

Сегодня: воскресенье, 19 июня 2016 г.

Ядерная физика

**Степанова Екатерина Николаевна
доцент кафедры ОФ ФТИ ТПУ**

Тема 16. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

16.1. Общие сведения об элементарных частицах

16.2. Виды взаимодействий

16.3. Краткая классификация и свойства частиц

16.4. Странные частицы

16.5. Кварки и очарование

16.6. Великое объединение и стандартная

модель

Существование элементарных частиц физики обнаружили при изучении ядерных процессов, поэтому вплоть до середины XX века физика элементарных частиц была разделом ядерной физики.

В настоящее время физика элементарных частиц и ядерная физика являются близкими, но самостоятельными разделами физики, объединенными общностью многих рассматриваемых проблем и применяемыми методами исследования.

Главная задача физики элементарных частиц – это исследование природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.

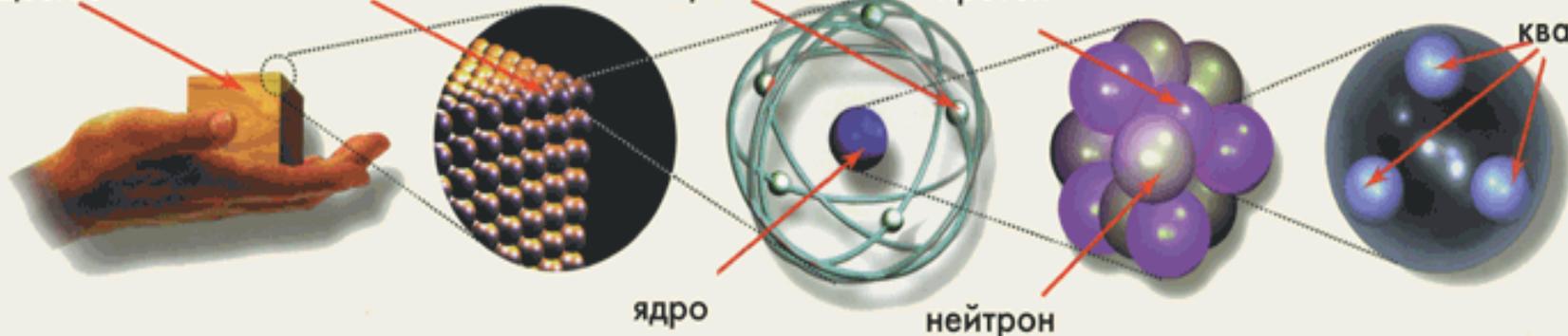
вещество

атом

электрон

протон

кварки



Фундаментальные фермионы

ЛЕПТОНЫ

	ЛЕПТОНЫ	
	-1	0
Электрический заряд		
Частицы окружающего мира принадлежат этой группе.	<p>Электрон переносит электрический ток $M = 0.511 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>Электронное нейтрино играет фундаментальную роль при горении солнца, каждую секунду сквозь вас пролетают миллиарды этих частиц</p>
Эти частицы существовали в первый момент после «Большого взрыва». Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц.	<p>Мюон аналог электрона, время жизни – 2 микросекунды $M = 106 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>Мюонное нейтрино образуется при рождении и распаде мюонов $M < 0.2 \text{ МэВ}/c^2$</p>
	<p>Тау аналог электрона, время жизни – 3×10^{-13} $M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>Тау нейтрино образуется при рождении и распаде тау лептонов, открыто в 1975 г. $M < 20 \text{ МэВ}/c^2$</p>

КВАРКИ

	КВАРКИ	
	+2/3	-1/3
	<p>u-кварк входит в состав протонов и нейтронов $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>d-кварк входит в состав протонов и нейтронов $M = 6 \text{ МэВ}/c^2$</p>
	<p>c-кварк (очарованный) открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>s-кварк (странный) открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$</p>
	<p>t-кварк открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$</p>	<p>b-кварк (прелестный) открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$</p>

Кванты фундаментальных полей

<p>Глюоны кванты сильного взаимодействия</p> <p>кварки и глюоны</p>	<p>Фотоны кванты электромагнитных полей</p> <p>Все заряженные частицы</p>	<p>Промежуточные векторные бозоны кванты слабого взаимодействия</p> <p>кварки, лептоны, промежуточные бозоны</p>	<p>Гравитоны кванты гравитации</p> <p>все частицы</p>
<p>Взаимодействуют:</p>			
<p>Объекты:</p>	<p>протон, нейтрон, атомные ядра, пи-мезон и др. мезоны</p>	<p>атомы, молекулы</p>	<p>солнечная система, галактики, черные дыры</p>
<p>Процессы:</p>	<p>деление и синтез атомных ядер</p>	<p>электричество, магнетизм, распространение света, радиоволны</p>	<p>притяжение тел</p>

16.1. Общие сведения об элементарных частицах

В качестве первого приближения:

элементарные частицы - такие микрочастицы, внутренняя структура которых на современном уровне физики нельзя представить как объединение других частиц.

Во всех наблюдавшихся до сих пор явлениях каждая такая частица ведёт себя как единое целое. Элементарные частицы могут превращаться друг в друга (протон в нейтрон и наоборот, γ -квант в e^-e^+ и наоборот и т.д.).

В настоящее время *общее число известных элементарных частиц* (вместе с античастицами) приближается к **400**.

До этого были изучены

электроном e^- (позитроном e^+),

протоном p ,

нейтроном n ,

фотоном γ и

электронным нейтрино (анти) ν_e ($\bar{\nu}_e$)

Эти частицы стабильны или квазистабильны, и они существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии.

Квазистабильные нейтроны входят в состав атомных ядер, многие из которых являются абсолютно устойчивыми.

Почти все остальные элементарные частицы крайне нестабильны и образуются во вторичном космическом излучении или получаются в лаборатории с помощью ускорителей, а затем быстро распадаются, превращаясь в конечном итоге в стабильные частицы.

Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится *целый ряд физических величин*, значениями которых они и различаются.

Наиболее известными среди них:

масса,

среднее время жизни,

спин,

электрический заряд,

магнитный момент.

Масштабы
 пространства и
 способы их
 исследования.

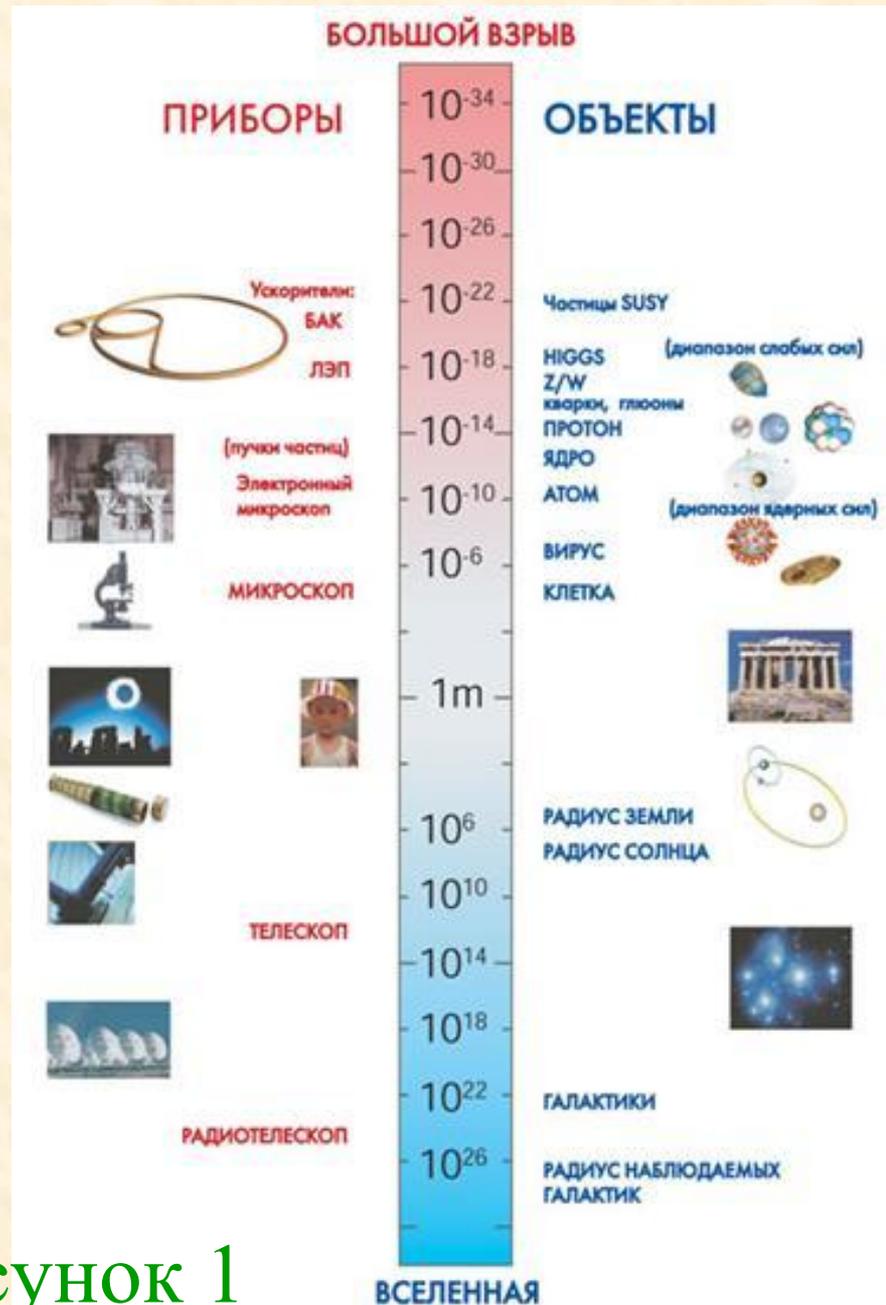


Рисунок 1

Различают *три уровня микромира*:

1. *Молекулярно-атомный*

$$E = 1 - 10 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м}$$

2. *Ядерный*

$$E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}$$

3. *Мельчайшие частицы*

$$E > 10^8 \text{ эВ} \quad \Delta r < 10^{-15} \text{ м}$$

13.2. Виды взаимодействий

Процессы, в которых участвуют различные элементарные частицы, сильно различаются по характерным временам их протекания и энергиям.

Известны *четыре вида взаимодействий* между элементарными частицами:

сильное,

электромагнитное,

слабое,

гравитационное



убывание
ИНТЕНСИВНОСТИ

Интенсивность взаимодействия характеризуют *константой взаимодействия α* – это безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия.

Для электромагнитного взаимодействия $\alpha = \frac{E}{m_0 c^2}$

где E – энергия взаимодействия двух электронов, находящихся на расстоянии λ .

Константы других видов взаимодействий определяют относительно значения константы электромагнитного взаимодействия.

Отношение констант даёт относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

1. *Сильное взаимодействие*

- обеспечивает связь нуклонов в ядре.

- $\alpha \sim 1$.

- наибольшее расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие, (радиус действия) $\sim 10^{-15}$ м.

2. *Электромагнитное взаимодействие.*

- Константа взаимодействия $\alpha = 1/137 \approx 10^{-2}$ (константа тонкой структуры).

- Радиус действия не ограничен ($r = \infty$).

3. Слабое взаимодействие.

- ответственно за все виды β -распада ядер (включая e – захваты), распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрона с веществом.

$$\alpha \approx 10^{-10} \div 10^{-14}.$$

- является короткодействующим.

4. Гравитационное взаимодействие

- $\alpha \approx 10^{-38}$.

- радиус действия не ограничен ($r=\infty$).

- является универсальным, ему подвержены все без исключения элементарные частицы. Однако в процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет.

В таблице приведены значения (по порядку величин) константы разных видов взаимодействия, а также среднее время жизни частиц, распадающихся за счёт данного вида взаимодействия (время распада).

Тип взаимодействий	Механизм обмена	Интенсивность, α	Радиус действия r , м	Характерное время жизни, τ , с
Сильное	глюонами	≈ 1	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромагнитное	фотонами	$\approx 1/137$	∞	$\approx 10^{-18}$
Слабое	Промежуточные бозоны	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
Гравитационное	гравитоны	$\approx 10^{-38}$	∞	- 15

16.3. Краткая классификация и свойства частиц

Элементарные частицы обычно подразделяются на *четыре класса*.

Первый класс - только одна частица – *фотон*.

Второй класс – *лептоны*.

Третий – *адроны*, (мезоны и барионы часто объединяют в один класс сильно взаимодействующих частиц, называемых *адронами* (греческое слово «адрос» означает крупный, массивный)).

Группа	Название частицы	Символ		Масса		Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)
		Частица	Анти-частица	в электронных массах	в МэВ			
ФОТОНЫ	Фотон	γ		0	0	0	1	Стабилен
ЛЕПТОНЫ	Нейтрино электронное	ν_e	$\tilde{\nu}_e$	0	0	0	1/2	Стабильно
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\tilde{\nu}_\mu$	0	0	0	1/2	Стабильно
	Тау-нейтрино	ν_τ	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	0	1/2	Стабильно
		Электрон	e^-	e^+	1	0,511	-1 1	1/2
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	105,66	-1 1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	3492	1782	-1 1	1/2	$1,46 \cdot 10^{-12}$

Группа	Название частицы	Символ		Масса		Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)			
		Частица	Анти-частица	в электронных массах	в МэВ						
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны		π^0	264,1	134,96	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$		
		π^+	π^-	273,1	139,57	1	-1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$		
		К-мезоны		K^+	K^-	966,4	493,67	1	-1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$
		K^0	\tilde{K}^0	974,1	437,7	0	0	0	$\approx 10^{-10}$ -10^{-8}		
		Эта-нуль-мезон		η^0	1074	548,8	0	0	0	$\approx 10^{-18}$	
	Барионы	Протон		p	\tilde{p}	1836,1	933,28	1	-1	1/2	Стабилен
		Нейтрон		n	\tilde{n}	1838,6	939,57	0	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон		Λ^0	$\tilde{\Lambda}^0$	2183,1	1115,6	0	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны		Σ^+	$\tilde{\Sigma}^+$	2327,6	1189,4	1	-1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
				Σ^0	$\tilde{\Sigma}^0$	2333,6	1192,5	0	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
				Σ^-	$\tilde{\Sigma}^-$	2343,1	1197,4	-1	1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны		Ξ^0	$\tilde{\Xi}^0$	2572,8	1314,9	0	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
				Ξ^-	$\tilde{\Xi}^-$	2585,6	1321,3	-1	1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
	Омега-минус-гиперон		Ω^-	$\tilde{\Omega}^-$	3273	1672,2	-1	1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$	

Рассмотрим более подробно перечисленные классы частиц.

1. **ФОТОНЫ**, γ (*кванты электромагнитного поля*), участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействием.

2. **ЛЕПТОНЫ** – частицы, участвующие в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях.

Лептоны (от греч. «лептос» – лёгкий) - легкие частицы, не обладающие сильным взаимодействием:

- **электроны** (e^- , e^+),
- **мюоны** (μ^- , μ^+),
- **таоны** (τ^- , τ^+),

а также

электронные нейтрино (ν_e , $\tilde{\nu}_e$),

мюонный нейтрино (ν_μ , $\tilde{\nu}_\mu$)

тау нейтрино (ν_τ , $\tilde{\nu}_\tau$).

Спин всех лептонов равен $\hbar/2$ – это **фермионы**.

Все лептоны обладают **слабым взаимодействием**. Те из них, которые имеют электрический заряд (т.е. мюоны и электроны), обладают также и **электромагнитным взаимодействием**.

Эти частицы являются шестой компонентой космического излучения.

Три семейства фундаментальных частиц вещества

Семейство 1

Частица	Масса, МэВ	Заряд
Электрон	0,00054	- 1
Электронное нейтрино	$<10^{-8}$	0
U - кварк	0,0047	+ 2/3
D - кварк	0,0074	- 1/3

Семейство 2

Частица	Масса, МэВ	Заряд
Мюон	0,11	- 1
Мюонное нейтрино	0,0003	0
C - кварк	1,6	+ 2/3
S - кварк	0,16	- 1/3

Семейство 3

Частица	Масса, МэВ	Заряд
Таон	1,9	- 1
Таонное нейтрино	$<0,033$	0
T - кварк	189,0	+ 2/3
B - кварк	5,2	- 1/3

2. **АДРОНЫ** – тяжелые, крупные частицы, участвующие в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях.

Класс адронов объединяет **мезоны и барионы**. Сегодня известно свыше сотни адронов.

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

Барионы - тяжелые частицы. Самые легкие из барионов - нуклоны (протоны и нейтроны). За ними следуют т.н. гипероны (Λ , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^- , Ω^-).

Все гипероны обладают сильным взаимодействием и активно взаимодействуют с атомными ядрами.

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

Все **барионы**, кроме протона, **нестабильны: время жизни** составляет всего лишь $\sim 10^{-23} - 10^{-22}$ с.

Мезоны – адроны, состоящие из кварка и антикварка (q, \tilde{q}), барионное число $B = 0$.

Мезоны - сильно взаимодействующие нестабильные частицы, не несущими барионного заряда:

- **π - мезоны** или пионы (π^+, π^-, π^0),
- **K - мезоны** или каоны ($K^+, K^-, K^0, \tilde{K}^0$)
- **η – (эта) мезон**

Массы π^+ и π^- мезонов одинакова и равна $273,1m_e$, $m_{\pi^0} \approx 264,1m_e$

Время жизни соответственно $2,6 \cdot 10^{-8}$ и $0,8 \cdot 10^{-16}$ с.

Масса K -мезонов составляет $970m_e$.

Время жизни K -мезонов 10^{-8} с.

Масса эта-мезонов $1074 m_e$, время жизни порядка 10^{-19} с.

Закон сохранения барионного числа:

В замкнутых системах при любых превращениях элементарных частиц барионное число сохраняется.

В отличие от лептонов, *мезоны* обладают не только *слабым* (и, если они заряжены, *электромагнитным*), но также и *сильным взаимодействием*, проявляющимся при взаимодействии их между собой, а также при взаимодействии между мезонами и барионами.

Спин всех мезонов равен нулю, так что они являются *бозонами*.

4. **КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ** – *частицы*
переносящие взаимодействие между кварками и
лептонами.

Характеристики элементарных частиц

Каждая частица описывается набором физических величин - квантовых чисел – определяющих её свойства.

Наиболее часто употребляемые характеристики частиц:

1. *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.

2. *Время жизни, τ .*

В зависимости от времени жизни частицы делятся на *стабильные частицы* (время жизни относительно велико) и *нестабильные*.

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

К стабильным частицам относят частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию.

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

3. Спин, J .

Величина спина измеряется в единицах \hbar и может принимать 0, полуцелые и целые значения. Например, спин π , 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.

4. *Электрический заряд, q .*

Электрический заряд является целой кратной величиной от $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (Кулон), называемой *элементарным электрическим зарядом*.

Частицы могут иметь заряды $0, \pm 1, \pm 2$.

5. *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:

лептонное число L

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.

1. Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ .

Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов.

Лептоны e, μ и τ участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны ν_e, ν_μ и ν_τ участвуют только в слабых взаимодействиях.

Лептонные числа имеют значения

$$L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1.$$

Например, e^- имеет $L_e = +1$; e^+, ν_e имеют

$$L_e = -1.$$

Все адроны имеют $L_e, L_\mu, L_\tau = 0$.

2. *Барионное число B .*

$$B = 0, +1, -1.$$

Барионы (n , p , Λ , Σ , нуклонные резонансы): $B = +1$.

Мезоны, мезонные резонансы: $B = 0$.

Антибарионы $B = -1$.

3. *Странность s .*

$$s = (-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3)$$

определяется кварковым составом адронов.

Например, гипероны Λ , Σ имеют $s = -1$;

K^+ , K^- -мезоны имеют $s = +1$.

4. Очарование - 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 Λ^+ имеет $c = +1$.

5. Красота - 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 $b = +1$.

6. Верхний - Topness t .

Квантовое число t может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$.

7. 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:

n и p составляют изотопический дуплет $I = 1/2$;

Σ^+ , Σ^- , Σ^0 изотопический триплет $I = 1$,

Λ – изотопический синглет $I = 0$,

Число частиц, входящих в один изотопический мультиплет, $2I + 1$.

Четность G

– 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.

16.4. Странные частицы

Странные частицы – частицы, имеющие в своём составе s -кварк или его античастицу. В течение 10 лет, последовавших за открытием пиона в 1947 году, в результате изучения космических лучей и экспериментов на ускорителях таблица частиц начала быстро пополняться новыми частицами. За это время их было открыто свыше 30.

Первыми из открытых частиц были K -мезоны или каоны, частицы с массой ~ 500 МэВ. Затем были обнаружены тяжелые частицы Λ и Σ .

В начале 50-х годов XX в. для некоторых из вновь открытых частиц (K , Λ , Σ) были обнаружены странные особенности:

1) они всегда рождались парами, хотя не были частицей и античастицей.

Например, реакция $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ проходит с вероятностью, близкой к 1, а реакция $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ никогда не наблюдалась.

Это казалось тем более странным, что вторая реакция не нарушала ни одного из известных законов сохранения и для её осуществления было достаточно энергии.

2) большое время жизни.

Хотя рождение **странных** частиц было обусловлено сильным взаимодействием (т.е. происходило с большой вероятностью), их распады не имели характерного для сильного взаимодействия времени жизни, хотя они и распадались на сильно взаимодействующие частицы.

Например, $K \rightarrow 2\pi$, $\Sigma^+ \rightarrow p^+ \pi^0$.

Время жизни странных частиц - от 10^{-10} до 10^{-8} с (характерно для слабого взаимодействия).

Для объединения этих фактов были введены новое квантовое число **странность** и новый **закон сохранения (сохранности)**.

В первой реакции странность частиц до реакции совпадает со странностью частиц после реакции; во второй реакции странность не сохраняется и эта реакция не идет.

Для объяснения особенностей распада странных частиц предполагается, что **странность сохраняется в сильном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии.**

Следовательно, хотя закон сохранения запрещает распад странных частиц на более лёгкие не странные частицы за счёт сильного взаимодействия, такие распады происходят за счёт слабого взаимодействия. Но слабые распады происходят гораздо медленнее, что соответствует большим временам жизни.

Сохранение странности оказалось первым примером «**частично сохраняющейся величины**»: странность сохраняется в сильном и не сохраняется в слабом взаимодействии.

16.5. Кварки и очарование

Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: лептонам и адронам.

Основные различия:

1. адроны не участвуют в сильном взаимодействии, а лептоны участвуют.
2. в 60-х годах были известны четыре лептона (e^- , μ^- , ν_e , ν_μ) и их античастицы и более сотни адронов. Лептоны – элементарные частицы (они, насколько известно, не распадаются на составные части, не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют определённого размера). Попытки определить размеры лептонов показали, что верхний предел составляет 10^{-18} м.

Адроны - более сложные частицы.

Эксперименты показали, что адроны обладают внутренней структурой, и их обилие наводит на мысль, что адроны совсем не элементарны.

Для решения этой проблемы М. Гелл-Манн и Г. Цвейг в 1963 г. независимо высказали идею, согласно которой:

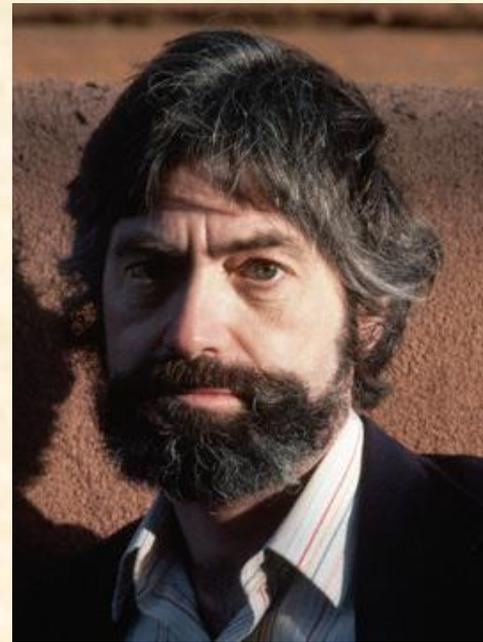
«все известные адроны неэлементарны, а построены из трёх более фундаментальных точечных объектов, называемых *кварками*».



Мюррей Гелл-Манн

(род. 1929)

- американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1969 год «за открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий».



Джордж Цвейг

род. 1937, Москва, СССР

- американский физик и нейробиолог. Предложил гипотезу (независимо от Гелл-Манна) существования кварков, называл их «тузами», т.к.полагал, что существует всего четыре кварка.

Подобно лептонам *кварки представляют собой истинно элементарные частицы.*

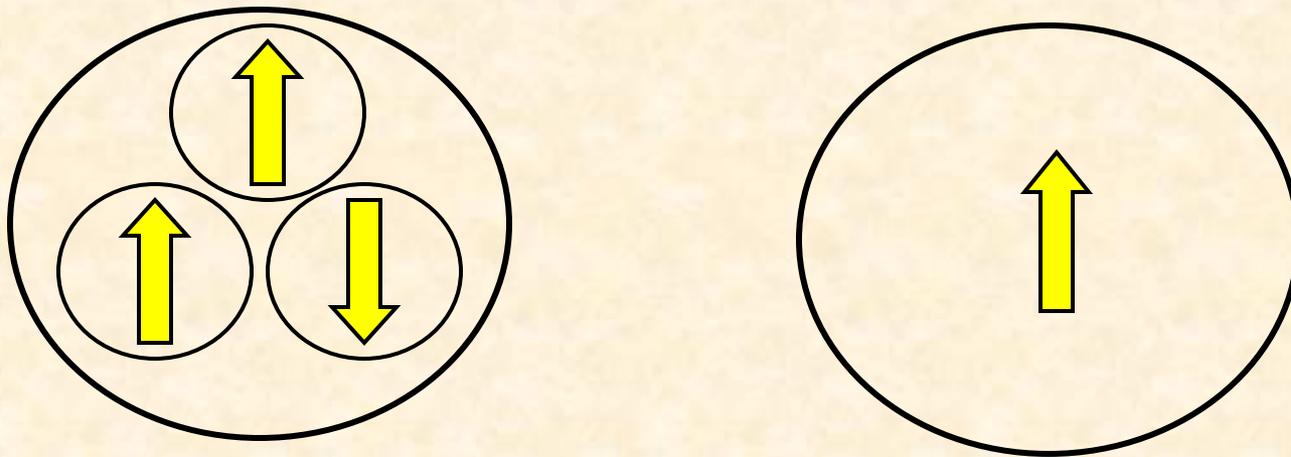
Три «сорта» кварков были обозначены буквами

u (up – вверх),

d (down – вниз),

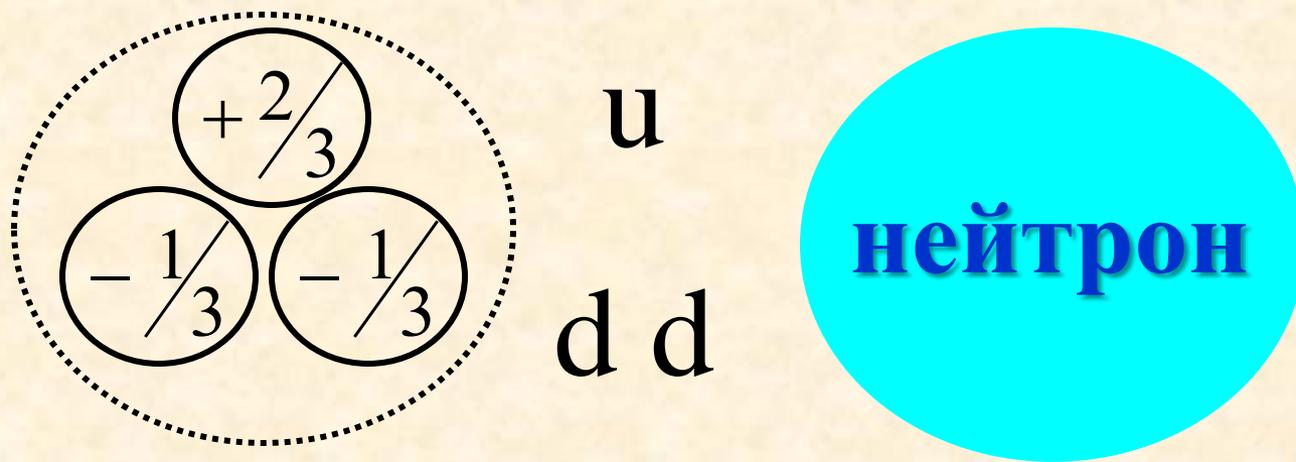
s (strange – странный).

Привычное свойство - спин: векторное сложение



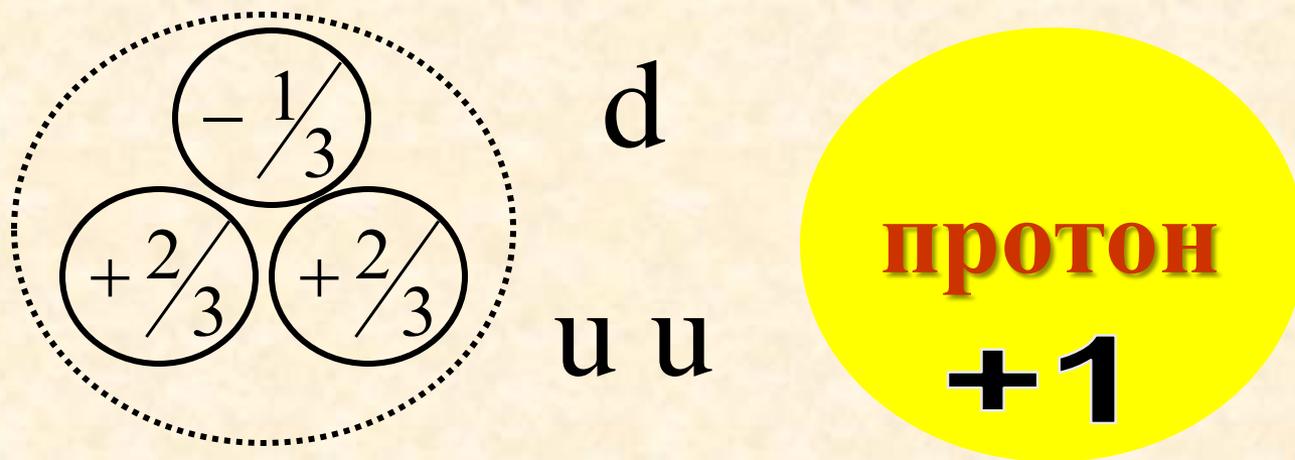
**Спин составной частицы
равен сумме спинов кварков**

Непривычное свойство - дробные заряды

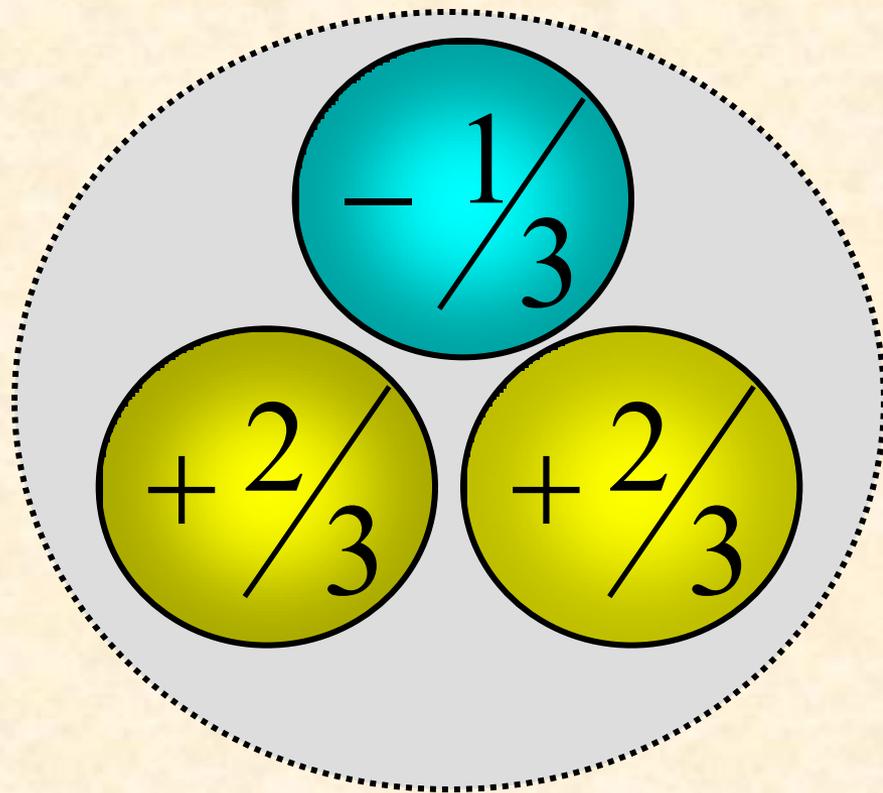


**Заряд составной частицы
равен сумме зарядов
кварков**

Непривычное свойство - дробные заряды

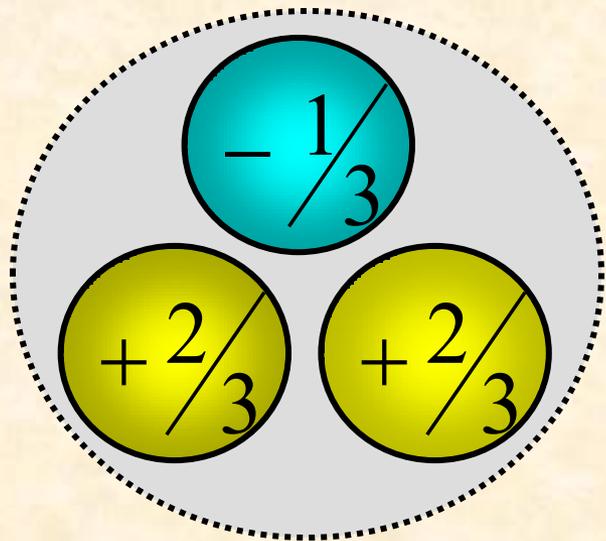


**Заряд составной частицы
равен сумме зарядов
кварков**



**Точечные заряды
оказались дробными !**

Все известные в то время **адроны** теоретически можно было построить **из кварков трёх видов: u, d, s.**



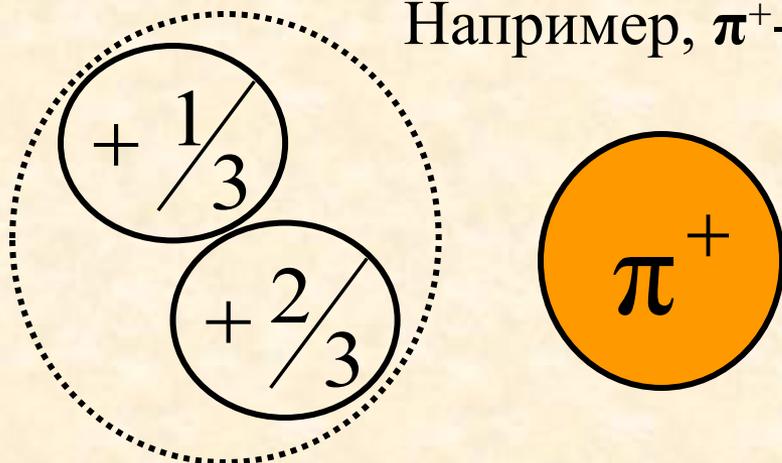
Барионы состоят из трёх кварков:

нейтрон: $n = ddu$,

антипротон: $\bar{p} = uud$

Мезоны состоят из сочетания: $u \bar{d}$ - кварк-антикварк.

Например, π^+ -мезон представляет собой пару $u \bar{d}$



Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц с дробным знаком.

Хотя имеются новейшие экспериментальные доказательства их существования, *непосредственно обнаружить кварки не удалось.*

Было высказано предположение, что кварки очень сильно связаны и не существуют в свободном состоянии (заключены в адронах).

Непривычное свойство - пленение кварков:

кварки очень сильно связаны и не существуют в свободном состоянии, причем существуют только в сочетаниях по два или по три.

В 1964 г. ряд физиков высказал предположение о существовании четвертого кварка. Они основывались на глубокой симметрии природы, включая связь кварков и лептонов.

Если существуют (как считали в 60-х годах) четыре лептона, то и кварков должно быть четыре.

Четвертый кварк получил название *очарованный*. Его *электрический заряд* должен быть равен $2/3e$.

Кроме того, четвёртый кварк должен обладать ещё одним свойством, отличающим его от трёх остальных кварков. Это новое свойство или квантовое число, было названо *очарованием*. Предполагалось, что *очарование c* ведёт себя подобно странности: сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии.

У нового очарованного кварка $c = +1$, у его антикварка $c = -1$.

Между тем до 1974 г. необходимости в очарованном кварке не возникало.

В этом году был открыт тяжёлый J/Ψ -мезон: его масса $3100 \text{ МэВ}/c^2$.

Для объяснения существования этого тяжёлого мезона и других тяжёлых мезонов, которые были открыты позже, и понадобился очарованный кварк.

После открытия (экспериментального) τ -лептона с массой $178 \text{ МэВ}/c$ и соответствующего ν_τ , семейство лептонов стало насчитывать шесть частиц (и шесть античастиц).

Исходя из симметрии природы физики предположили существование *ещё двух кварков:*

b-кварки (bottom – низ или beauty - *красивый*)

t-кварки (top – высший или truth - *истинный*). Соответственно новые свойства (квантовые числа), отличающие новые кварки от ранее известных, называются *t*- и *b*-свойствами или *истиной и красотой*.

СЕМЕЙСТВО

КВАРКОВ:

Верхний

U



Нижний

D



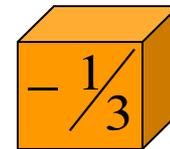
Странный

S



Прекрасный

B



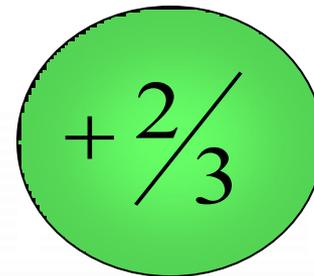
Очарованный

C



Высший

T



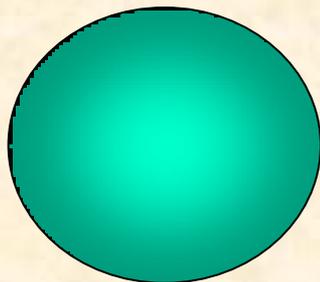
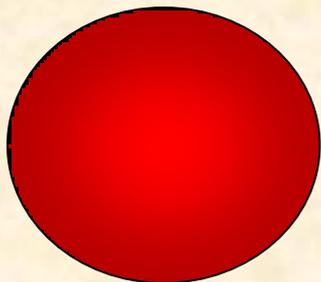
Вскоре после возникновения модели кварков было выдвинуто предположение, что *кварки обладают ещё одним свойством* (или качеством), которое получило название *цвет*.

Различие между шестью кварками **u**, **d**, **s**, **c**, **b**, **t** стали называть *аромат*.

Согласно существующим представлениям, *каждый из ароматов кварка может иметь три цвета*, обычно обозначаемых как **КРАСНЫЙ**, **ЗЕЛЁНЫЙ** и **СИНИЙ**.

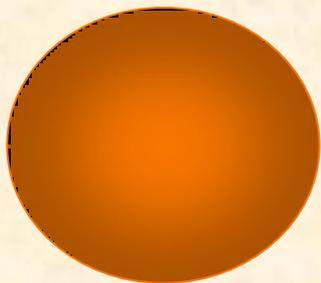
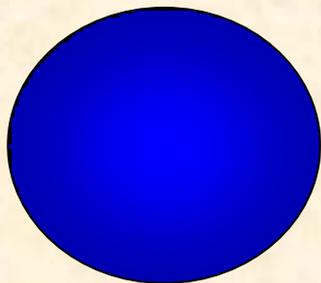
Цвета антикварков называются соответственно *антикрасный, антизеленый и антисиний*.

красный



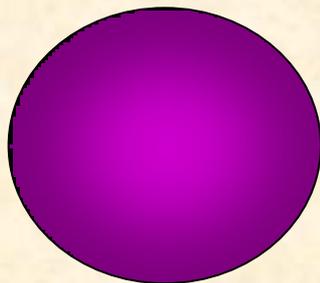
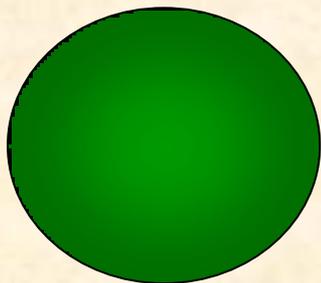
антикрасный

синий



антисиний

зеленый



антизеленый



**Сложение цветов дает
бесцветный, белый свет!**



Сложение трех цветов

кварков дает

белое состояние!

*Барионы содержат три кварка – по одному
каждого цвета;
мезоны состоят из пары: кварк –
антикварк определенного цвета и
соответствующего антицвета,
поэтому и барионы, и мезоны
оказываются «белыми» или «бесцветными».*



**ТОЛЬКО БЕЛЫЕ СОЧЕТАНИЯ
ЯВЛЯЮТСЯ СТАБИЛЬНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ**

Первоначально *цвета кварков были введены для того, чтобы удовлетворить принципу Паули* для частиц со спинами $1/2$ (или любым полуцелым спином, например, $3/2$, $5/2$ и т. д.) – таким, как электрон или нуклон.

Т.к. спин кварков равен $1/2$, они должны подчиняться принципу Паули. Но у трёх барионов **uuu**, **ddd**, **sss** все три кварка имели бы одинаковые квантовые числа, и по крайней мере у двух из них спины имели бы одинаковое направление (т.к. существует только два возможных направления спина $+1/2$ и $-1/2$). Это означало бы нарушение принципа Паули.

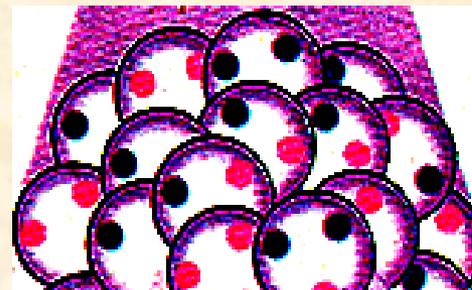
Но если бы кварки обладали дополнительным числом (цветом), которое у каждого кварка принимало своё значение, то кварки могли бы различаться этим квантовым числом и принцип Паули не нарушался бы.

Хотя цвет кварков и связанное с ним (троекратное) увеличение числа кварков было введено искусственно, это позволило улучшить согласие теории с экспериментом и, в частности, предсказать правильное время жизни π^0 -мезона.

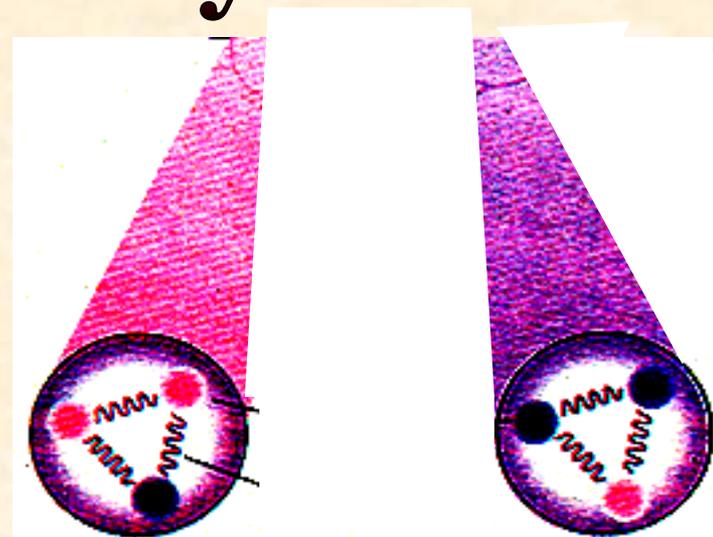
Кроме того, представление в цвете вскоре стало центральным моментом теории, поскольку именно с цветом стали связывать взаимодействие, удерживающее кварки в адроне.

**Схема
структурных
уровней
приобрела
ВИД**

Ядро



Нуклоны



Кварки

Каждому кварку приписывается
ЦВЕТОВОЙ ЗАРЯД, аналогичный
электрическому заряду и *сильное взаи-
мдействие между кварками часто
называют*
ЦВЕТОВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ.
*Новая теория сильного взаимодействия
получила название квантовой
хромодинамики («хрома» – цвет) или*
КХД.

КХД - калибровочная теория квантовых полей, описывающая сильное взаимодействие элементарных частиц. Наряду с электрослабой теорией, КХД составляет общепринятый в настоящее время теоретический фундамент физики элементарных частиц.

Основной постулат КХД: каждый кварк обладает новым внутренним квантовым числом - цветовой заряд (цвет).

Инвариантная в цветовом пространстве комбинация есть сумма трёх различных цветов. Сумма трёх основных оптических цветов (красного, зелёного и синего) дает белый цвет, т.е. бесцветное состояние.

Поэтому базисные векторы в цветовом пространстве называют «красный» (к), «зелёный» (з) и «синий» (с).

Антикваркам соответствуют анти-цвета (ак, аз, ас), причём комбинация «цвет + антицвет» тоже бесцветна.

Глюоны же в цветовом пространстве есть комбинации «цвет-антицвет», причём такие комбинации, которые не являются инвариантными относительно вращений в цветовом пространстве.



Квантовая хромодинамика!

современная теория
элементарных частиц

Сим- вол	Название		Заряд	Масса, МэВ/с ²
	рус.	англ.		
Первое поколение				
<i>d</i>	нижний	<i>down</i>	$-1/3$	$4,8 \pm 0,5 \pm 0.3$
<i>u</i>	верхний	<i>up</i>	$+2/3$	$2,3 \pm 0,7 \pm 0.5$
Второе поколение				
<i>s</i>	странный	<i>strange</i>	$-1/3$	95 ± 5
<i>c</i>	очарованный	<i>charm (charmed)</i>	$+2/3$	1275 ± 25
Третье поколение				
<i>b</i>	прелестный	<i>beauty (bottom)</i>	$-1/3$	4180 ± 30
<i>t</i>	истинный	<i>truth (top)</i>	$+2/3$	$173\ 340 \pm 270$

Вопросы в отношении кварков, на которые пока нет ответа:

- почему ровно три цвета?
- почему ровно три поколения кварков?
- случайно ли совпадение числа цветов и числа поколений?
- случайно ли совпадение этого числа с размерностью пространства в нашем мире?
- откуда берётся такой разброс в массах кварков?
- из чего состоят кварки? (из преонов?)
- как кварки складываются в адроны

Считается, что сильное взаимодействие адронов сводится к взаимодействию составляющих их кварков.

ГЛЮОНЫ (от англ. glue – клей) - частицы, переносящие взаимодействие.

Согласно теории существует восемь глюонов с нулевой массой покоя, часть из них имеют цветовой заряд.

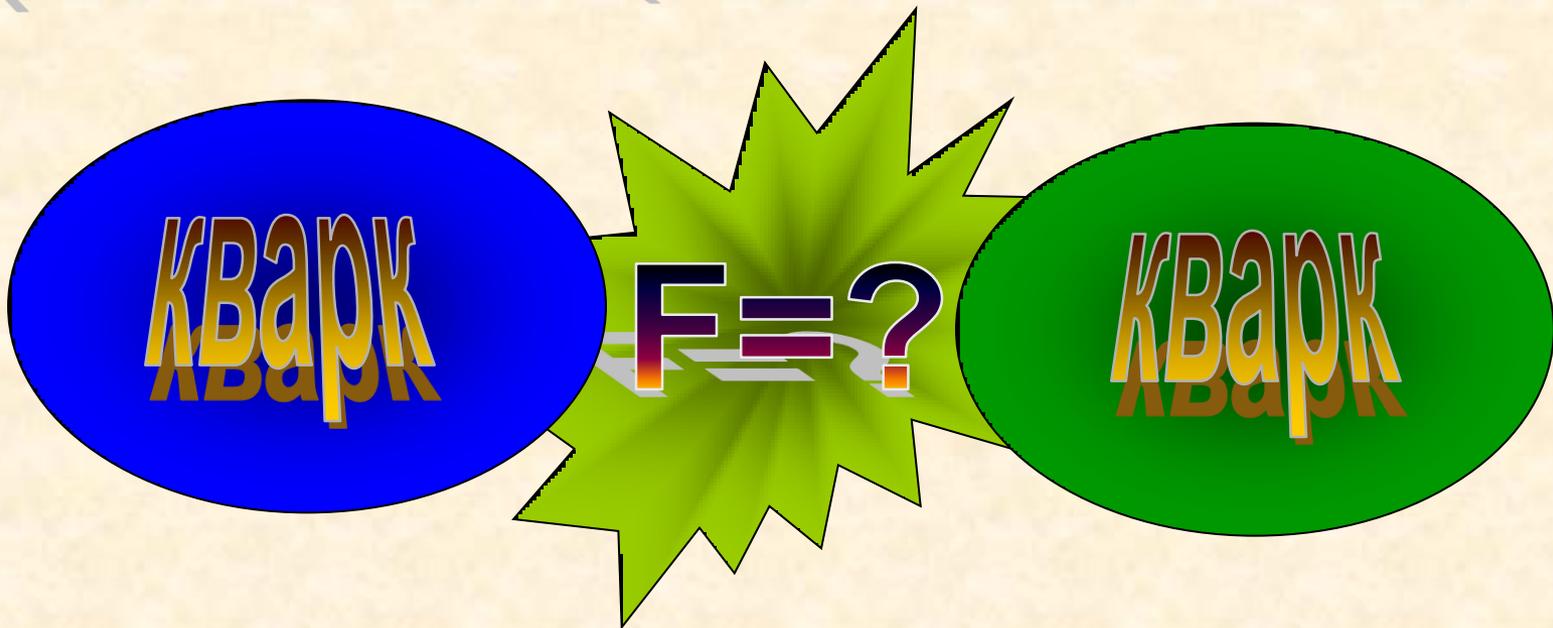
Переносчиками слабого взаимодействия являются W^{\pm} и Z^0 - частицы. W - и Z -бозоны - элементарные частицы (открытие: ЦЕРН, 1983).

*W -частица – слабое (**Weak**) взаимодействие. Z -частица получила такое имя, поскольку Z -бозон имеет нулевой (**Zero**) электрический заряд.*

Это взаимодействие обусловлено слабым зарядом, которым обладает каждая частица.

Каков "механизм" передачи

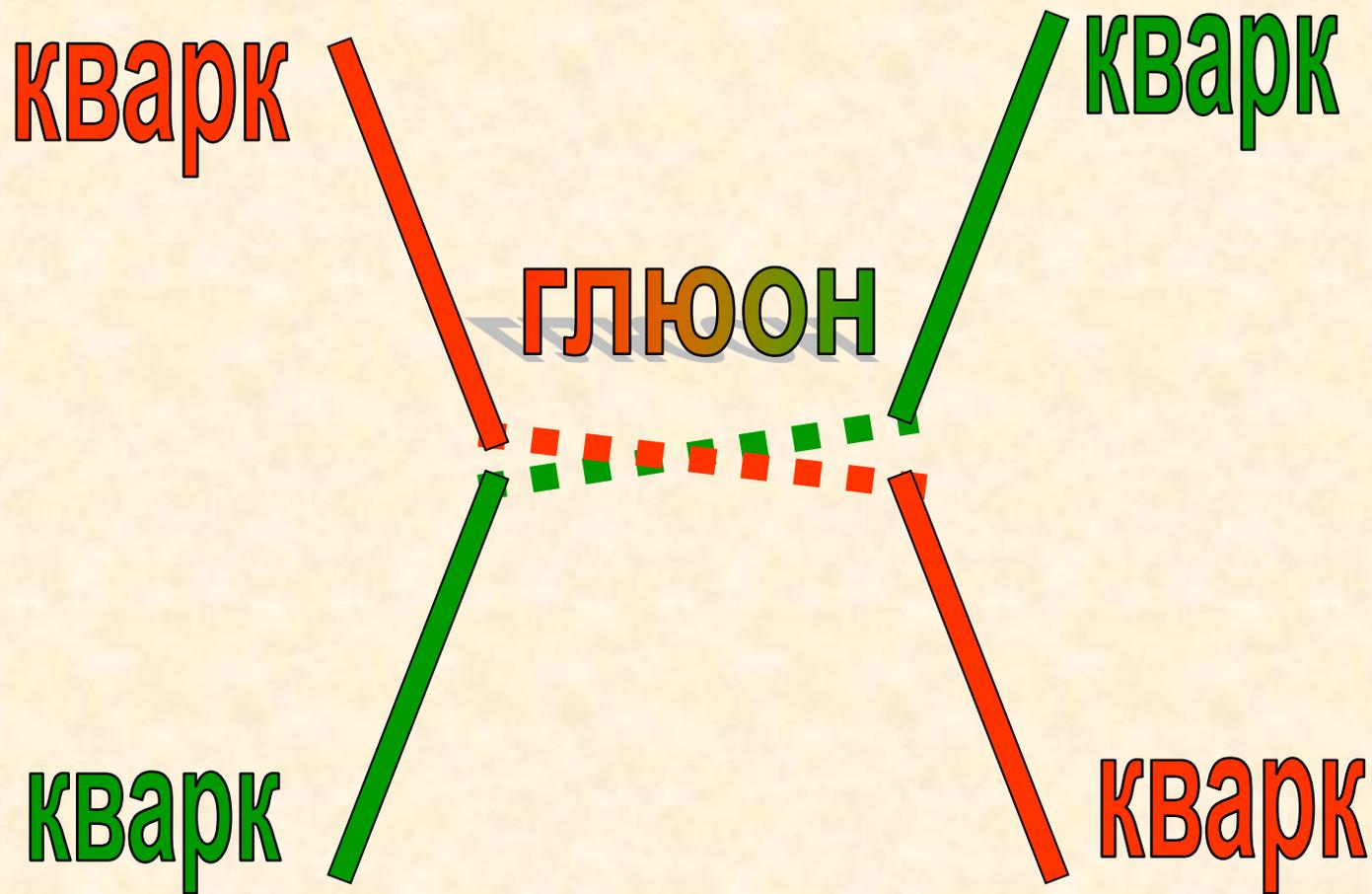
цветовых сил (взаимодействий)?



**Квантовая электродинамика
поясняет взаимодействие двух
электрических зарядов диаграммой**



ОБМЕН ГЛЮОНАМИ



**Глюоны - "окрашенные" фотоны
- частицы глюонного поля,
передающие цветовые
взаимодействия.**

**Действующие между кварками
силы много больше электрических
сил и по величине превышают
ядерные силы (отвечающие за
строение ядер). Это самая большая
из наблюдаемых сил в природе.**

**Энергии
связей**

1эВ

**внутри
молекул**

10^4 эВ

**внутри
атома**

10^8 эВ

внутри ядер

10^{23} эВ

межкварковые

Таким образом, у каждой элементарной частицы есть:

- *электрический заряд,*
- *слабый заряд,*
- *цветовой заряд и*
- *гравитационная масса*

(хотя одна или даже несколько из этих характеристик могут быть равны нулю).

Например, цветовой заряд всех лептонов равен нулю, поэтому они не участвуют в сильном взаимодействии.

Вывод:

В современных теориях *истинно элементарными частицами являются фотон, лептоны, кварки, глюоны, W^\pm и Z^0 -частицы.*

До сих пор наблюдались только комбинации кварков (барионы, мезоны). Весьма вероятно, что кварки не существуют в свободном состоянии.

С другой стороны, *некоторые физики считают, что лептоны и кварки не являются фундаментальными частицами, а состоят из ещё более фундаментальных частиц.*