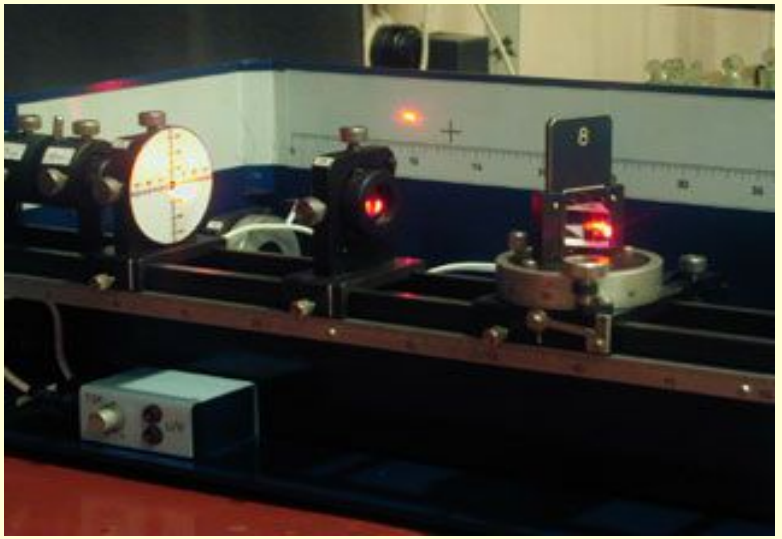
Оптика, квантовая и ядерная физика



для студентов 2 курса ФТФ

Кафедра общей физики

Лекция 14

Элементарные частицы

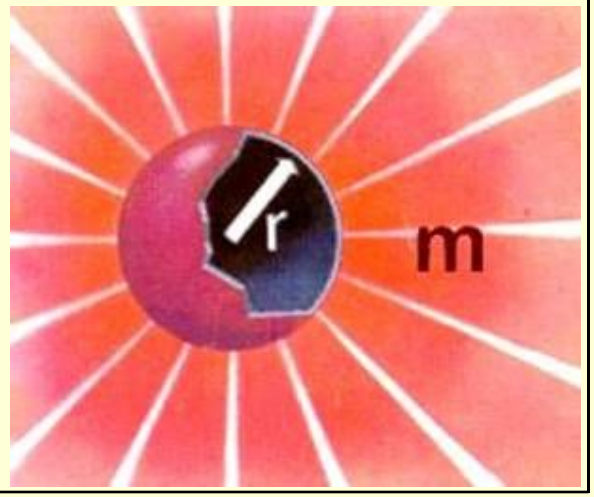
- Фундаментальные взаимодействия и основные классы элементарных частиц
- Частицы и античастицы
- Лептоны и адроны
- Кварки
- Электрослабое взаимодействие
- Стандартная модель элементарных частиц. Проблема объединения фундаментальных взаимодействий

Немного истории…

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

30-е годы XIX века – в теории электролиза, развитой М. Фарадеем, появилось понятие иона и было выполнено измерение элементарного заряда.
Конец XIX века – открытие явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г.), открытия электронов (Дж. Томсон, 1897 г.) и α-частиц (Э. Резерфорд, 1899 г.).

1905 год – представление о квантах электромагнитного поля – фотонах (А. Эйнштейн).
1911 год – открыто атомное ядро (Э. Резерфорд) и окончательно доказано, что атомы имеют сложное строение.



Немного истории…

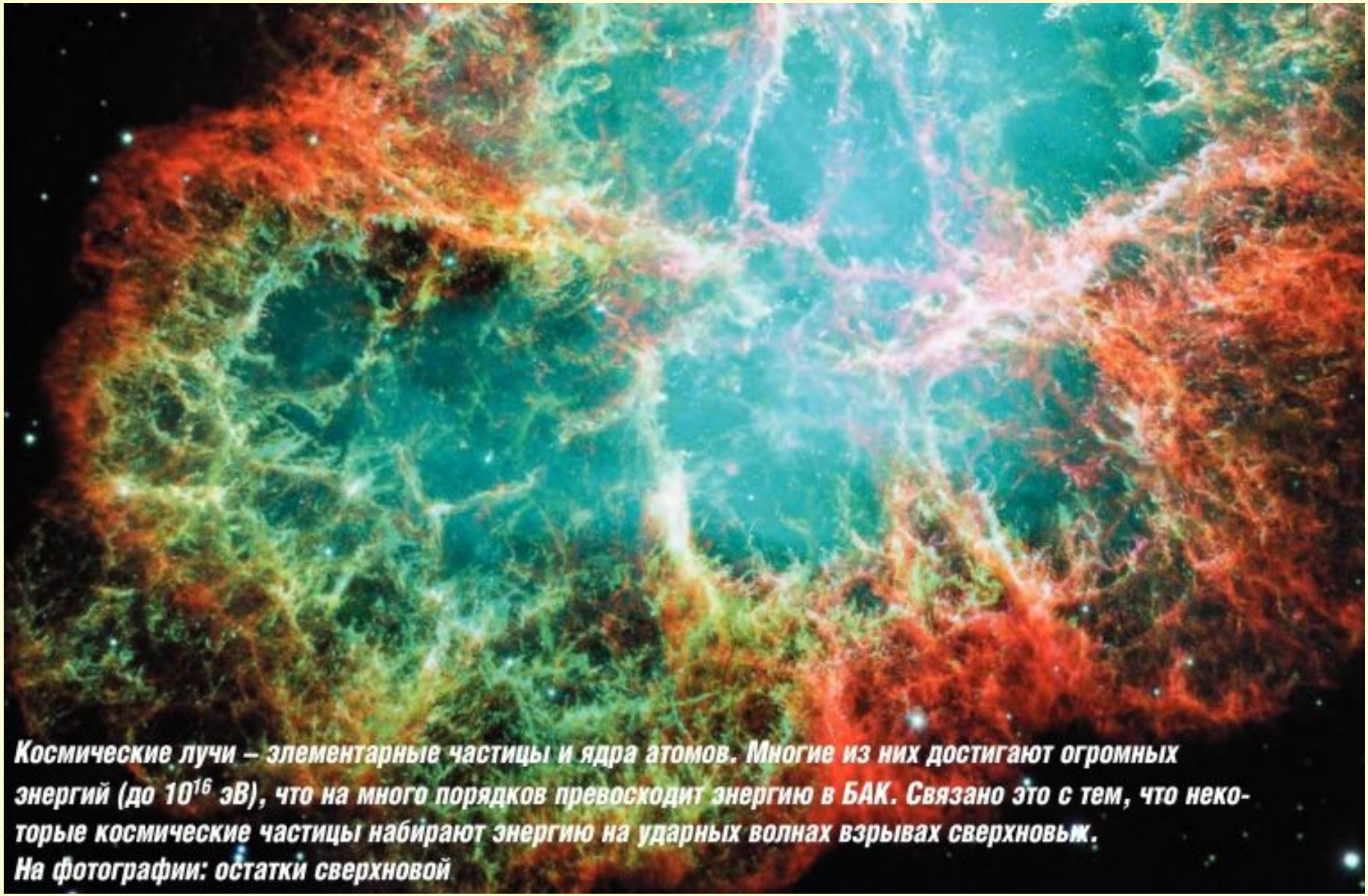
1919 год – Резерфорд в продуктах расщепления ядер атомов ряда элементов обнаружил протоны.

1932 год – Дж. Чедвик открыл нейтрон. Возникла протон-нейтронная теория строения ядер (Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг). В космических лучах был открыт позитрон (К. Андерсон). Существование позитрона было предсказано П. Дираком в 1928 г.

В эти годы были обнаружены и исследованы взаимные превращения протонов и нейтронов и стало ясно, что эти частицы также не являются неизменными элементарными «кирпичиками» природы.

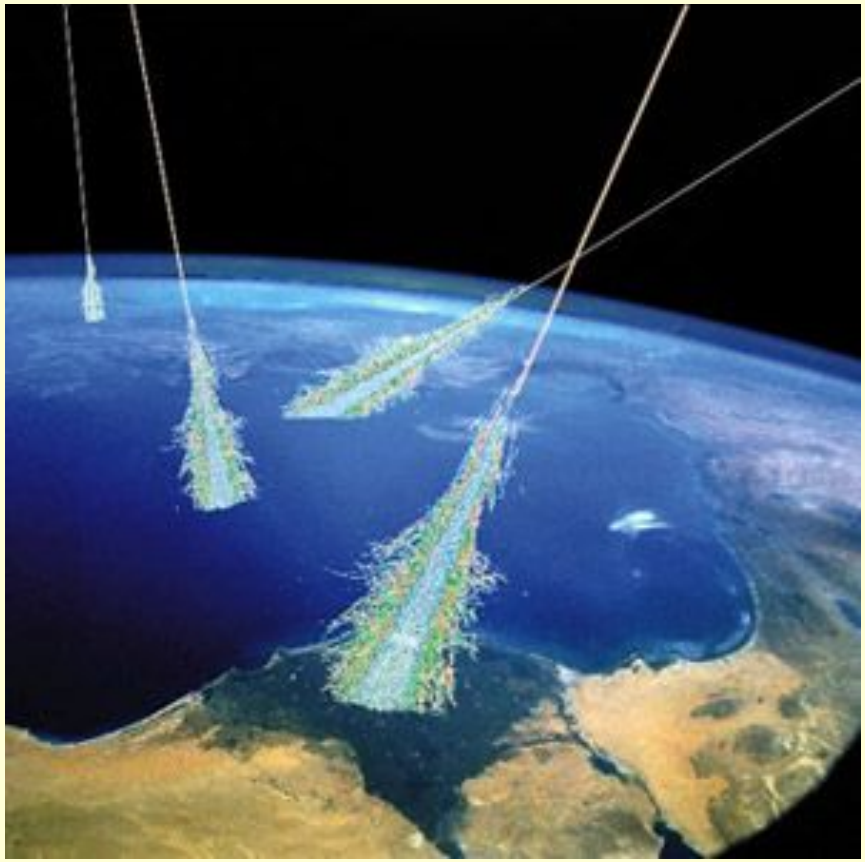
1937 год – в космических лучах были обнаружены частицы с массой в 207 электронных масс, названные мюонами (μ-мезонами).

1947–1950 годы – открыты пионы (то есть π-мезоны), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре.

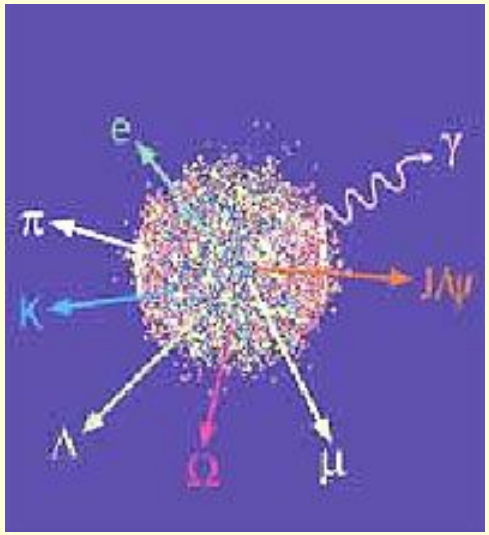


Космические лучи – элементарные частицы и ядра атомов. Многие из них достигают огромных энергий (до 10^{16} эВ), что на много порядков превосходит энергию в БАК. Связано это с тем, что некоторые космические частицы набирают энергию на ударных волнах взрывах сверхновых.
На фотографии: остатки сверхновой

Немного истории…



Открытию новых частиц способствовали исследования космических лучей, развитие ускорительной техники и изучение ядерных реакций.



Немного истории…

Открытию новых частиц способствовали исследования космических лучей, развитие ускорительной техники и изучение ядерных реакций.

В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть элементарными. Подавляющее большинство этих частиц являются нестабильными.

Стабильные: фотон, электрон, протон и нейтрино.

Все остальные частицы – нестабильные.

Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни τ – порядка 15 мин.

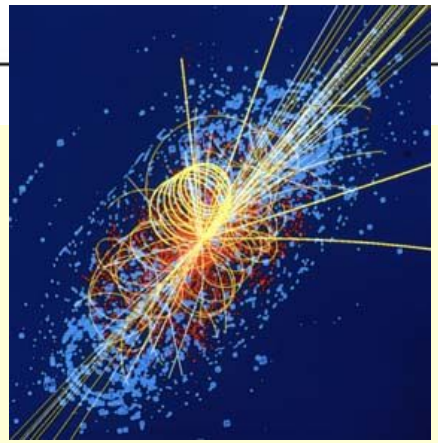
Относительно стабильные – $\tau > 10^{-17}$ с (мезоны, гипероны).

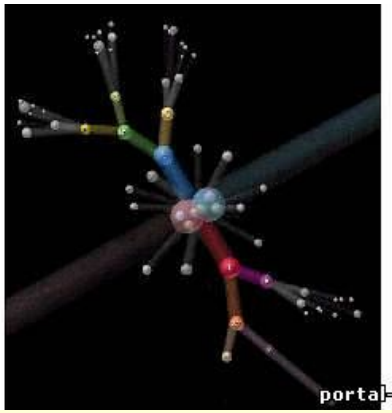
Короткоживущие $\tau \approx 10^{-22} - 10^{-23}$ с

Античастицы найдены у всех частиц.

Возможно существование атомов ***антивещества***, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка – из позитронов.

1897 г. – 1931 г.	1932 г. – 1963 г.	с 1964 г.
от электрона до позитрона	от позитрона до кварков	от гипотезы кварков до наших дней
Атом – Демокрит (400 л.до н.э.) Электрон – Томсон Дж. (1899г) Заряд электрона –Р.Милликен (1909 г.) Протон - Э.Резерфорд (1919 г.) Нейтрон – Д.Чэдвиг (1932 г.) Позитрон – П. Дирак (1928 г. предсказал!) Фотон – А. Эйнштейн (1928 г.) Позитрон – Г.Андерсон (1930 г открыл) Нейтрино и антинейтрино –. В Паули (1931 г. предсказал!)	Мезон - Х.Юкава (1935 г.) Мюон- (1937 г.) Пи-мезон - (1947г) Нейтрино и антинейтрино - (1955 г. зарегистрировали) Антипротон- 1955г. Антинейтрон (1959 г.) Несколько сотен новых эл. частиц (с массами от 140 МэВ до 2 ГэВ)	Модель строения сильно-взаимодействующих кварков. Дж.Цвейг и М.Гелл-Манн (1964 г.) Шестой кварк (Все шесть кварков группируются в 3 семейства) (1995 г.) Стандартная модель (Все современные эксперименты подтверждаются и находят количественное объяснение в рамках этой модели) Бозон Хиггса (предсказал П. Хиггс 1964 г.)

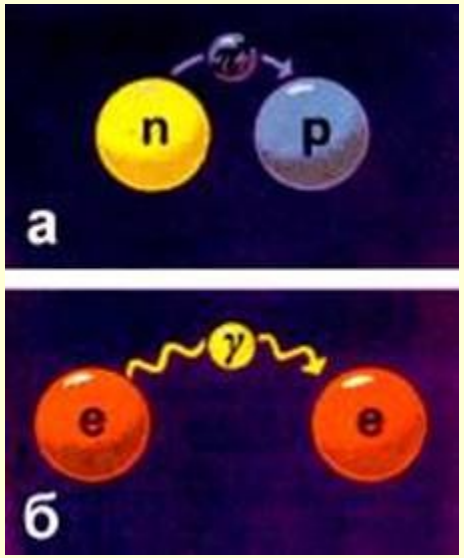




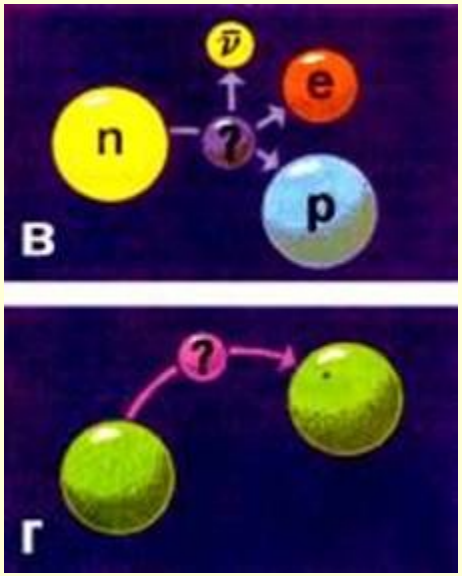
В июле 2008 года на границе Франции и Швейцарии был запущен Большой адронный коллайдер. Это самый большой в мире ускоритель элементарных частиц. На глубине 100 метров по кольцу диаметром 27 километров заряженные частицы (протоны) будут разгоняться почти до скорости света для того, чтобы столкнуться друг с другом. Впервые в истории, элементарные частицы удастся столкнуть друг с другом с невиданной доселе энергией – 14 тераэлектронвольт (ТэВ).

Фундаментальные взаимодействия

Сильное (ядерное)



Электромагнитное



Слабое

Гравитационное

Фундаментальные взаимодействия

Сильное (ядерное)

- наиболее интенсивное из всех видов взаимодействий.
- Обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов.
- В сильном взаимодействии могут принимать участие только тяжелые частицы – адроны (мезоны и барионы).
- Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка и менее 10^{-15}м. Поэтому его называют короткодействующим.

Фундаментальные взаимодействия

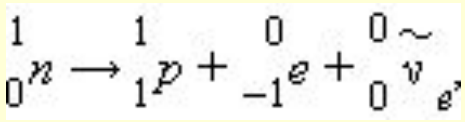
Электромагнитное

- могут принимать участие любые электрически заряженные частицы, а так же фотоны – кванты электромагнитного поля.
- ответственно, в частности, за существование атомов и молекул.
- определяет многие свойства веществ в твердом, жидком и газообразном состояниях.
- Кулоновское отталкивание протонов приводит к неустойчивости ядер с большими массовыми числами.
- обуславливает процессы поглощения и излучения фотонов атомами и молекулами вещества и многие другие процессы физики микро- и макромира.

Фундаментальные взаимодействия

Слабое

- наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире.
- могут принимать участие любые элементарные частицы, кроме фотонов.
- ответственно за протекание процессов с участием нейтрино или антинейтрино, например, β-распад нейтрона



а также безнейтринные процессы распада частиц с большим временем жизни ($\tau \geq 10^{-10}$ с).

Фундаментальные взаимодействия

Гравитационное

- присуще всем без исключения частицам, однако из-за малости масс элементарных частиц силы гравитационного взаимодействия между ними пренебрежимо малы и в процессах микромира их роль несущественна.
- Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезды, планеты и т. п.) с их огромными массами.

Фундаментальные взаимодействия

В 30-е годы XX века возникла гипотеза (И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко) о том, что в мире элементарных частиц взаимодействия осуществляются посредством обмена квантами какого-либо поля.

Фундаментальные взаимодействия возникают в результате ***обмена частицами***, подобно тому, как ковалентная химическая связь атомов возникает при обмене валентными электронами, которые объединяются на незаполненных электронных оболочках. Взаимодействие, осуществляемое путем обмена частицами, получило в физике название ***обменного взаимодействия.***

Фундаментальные взаимодействия

- ***Электромагнитное взаимодействие*** между заряженными частицами возникает вследствие ***обмена фотонами*** – квантами электромагнитного поля.
- ***Сильное взаимодействие*** между нуклонами в ядрах атомов может быть объяснено, если предположить, что нуклоны обмениваются ***π-мезонами*** (пионами). В настоящее время известны три вида пионов: π^+, π^- и π^0 мезоны.
- Обменный механизм ***слабого взаимодействия*** обуславливают ***векторные бозоны W+, W– и Z0 .*** Обнаружены в 1983 году.
- Ученые предполагают, что и у ***гравитационного взаимодействия*** должен быть свой переносчик – гипотетическая частица, названная ***гравитоном***.

Фундаментальные взаимодействия

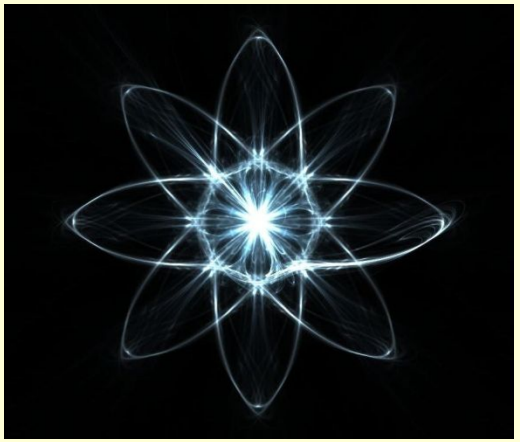
Теория электрослабого взаимодействия, объединяет ***электромагнитное и слабое*** взаимодействия, рассматривая электромагнитное поле и поле слабого взаимодействия как разные компоненты одного поля, в котором наряду с квантом электромагнитного поля участвуют векторные бозоны.

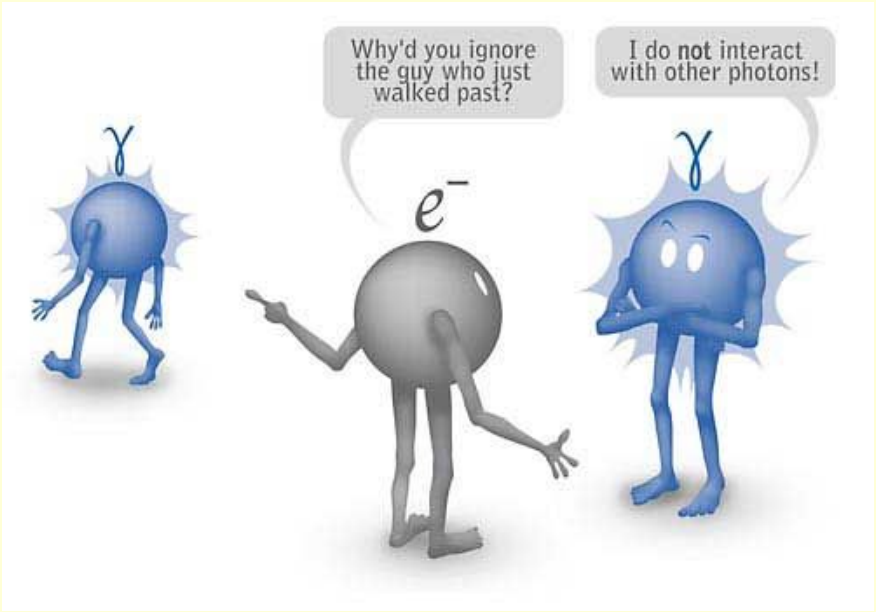
После этого открытия в современной физике значительно возросла уверенность в том, что все виды взаимодействия тесно связаны между собой и, по существу, являются различными проявлениями некоторого единого поля. Однако объединение всех взаимодействий остается пока лишь привлекательной научной гипотезой.

Фундаментальные взаимодействия

В настоящее время считается доказанным, что единое поле, объединяющее все виды взаимодействия, может существовать только при чрезвычайно больших энергиях частиц, недостижимых на современных ускорителях. Такими большими энергиями частицы могли обладать только на самых ранних этапах существования Вселенной, которая возникла в результате так называемого Большого взрыва (Big Bang).

Фундаментальные взаимодействия

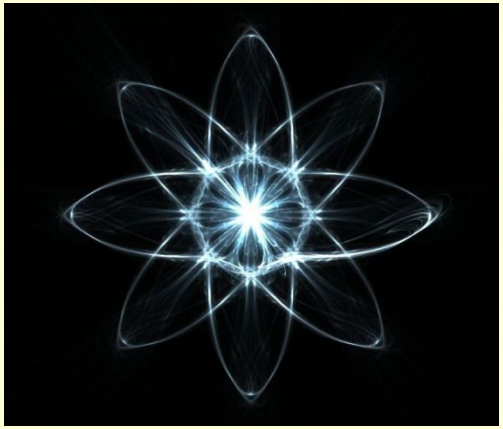




Основные классы элементарных частиц

Основные классы элементарных частиц

1) **Фотоны** — кванты ***электромагнитного*** излучения;
2) **Лептоны** (от греч. «лептос» — легкий), участвующие только в ***электромагнитном и слабом взаимодействиях***. К лептонам относятся электронное и мюонное нейтрино, электрон, мюон, тяжелый лептон — τ-лептон, или таон, с массой примерно $3487m_e$, таонное нейтрино, а также соответствующие им античастицы
3) Адроны (от греч. «адрос» — крупный, сильный). Адроны обладают ***сильным взаимодействием наряду с электромагнитным и слабым***.
К ним относятся протон, нейтрон, пионы и каоны.



Наименование частиц			Символ: частица	Символ: античастица	Масса в электронных массах	Электрический заряд	Время жизни, с
Фотон			γ	γ	0	0	Стабилен
Лептоны	Нейтрино электронное		ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно
	Нейтрино мюонное		ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно
	Тау-нейтрино		ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Стабильно
	Электрон		e^-	e^+	1	−1	Стабилен
	Мюон		μ^-	μ^+	207	−1	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
	Тау-лептон		τ^-	τ^+	3492	−1	$1{,}46 \cdot 10^{-12}$
Адроны: Мезоны	Пи-мезоны		π^0	π^0	264,1	0	$1{,}83 \cdot 10^{-16}$
	(пионы)		π^+	π^-	273,1	1	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
	Ка-мезоны		K^+	K^-	966,4	1	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$
	(каоны)		K^0	K^0	974,1	0	K_S^0 — $8{,}9 \cdot 10^{-11}$; K_L^0 — $5{,}2 \cdot 10^{-8}$
	Эта-нуль-мезон		η^0	η^0	1074	0	$2{,}4 \cdot 10^{-19}$
Адроны: Барионы	Нуклоны	Протон	p	$\bar{p}$	1836,1	1	Стабилен (?)
		Нейтрон	n	$\bar{n}$	1838,6	0	10^3
	Гипероны	Гиперонлямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183.1	0	$2.63 \cdot 10^{-10}$
		Гиперонсигма	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	$8 \cdot 10^{-11}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	$5{,}8 \cdot 10^{-30}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	−1	$1{,}48 \cdot 10^{-10}$
		Гиперонкси	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	$2{,}9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2586,6	−1	$1{,}64 \cdot 10^{-10}$
		Омегаминус-гиперон	Ω	$\bar{\Omega}$	3273	−1	$8{,}2 \cdot 10^{-11}$

Основные классы элементарных частиц

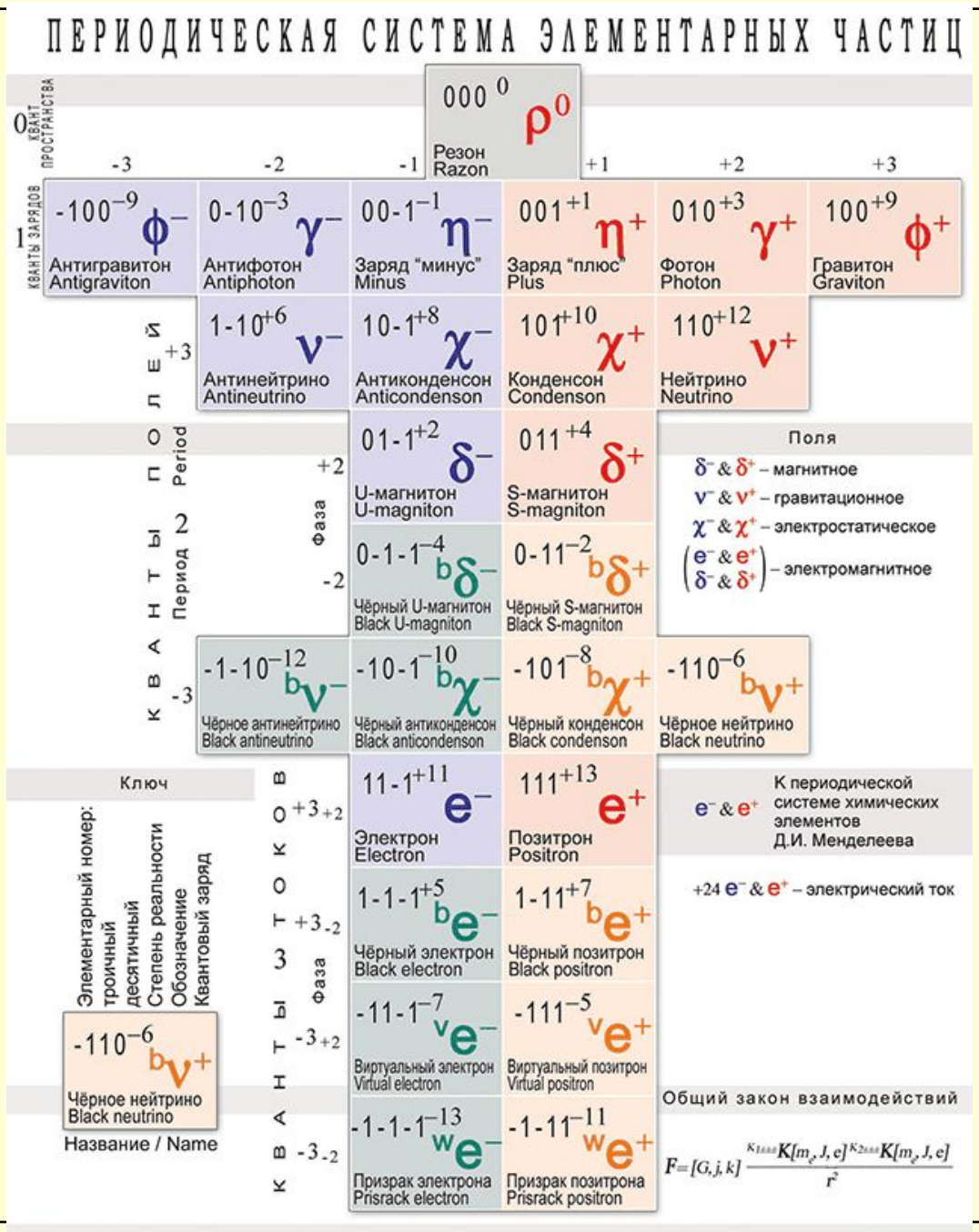
Для процессов взаимопревращаемости элементарных частиц, обусловленных ***сильными взаимодействиями***, выполняются ***все законы сохранения*** (энергии, импульса, момента импульса, зарядов (электрического, лептонного и барионного), изоспина, странности и четности).

В процессах, обусловленных ***слабыми взаимодействиями***, ***не сохраняются*** только изоспин, странность и четность.

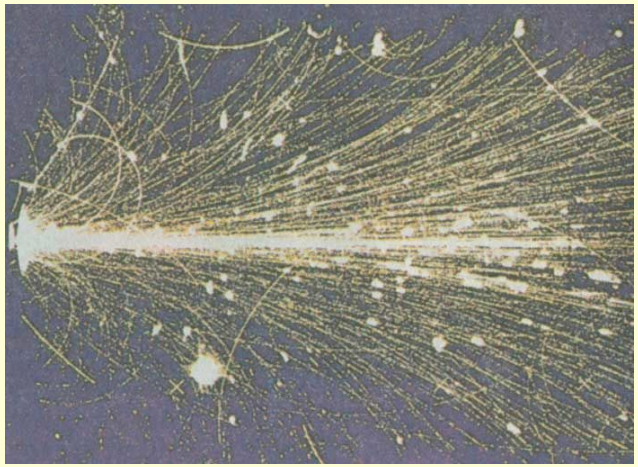
Название частиц	Масса покоя	Заряд	Спин $\frac{p}{h}$	Время жизни
Электрон	m_e	-1	$\frac{1}{2}$	Стабилен
Протон	1836,1	+1	½	Стабилен
Нейтрон	1838,6	0	½	10^3 сек
Позитрон	m_e	+1	½	Стабилен
Нейтрон	$10^{-4}\ m_e$	0	½	Стабилен
Фотон	0	0	1	Стабилен

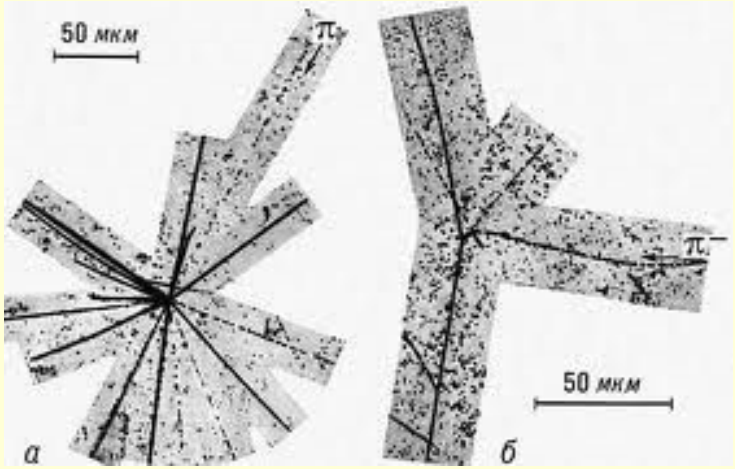
таб.2

Рис. 1. Квантовая лестница


ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
0 КВАНТ ПРОСТРАНСТВА
КВАНТЫ ЗАРЯДОВ
-3 -2 -1 +1 +2 +3
000 0 ρ0 Резон Razon
-100−9 ϕ− Антигравитон Antigraviton
0-10−3 γ− Антифотон Antiphoton
00-1−1 η− Заряд "минус" Minus
001+1 η+ Заряд "плюс" Plus
010+3 γ+ Фотон Photon
100+9 ϕ+ Гравитон Graviton
КВАНТЫ ПОЛЕЙ
1-10+6 ν− Антинейтрино Antineutrino
10-1+8 χ− Антиконденсон Anticondenson
101+10 χ+ Конденсон Condenson
110+12 ν+ Нейтрино Neutrino
Period +3
Период 2
01-1+2 δ− U-магнитон U-magniton
011+4 δ+ S-магнитон S-magniton
Фаза +2
Фаза -2
0-1-1−4 bδ− Чёрный U-магнитон Black U-magniton
0-11−2 bδ+ Чёрный S-магнитон Black S-magniton
-3
-1-10−12 bν− Чёрное антинейтрино Black antineutrino
-10-1−10 bχ− Чёрный антиконденсон Black anticondenson
-101−8 bχ+ Чёрный конденсон Black condenson
-110−6 bν+ Чёрное нейтрино Black neutrino
Поля
δ− & δ+ – магнитное
ν− & ν+ – гравитационное
χ− & χ+ – электростатическое
(e− & e+ / δ− & δ+) – электромагнитное
Ключ
Элементарный номер:
троичный
десятичный
Степень реальности
Обозначение
Квантовый заряд
-110−6 bν+
Чёрное нейтрино
Black neutrino
Название / Name
КВАНТЫ СПИНОВ
3 Фаза +3 +2
Фаза -3 +2
Фаза -3 -2
11-1+11 e− Электрон Electron
111+13 e+ Позитрон Positron
1-1-1+5 be− Чёрный электрон Black electron
1-11+7 be+ Чёрный позитрон Black positron
-11-1−7 ve− Виртуальный электрон Virtual electron
-111−5 ve+ Виртуальный позитрон Virtual positron
-1-1-1−13 we− Призрак электрона Prisrack electron
-1-11−11 we+ Призрак позитрона Prisrack positron
e− & e+ К периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева
+24 e− & e+ – электрический ток
Общий закон взаимодействий
F=[G,j,k] κ1 K[me,J,e] κ2 K[me,J,e] / r2

Следы элементарных частиц в детекторе





Расщепление ядер фотоэмульсии: а-заряженным пионом с энергией 3,8 Гэв; б-остановившимся π-мезоном.

Частицы и античастицы

Гипотеза об античастице впервые возникла в 1928 г., когда П. Дирак на основе релятивистского волнового уравнения предсказал существование позитрона, обнаруженного спустя четыре года К. Андерсеном в составе космического излучения.

На основе релятивистской квантовой теории пришли к заключению, что для каждой элементарной частицы должна существовать античастица **(принцип зарядового сопряжения).**

Эксперименты показывают, что за немногим исключением (например, фотона и π^0-мезона), действительно, каждой частице соответствует античастица.

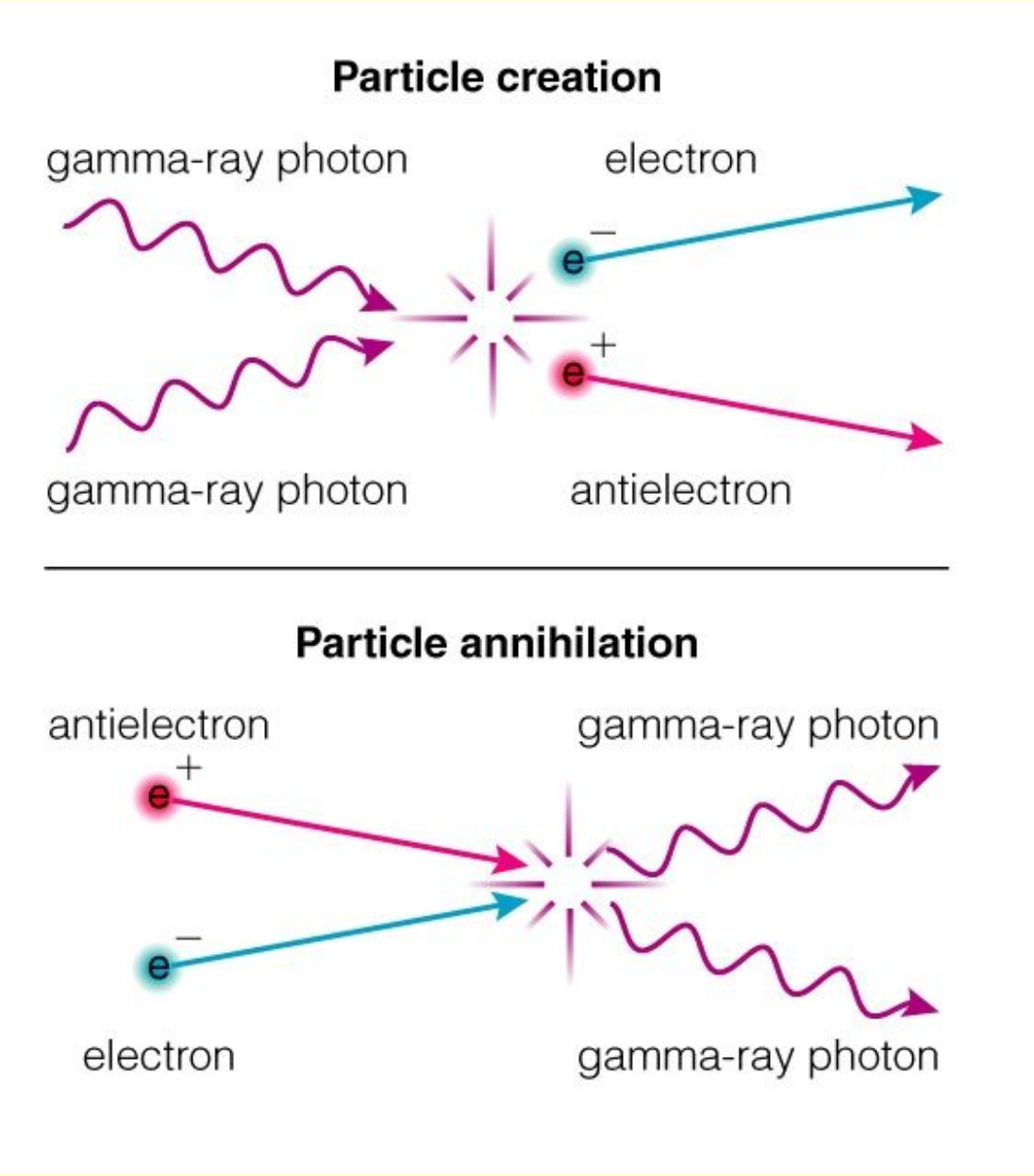
Частицы и античастицы

Из общих положений квантовой теории следует, что частицы и античастицы должны иметь одинаковые

- ✔ массы,
- ✔ времена жизни в вакууме,
- ✔ одинаковые по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды (и магнитные моменты),
- ✔ одинаковые спины и изотопические спины,
- ✔ остальные квантовые числа, приписываемые элементарным частицам для описания закономерностей их взаимодействия (лептонное число, барионное число, странность, очарование и т. д.).

Частицы и античастицы

Согласно теории Дирака, столкновение частицы и античастицы должно приводить к их взаимной аннигиляции, в результате которой возникают другие элементарные частицы или фотоны.



Частицы и античастицы

Существуют частицы, которые античастиц не имеют, — так называемые **истинно нейтральные частицы.**

фотон,

π^0-мезон

η-мезон (его масса равна $1074 m_e$, время жизни $7 \cdot 10^{-19}$ с; распадается с образованием π-мезонов и γ-квантов).

Не способны к аннигиляции, но испытывают взаимные превращения, являющиеся фундаментальным свойством всех элементарных частиц.

Частицы и античастицы

После открытия столь большого числа античастиц возникла новая задача — найти антиядра, иными словами, доказать существование антивещества.
Антиядра действительно были обнаружены. Первое антиядро — антидейтрон было получено в 1965 г. группой американских физиков под руководством Л. Ледермана. Впоследствии на Серпуховском ускорителе были синтезированы ядра антигелия (1970) и антитрития (1973).

Возможность аннигиляции при встрече с частицами не позволяет античастицам длительное время существовать среди частиц. Поэтому для устойчивого состояния антивещества оно должно быть от вещества изолировано.

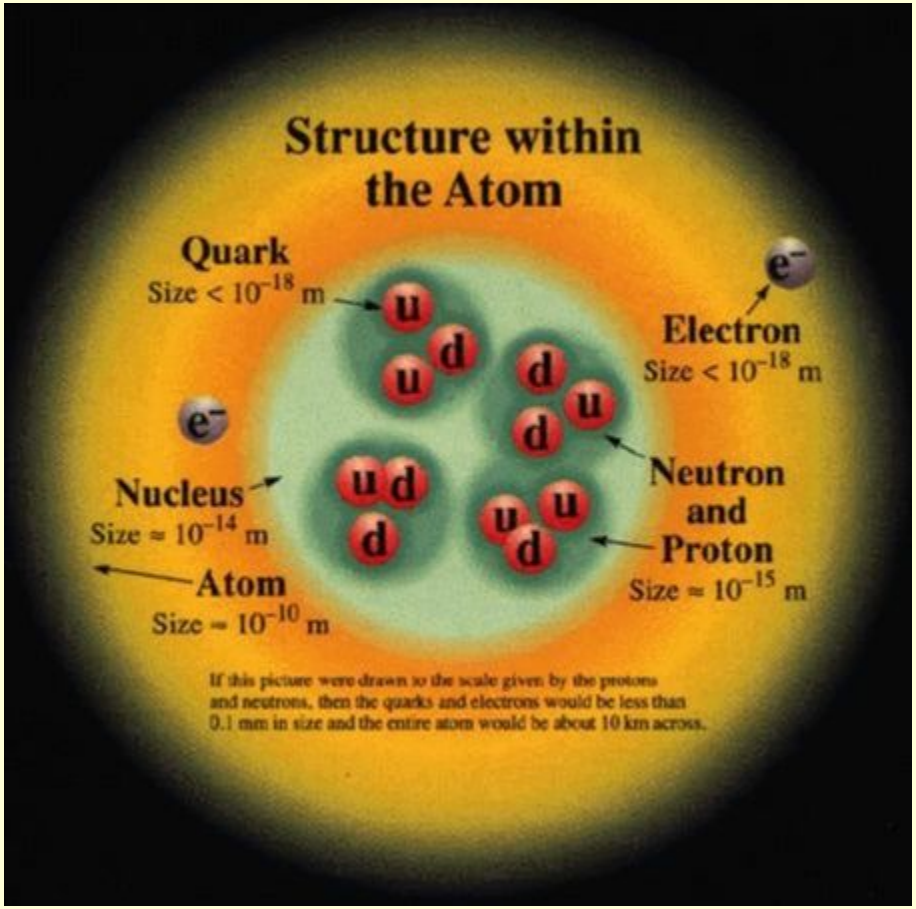
Кварки

Название «кварк» заимствовано из романа ирландского писателя Дж. Джойса «Поминки по Финнегану» (герою снится сон, в котором чайки кричат: «Три кварка для мастера Марка»).

Согласно модели Гелл-Манна — Цвейга, все известные в то время адроны можно было построить, постулировав существование трех типов кварков (*u, d, s*) и соответствующих антикварков ($\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{s}$), если им приписать характеристики, указанные в табл.

Углубленное изучение модели Гелл-Манна — Цвейга, а также открытие в 1974 г. истинно нейтрального джей-пси-мезона (J/Ψ), привело к введению нового кварка — *c*-кварка и новой сохраняющейся величины — «**очарования**».

Кварк (антикварк)	Электрический заряд в единицах *e*	Барионное число *B*	Спин, в единицах *ħ*	Странность *S*
$u\,(\tilde{u})$	$+{}^{2}/_{3}\,(-{}^{2}/_{3})$	$+{}^{1}/_{3}\,(-{}^{1}/_{3})$	${}^{1}/_{2}$	0
$d\,(\tilde{d})$	$-{}^{1}/_{3}\,(+{}^{1}/_{3})$	$+{}^{1}/_{3}\,(-{}^{1}/_{3})$	${}^{1}/_{2}$	0
$s\,(\tilde{s})$	$-{}^{1}/_{3}\,(+{}^{1}/_{3})$	$+{}^{1}/_{3}\,(-{}^{1}/_{3})$	${}^{1}/_{2}$	$-1\,(+1)$
$c\,(\tilde{c})$	$+{}^{2}/_{3}\,(-{}^{2}/_{3})$	$+{}^{1}/_{3}\,(-{}^{1}/_{3})$	${}^{1}/_{2}$	$-1\,(+1)$


Structure within the Atom
Quark
Size < 10^{-18} m
Electron
Size < 10^{-18} m
Nucleus
Size ≈ 10^{-14} m
Neutron and Proton
Size ≈ 10^{-15} m
Atom
Size ≈ 10^{-10} m
If this picture were drawn to the scale given by the protons and neutrons, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Ждём Вас на зачете!