

ЧАСТЬ 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И МАТЕМАТИКА.

РОЛЬ И МЕСТО ФИЗИКИ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ

Естествознание – совокупность наук о природе, то есть о материальном мире. Разделение естествознания на различные науки соответствует различным уровням организации материи. Так астрономия изучает объекты космического уровня, геология – строение Земли, биология – жизнь, живую материю, химия – явления химического уровня и т.д.

Физика имеет дело с самым фундаментальным уровнем организации материального мира, с самыми глубинными свойствами неживой материи.

Физические исследования составляют фундамент большинства естественных наук, в том числе всех технических дисциплин: электротехники, технической термодинамики, сопротивления материалов и других. Физика вооружает эти науки основными понятиями и новыми методами.

Разные естественные науки не обособлены друг от друга. Все они вместе с математикой являются продуктами и частью общественного сознания. Большие успехи уже достигнуты и ожидаются в будущем на стыке разных естественно-научных дисциплин. Успешно развиваются такие науки, как биофизика, биохимия, астрофизика, химическая физика, физическая химия и т.д.

У каждой науки есть свой собственный предмет изучения, свой метод исследования, свой язык.

Язык естественных наук, и в особенности язык физики, по существу математический. Например, любую законченную мысль о предметах или явлениях, имеющих количественную характеристику, можно записать в виде уравнения. Чтобы овладеть математическим языком, необходимо усвоить ряд абстрактных понятий, многие из которых не имеют аналога в мире нашей повседневности. По мысли Галилея и Фейнмана сама природа как бы разговаривает с нами на языке математики. А Иммануил Кант утверждал, что во

всяком учении о природе подлинной науки заключается ровно столько, сколько в ней математики.

Основной принцип естествознания состоит в том, что любые гипотезы и теории об устройстве и поведении объектов природы должны допускать экспериментальную проверку.

В этом смысле математика отличается от естественных наук. Главный принцип построения математики – внутренняя непротиворечивость. Например, предположив, что через точку, не лежащую на некоторой прямой, проходит не более одной прямой, параллельной данной, получим евклидову геометрию. А предположив, что через эту точку проходит бесчисленное множество прямых, параллельных данной, получим геометрию Лобачевского. И при этом математика не обязана отвечать на вопрос, как устроен мир: по Евклиду или по Лобачевскому. Поэтому математика не включается в структуру естествознания.

НАУЧНЫЙ МЕТОД

Общим для всех естественных наук является **научный метод, суть которого заключается в триаде: наблюдение → размышление → опыт**.

Наблюдение включает в себя накопление эмпирического материала. В ходе размышления высказываются гипотезы и строятся научные теории, которые на стадии опыта подвергаются экспериментальной проверке.

Если результаты теоретических расчетов, выполненных на основании предложенной теории, совпадают с результатами эксперимента в пределах погрешности последнего, то можно предположить, что это теория верна.

Эйнштейн говорил, что самым непостижимым во Вселенной является то, что она все-таки постижима.

ПОНИТИЕ СОБЫТИЯ В ФИЗИКЕ

Всякий физический процесс происходит в пространстве и времени. Любой физический закон содержит явно или неявно пространственно-

временные отношения. Физика исследует количественные отношения между различными физическими величинами, принимающими то или иное значение в пространстве и времени.

В узком смысле событием можно назвать саму четверку чисел $\{x, y, z, t\}$.

ВЕЩЕСТВО И ПОЛЕ

Материя в природе существует в двух формах: в форме вещества и в форме поля. Из вещества сформированы все нерукотворные и рукотворные тела. Все тела, хоть и представляются нам сплошными, на самом деле как бы пустота. Ведь вся масса сосредоточена в ядрах атомов, а расстояния между ядрами в 10000000 раз превышают размер самих ядер. Таким образом, тела устроены из вещества, «сцементированного» полем.

Как вещество, так и поле состоят из частиц. Важнейшими внутренними свойствами частиц являются масса или ее отсутствие, электрический заряд, спин и др.

Вселенная состоит из частиц вещества, между которыми действуют силы. Силы измеряются в Ньютонах: $1 \text{ Н} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$. Взаимодействие осуществляется через поле.

ИЕРАРХИЯ ОБЪЕКТОВ В ПРИРОДЕ

Все мироздание принято разделять на три уровня, как это показано ниже в таблице.

Микромир	Элементарные частицы → ядра → атомы → молекулы →
Макромир	→ макротела от пылинок до планет →
Мегамир	→ звезды → галактики → Метагалактика (Вселенная)

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Структурные уровни вещества, из которого сформированы все тела в природе, показаны ниже в таблице. Все тела: кристаллические (твердые), жидкие и газообразные, – состоят из молекул, атомов или ионов. Молекулы состоят из атомов. Атомы – из ядер и электронов. Ядра – из нуклонов. Нуклоны – из кварков.

Структурный уровень вещества	Составные элементы
нуклон	кварки
ядро	нуклоны
атом	ядро и электроны
молекула	атомы
кристалл	молекулы, атомы, ионы

ЭНЕРГИЯ

Энергия – это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. Любой объект природы обладает энергией уже потому, что существует.

Все процессы сопровождаются превращением энергии из одного вида в другой и передачей энергии от одного тела к другому путем совершения работы. Энергия в природе проявляется в формах энергии покоя, энергии движения и энергии взаимодействия тел.

Изменение энергии E тела или системы тел равно работе $A_{\text{внш}}$ внешних сил:

$$E_2 - E_1 = A_{\text{внш}}.$$

Это уравнение выражает закон сохранения и превращения энергии – один самых основных законов природы. Энергия и работа измеряются в Джоулях: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Масса тела эквивалентна энергии в соответствии с формулой Эйнштейна:

$$E_0 = mc^2,$$

где m – так называемая масса покоя, c – скорость света в вакууме. Эта энергия E_0 называется энергией покоя.

Кинетической энергией $E_{\text{кин}}$ называется энергия движения. Кинетической энергией тело обладает вследствие своего движения относительно других тел.

Безмассовые частицы, например фотон, также обладают энергией, при этом по существу только кинетической, и всегда движутся со скоростью света. Эти частицы являются частицами поля и обладают частотой ν . Энергия таких частиц вычисляется по формуле Планка

$$E = h \cdot \nu,$$

где h – постоянная Планка.

Энергия взаимодействия различных тел называется потенциальной энергией $E_{\text{пот}}$. Формула для вычисления потенциальной энергии определяется видом соответствующего взаимодействия.

Кинетическая энергия и энергия покоя принадлежат самой частице (телу), в то время как потенциальная энергия принадлежит всем взаимодействующим телам.

АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Существование вещества в трех агрегатных состояниях (фазах): кристаллическом (твердом), жидком и газообразном, – обусловлено соотношением между интенсивностью хаотического теплового движения, выраженного в средней кинетической энергии молекул $E_{\text{кин}}$, и степенью упорядоченности, выраженной в потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ взаимодействия между молекулами.

Если средняя кинетическая энергия молекул много меньше потенциальной энергии взаимодействия между ними ($E_{\text{кин}} \ll E_{\text{пот}}$), то вещество находится в кристаллическом состоянии. В расположении молекул или других

структурных элементов кристалла (атомов или ионов) наблюдается так называемый дальний порядок.

Если средняя кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии взаимодействия между ними ($E_{\text{кин}} \gg E_{\text{пот}}$), то вещество находится в газообразном состоянии. Молекулы находятся в непрерывном хаотическом (тепловом) движении – полный беспорядок.

Если средняя кинетическая энергия молекул примерно равна потенциальной энергии взаимодействия между ними ($E_{\text{кин}} \approx E_{\text{пот}}$), то вещество находится в жидком состоянии. В расположении молекул наблюдается так называемый ближний порядок.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ

Во всей Вселенной между любыми телами действует гравитация – взаимное притяжение – в соответствии с законом Всемирного тяготения, в котором коэффициентом пропорциональности является гравитационная постоянная $\gamma = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$, являющаяся одной из фундаментальных мировых физических постоянных (констант).

Другой фундаментальной мировой физической постоянной является скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Эта скорость является предельной скоростью движения материальных объектов, в том числе максимальной скоростью распространения взаимодействий и передачи информации. **Частицы, обладающие массой покоя, всегда движутся со скоростями, меньшими скорости света в вакууме.**

При движении макро- и микротел со скоростями, много меньшими c , действуют законы классической (Ньютоновской) механики. Именно эти тела и являются объектами изучения в классической механике. При этом кинетическая энергия этих тел много меньше их энергии покоя:

$$E_{\text{кин}} \ll mc^2.$$

При движении макро- и микротел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, действуют законы релятивистской механики (Эйнштейновской специальной теории относительности). При этом

$$E_{\text{кин}} \geq mc^2.$$

Во всех формулах, описывающих явления микромира, присутствует еще одна фундаментальная мировая физическая постоянная – постоянная Планка $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, называемая также квантом действия.

При выполнении условия $\frac{h}{p} \approx R$, где R – размер тела (частицы) а p – его импульс, вступают в силу законы квантовой механики.

Объектами изучения в квантовой физике являются структурные элементы микромира и частицы полей.

Итак, основными физическими теориями являются классическая и квантовая механика, каждая из которых в свою очередь могут быть нерелятивистской и релятивистской.

ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ

Появление новых экспериментальных данных, не укладывающихся в рамки теории, имеющейся для описания этого круга явлений, требует создания новой теории, способной объяснить эти данные. При этом «старая» теория не всегда отвергается как ложная.

В физике существует преемственность согласно принципу соответствия, сформулированному Нильсом Бором: **любая новая теория, претендующая на более глубокое описание физической реальности и на более широкую область применимости, чем старая, должна включать в себя эту старую теорию как предельный случай.**

Так релятивистская механика переходит в классическую при условии $c \rightarrow \infty$, а квантовая механика переходит в классическую при условии $h \rightarrow 0$.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

Есть весьма веские основания предполагать, что Вселенная появилась в результате Большого взрыва (Big bang) и продолжает находиться в состоянии расширения. При этом в самом начале Вселенная с конечной массой и бесконечно большой плотностью была сосредоточена в бесконечно малом объеме пространства.

Если время существования Вселенной принять за один год, то время жизни человечества придется на последние 90 минут.

Пространство и время, которые заполнены материей, представляются гладкими и непрерывными. Однако встает вопрос, до каких пор можно уменьшать длину отрезка и промежуток времени.

Из фундаментальных констант c, h, γ можно сформировать так называемую планковскую длину $L_P = \sqrt{\frac{\gamma \cdot h}{c^3}} = 10^{-35}$ м. Этот отрезок можно пройти со скоростью c за промежуток времени $\Delta t_P = 10^{-43}$ с, также называемый планковским. При расстояниях и промежутках времени, меньших соответствующих планковских, перестает быть применимым понятие непрерывного пространства – времени. Пространство и время становятся «поврежденными зернистостью».

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ И ВРЕМЕННОЙ ДИАПАЗОНЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Различают три уровня мироздания: микромир, макромир и мегамир.

К микромиру относят следующие объекты: элементарные частицы → ядра → атомы → молекулы.

К мегамиру – звезды → галактики → Метагалактика (Вселенная).

К макромиру относят все остальные объекты от мельчайших пылинок до планет.

Пространственные диапазоны для этих миров указаны ниже в таблице.

микромир	от 10^{-18} до 10^{-7} м
макромир	от 10^{-6} до 10^7 м
мегамир	от 10^8 до 10^{26} м

Характерные размеры объектов микромира таковы:

от 10^{-15} до 10^{-14} – размер ядер;

от 10^{-8} до 10^{-7} – размер атомов;

от 10^{-7} до 10^{-6} – размер молекул.

Временной диапазон составляет от 10^{-26} до 10^{18} с. Промежуток времени 10^{18} с, равный 15 миллиардам лет, является временем существования Вселенной, размер которой составляет 10^{26} м.

ПРИНЦИП МИНИМУМА (ЭКОНОМИИ) ЭНЕРГИИ.

СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ

Любая частица во внешнем поле или система взаимодействующих частиц во внешнем и во внутреннем полях, будучи предоставлена самой себе, займет положение, соответствующее минимально возможному значению энергии, то есть расположится на дне «потенциальной ямы» – в этом и заключается принцип минимума энергии.

Взаимодействующие притягивающиеся частицы, объединившиеся в некоторое составное тело, окажутся в энергетически выгодном связанном состоянии. Чтобы отделить эти частицы друг от друга, то есть разрушить это составное тело, нужно затратить энергию, равную так называемой энергии связи.

Примерами связанных состояний являются нуклон, ядро, атом, молекула, кристалл, любое твердое тело, планетная система, звездное скопление, галактика, Вселенная.

Для каждого структурного уровня существует свой порог энергии. При энергиях, ниже этого порога, все объекты данного уровня неделимы, и их можно считать бесструктурными. При воздействии на эти объекты энергией,

сравнимой с пороговой или превышающей ее, они обнаруживают внутреннюю структуру и могут быть разделены на составляющие их элементы.

Как видно из приведенной ниже таблицы, по мере углубления в микромир пороговая энергия возрастает, и мы встречаем все более стабильные объекты. Так разрушить атом гораздо легче, чем ядро атома.

Объект	Пороговая энергия, эВ
атом	1 – 10
ядро	$10^6 - 10^7$
нуклон	$10^8 - 10^9$

$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – так называемый элементарный электрический заряд.

СОСТАВ ЯДРА. НУКЛОНЫ. ИЗОТОПЫ

Ядра атомов (их еще называют нуклидами) **состоят из протонов и нейтронов, называемых нуклонами.**

Протон – элементарная частица, обладающая положительным элементарным электрическим зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Электрические заряды протона и электрона равны по модулю и противоположны по знаку. Масса покоя протона $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, что в 1837 раз больше массы электрона.

Нейтрон – элементарная частица, не обладающая электрическим зарядом (электрически нейтральная). Масса покоя нейтрона $m_n = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, что немногим больше массы протона.

Нуклид (ядро) обозначается следующим образом, ${}_Z X^A$, где X – символ соответствующего химического элемента, Z – число протонов в ядре, равное его электрическому заряду, N – число нейтронов в ядре, $A = Z + N$ – суммарное число нуклонов в ядре, называемое массовым числом.

Из легких нуклидов желательно знать следующие:

${}_1H^1$ – протон, нуклид водорода;

${}_1H^2$ – дейтрон, нуклид тяжелого водорода – дейтерия;

${}_1H^3$ – тритон, нуклид сверхтяжелого водорода – трития;

${}_2He^3$ – нуклид гелия-3;

${}_2He^4$ – α -частица, нуклид гелия-4.

Ядра одного и того же химического элемента с разным числом нейтронов называются изотопами.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ И ДЕФЕКТ МАССЫ ЯДРА

Ядро атома – очень стабильная система. Здесь имеет место связь массы и энергии в соответствии с формулой А. Эйнштейна $E = mc^2$, и масса каждого нуклона в ядре меньше массы этого же нуклона в свободном состоянии (вне ядра). Поэтому чтобы разрушить ядро, нужно затратить энергию, равную энергии связи ядра, компенсирующую эту разницу в массе. **Разность суммарной массы всех нуклонов в ядре и массы этого ядра называется дефектом массы:**

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{ядра}}.$$

При этом энергия связи ядра вычисляется по формуле Эйнштейна:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2.$$

Относительная стабильность ядра каждого химического элемента определяется энергией связи, приходящейся на один нуклон, – $E_{\text{св}}/A$. Внутри ядра происходит «борьба» между ядерными силами, притягивающими нуклоны друг к другу, и силами электрического отталкивания между положительно заряженными протонами. Поэтому энергия связи, приходящаяся на один нуклон, довольно сложным образом зависит от массового числа A .

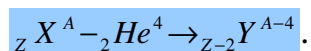
Наиболее стабильны ядра химических элементов с массовыми числами от 50 до 60. Поэтому тяжелые ядра испытывают тенденцию (стремление) к делению, а очень легкие ядра испытывают тенденцию к объединению (синтезу) в более стабильные ядра. Энергия, которая выделяется при делении тяже-

лых ядер и при синтезе легких ядер, равна разности между суммарной энергией связи продуктов соответствующей реакции и энергией связи исходного ядра. Причем выделяющаяся энергия в расчете на один нуклон в случае синтеза легких ядер почти на порядок больше, чем в случае деления тяжелых.

Одним из наиболее стабильных ядер является ядро гелия-4, называемое α -частицей. Именно α -частица способна вылететь из нестабильного ядра.

α – РАДИОАКТИВНОСТЬ

α -частица состоит из двух протонов и двух нейтронов. **α – радиоактивностью называется процесс самопроизвольного «вылета» α -частицы из тяжелого недостаточно стабильного ядра.** При этом заряд ядра уменьшается на две единицы, а массовое число уменьшается на четыре единицы, и данное ядро X превращается в ядро Y другого элемента. Соответствующая ядерная реакция записывается следующим образом:



β – РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЭЛЕКТРОНЫ. ПОЗИТРОНЫ. НЕЙТРИНО

Имеются два вида β – частиц: β^- и β^+ . β^- – частица – это электрон (${}_{-1}e^0$), элементарная частица с массой покоя $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, обладающая отрицательным электрическим зарядом, по модулю равным элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. β^+ – частица – это античастица электрона, называемая позитроном (${}_{+1}e^0$). Позитрон обладает той же массой покоя, что и электрон, и противоположным по знаку, т.е. положительным, электрическим зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Массовые числа электрона и позитрона равны нулю.

Электронов и позитронов в ядре нет и быть не может. Поэтому **β – радиоактивность является не внутриядерным, а внутринуклонным процессом.** «Вылет» из ядра β – частиц вызван превращениями внутри ядра атома нейтрона в протон или протона в нейтрон. Имеются три вида β – радиоактивности: β^- – распад, β^+ – распад и K – захват.

В основе β^- – распада лежит превращение нейтрона в протон:

$${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0 + \tilde{\nu}_e.$$

При этом ядро химического элемента X превращается в ядро элемента Y в соответствии с реакцией

$${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{-1}e^0.$$

В основе β^+ – распада лежит превращение протона в нейтрон:

$${}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_1e^0 + \nu_e.$$

K – захват состоит в поглощении протоном ядра электрона из K – оболочки атома и превращении этого протона в нейтрон:

$${}_1p^1 + {}_{-1}e^0 \rightarrow {}_0n^1 + \nu_e.$$

В двух последних случаях превращение ядра происходит по схеме

$${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^A.$$

Превращения нейтрона в протон и протона в нейтрон сопровождаются появлением частиц, называемых нейтрино. **Нейтрино** – это элементарная частица с почти нулевой массой и не имеющая электрического заряда (электрически нейтральная частица), и поэтому обладающая огромной проникающей способностью. Нейтрино наряду с фотонами являются самыми распространенными частицами во Вселенной. Их в миллиарды раз больше, чем протонов, нейтронов и электронов вместе взятых.

ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ. АННИГИЛЯЦИЯ

Все элементарные частицы обладают целым набором внутренних свойств, определяющим само существование этой частицы и ее индивидуальность. Масса покоя, время жизни, электрический заряд относятся к этим свойствам. Некоторые внутренние свойства также называются различными зарядами. Отсутствие какого-нибудь из этих свойств выражается в равенстве нулю соответствующего заряда.

Каждая частица обладает особым внутренним свойством, называемым спином, в том числе и равным нулю. Благодаря спину частица «ведет себя» подобно вращающемуся волчку, то есть обладает собственным моментом импульса. Спин проявляется как вектор, и внутреннее квантовое состояние реализуется определенным положением этого вектора в пространстве (проекцией).

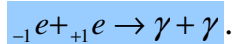
Практически у каждой элементарной частицы есть своя античастица, которая имеет те же массу покоя, время жизни и спин, но отличается знаками электрического и всех других зарядов. Спин античастицы имеет противоположную ориентацию в пространстве. Для обозначения символа античастицы над символом соответствующей частицы ставится значок «~» (тильда). Одна из античастиц, античастица электрона, имеет собственное название – позитрон. Название остальных античастиц образуется из названий соответствующих частиц с добавлением приставки «анти».

$\tilde{e}_{+1}e^0$ – антиэлектрон (позитрон);

$\tilde{p}_{-1}p^1$ – антипротон;

$\tilde{n}$ – антинейтрон и т.д.

Важнейшим свойством родственных частиц и античастиц является их способность к аннигиляции, то есть к взаимному уничтожению при встрече. При этом вместо «исчезнувших» частиц появляются совсем другие частицы – частицы поля. Так например, аннигиляция электрона и позитрона сопровождается «рождением» двух фотонов (γ):



Здесь масса превратилась в энергию, а вещество превратилось в поле.

В принципе из антипротонов, антинейтронов и антиэлектронов можно построить антиатом и антивещество. Но из-за аннигиляции совместное существование вещества и антивещества невозможно. Наша Вселенная состоит из вещества. Число же античастиц очень мало.

ФЕРМИОНЫ И БОЗОНЫ. ПРИНЦИП ЗАПРЕТА

Собственный момент импульса элементарных частиц – спин – принято измерять в единицах $\hbar$ (h перечеркнутое), где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h – постоянная Планка. Здесь следует напомнить, что постоянная Планка имеет размерность момента импульса.

В единицах $\hbar$ спин всех элементарных частиц принимает значения или целые: 0, 1, 2, ... или полуцелые: $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$

Частицы с целыми спинами называются бозонами. Все бозоны являются «коллективистами»: в каждом квантовом состоянии может находиться любое число бозонов. Все бозоны являются частицами – квантами – какого-нибудь поля. Из всех бозонов самыми распространенными во Вселенной являются фотоны.

Частицы с полуцелыми спинами называются фермионами. Все фермионы являются «индивидуалистами». Фермионы подчиняются принципу запрета (принципу Паули): **в каждом квантовом состоянии может находиться только один фермион.** Все фермионы являются частицами вещества.

Именно благодаря совместному действию двух принципов: принципа минимума энергии и принципа запрета, – в нашем мире существует многообразие веществ. Ядра и атомы различных химических элементов устроены по-разному. В то же время все электрические поля, например, устроены одинаково, ведь поля состоят из бозонов.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФЕРМИОНЫ

В настоящее время считается, что все вещество во Вселенной построено из фундаментальных фермионов. **Фундаментальными фермионами называют лептоны и кварки.** Все известные лептоны и кварки и их свойства даны ниже в таблице.

Семейства		Поколения			q , в ед. e	B	L
		1 – ое	2 – ое	3 – ье			
Лептоны	нейтральные	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	0	1
	заряженные	e	μ	τ	-1	0	1
Кварки	верхние	u	c	t	+2/3	1/3	0
	нижние	d	s	b	-1/3	1/3	0

Каждый фундаментальный фермион имеет спин, равный $(1/2) \hbar$. При этом возможны два внутренних квантовых состояния с проекциями вектора-спина: $+1/2$ и $-1/2$.

Все вещество во Вселенной в основном построено из фундаментальных фермионов первого поколения. Частицы второго и третьего поколений являются нестабильными и распадаются с образованием частиц первого поколения.

Все заряженные лептоны: электрон (e), мюон (μ) и таон (τ) обладают одинаковым отрицательным электрическим зарядом $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса мюона примерно в 200 раз, а масса таона примерно в 3500 раз больше массы электрона. Все лептоны могут находиться в свободном состоянии.

Все лептоны обладают особым внутренним свойством, делающим их собственно лептонами. Это свойство называется лептонным зарядом, который обозначается буквой L . У частиц, не являющихся лептонами, лептонный заряд равен нулю. Все кварки также обладают своим особым внутренним свойством, делающим их собственно кварками. Это свойство называется барионным зарядом, который обозначается буквой B . Барионный заряд любого кварка равен $1/3$. У всех лептонов барионный заряд равен нулю.

Электрон, мюон и таон всегда появляются в паре только со своим родственником нейтрино. Такое поведение объясняется наличием трех разных лептонных зарядов: лептонного электронного, лептонного мюонного и лептонного таонного, как это показано ниже в таблице.

Пары лептонов	Лептонные заряды		
	L_e	L_μ	L_τ
(e, ν_e)	1	0	0
(μ, ν_μ)	0	1	0
(τ, ν_τ)	0	0	1

Каждый кварк имеет собственное название: u – верхний, d – нижний, s – очарованный, t – истинный, b – красивый. Все названия происходят от соответствующих английских слов. Оказывается, что у всех кварков есть еще четыре внутренних квантовых состояния: очарование, странность, истинность и красота. У очарованного кварка очарование равно 1, а у остальных кварков очарование равно нулю, т.к. они не являются очарованными. У странного кварка странность равна -1 (так принято), а у остальных кварков странность равна нулю, т.к. они не являются странными. И так далее.

Напомним, что отсутствие некоторого свойства у элементарной частицы выражается равенством нулю соответствующего зарядового числа.

Все фундаментальные фермионы имеют соответствующие античастицы, у которых спин и все заряды: электрический, три лептонных и барионный, странность, – имеют противоположные знаки. Таким образом, всего имеется 12 лептонов и 12 кварков.

Кварки в свободном состоянии не существуют. Они являются строительным материалом для так называемых адронов – частиц, участвующих в сильном взаимодействии. Представители семейства адронов и их свойства показаны ниже в таблице.

Мезоны не являются барионами, и поэтому их барионный заряд равен нулю. Каждый мезон состоит из пары кварк – антикварк. Напомним, что у любого кварка барионный заряд равен $1/3$, а у любого антикварка барионный заряд равен $-1/3$, что в сумме дает нулевой барионный заряд. Спин у мезонов целый, и мезоны являются бозонами.

Свойства	Адроны									
	Мезоны					Барионы				
						Нуклоны		Гипероны		
	π	K	η	φ	p	n	Λ	Σ	Ξ	Ω
Спин, в ед. $\hbar$	0	0	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	3/2
B	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Каждый барион состоит из трех кварков. Так например, кварковый состав протона – $\{uud\}$, а кварковый состав нейтрона – $\{udd\}$.

ИЗОТОПИЧЕСКИЕ МУЛЬТИПЛЕТЫ

Этот материал дополнительный и предназначен для подготовки к лабораторной работе по элементарным частицам.

Частицы, имеющие примерно одинаковые массы, одинаковый барионный заряд, спин, странность и отличающиеся только электрическим зарядом, образуют так называемый мультиплет. Все частицы мультиплета обладают еще одним одинаковым внутренним свойством, получившим название «изотопический спин», T . Термин изотопический происходит от изотопов. А термин спин использован потому, что изотопический спин тоже проявляет себя как вектор. Каждая частица мультиплета является реализацией одного из внутренних квантовых состояний одной и той же частицы с данным значением изотопического спина. Эти внутренние квантовые состояния отличаются значениями проекций T_z вектора изотопического спина. Следовательно, число таких квантовых состояний равно числу N частиц в мультиплете.

Невероятно интересной особенностью квантового поведения микроробъектов является то обстоятельство, что проекции спина и изотопического спина частицы соответственно могут отличаться друг от друга только на $1\hbar$. Таким образом, для расчета N имеем формулу $N = 2T + 1$, откуда следует, что изотопический спин

$$T = \frac{N-1}{2}.$$

Если у элементарной частицы нет «напарников», например у странного кварка, то она составляет так называемый синглет – мультиплет из одной частицы. $N = 1$, следовательно, согласно формуле $T = 0$, $T_z = 0$ – одна проекция изотопического спина и соответственно одна частица.

Верхний u и нижний d кварки составляют дублет. У этих кварков примерно одинаковые массы, одинаковый барионный заряд, спин, странность (равная нулю у обоих) и отличаются они только электрическим зарядом. Их изотопический спин согласно формуле равен $1/2$, а проекции изотопического спина равны $+1/2$ и $-1/2$. Таким образом, верхний и нижний кварки являются разными квантовыми состояниями одной и той же частицы с изотопическим спином $1/2$.

Существуют также три π -мезона, образующие триплет $\{\pi^+, \pi^0, \pi^-\}$. Каждая из частиц триплета является реализацией того или иного квантового состояния π -мезона, изотопический спин которого равен 1 , а проекции соответственно равны $+1$ для π^+ , 0 – для π^0 и -1 – для π^- .

Далее идет обязательный материал.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

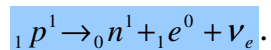
Все реакции превращения и взаимодействия частиц происходят при обязательном выполнении основных законов сохранения:

- закона сохранения энергии;
- закона сохранения импульса;
- закона сохранения момента импульса;
- закона сохранения электрического заряда;
- закона сохранения трех лептонных и барионного зарядов,
- закона сохранения странности.

В истории науки не известно ни одного факта нарушения этих законов сохранения. Они считаются универсальными и важнейшими законами природы.

Все перечисленные законы сохранения позволяют анализировать процессы, механизм которых еще не раскрыт, и предсказывать существование еще не известных объектов и их свойства.

Рассмотрим, как выполняются законы сохранения, на примере реакции распада протона (β^+ – распада):



Именно научный анализ реакции β^+ – распада привел к открытию позитрона и нейтрино.

Выполнение закона сохранения энергии с учетом эквивалентности энергии и массы ($E = mc^2$) обеспечено равенством массовых чисел до и после распада: $1 = 1$.

Электрический заряд до и после распада равен +1. Барионный заряд до и после распада равен +1. Электронный лептонный заряд до и после распада равен 0 (у протона и нейтрона электронный лептонный заряд равен 0, у позитрона –1, а у электронного нейтрино +1). Мюонный и таонный лептонные заряды до и после распада равны 0. Странность до и после распада равна 0.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Все происходящее в природе можно свести к четырем фундаментальным взаимодействиям:

- 1) сильному – S ;**
- 2) электромагнитному – E ;**
- 3) слабому – W ;**
- 4) гравитационному – G .**

Ниже в таблице представлены эти взаимодействия и их характеристики.

Вид взаимодействия	Участники взаимодействия	Относительная интенсивность взаимодействия	Радиус действия, м
S	Кварки и адроны	1	10^{-15}
E	Все частицы, обладающие электрическим зарядом	10^{-2}	∞
W	Кварки, лептоны и все составные частицы	10^{-6}	10^{-18}
G	Все частицы	10^{-39}	∞

Кварки способны принимать участие во всех четырех взаимодействиях. Поэтому в таблице даны значения относительных интенсивностей различных взаимодействий, участниками которых являются именно кварки. Наиболее интенсивно сильное взаимодействие кварков. Относительная интенсивность сильного взаимодействия кварков принята за единицу. Интенсивность других взаимодействий дана в сравнении с интенсивностью сильного взаимодействия.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО РОЛЬ В ПРИРОДЕ

Гравитационное взаимодействие является самым слабым и в то же время самым универсальным. Оно обеспечивает взаимное притяжение всех тел во Вселенной, имеющих массу. Это взаимное притяжение осуществляется в соответствии с законом всемирного тяготения, справедливым для точечных масс:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Гравитационные силы являются дальнодействующими, и гравитационное взаимодействие распространяется на бесконечность. Гравитация удерживает все тела на Земле, собирает вещество в планеты и звезды, удерживает планеты на орбитах и «связывает» звезды в скопления и галактики. Таким образом, в астрономических масштабах гравитация играет определяющую роль.

В микромире гравитацией можно пренебречь по сравнению с другими более интенсивными взаимодействиями. Например, атом водорода, удерживаемый как единое целое одной гравитационной силой, имел бы размеры порядка размеров всей Вселенной.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО РОЛЬ В ПРИРОДЕ

Электромагнитное взаимодействие примерно в 100 раз слабее сильного взаимодействия. В электромагнитном взаимодействии участвуют только электрически заряженные частицы и тела. Тела, имеющие одинаковые по знаку электрические заряды отталкиваются, а имеющие заряды разных знаков притягиваются. Это отталкивание и притяжение осуществляется в соответствии с законом Кулона, справедливым для точечных заряженных тел:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2},$$

где q_1 и q_2 – величины электрических зарядов. Кулоновские силы являются дальнодействующими, и электромагнитное взаимодействие распространяется на бесконечность.

Электромагнитное взаимодействие обеспечивает существование атома посредством кулоновского притяжения электрически положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов.

Электромагнитное взаимодействие лежит в основе межмолекулярных сил, обеспечивающих существование молекул и поведение кристаллов, жидкостей и газообразных тел. А также лежит в основе сил упругости и трения, химических реакций, всех наблюдаемых электрических, магнитных и оптических явлений. Напомним, что свет – это электромагнитная волна.

СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО РОЛЬ В ПРИРОДЕ

Слабое взаимодействие присуще всем фундаментальным фермионам и его предназначением является изменение природы частиц, то есть превраще-

ние одного кварка или лептона в другой кварк или лептон. В микромире слабое взаимодействие играет решающую роль.

В результате слабого взаимодействия происходит распад – превращение нейтрона

$${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0 + \tilde{\nu}_e,$$

мюона

$${}_{-1}\mu \rightarrow {}_{-1}e + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Слабое взаимодействие проявляется не только в микромире. Его влияние распространяется и на мегамир. Без слабого взаимодействия погасло бы Солнце и другие звезды, поскольку «топливом» для термоядерных реакций, обеспечивающих «горение» звезд, служит гелий-4, полученный из четырех протонов, два из которых превратились в нейтроны:

$${}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_1e^0 + \nu_e.$$

А ведь эта реакция осуществляется благодаря слабому взаимодействию.

Нейтрино участвуют только в слабом взаимодействии.

СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ЕГО РОЛЬ В ПРИРОДЕ

Сильное взаимодействие существует только в микромире на около-ядерном уровне. Благодаря сильному взаимодействию существуют нуклоны и ядра атомов. Собственно сильное взаимодействие объединяет кварки и антикварки в нуклоны и другие адроны. Действие же ядерных сил, связывающих нуклоны в ядре, обеспечено остаточным сильным взаимодействием.

Сильные и ядерные силы являются короткодействующими, причем удивительной особенностью этих сил является то, что они не убывают с увеличением расстояния между частицами.

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. СИЛОВОЕ ПОЛЕ

Взаимодействие различных тел в природе, в том числе и взаимодействие элементарных частиц, осуществляется посредством физического силового поля – одной из форм распространенной в пространстве материи.

Две частицы вещества (два физических тела) не могут вступить во взаимодействие, то есть испытать действие силы притяжения или отталкивания, до тех пор, пока не «узнают» с помощью соответствующего переносчика о существовании друг друга. Эти частицы-переносчики являются элементарными частицами (квантами) соответствующих полей. Все они являются бозонами и называются фундаментальными векторными бозонами.

В таблице ниже представлены частицы-переносчики четырех фундаментальных взаимодействий и свойства этих частиц.

Взаимодействие	Частицы-переносчики	Спин	Электрический заряд, в ед. e	Масса, в m_p
S	Глюоны (g)	1	0	0
E	Фотоны (γ)	1	0	0
W	W^+	1	+1	85,7
	W^-	1	-1	85,7
	Z^0	1	0	97,2
G	Гравитоны	2	0	0

Переносчики сильного взаимодействия называются глюонами. Это безмассовые электрически нейтральные частицы. Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются фотоны, также безмассовые электрически нейтральные частицы. Переносчиками слабого взаимодействия являются W^+ , W^- , Z^0 – бозоны. Это очень массивные частицы (их масса почти в 100 раз превышает массу протона) и две из них имеют электрический заряд. Переносчики гравитационного взаимодействия получили название гравитоны. Хотя в настоящее время гравитоны экспериментально не обнаружены, их свойства известны. Они должны быть безмассовыми электрически нейтральными частицами со спином, равным 2.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

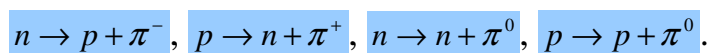
Частицы-переносчики взаимодействий называются виртуальными. Квантовый механизм взаимодействия состоит в том, что одна из взаимодействующих частиц вещества испускает виртуальный бозон, который почти сразу же поглощается другой взаимодействующей частицей. Таким образом, две взаимодействующие частицы обмениваются виртуальными бозонами. Время жизни виртуальных бозонов крайне мало. В отличие от реальных частиц их нельзя непосредственно зарегистрировать. Однако, сообщив им достаточную энергию, можно превратить виртуальные частицы из «призраков» в реальные частицы. Так реальные фотоны проявляются в виде электромагнитных волн – света.

В процессе испускания и поглощения виртуальных частиц обязательно происходит «кажущееся» нарушение закона сохранения энергии. Однако, это нарушение вполне согласуется с законами квантовой физики, как это будет показано в дальнейшем (см. соотношение неопределенностей Гейзенберга).

Если масса виртуальных бозонов велика, то переносимые ими силы являются короткодействующими. Это имеет место в случае слабого взаимодействия. При нулевой массе виртуальные бозоны переносят далекодействующие силы, поскольку движутся со скоростью света, что имеет место в случаях электромагнитного и гравитационного взаимодействий.

Исключением в этом смысле является сильное взаимодействие. Хотя глюоны являются безмассовыми частицами, сильные и ядерные силы короткодействующие. Кварки и глюоны не могут существовать в свободном виде, а представляют собой так называемую кварк-глюонную плазму.

Квантами поля ядерных сил являются π -мезоны. Обмениваясь виртуальными π -мезонами, нуклоны удерживаются в ядре. При этом нейтрон может превратиться в протон, а протон – в нейтрон. Эти реакции происходят по следующим схемам:



Напомним, что π -мезоны являются одновременно и адронами и бозонами.

ВОПРОСЫ К ТЕСТУ № 1

1. Что такое естествознание? Назовите естественнонаучные дисциплины.
2. Что такое научный метод? Какова роль опыта в познании окружающего мира?
3. В чем заключается суть научного метода познания?
4. Какова роль эксперимента для естественнонаучных дисциплин?
5. Понятие события в физике.
6. Почему математика не относится к естественнонаучным дисциплинам? Какова роль математики в познании окружающего мира?
7. Что такое фундаментальные постоянные c и h и какова их роль? Какова максимальная скорость передачи информации в нашем мире?
8. Что такое минимальный квант действия? Какова его размерность?
9. Напишите формулу, определяющую энергию покоя.
10. Формула Планка для энергии фотонов.
11. По какому принципу физику делят на релятивистскую и нерелятивистскую (ньютоновскую)?
12. Объекты изучения в классической и квантовой физике.
13. Преемственность в науке и принцип соответствия Нильса Бора.
14. Сформулируйте принцип соответствия Нильса Бора.
15. Пространственный диапазон в нашей Вселенной. Микро-, макро- и мегамиры.
16. Какие объекты в нашей Вселенной принято относить к микро-, макро- и мегамирам?
17. Временной диапазон в нашей Вселенной. Что такое Big Bang?
18. Каковы минимальные и максимальные пространственные и временные интервалы в природе?
19. Строение атома.
20. Как молекулярно-кинетическая теория объясняет различие между твердым кристаллическим, жидким и газообразным состояниями вещества?

21. Состав атомного ядра.
22. Что означают символы A и Z в записи ${}_Z X^A$?
23. Что такое нуклоны? Чем протон отличается от нейтрона?
24. Как называются элементы ${}_1 X^2$, ${}_1 X^3$, ${}_2 X^4$ и ${}_2 X^3$?
25. Сколько протонов и нейтронов в следующих изотопах: ${}_{92}U^{235}$, ${}_{92}U^{238}$, ${}_6C^{12}$, ${}_6C^{14}$, ${}_2He^4$, ${}_2He^3$ и ${}_8O^{16}$?
26. Что такое дефект массы и энергия связи ядра?
27. Что такое α – распад?
28. Виды β – распада. Расскажите о β^- – распаде и β^+ – распаде.
29. Что такое нейтрино? Какие виды нейтрино Вам известны?
30. Какими свойствами обладают нейтрино?
31. Что такое частицы и античастицы? Приведите примеры.
32. Что такое античастицы? Чем отличается позитрон от электрона?
Протон от антипротона?
33. Что такое фермионы и бозоны? Приведите примеры.
34. Сформулируйте принцип запрета Паули.

ВОПРОСЫ К ТЕСТУ № 2

1. Что такое античастицы?
2. Лептоны и кварки. Их характеристики.
3. Сравните свойства лептонов и антилептонов. Почему в обычных условиях мы не встречаемся с антивеществом?
4. Семейства лептонов и кварков и их характеристики
5. Назовите основные характеристики элементарных частиц. Какие стабильные частицы Вам известны?
6. Что такое электрический заряд?
7. Что такое лептонный заряд?
8. Что такое барионный заряд?
9. Чему равны электрический, лептонный и барионный заряды следующих элементарных частиц: фотона, протона, антипротона, электрона, позитрона, мюона, таона, антинейтрино, электронного нейтрино, электронного антинейтрино, мюонного нейтрино, мюонного антинейтрино, кварка, верхнего и нижнего кварков, антикварка, странного кварка и очарованного кварка?
10. Фундаментальные взаимодействия и их характеристики.
11. Фундаментальные взаимодействия и их роль в природе.
12. Характеристики фундаментальных взаимодействий.
13. Какие взаимодействия характерны для микромира?
14. Сравните интенсивности и радиусы действия различных фундаментальных взаимодействий.
15. Сравните гравитационное и электромагнитное взаимодействия.
16. Сравните электромагнитное и слабое взаимодействия.
17. Сравните сильное и слабое взаимодействия.
18. Какова роль в природе сильного и слабого взаимодействий?
19. Какие изменения произойдут, если «выключить» электромагнитное взаимодействие?
20. Какие изменения в природе вызовет «выключение» слабого взаимодействия?

21. Какие изменения произойдут, если «выключить» сильное взаимодействие?
22. Какие изменения произойдут, если «выключить» гравитационное взаимодействие?
23. Законы сохранения лептонного и барионного зарядов. Приведите примеры.
24. На основе законов сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов сделайте вывод о возможности следующего превращения элементарных частиц: $n = p + {}_{-1}e$.
25. На основе законов сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов сделайте вывод о возможности следующего превращения элементарных частиц: $p = n + {}_{-1}e$.
26. На основе законов сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов сделайте вывод о возможности следующего превращения элементарных частиц: $p = n + {}_{+1}e + \nu_e$.
27. На основе законов сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов сделайте вывод о возможности следующего превращения элементарных частиц: $\gamma + \gamma = {}_{-1}e + {}_{+1}e$.
28. На основе законов сохранения электрического, лептонного и барионного зарядов сделайте вывод о возможности следующего превращения элементарных частиц: $p + {}_{-1}e = n + \nu_e$.
29. Что такое виртуальные частицы?
30. Расскажите о переносчиках фундаментальных взаимодействий.
31. Расскажите о переносчиках сильного взаимодействия.
32. Расскажите о переносчиках электромагнитного взаимодействия.
33. Расскажите о переносчиках слабого взаимодействия.
34. Расскажите о переносчиках гравитационного взаимодействия.
35. Кварковый состав протона и нейтрона.
36. Определите кварковую структуру и характеристики следующих барионов, исходя из их названия: протон, антипротон, антинейтрон.

37. Что означают названия: барионы, мезоны, адроны? Каково их кварковое строение?

38. Поясните, какие превращения происходят на кварковом уровне при β^- и β^+ – распадах ядер.