

Элементарные частицы

Что относится к элементарным частицам?

Частицы, из которых состоят атомы различных веществ- электрон, протон и нейтрон, называли элементарными.

Слово «элементарный» подразумевало, что эти частицы являются первичными, простейшими, далее неделимыми и неизменяемыми.



История открытия элементарных частиц

Открытие электрона

На основании опытов по электролизу Майкл Фарадей установил: заряды имеются в атомах всех химических элементов.



Открытие электрона



В 1899 г.
Джозеф Джон
Томсон доказал
реальность
существования
электронов.

Открытие электрона



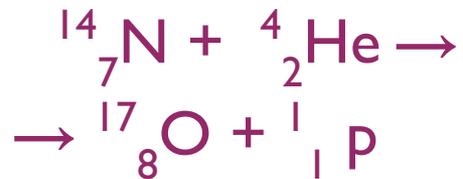
В 1909 г.
Роберт Милликен
впервые измерил
заряд электрона:

$$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

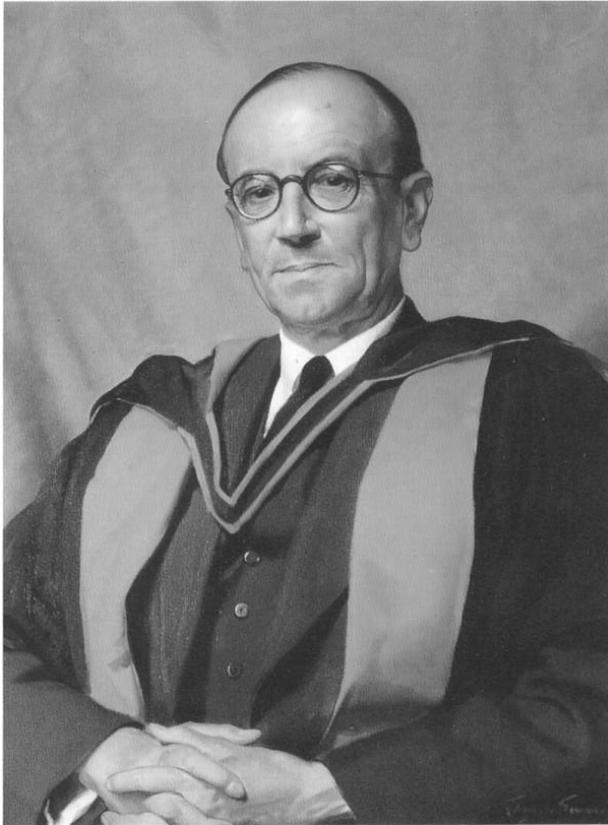
Открытие протона

В 1919 г.

Эрнест Резерфорд
при
бомбардировке
азота альфа-
частицами
обнаружил протон:



Открытие нейтрона

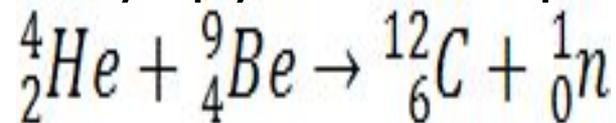


В 1932 г. Джеймс Чедвик открыл новую частицу, которая не имеет электрического заряда, и назвал ее нейтроном.

В свободном состоянии нейтрон живет около 1000 с, потом распадается на протон, электрон и нейтрино:

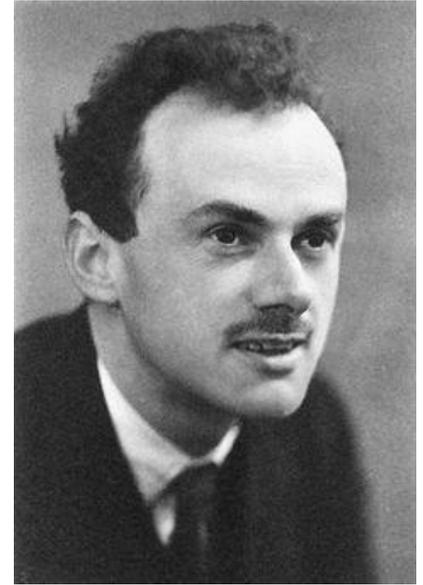


Существование нейтрона доказывает опыт, проведенный супругами Кюри



Открытие позитрона

В 1928 г. Поль Дирак предсказал, а в 1932 г. Карл Андерсон открыл позитрон (e^+), фотографируя следы космических частиц в камере Вильсона. Позитрон рождается в паре с электроном и является его античастицей.



Открытие фотона

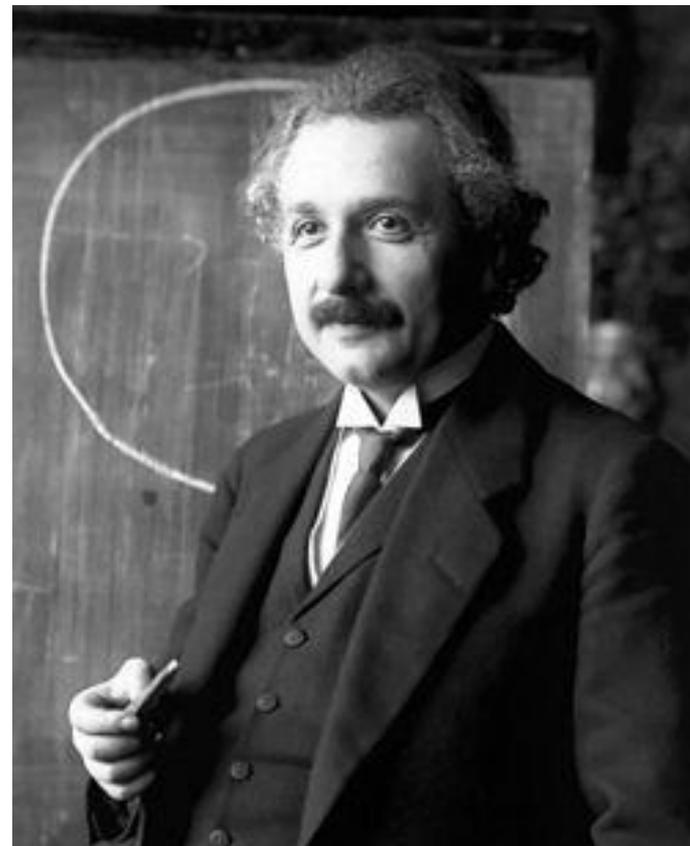
Альберт Эйнштейн предположил, что свет распространяется в виде потока элементарных частиц – фотонов.

Фотоны не имеют массы.

Существуют только в движении со скоростью в вакууме

$$3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Энергия фотона прямо пропорциональна частоте ЭМВ

$$E = h\nu$$


Открытие нейтрино

В 1931 г. Вольфганг Паули предсказал, а в 1955 г. экспериментально зарегистрировал нейтрино («нейтрончик») и антинейтрино.

Нейтрино появляется в ходе распада нейтрона.

Нейтрино – это легкие нейтральные частицы, очень слабо взаимодействующие с веществом.





Опыты Резерфорда и явление радиоактивности показали, что атомы не являются простейшими неделимыми частицами.

Было установлено, что атомы состоят из электронов, протонов и нейтронов, которые считались неспособными ни к каким изменениям и превращениям, т. е. элементарными или простейшими.

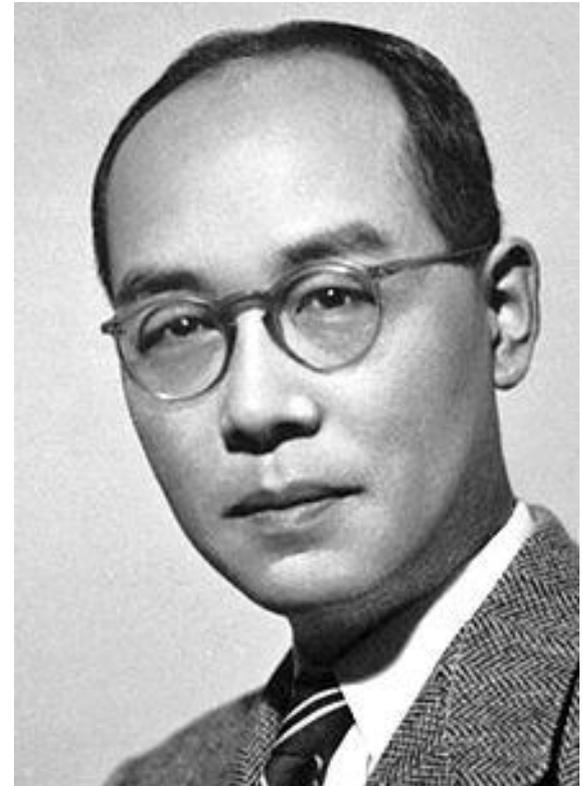
Но вскоре выяснилось, что эти частицы вовсе не являются неизменными!

Открытие других элементарных частиц

Начало физике элементарных частиц в современном виде было положено в 1935 г. японским физиком Хидэки Юкава.

В 1947 г. Юкава открыл π -мезон, который является переносчиком сильного взаимодействия и удерживает нуклоны внутри ядра.

В 1955 г. был открыт антипротон, а в 1959 г. – антинейтрон.



Дальнейшие исследования частиц показали, что их нельзя считать элементарными. Каждая из этих частиц при взаимодействии с другими частицами и атомными ядрами может превращаться в новые частицы.

Поэтому термин «элементарная частица» является условным.

Сегодня обнаружено около 400 элементарных частиц.

В основе классификации элементарных частиц лежат различия в массах покоя:

Элементарные
частицы

Лептоны
(легкие частицы
 $m < 207m_e$)

Мезоны
(ср. частицы
 $207m_e < m < m_p$)

Барионы
(тяж. частицы
 $m > m_p$)

Фотон

ФОТОН

Название частицы	Символ		Масса (в массах электрона)	Заряд (в зарядах электрона)	Время жизни, с
	Частицы	анти Частицы			
Фотон	ν		0	0	Стабилен

ЛЕПТОНЫ

Название частицы		Символ		Масса (в массах электрона)	Заряд (в зарядах электрона)	Время жизни, с
		Частицы	анти Частицы			
Лептоны (легкие частицы $m < 207m_e$)	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно
	Тау-нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Стабильно
	Электрон	e^-	e^+	1	-1 +1	стабилен
	Мюон	μ^-	μ^+	207	-1 +1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	3492	-1 +1	$1,46 \cdot 10^{-12}$

Группа лептоны состоит из 12 частиц.

Лептоны являются истинно элементарными.

Фундаментальные
фермионы

Электрический
заряд

Частицы
окружающего
мира принадлежат
этой группе

Эти частицы
существовали в
первый момент
после “Большого
взрыва”.

Теперь их можно
обнаружить
в космосе и на
ускорителях
частиц

ЛЕПТОНЫ

-1

0

Электрон

переносит электрический ток

$$M = 0,511 \text{ МэВ}/c^2$$



Электронное нейтрино

играет фундаментальную роли при
горении Солнца. Каждую секунду сквозь
нас пролетают миллиарды этих частиц



Мюон

аналог электрона

Время жизни - 2 микросекунды

$$M = 106 \text{ МэВ}/c^2$$



Мюонное нейтрино

образуется при рождении и распаде
мюонов

$$M < 0,2 \text{ МэВ}/c^2$$



Тау

аналог электрона

Время жизни - доли пикосекунды

$$M = 1777 \text{ МэВ}/c^2$$



Тау нейтрино

образуется при рождении и распаде
тау лептонов

Открыто в 1975 г.

$$M < 20 \text{ МэВ}/c^2$$



Мезоны

Название частицы		Символ		Масса (в массах электро на)	Заряд (в зарядах электро на)	Время жизни, с
		Час тиц ы	анти части цы			
МЕЗОНЫ (средние частицы – $207m_e < m < m_p$)	Пи - мезоны	π^0 π^+ π^-	264,1 273,1	0 1 -1	$1,83 \cdot 10^{-16}$ $2,6 \cdot 10^{-8}$	
	Ка - мезоны	K^+ – K^0 K^0 K^-	974,1 966,4	0 1 -1	Не стабил ьны	
	Эта-нуль- мезон	η^0	1074	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$	

Группа мезоны состоит из 8 частиц.

Барионы

Название частицы		Символ		Масса (в массах электрона)	Заряд (в зарядах электрона)		Время жизни, с
		частицы	анти частицы				
Барионы (тяжелые частицы $m > m_p$)	Протон	p	p ⁻	1836,1	1	-1	стабилен?
	Нейтрон	n	n̄	1838,6	0		10 ³
	Лямбда-гиперон	Λ ⁰	Λ ⁻⁰	2183,1	0		2,63·10 ⁻¹⁰
	Сигма-гиперон	Σ ⁺	Σ ⁻⁺	2327,6	1	-1	8·10 ⁻¹¹
		Σ ⁰	Σ ⁻⁰	2333,6	0		5,8·10 ⁻²⁰
		Σ ⁻	Σ ⁻⁻	2343,1	-1	1	1,48·10 ⁻¹⁰
Кси-гиперон	Ξ ⁰	Ξ ⁻⁰	2572,8	0		2,9·10 ⁻¹⁰	
	Ξ ⁻	Ξ ⁻⁻	2585,6	-1	1	1,64·10 ⁻¹⁰	
Омега-минус-гиперон	Ω ⁻	Ω ⁻⁻	3273	-1	1	8,2·10 ⁻¹¹	

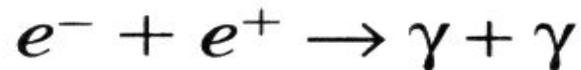
Группа барионы состоит из 18 частиц.

Легкие барионы – протон и нейтрон образуют группу нуклоны.

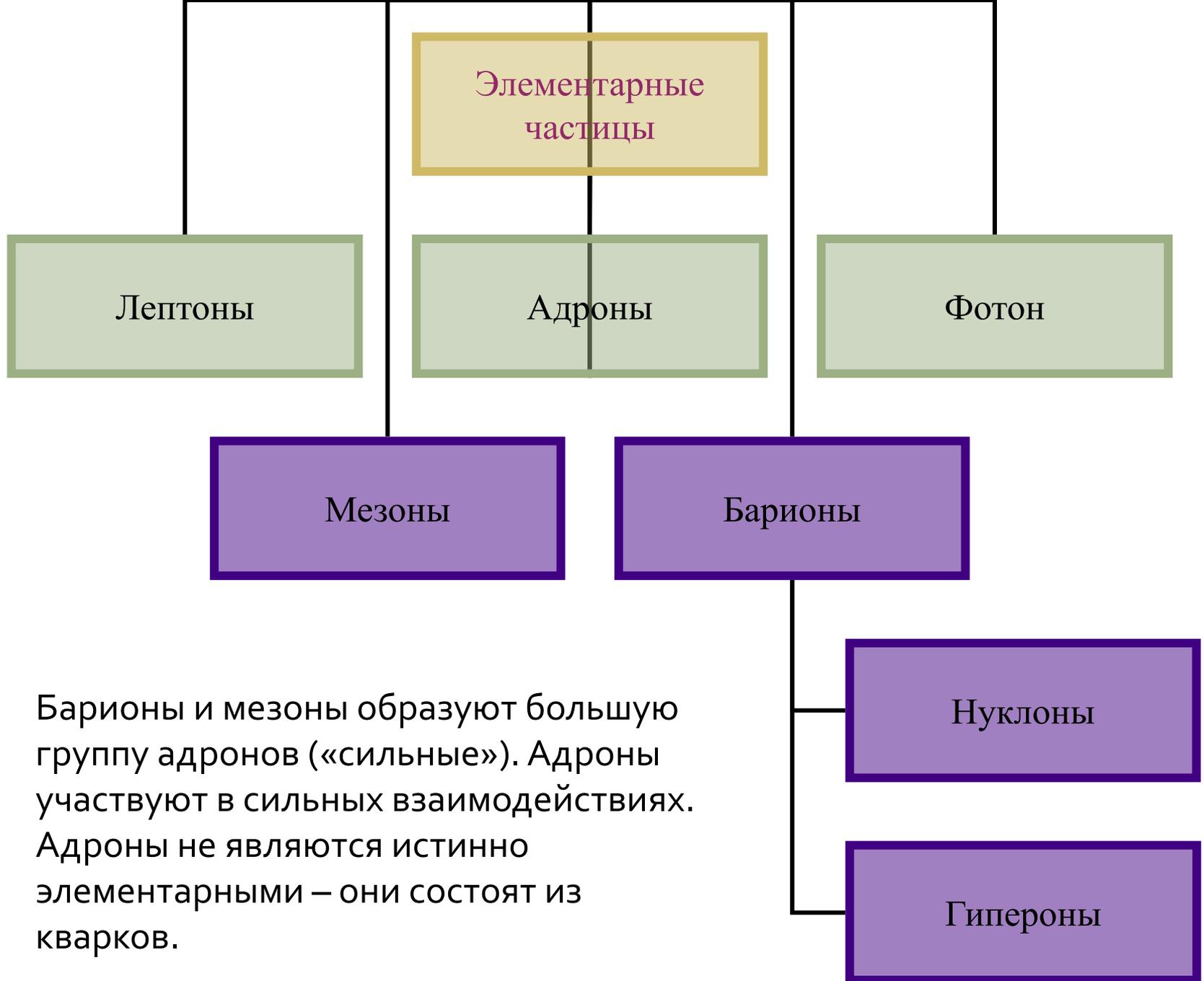
Тяжелые барионы – это гипероны.

Античастицы

- Античастицы найдены у всех элементарных частиц (массы равны, заряды противоположны, закрутка спина по направлению движения – спиральность, противоположна).
- В некоторых случаях частица и античастица совпадают (например у π^0 -мезона)
- При встрече частицы со своей античастицей происходит аннигиляция – обе частицы исчезают, превратившись в ЭМ излучение.



- Существует антивещество, у которого ядра атомов состоят из антипротона и антинейтрона, а оболочка из позитронов (в 1969г получен экспериментально антигелий).



Барионы и мезоны образуют большую группу адронов («сильные»). Адроны участвуют в сильных взаимодействиях. Адроны не являются истинно элементарными – они состоят из кварков.

- В 1964 г. американские физики-теоретики Джордж Цвейг и Мюррей Гелл-Манн выдвинули гипотезу о том, что адроны состоят из кварков («бесы»).
- В 1969 г. экспериментальное подтверждение кварковой структуры адронов пришло из Стэнфорда (в свободном состоянии кварки не обнаружены).



*Рис. 32. М. Гелл-Манн и
Дж. Цвейг*

По совокупности многих косвенных "улик", кварки были признаны реально существующими и бесструктурными объектами.

Подобно лептонам *кварки представляют собой истинно элементарные частицы.*

Три «сорта» кварков были обозначены буквами

u (up – вверх),
d (down – вниз),
s (strange – странный).

Все известные в то время *адроны* теоретически можно было построить *из кварков трёх видов:*

u, d, s.

Фундаментальные
фермионы

Электрический
заряд

Частицы
окружающего
мира принадлежат
этой группе

Эти частицы
существовали в
первый момент
после “Большого
взрыва”.

Теперь их можно
обнаружить
в космосе и на
ускорителях
частиц

КВАРКИ

+2/3

-1/3

u-кварк (up - вверх)

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 3 \text{ МэВ}/c^2$$



d-кварк (down - вниз)

входит в состав протонов и нейтронов

$$M = 6 \text{ МэВ}/c^2$$



c-кварк (charmed - очарованный)

открыт в 1974 г.

$$M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$$



s-кварк (strange - странный)

открыт в 1964 г.

$$M = 100 \text{ МэВ}/c^2$$



t-кварк (top - верхний)

открыт в 1995 г.

$$M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$$



**b-кварк (beauty - прелестный
bottom - нижний)**

открыт в 1977 г.

$$M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$$



Кварк-лептонная симметрия

Семейство 1

Частица	Масса, МэВ Заряд
Электрон	0,00054 - 1
Электронно е нейтрино	<10 ⁻⁸ 0
U - кварк	0,0047 + 2/3
D - кварк	0,0074 - 1/3

Семейство 2

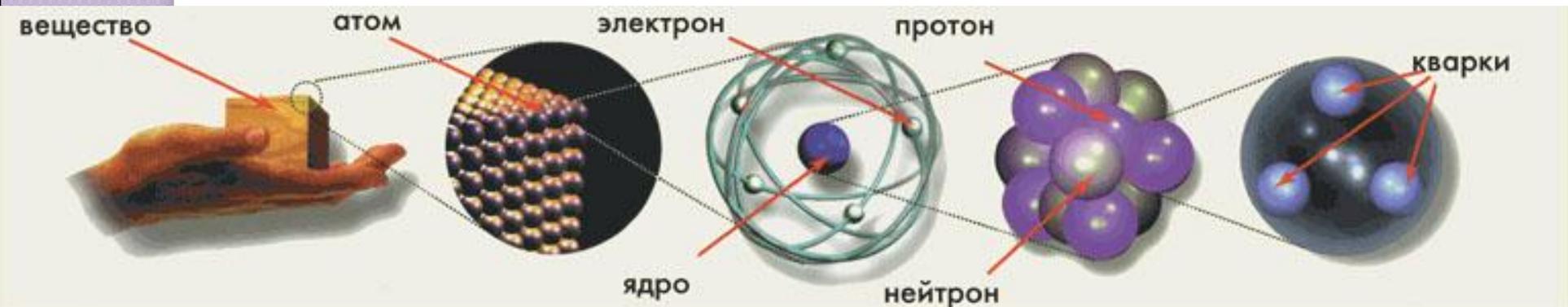
Частица	Масса, МэВ Заряд
Мюон	0,11 - 1
Мюонное нейтрино	0,0003 0
C - кварк	1,6 + 2/3
S - кварк	0,16 - 1/3

Семейство 3

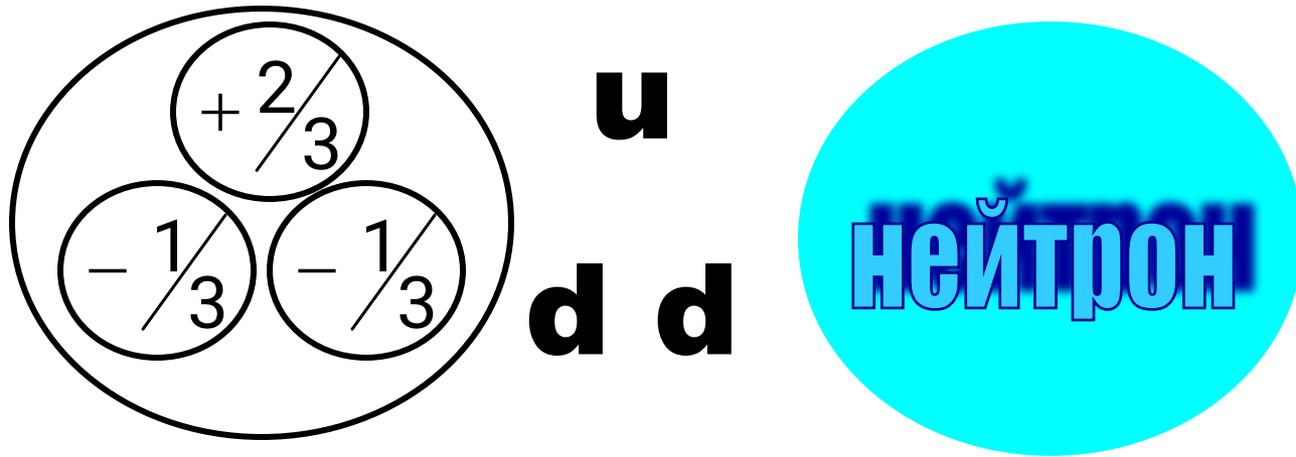
Частица	Масса, МэВ Заряд
Таон	1,9 - 1
Таонное нейтрино	<0,033 0
T - кварк	189,0 + 2/3
B - кварк	5,2 - 1/3

Кварковая структура адронов

- Барионы состоят из трех кварков:
 $p = (u; u; d)$, $n = (u; d; d)$
- Мезоны состоят из кварка и антикварка:
 $\pi^+ = (u; \bar{d})$

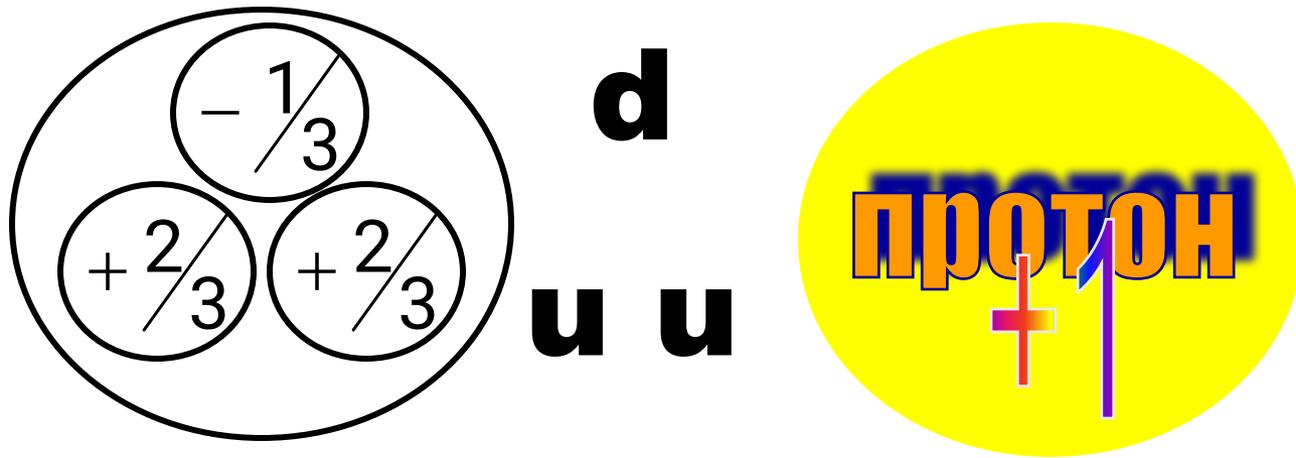


Непривычное свойство - дробные заряды



Заряд составной частицы равен
сумме зарядов кварков

Непривычное свойство - дробные заряды



Заряд составной частицы равен
сумме зарядов кварков

Непривычное свойство - пленение кварков:

Межкварковые силы в отличие от всех других сил в природе при увеличении расстояния возрастают.

При удалении кварка из частицы потенциальная энергия достигает достаточно высокого уровня и за счет этой энергии произойдет рождение пары кварк-антикварк. Полученный кварк останется и восстановит частицу, а антикварк объединится с удаляемым кварком и произойдет рождение мезона.

Кварки существуют только в сочетаниях по два или по три.

Непривычные свойства - цвет и аромат кварков

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 (R)**, **ЗЕЛЁНЫЙ (G)** и **СИНИЙ (B)**.

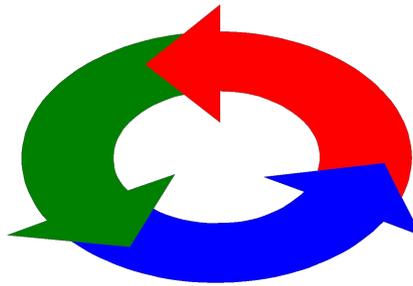


Так как существует 6 кварков и 6 антикварков, каждый из которых может иметь 3 цвета, то полное число кварков равно 36.

Антикварки имеют цвета дополнительные к кваркам: желтый, пурпурный и сине-зеленый.

Принцип бесцветности

Принцип бесцветности: все адроны состоят из такой комбинации кварков, что должны быть бесцветными.



- Барионы содержат три кварка – по одному каждого цвета.
- Мезоны состоят из пары кварк определенного цвета и антикварк дополнительного к нему цвета.

Квантовая хромодинамика

Цвет кварков непрерывно меняется.

Кварки внутри адронов взаимодействуют друг с другом сильным взаимодействием посредством обмена частицами – **глюонами** («клей»).

Непрерывный обмен глюонами приводит к тому, что кварки в адронах меняют свой цвет (но не аромат), оставляя адрон во все моменты времени бесцветным.

Теория взаимодействия между кварками называется **квантовой хромодинамикой**.

Глюоны

Глюоны не имеют заряда и массы.

Существует восемь глюонов, но их не возможно обнаружить в свободном состоянии.

Глюоны взаимодействуют друг с другом и могут превратиться в пару в пару кварк-антикварк, т.е. виртуальный мезон, который осуществляет связь между протонами и нейтронами в ядре.

Сильное взаимодействие глюонов друг с другом и кварками приводит к удержанию кварков внутри адрона.

Слабое взаимодействие

Слабое взаимодействие между кварками осуществляется за счет обмена промежуточными бозонами

$$W^+, W^-, Z^0$$

Этот обмен приводит к изменению аромата кварка, т.е. приводит к превращениям элементарных частиц.

$$u + W^- \rightarrow d$$

$$n(ddu) \rightarrow p(uud) + \bar{e} + \nu$$

Фундаментальные взаимодействия осуществляющие взаимные превращения элементарных частиц друг в друга называются **слабыми взаимодействиями.**

Фундаментальные взаимодействия

Во Вселенной материя существует в виде вещества и поля. На фундаментальном уровне им соответствуют элементарные частицы – фермионы и бозоны

Форма материи	Вещество	Поле
Элементарные частицы	Фермионы	Бозоны

Фундаментальные взаимодействия

Все наблюдаемые взаимодействия в природе сводятся к четырем фундаментальным взаимодействиям: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное.

Все элементарные частицы могут быть или участниками или переносчиками этих взаимодействий.

Все фундаментальные взаимодействия происходят по одной схеме – обмен фермионов бозонами

Классификация частиц по взаимодействию:

Взаимодействие	Сила в относительных единицах	Частицы участницы (фермионы)	Радиус действия, м	Частицы переносчики (бозоны)
Сильное	1	Нуклоны (кварки)	10^{-15}	Глюоны
Электромагнитное	1/137	Заряженные частицы (лептоны, кварки)	∞	Фотоны
Слабое	10^{-10}	Лептоны, кварки	10^{-18}	Промежуточные бозоны
Гравитационное	10^{-38}	Все частицы	∞	Гравитоны?

Кванты
фундаментальных
полей

Глюоны
сильное
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки и глюоны

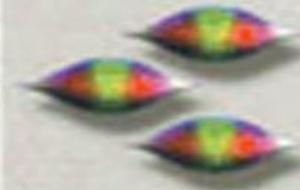
Объекты

протон, нейтрон, атомные
ядра, мезоны

Процессы

деление и синтез атомных ядер

Фотоны
электромагнитное
взаимодействие



Взаимодействуют

все заряженные частицы

атомы, молекулы

электричество, магнетизм,
распространение света, радиоволны

Кванты
фундаментальных
полей

Промежуточные
векторные бозоны
слабое
взаимодействие



Взаимодействуют

кварки, лептоны
промежуточные бозоны

Объекты

Процессы

бета-распад ядер, распад нейтронов
и мюонов

Гравитоны
гравитация



Взаимодействуют

все частицы

Солнечная Система,
галактики, черные дыры

притяжение тел



Резюмируя все выше изложенное, можно сделать вывод, что в современных теориях *истинно элементарными частицами* являются *фотон, лептоны, кварки, глюоны, промежуточные бозоны*.

Теория объединения

- **Теория Великого объединения (ТВО)** – учеными разработана теория объединяющая сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия.
- **Теория суперструн** – в настоящее время физики работают над теорией, которая призвана объединить все четыре взаимодействия.