) в обычном пространстве, рассматривают не как две разные частицы, а как два состояния одной частицы. Аналогично, протон и нейтрон можно считать не двумя разными частицами, а двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона (с изоспином $1/2$, направленным либо вверх вдоль оси 3 (протон), либо вниз (нейтрон)) в специальном трёхмерном *зарядовом* (т.е. *изоспиновом*) пространстве.

Э
Л
Е
К
Т
Р
О
Н



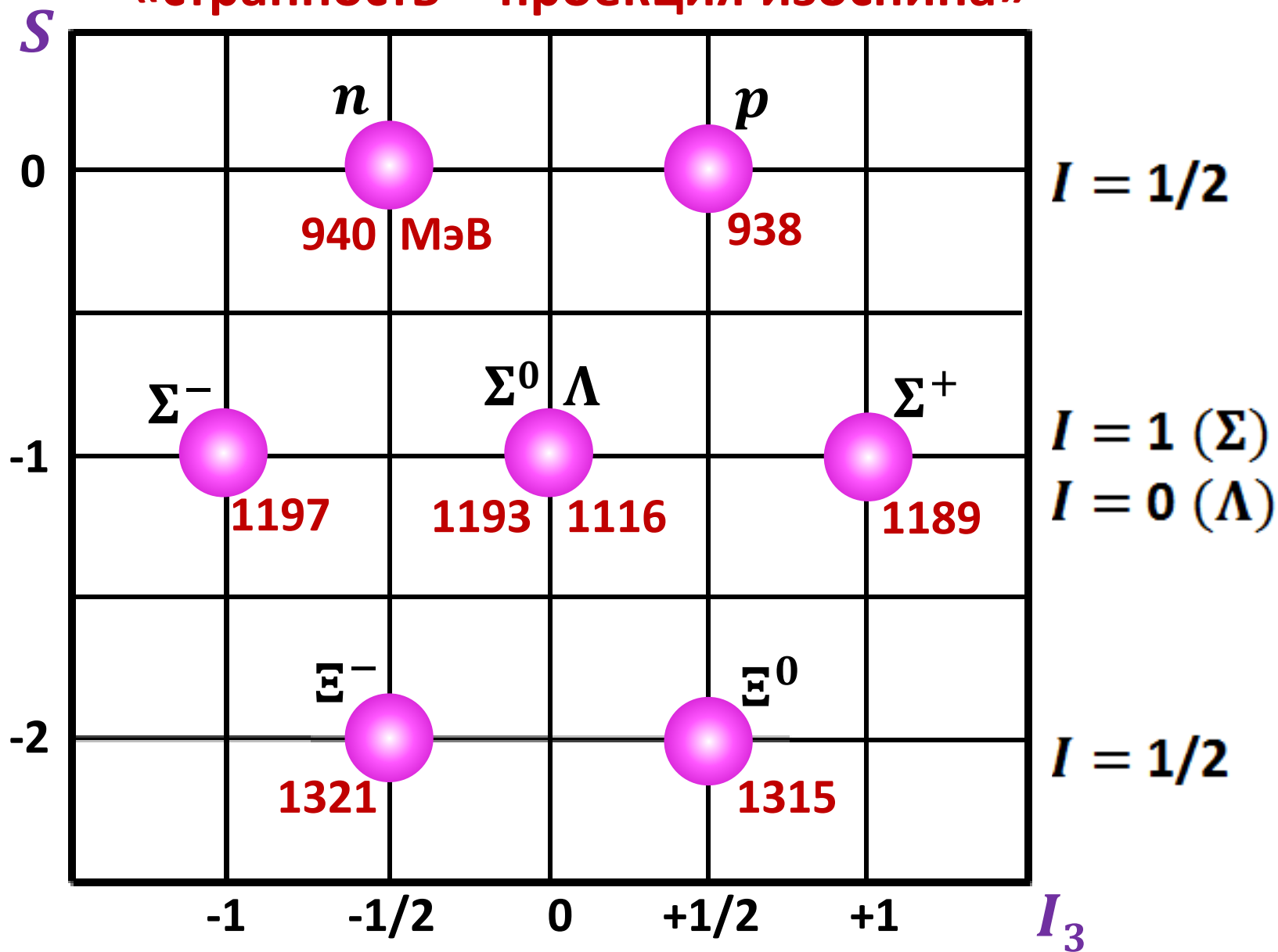
Реальное пространство



Н
У
К
Л
О
Н

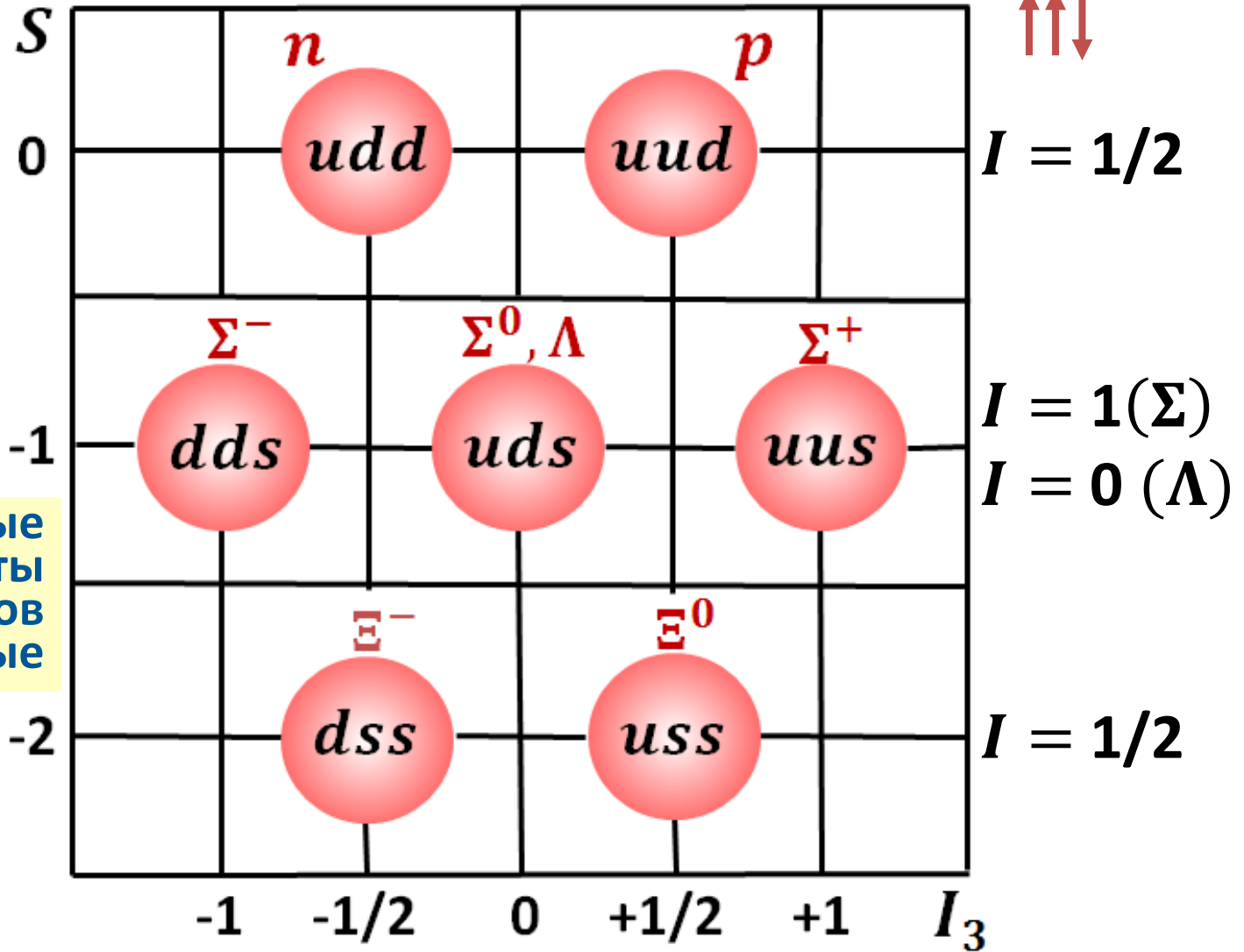
Зарядовое (изоспиновое)
пространство

Октет легчайших барионов на плоскости «странность – проекция изоспина»



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

спины кварков

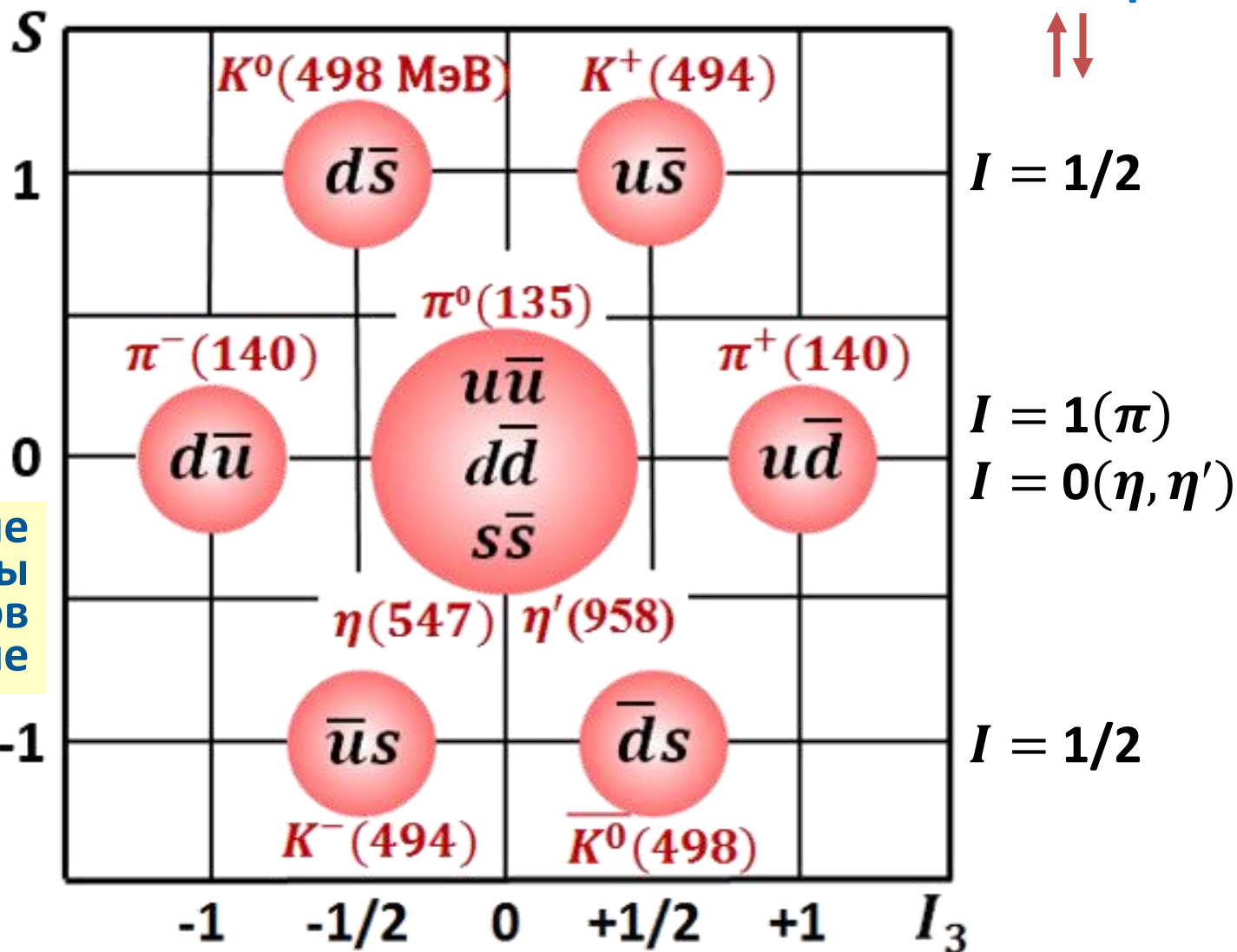


Орбитальные
моменты
кварков
нулевые

Кварковая структура нонета легчайших мезонов

с $J^P = 0^-$

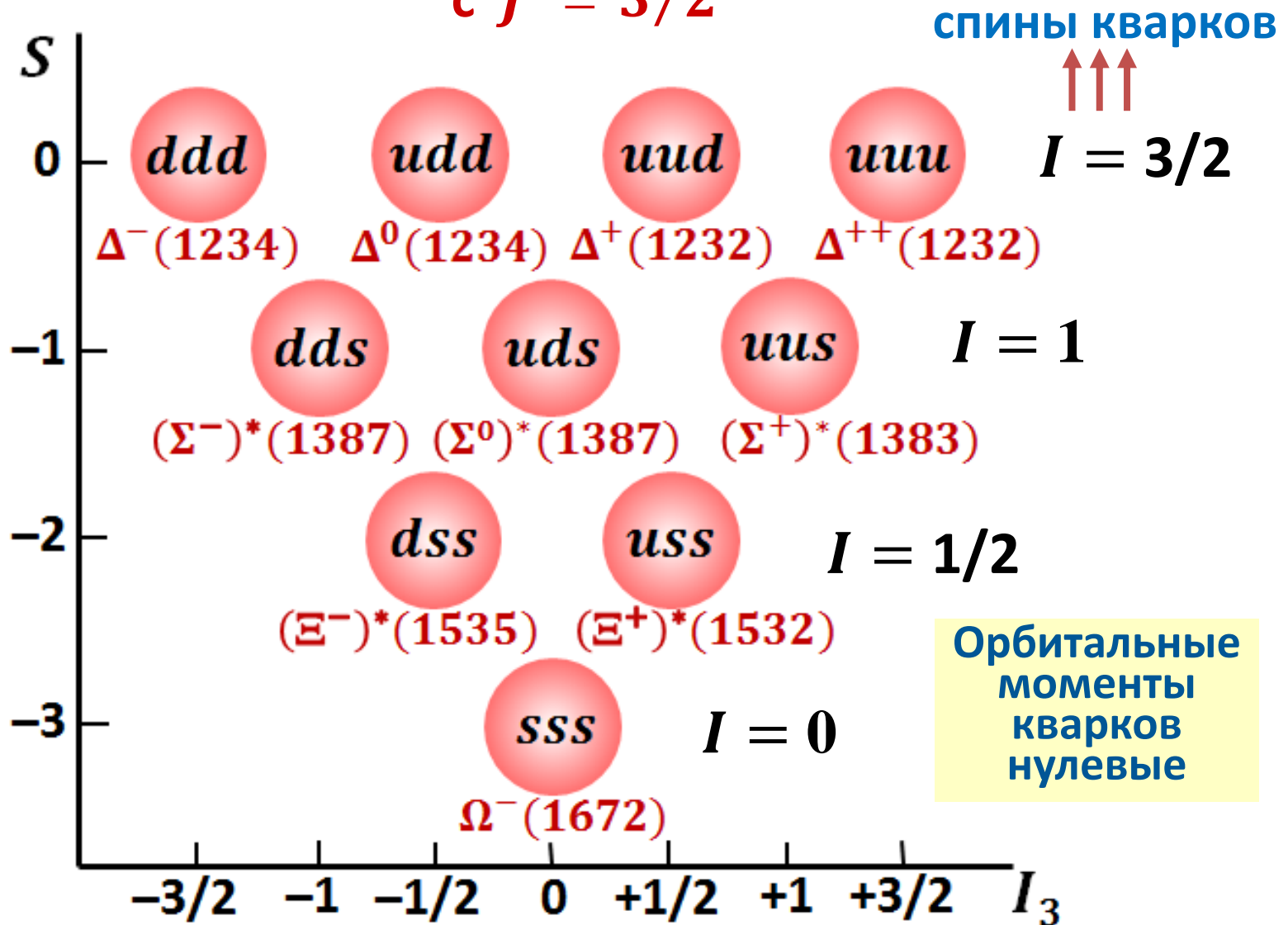
спины кварков



Орбитальные моменты кварков нулевые

Кварковая структура декуплета барионов

с $J^P = 3/2^+$



The quirks of quarks

Причуды (странности) кварков

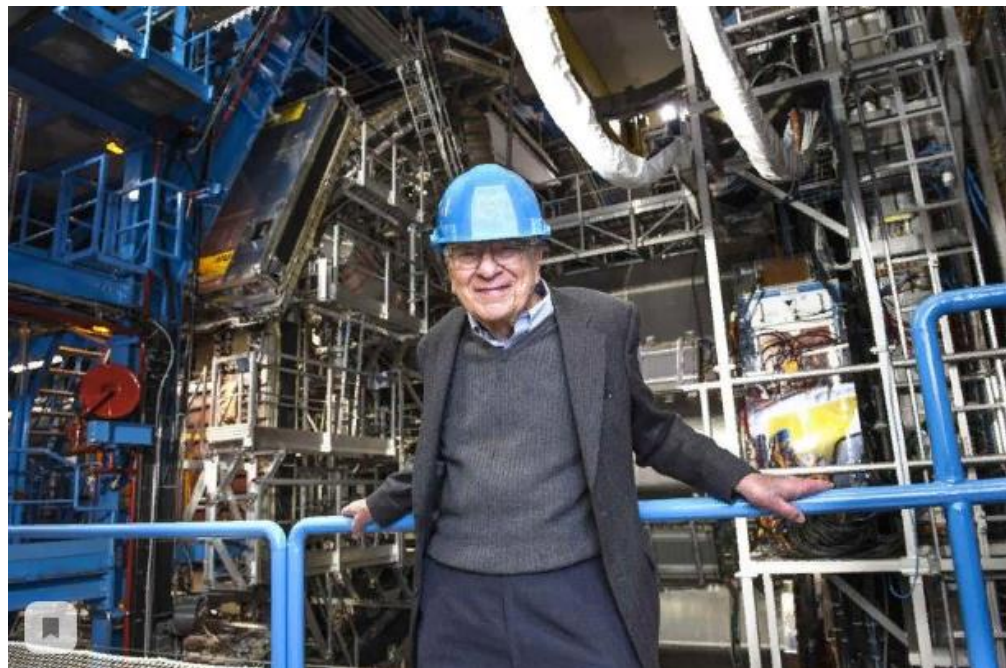
1964 – 2014

Fifty years of quarks

Джордж Цвейг и Мюррей Гелл-Манн посетили ЦЕРН
через 50 лет после предсказания кварков



Цвейг на установке ALICE



Гелл-Манн на установке ATLAS

Квантовое число «цвет»

В природе { **есть** кварковые комбинации $qqq, \bar{q}\bar{q}\bar{q}, q\bar{q}$
но нет комбинаций ~~$qq, \bar{q}\bar{q}, qq\bar{q}, q\bar{q}\bar{q}$~~

Да и свободных кварков (q) и антикварков (\bar{q}) не видят.
 Кроме того, для следующих «угловых» членов декуплета барионов $3/2^+$ не выполняется принцип Паули – три тождественных кварка находятся в одинаковых состояниях:

Орбитальные моменты кварков нулевые

↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
$\Delta^- (ddd)$	$\Delta^{++} (uuu)$	$\Omega^- (sss)$

В 1964-1965 гг было постулировано новое квантовое число «цвет»

Кварки могут быть	q	q	q
красными, зелёными, синими:	K	Z	C
Антиварки – антикрасными,	\bar{q}	\bar{q}	\bar{q}
антизелёными, антисиними:	\bar{K}	\bar{Z}	\bar{C}

$$\Delta^{++} (uuu) \equiv u_K u_Z u_C$$

Но остаётся следующая проблема: каждому адрону можно сопоставить не одну цветовую кварковую комбинацию, удовлетворяющую принципу Паули, а несколько: например, можно предложить следующие варианты устройства протона:

$$p = u_{\text{к}} u_{\text{з}} d_{\text{с}}, u_{\text{к}} u_{\text{з}} d_{\text{з}}, u_{\text{с}} u_{\text{к}} d_{\text{к}}, \dots ,$$
$$u_{\text{с}} u_{\text{к}} d_{\text{з}}, u_{\text{к}} u_{\text{с}} d_{\text{з}}, u_{\text{з}} u_{\text{к}} d_{\text{с}}, \dots ,$$
$$u_{\text{з}} u_{\text{с}} d_{\text{к}},$$
$$u_{\text{с}} u_{\text{з}} d_{\text{к}},$$
$$\dots$$

Однако, в силу принципа неразличимости (тождественности) частиц одного типа, **может существовать лишь один вариант структуры протона.**

Поэтому был принят и второй постулат:

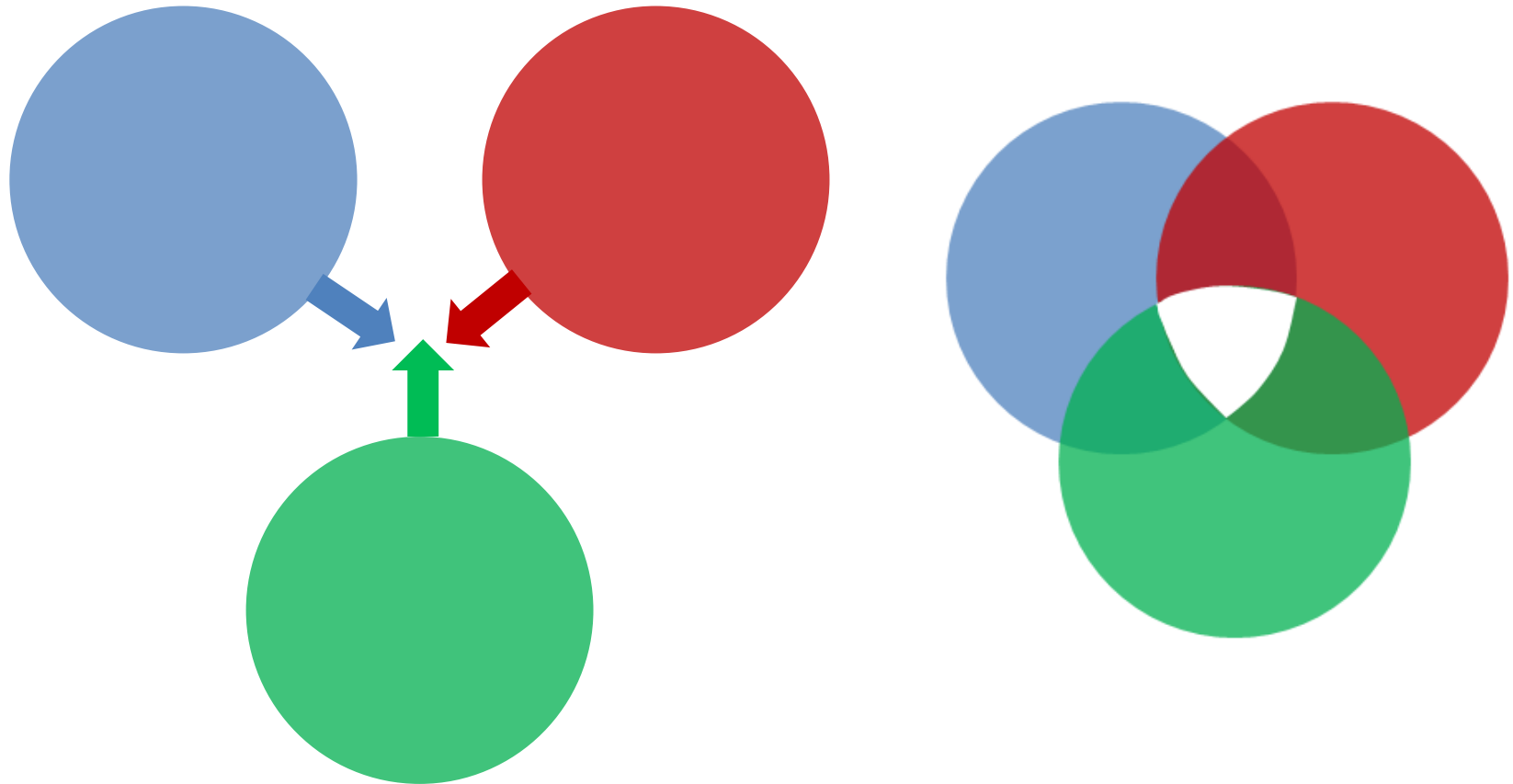
Наблюдаемые (существующие в природе) адроны должны быть абсолютно бесцветными (белыми) – в них кварки разного цвета образуют бесцветные комбинации, т. е. перемешаны равномерно (присутствуют в равных долях).

О таких цветовых состояниях говорят как о *цветовых синглетах*. В этом аналогия между оптическим и квантовым цветом.

С учётом второго постулата остаётся единственный набор белых адронов:

1. Смесь **красного**, **зелёного** и **синего** поровну – **KZC** (барионы).
2. Смесь **антикрасного**, **антизелёного** и **антисинего** поровну – **$\bar{K}\bar{Z}\bar{C}$** (антибарионы).
3. Смесь цвета и его антицвета поровну – **$K\bar{K}$, $Z\bar{Z}$, $C\bar{C}$** (мезоны и антимезоны).

Формирование из трёх базовых цветов бесцветной комбинации – белой



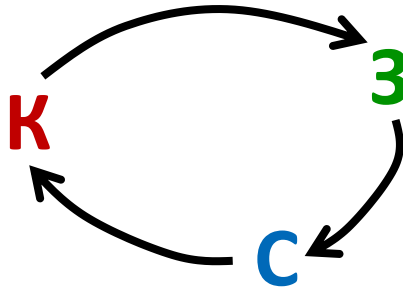
Пример: мезон (мезонный цветовой синглет):

$$q\bar{q} \equiv \text{К}\bar{\text{К}} + \text{З}\bar{\text{З}} + \text{С}\bar{\text{С}}$$

$$\pi^- = d_{\text{К}}\bar{u}_{\bar{\text{К}}} + d_{\text{З}}\bar{u}_{\bar{\text{З}}} + d_{\text{С}}\bar{u}_{\bar{\text{С}}}$$

Цветовые кварковые синглеты (истинные адроны)
не меняются при вращениях
в трёхмерном цветовом пространстве.

При таком вращении
происходит циклическая замена цветов:



Вращение π^- в цветовом пространстве:

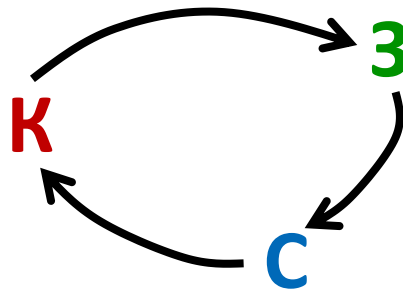
$$\pi^- = d_{\text{К}}\bar{u}_{\bar{\text{К}}} + d_{\text{З}}\bar{u}_{\bar{\text{З}}} + d_{\text{С}}\bar{u}_{\bar{\text{С}}}$$



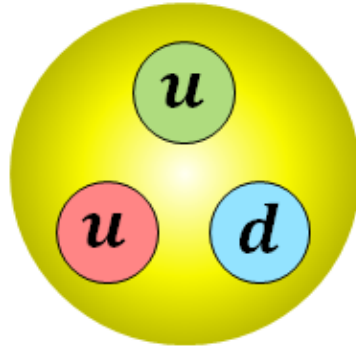
$$\pi^- = d_{\text{З}}\bar{u}_{\bar{\text{З}}} + d_{\text{С}}\bar{u}_{\bar{\text{С}}} + d_{\text{К}}\bar{u}_{\bar{\text{К}}}$$



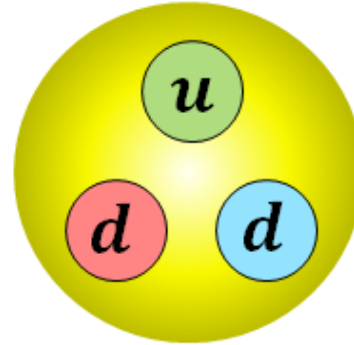
$$\pi^- = d_{\text{С}}\bar{u}_{\bar{\text{С}}} + d_{\text{К}}\bar{u}_{\bar{\text{К}}} + d_{\text{З}}\bar{u}_{\bar{\text{З}}}$$



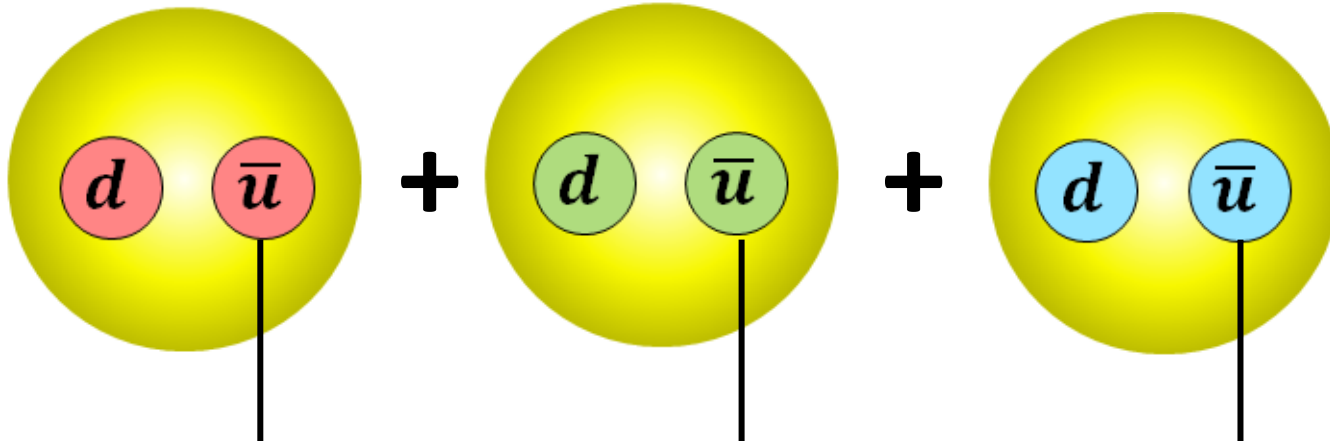
Протон



Нейтрон



π^-



антикрасный

антизелёный

антисиний

Сильное взаимодействие устроено так, что цветные состояния значительно тяжелее бесцветных, поэтому энергетически менее выгодны.

Это роднит межкварковые силы с электрическими и понять это помогает аналогия с атомами.

Нейтральные атомы, где заряды скомпенсированы, значительно устойчивей ионов, имеющих большую дополнительную электрическую энергию и стремящихся превратиться в нейтральные атомы под действием сил кулоновского притяжения. Нейтральные атомы в этом плане аналогичны белым адронам, а ионы – цветным состояниям.

Рассмотренная аналогия позволяет трактовать цвет как заряд сильного взаимодействия.

Так вводится **цветовой заряд**, ответственный за сильное взаимодействие (по аналогии с электрическим зарядом, ответственным за электромагнитное взаимодействие). Для цветового заряда также как и для электрического имеет место закон сохранения.

Глюоны.

Квантовая хромодинамика (КХД)

Сильное взаимодействие осуществляется обменом безмассовой электрически нейтральной частицей со спином 1, отрицательной чётностью и нулевым изоспином – **глюоном** (от англ. *glue* – клей).

Испуская или поглощая глюон, кварк определённого цвета может сохранять этот цвет или изменять цвет.

Цвет исполняет роль заряда сильного взаимодействия.

При испускании и поглощении глюона выполняется

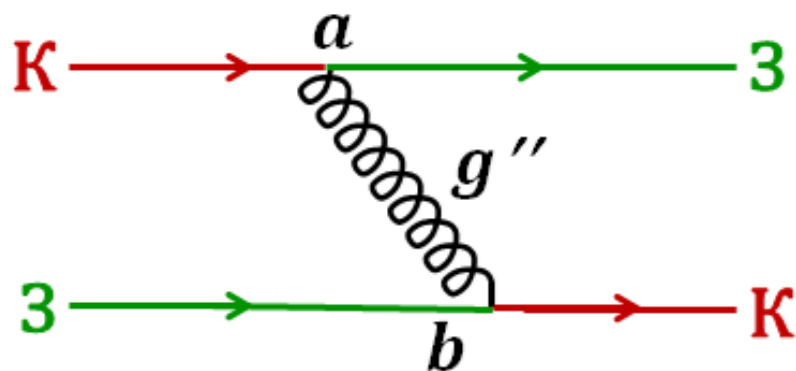
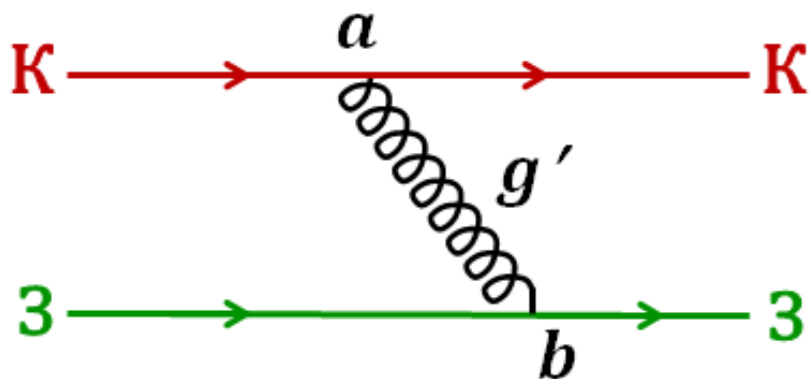
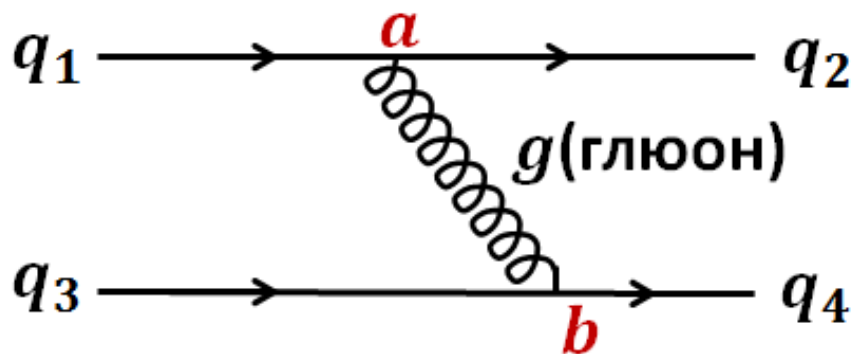
закон сохранения цвета или цветового заряда.

Для нахождения
цветовых характеристик глюонов используем
закон сохранения цвета (цветового заряда):

Уравнения сохранения
цвета в узлах:

$$a) \quad q_1 = g + q_2$$

$$b) \quad q_3 + g = q_4$$



$$a) \quad K = g' + K$$

$$b) \quad 3 + g' = 3$$

$$g' = \begin{cases} K\bar{K} \\ 3\bar{3} \\ C\bar{C} \end{cases}$$

$$a) \quad K = g'' + 3$$

$$b) \quad 3 + g'' = K$$

$$g'' = K\bar{3}$$

Цветовая структура глюонов

	\bar{K}	$\bar{3}$	\bar{C}
K	$K\bar{K}$	$K\bar{3}$	$K\bar{C}$
3	$3\bar{K}$	$3\bar{3}$	$3\bar{C}$
C	$C\bar{K}$	$C\bar{3}$	$C\bar{C}$

Из цвета и антицвета получаем $3 \times 3 = 9$ парных комбинаций «цвет-антицвет», показанных в таблице. Эти 9 комбинаций делятся на 6 недиагональных явно окрашенных пар:

$K\bar{3}$, $3\bar{K}$, $K\bar{C}$, $C\bar{K}$, $3\bar{C}$, $C\bar{3}$ и 3 диагональных: $K\bar{K}$, $3\bar{3}$, $C\bar{C}$, обладающих *скрытым цветом*. Недиагональные явно окрашенные пары в силу сохранения цветового заряда не перемешиваются. В то же время сохранение цвета не препятствует переходам $K\bar{K} \leftrightarrow 3\bar{3} \leftrightarrow C\bar{C}$. В результате этих переходов возникают три линейных комбинаций, из которых одна $K\bar{K} + 3\bar{3} + C\bar{C}$, как и белый мезон, полностью лишена цвета и не может исполнять функцию глюона (переносить цвет) и должна быть отброшена.

Две другие (глюонные) цветовые смеси имеют сочетания цветов $\frac{1}{2}K\bar{K} + \frac{1}{2}3\bar{3}$ и $\frac{1}{6}K\bar{K} + \frac{1}{6}3\bar{3} + \frac{2}{3}C\bar{C}$. **Итак, глюонов 8**

Итак, цветовая структура 8 глюонов, реализующих сильное взаимодействие, следующая:

Шесть явно окрашенных:

$K\bar{3}, 3\bar{K}, K\bar{C}, C\bar{K}, 3\bar{C}, C\bar{3}$

Два со скрытым цветом:

$$\frac{1}{2} K\bar{K} + \frac{1}{2} 3\bar{3} \text{ и } \frac{1}{6} K\bar{K} + \frac{1}{6} 3\bar{3} + \frac{2}{3} C\bar{C}$$

Поясним смысл числовых коэффициентов в цветовых комбинациях глюонов со скрытым цветом.

Они показывают вероятность пребывания в глюоне данной пары «цвет-антицвет» или долю времени, которую глюон проводит в форме данной пары.

Отметим, что глюоны со скрытым цветом могут быть выбраны и двумя другими эквивалентными способами путём циклической замены цветов:

$$K \leftrightarrow 3 \leftrightarrow C \leftrightarrow K.$$

Сопоставление КЭД и КХД

КЭД	КХД
Электрон Заряд Фотон Позитроний (e^-e^+)	Кварк Цвет Глюон Мезон ($q\bar{q}$)