



МИКРОМИР: КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Тема 2

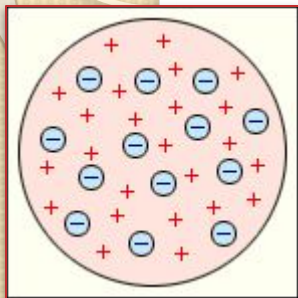
План лекции

1. Особенности квантово-механического описания микромира. Корпускулярно-волновой дуализм
2. Элементарные частицы и кварковая модель атома
3. Типы фундаментальных физических взаимодействий

Структурные уровни организации материи

Структурный уровень материи	Подуровни
МИКРОМИР	Физический уровень: субатомный уровень: кварки, лептоны ядерный уровень: нуклоны, ядра атомов Атомный уровень: атомы химических элементов Молекулярный уровень: молекулы веществ
МАКРОМИР	Макромолекулярный уровень: полимеры, комплексы молекул Физические тела
МЕГАМИР	Уровень геологических объектов, планет, звезд Уровень галактик и скоплений галактик

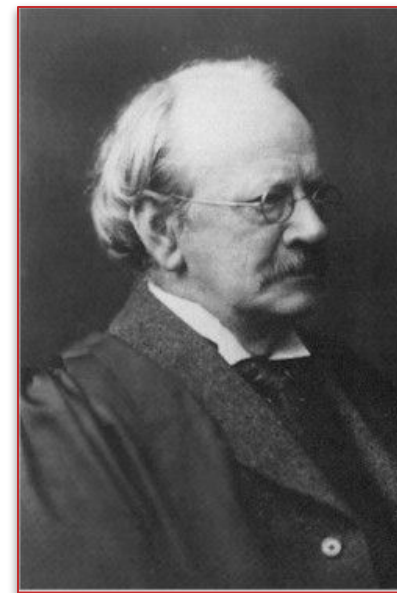
Модель атома Томсона



Атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар радиуса порядка 10^{-10} м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны.

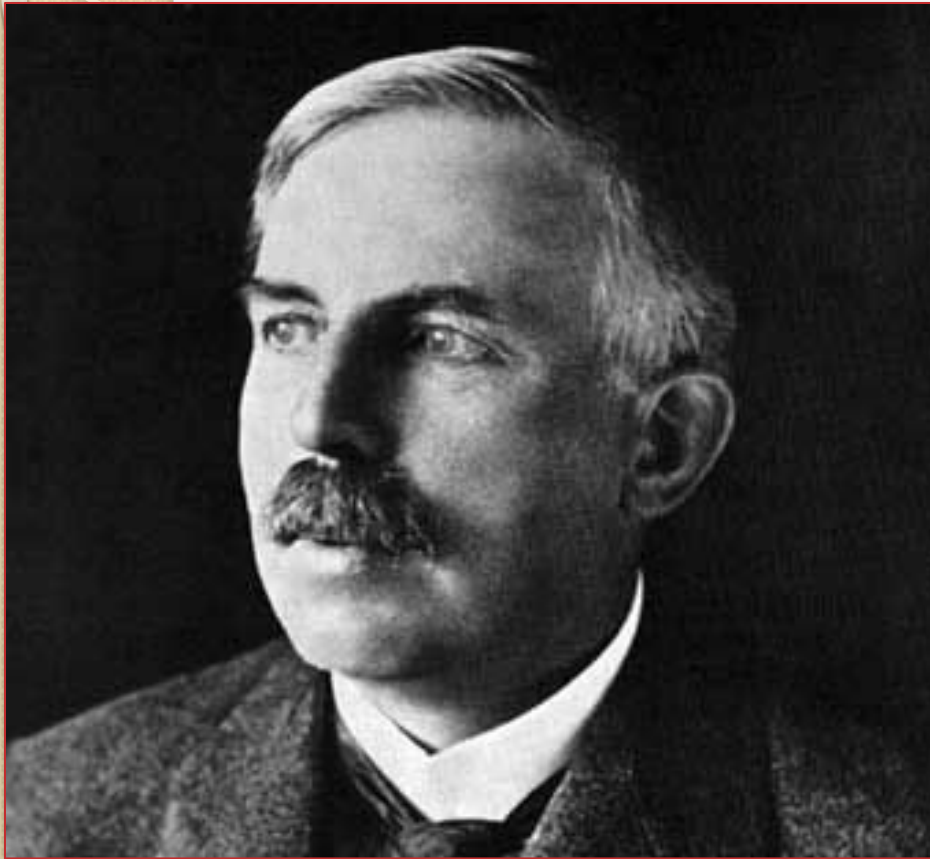
Недостатки модели:

1. не объясняла дискретный характер излучения атома и его устойчивость;
2. не дает возможности понять, что определяет размеры атомов;
3. оказалась в полном противоречии с опытами по исследованию распределения положительного заряда в атоме (опыты, проводимые Эрнестом Резерфордом).



Джозеф Джон Томсон
(1856 – 1940)

Модель атома Резерфорда

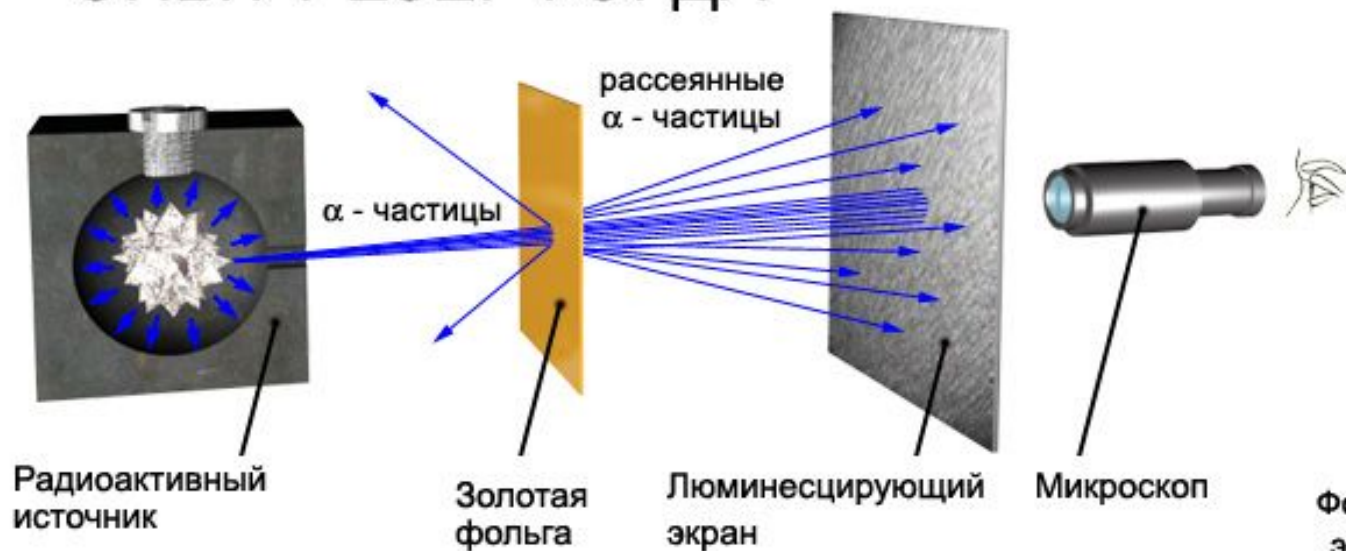


Эрнест Резерфорд
(1871 – 1937)

Экспериментально исследовал распределение положительного заряда.

В 1906 г. зондировал атом с помощью α -частиц.

ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА



Фотографии люминесцирующего экрана при отсутствии золотой фольги в потоке α - частиц и при ее внесении в поток

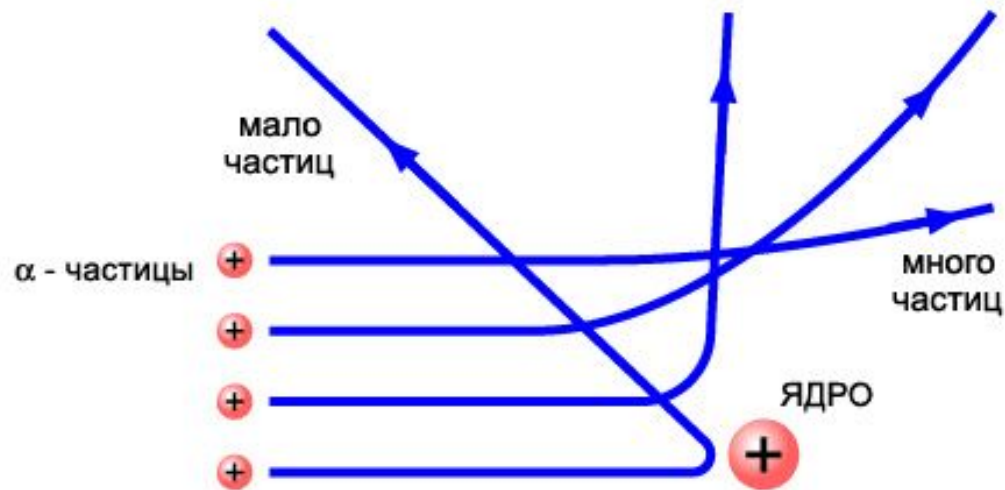
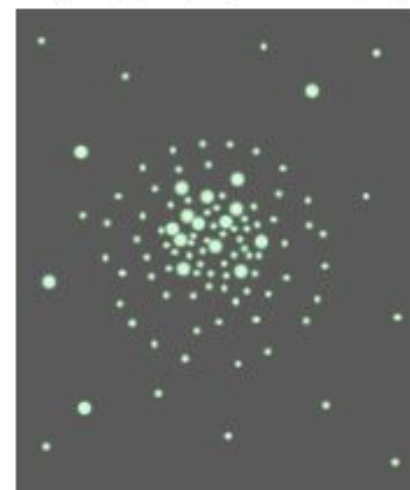
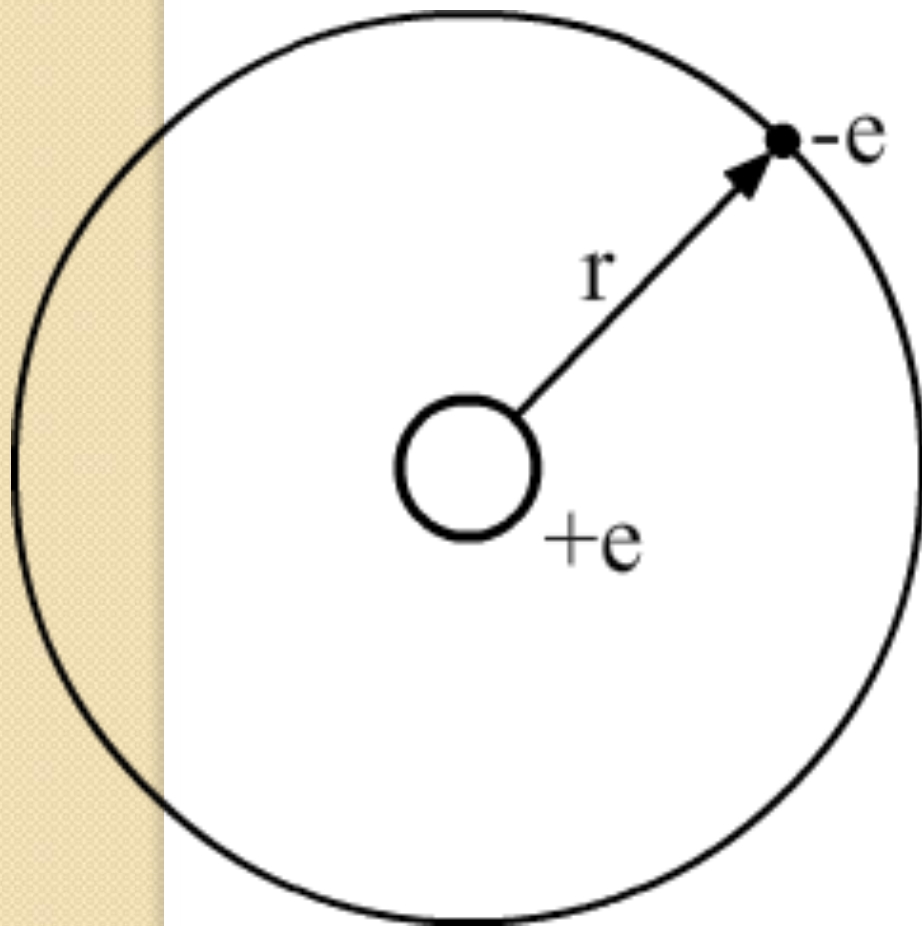


СХЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ α - ЧАСТИЦ С ЯДРОМ

Атомное ядро – тело малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.

Диаметр ядра порядка $10^{-12} - 10^{-13}$ см.

Атом водорода



В атоме водорода вокруг ядра обращается всего один электрон.

Ядро было названо **протоном**.

$$m_p = 1836,1 \cdot m_e$$

Размер атома – это радиус орбиты его электрона.

Недостатки атома Резерфорда

1. **Эта модель не согласуется с наблюдаемой стабильностью атомов.** По законам классической электродинамики вращающийся вокруг ядра электрон должен **непрерывно** излучать электромагнитные волны, а поэтому терять свою энергию. В результате электроны будут приближаться к ядру и в конце концов упадут на него.
2. **Эта модель не объясняет наблюдаемые на опыте оптические спектры атомов.** Оптические спектры атомов не непрерывны, как это следует из теории Резерфорда, а состоят из узких спектральных линий, т.е. атомы излучают и поглощают электромагнитные волны лишь определенных частот, характерных для данного химического элемента.



К явлениям атомных масштабов законы классической физики неприемлемы.

Квантовый подход к описанию атома

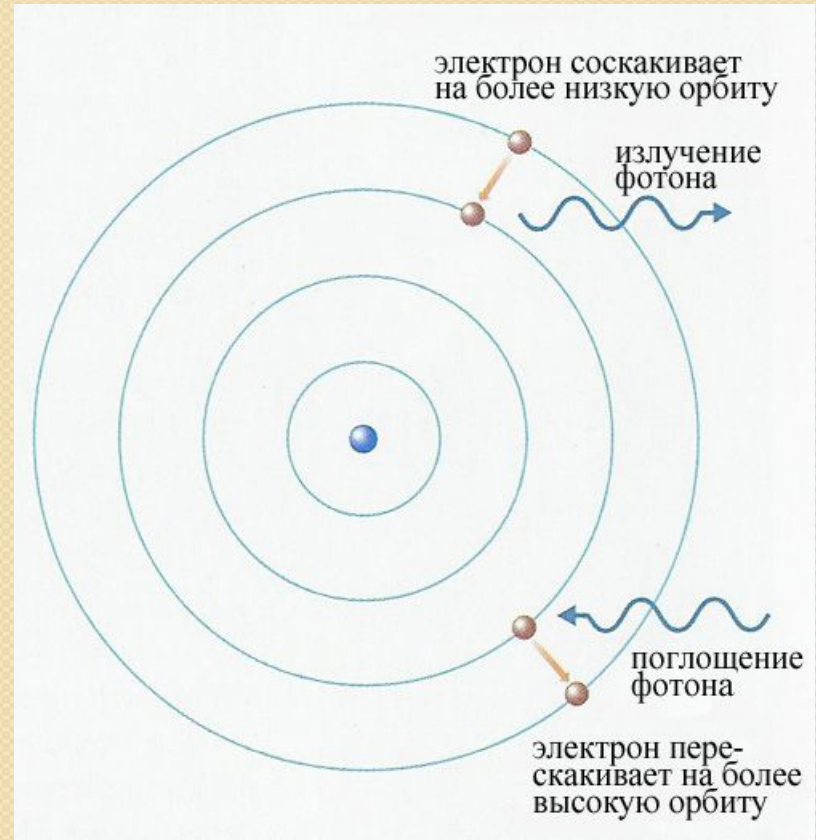
В 1913г. Великий датский физик Н.Бор применил принцип квантования при решении вопроса о строении атома

Два постулата Н.Бора:

1. В атоме существуют стационарные орбиты, вращаясь по которым электрон не излучает
2. При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает ***порцию энергии***

МОДЕЛЬ АТОМА Н. БОРА

Согласно модели атома Бора, электрон перескакивает на более высокую орбиту при поглощении фотона и соскакивает на более низкую при излучении фотона



Квант

Квант (от лат. quantum — «сколько») — неделимая порция какой-либо величины в физике. В основе понятия лежит представление квантовой механики о том, что некоторые физические величины могут принимать только определённые значения (говорят, что физическая величина квантуется). В некоторых важных частных случаях эта величина или шаг её изменения могут быть только целыми кратными некоторого фундаментального значения — и последнее называют квантом.

Идея М.Планка

Автор идеи квантования излучения – немецкий физик М.Планк

Сущность «парадоксальной гипотезы» Планка заключалась в том, что испускание и поглощение электромагнитной энергии атомами и молекулами происходит не непрерывно, а дискретно - порциями, или «квантами», как несколько позже предложил называть их Планк.



Энергия кванта

Энергия кванта электромагнитного излучения фиксирована и равна

$$E = h\nu$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, фундаментальная физическая величина, определяющая свойства нашего мира, а ν — частота излучения

Фотоэффект

- Фотоэффект - явление испускания электронов с поверхности металла под действием света.

Т.е. свет выбивает (вырывает) электроны из металла.

Идея Эйнштейна (1905 г.)

- Свет имеет прерывистую дискретную структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций – квантов, впоследствии названных фотонами.
- Квант поглощается электроном целиком. Энергия кванта передается электрону. (Один фотон выбивает один электрон.)
- Энергия каждого фотона определяется формулой Планка $W = E = h\nu$, где h – постоянная Планка.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где A – работа выхода электронов из металла.

Уравнение получено в предположении, что каждый вылетающий электрон поглощает один фотон.

Волновые свойства микрочастиц. Волны де Бройля

Недостатки теории Бора указывали на необходимость пересмотра основ квантовой теории и представлений о природе микрочастиц (электронов, протонов и т.п.). Возник вопрос о том, насколько исчерпывающим является *представление электрона в виде малой механической частицы, характеризующейся определенными координатами и определенной скоростью.*

Мы помним, что в *оптических явлениях наблюдается своеобразный дуализм.*

Наряду с явлениями дифракции, интерференции (волновыми явлениями) наблюдаются и явления, характеризующие корпускулярную природу света (фотоэффект, эффект Комптона).



В 1924 г. Луи де Бройль выдвинул смелую гипотезу, что дуализм не является особенностью только оптических явлений, а имеет универсальный характер: частицы вещества также обладают волновыми свойствами.

Не только луч света, но и все тела в природе должны обладать и волновыми и корпускулярными свойствами одновременно

Квантовая механика устранила абсолютную грань между волной и частицей.

Основным положением квантовой механики, описывающей поведение микрообъектов, является корпускулярно-волновой дуализм, т.е. двойственная природа микрочастиц.

Так, поведение электронов в одних явлениях, например при наблюдении их движения в камере Вильсона или при измерении электрического заряда в фотоэффекте, может быть описано на основе представлений о частицах. В других же, особенно в явлениях дифракции, – только на основе представления о волнах.

Идея «волн материи», высказанная французским физиком Л. де Бройлем, получила блестящее подтверждение в опытах по дифракции частиц.

Формула длины волны электрона

Формула де Бройля устанавливает зависимость длины волны λ движущейся частицы вещества от ее импульса p ($p = mv$, где m — масса частицы, v — ее скорость) и постоянной Планка h .

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Квантовая механика

Квантовая механика описывает свойства частиц с учетом их волновых особенностей

В ней состояние микрочастиц описывается принципиально по-новому – с помощью волновой функции, которая является основным носителем информации об их корпускулярных и волновых свойствах

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} (E-U)\Psi = 0$$

где x — расстояние, h — постоянная Планка, а m , E и U — соответственно масса, полная энергия и потенциальная энергия частицы.

Уравнение Э. Шредингера

Уравнение Э.Шредингера

Шрёдингер применил к понятию волн вероятности классическое дифференциальное уравнение волновой функции и получил знаменитое уравнение, носящее его имя. Подобно тому как обычное уравнение волновой функции описывает распространение, например, ряби по поверхности воды, уравнение Шрёдингера описывает распространение волны вероятности нахождения частицы в заданной точке пространства. Пики этой волны (точки максимальной вероятности) показывают, в каком месте пространства скорее всего окажется частица.

Уравнение Э.Шредингера

Картина квантовых событий, которую дает нам уравнение Шрёдингера, заключается в том, что электроны и другие элементарные частицы ведут себя подобно волнам на поверхности океана. С течением времени пик волны (соответствующий месту, в котором скорее всего будет находиться электрон) смещается в пространстве в соответствии с описывающим эту волну уравнением. То есть то, что мы традиционно считали частицей, в квантовом мире ведёт себя во многом подобно волне.

Соотношение неопределенностей В. Гейзенберга

*Невозможно одновременно с точностью
определить координаты и скорость
квантовой частицы.*

$$\Delta x \cdot \Delta v > h/m$$

где Δx — неопределенность (погрешность измерения) пространственной координаты микрочастицы, Δv — неопределенность скорости частицы, m — масса частицы, а h — постоянная Планка

В обычном мире, измеряя положение и скорость тела в пространстве, мы на него практически не воздействуем. Таким образом, в идеале мы можем одновременно измерить и скорость, и координаты объекта абсолютно точно.

В мире квантовых явлений, однако, любое измерение воздействует на систему. Сам факт проведения нами измерения, например, местоположения частицы, приводит к изменению ее скорости, причем непредсказуемому (и наоборот). Чем меньше неопределенность в отношении одной переменной (например, Δx), тем более неопределенной становится другая переменная (Δv). Иными словами, если бы нам удалось абсолютно точно установить координаты квантовой частицы, о ее скорости мы не имели бы ни малейшего представления; если бы нам удалось точно зафиксировать скорость частицы, мы бы понятия не имели, где она находится.

Особенности квантовой теории

- Предсказания квантовой механики неоднозначны, они дают лишь вероятность того или иного результата.
- Вероятностное описание явлений в квантовой механике имеет иную природу, нежели в механике статистической. В последней вероятность появляется в результате усреднения значений для множества частиц. В квантовой механике она изначально и справедлива как для множества, так и для единственной частицы.

Особенности квантовой теории

- Причина вероятностного характера предсказаний заключается в том, что свойства объектов микромира нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения. В зависимости от него микрообъект проявляет себя либо как волна, либо как частица.

Принцип дополнительности Н. Бора

Для полного описания квантово-механического объекта требуется применение двух различных наборов понятий, один из которых описывает данный объект как волну, а другой – как частицу. Эти наборы понятий

***не противоречивы, но
взаимодополнительны.***

Элементарные частицы

Ныне сформировалось убеждение, что абсолютной элементарности не существует.

Условно же принято считать элементарными те частицы, у которых сегодня не обнаруживается внутренняя структура, а размеры не превышают величины 10^{-15} см.

Характеристики элементарных частиц

Физические величины, характеризующие элементарные частицы, это масса, заряд, спин, время жизни, внутренние квантовые числа.

Спин (англ. spin — вертеть[-ся]) характеризует собственный момент количества движения элементарных частиц. Спин имеет квантовую природу и не связан с перемещением частицы как целого.

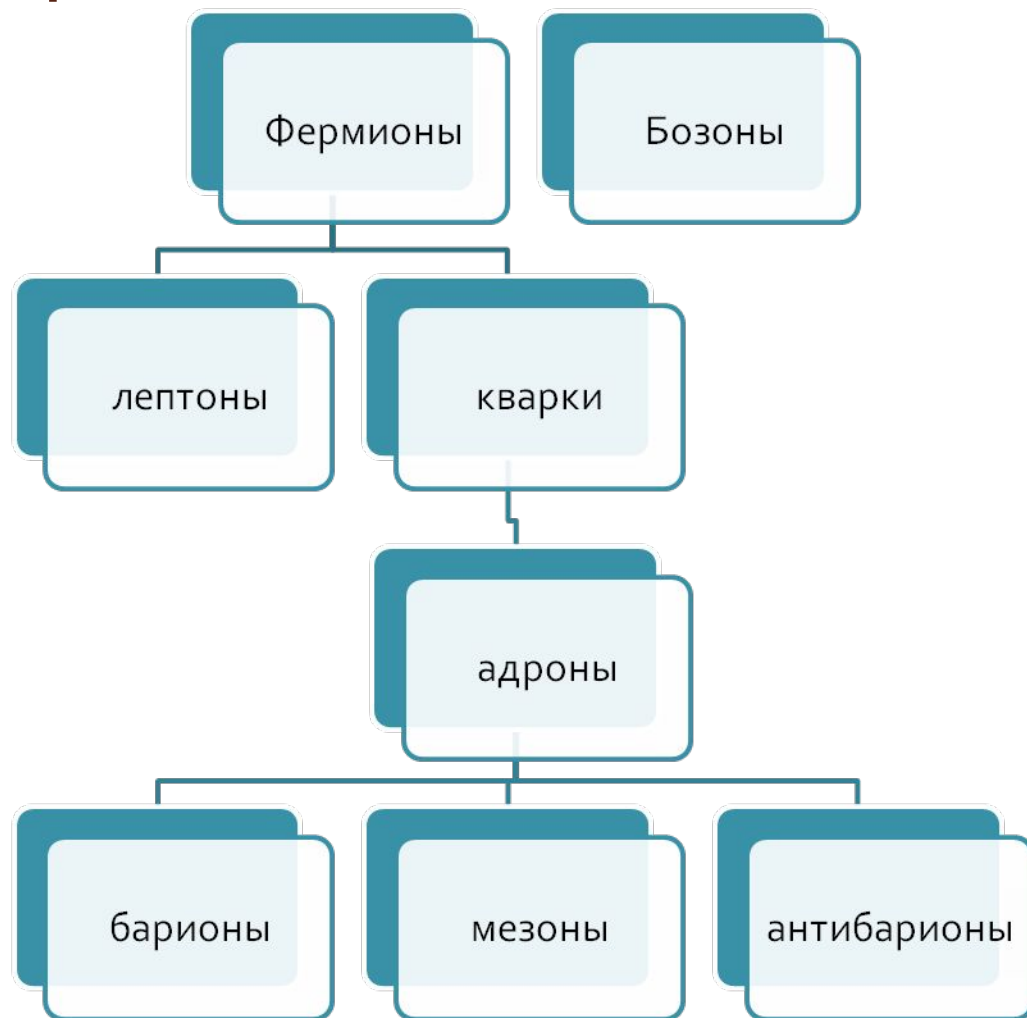
Квантовое число — численное значение какой-либо квантованной переменной микроскопического объекта (элементарной частицы, ядра, атома и т. д.), характеризующее состояние частицы. Задание квантовых чисел полностью характеризует состояние частицы. Квантовые числа — целые или дробные числа, определяющие возможные значения физических величин, характеризующих квантовую систему (молекулу, атом, атомное ядро, элементарную частицу). Квантовые числа отражают дискретность (квантованность) физических величин, характеризующих микросистему.

Характеристики элементарных частиц

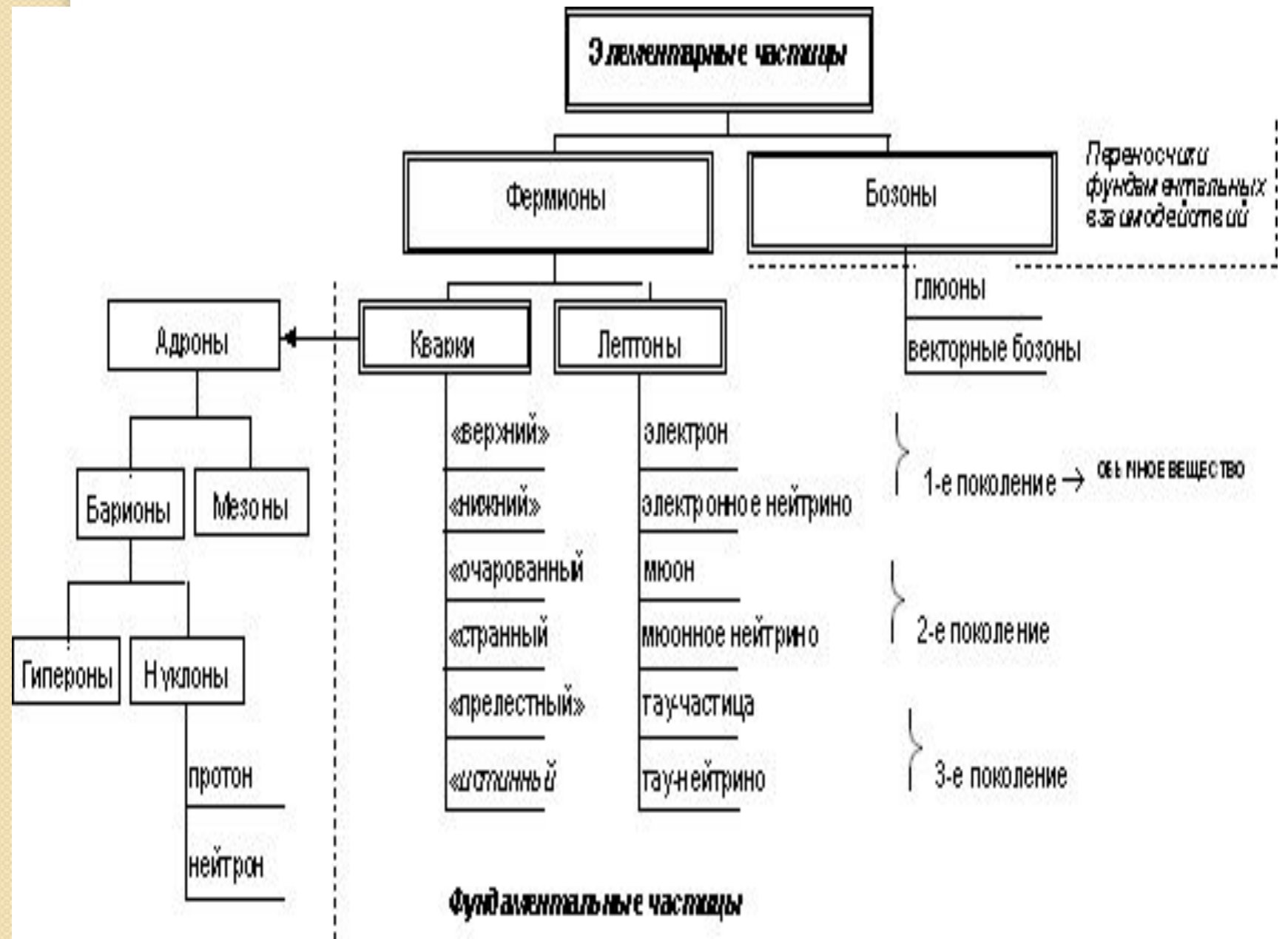
В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на:

- **Стабильные** (электрон, протон, фотон и нейтрино)
- **Квазистабильные** (распадаются при электромагнитных взаимодействиях, среднее время жизни 10^{-20} с)
- **Резонансы** (распадаются за счет сильного взаимодействия, среднее время жизни 10^{-22} - 10^{-24} с)

Классификация элементарных частиц



Элементарные частицы



Элементарные частицы

По величине спина все элементарные частицы делятся на два класса:

- **бозоны** — частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны).
- **фермионы** — частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино)

Группа фермионов состоит из двух подгрупп:

лептоны и ***кварки***

Лептоны

Лепто́ны (греч. λεπτός — лёгкий) — фундаментальные частицы с полуцелым спином ($1/2$)

Лептоны вместе с кварками (которые участвуют во всех четырёх взаимодействиях, включая сильное) составляют класс фундаментальных фермионов — частиц, из которых состоит вещество и у которых неизвестна внутренняя структура.

Существует 6 лептонов:

- электрон,
- мюон,
- тау-лептон,
- электронное нейтрино
- мюонное нейтрино,
- тау-нейтрино

Адроны

Составные частицы

адроны — они состоят из кварков и подразделяются, в свою очередь, на:

барионы — частицы, состоящие из трех кварков (к ним, в частности, относятся протон и нейтрон);

мезоны — адроны, составленные парой «кварк – антикварк»;

антибарионы – частицы, состоящие из трех антикварков.

Бозоны

Бозо́ны — частицы с целым значением спина.
Являются переносчиками взаимодействий.

Элементарные бозоны:

- фотон (электромагнитное взаимодействие),
- глюон (сильное взаимодействие)
- промежуточный векторный бозон (слабое взаимодействие).

Кварки

Ква́рк — фундаментальная частица в, обладающая электрическим зарядом, кратным $e/3$, и не наблюдающаяся в свободном состоянии. Кварки являются точечными частицами, примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона. Из кварков состоят адроны, в частности, протон и нейтрон. В настоящее время известно 6 разных «ароматов» кварков

Кварки

Кварк	Заряд
u или p (верхний или протонный)	+ 2/3
d или n (нижний или нейтронный)	- 1/3
c (очарованный)	+ 2/3
s (странный)	- 1/3
b (красивый)	+ 2/3
t (истинный)	- 1/3

Поколения частиц

Первое поколение

Электрон Электронное нейтрино
u-кварк («верхний») d-кварк («нижний»)

Второе поколение

Мюон Мюонное нейтрино
s-кварк («странный») c-кварк
(«очарованный»)

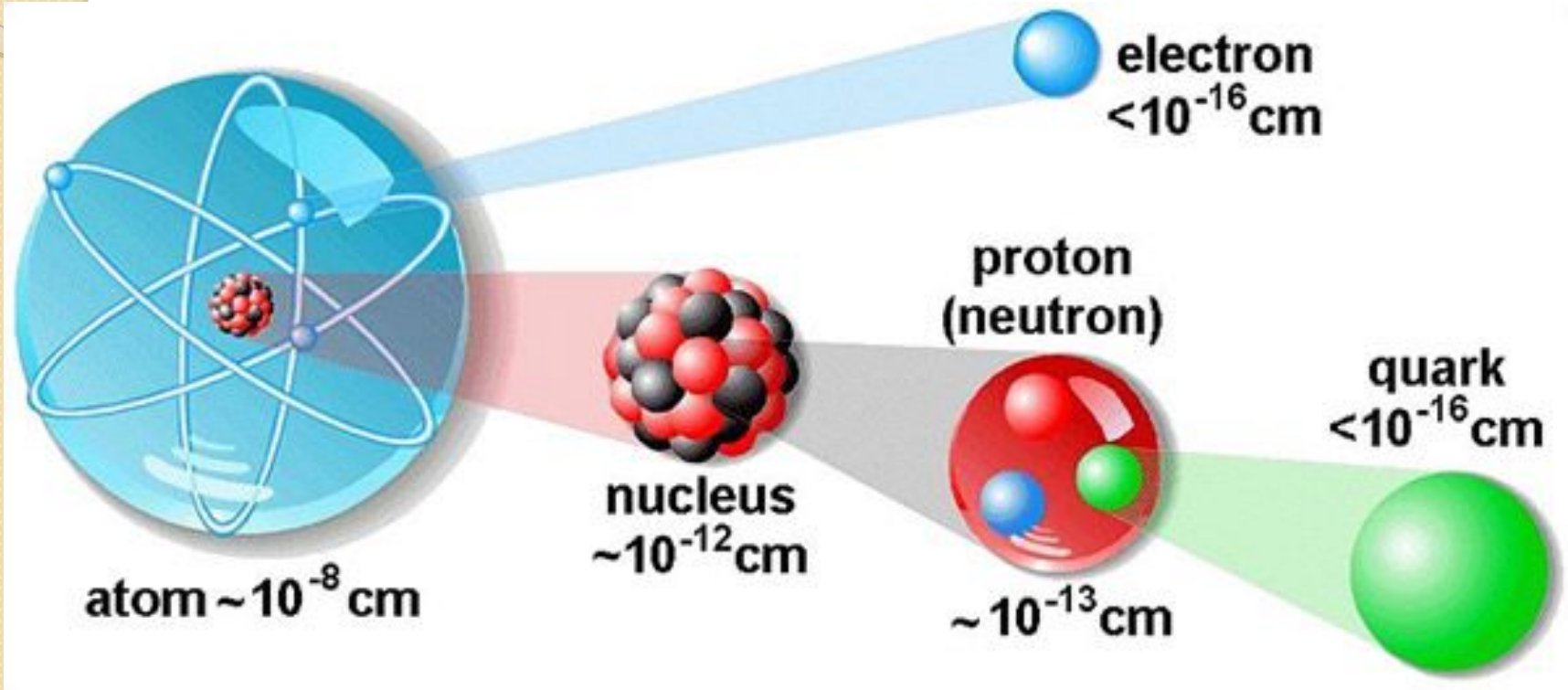
Третье поколение

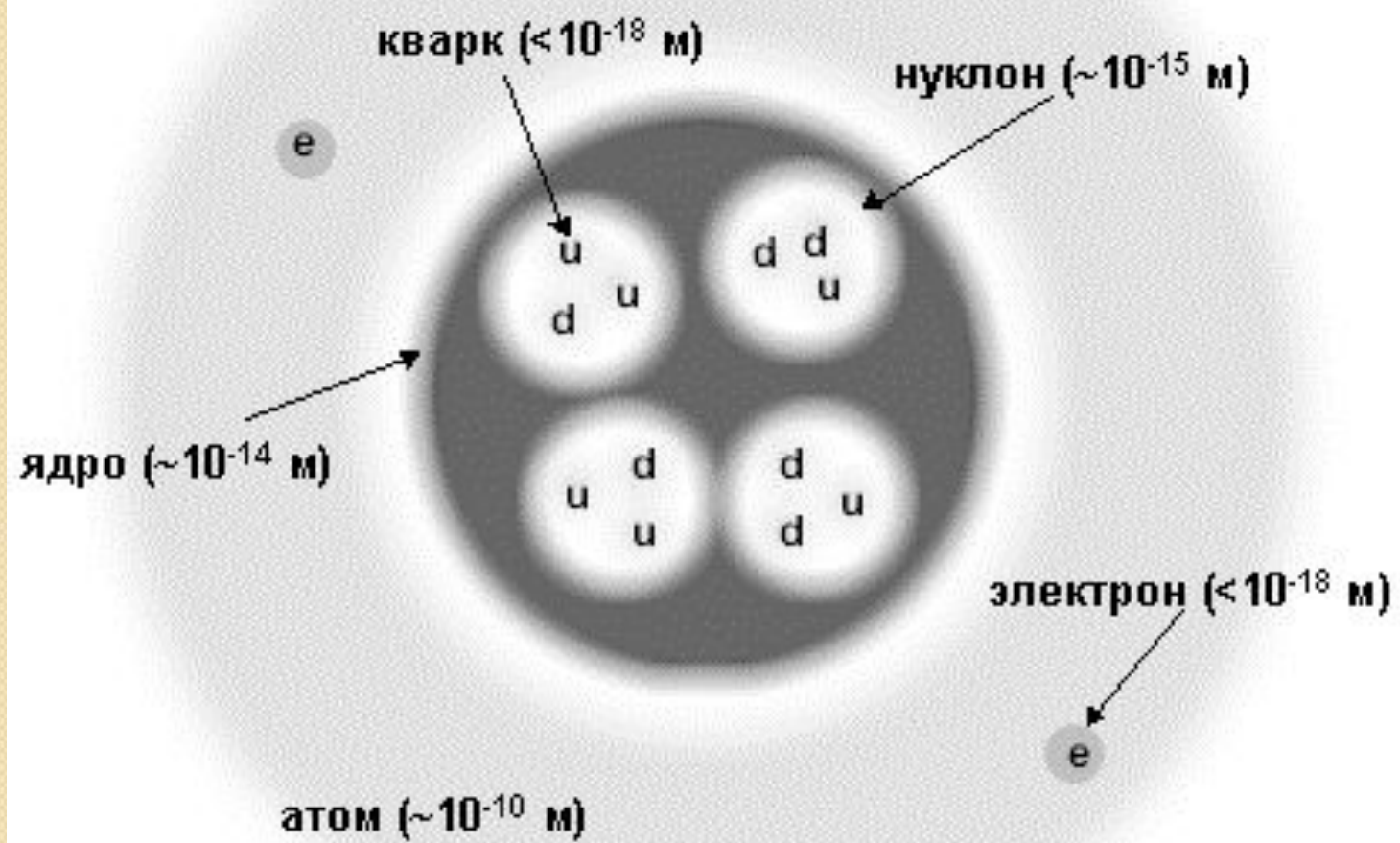
Тау-лептон Тау-нейтрино
t-кварк («истинный») b-кварк
(«прелестный»)

Строение атома

- Атом- мельчайшая **химически** неделимая электронейтральная частица вещества.
- В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны.
- Виды элементарных частиц: протоны (p), нейтроны (n), электроны (e).
- Общее число протонов и нейтронов в ядре атома называют массовым числом (A). **$A = N + P$**
- Химический элемент- вид атомов с определенным зарядом ядра.
- Изотопы- разновидности атомов одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое число протонов в ядре, но разную массу.

Кварковая модель атома



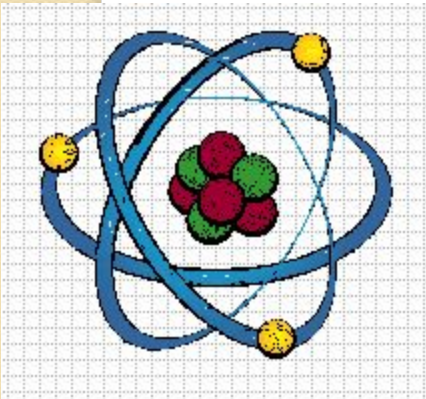


Сильное

Электромагнитное

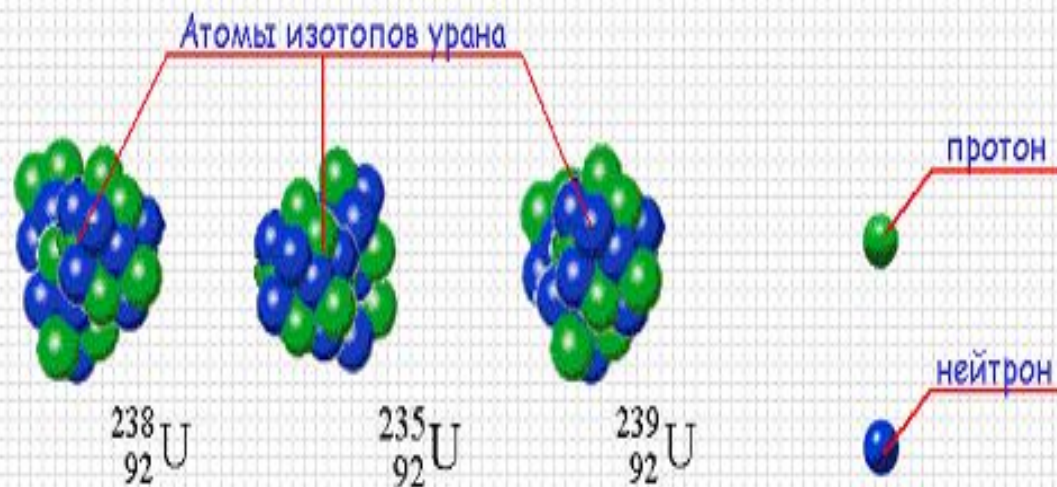
Гравитационное

Слабое



Сильное

Состав атомного ядра. Изотопы.



Обуславливает связь нуклонов в ядре. Чрезвычайно огромные ограниченного радиуса ($R=10^{-13}$ м) силы, действующие только между соседними нуклонами. Они обуславливают сильную связь нуклонов в ядре и превосходят гравитационные силы в 10^{39} раз.

Электромагнитное

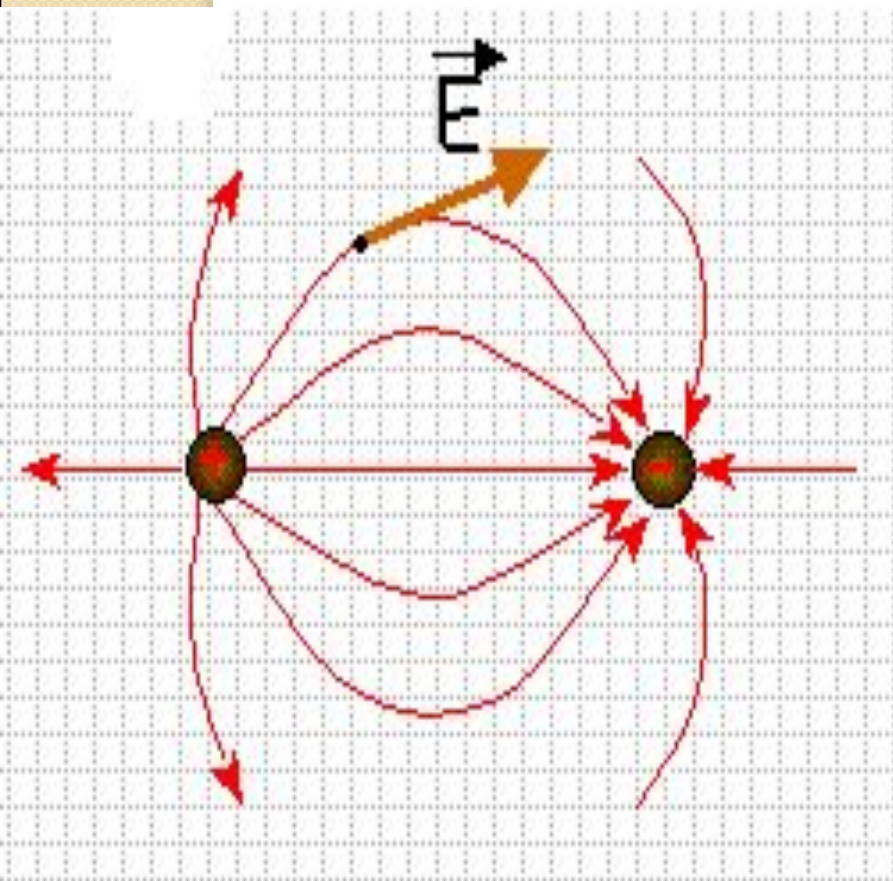
Характерно для всех элементарных частиц за исключением нейтрино, антинейтрино

Переносчики взаимодействия – фотон

Радиус действия – ∞

Интенсивность (по сравнению с сильным) – $1/137$

Характерное время – 10^{-20} с



Слабое

Ответственно за распад и взаимодействие частиц, происходящих с участием нейтрино или антинейтрино, а так же безнейтринные процессы с большим временем жизни ($\tau > 10^{-10}$ с)

Переносчики взаимодействия – промежуточные векторные бозоны

Радиус действия – $2 \cdot 10^{-16}$ см

Интенсивность (по сравнению с сильным) – 10^{-5}

Характерное время - 10^{-13} с

Гравитационное



Присуще всем телам. Переносчики взаимодействия – гравитоны.

Радиус действия – ∞ Интенсивность (по сравнению с сильным) – 10^{-39}



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Взаимодействие	Сила относительно единицы	Радиус действия	Частицы участники	Частицы переносчики
Сильное	1	10^{-13}	Кварки и нуклоны	Глюоны
Слабое	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-16}$	Лептоны и кварки	Векторные бозоны
Электромагнитное	1/137	Большой ∞	Все с электр. зарядами	Фотоны
Гравитационное	10^{-39}	Большой ∞	Все	Гравитоны

Теория великого объединения

Согласно современным представлениям, при очень высоких температурах (и, соответственно, энергиях) все четыре взаимодействия объединяются в одно. Так, при энергии 100 ГэВ объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Такая энергия соответствует температуре Вселенной через 10^{-10} с после Большого Взрыва. Это открытие, сделанное в ЦЕРНе, позволяет предположить, что при энергии порядка 10^{15} ГэВ произойдет объединение электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий, а при 10^{19} ГэВ к ним присоединится и гравитационное. Эти теории называются Теориями Великого Объединения (ТВО).