

ОДНА ИЗ НАИАКТУАЛЬНЕЙШИХ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ: ПОЧЕМУ МАТЕРИАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ ОБЛАДАЮТ РАЗНОЙ МАССОЙ ПОКОЯ ИЛИ НЕ ИМЕЮТ ЕЁ

Цюпка В. П.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)

1. Механика о массе как обязательной физической величине тел и частиц вещества, её инвариантности, о том, почему она разная у различных тел и молекул

Как стало известно еще со времени построения классической механики (ее основы были заложены в XVII в. в первую очередь такими учёными, как итальянский физик, астроном, философ и математик Галилео Галилей и английско-британский физик, математик и астроном сэра Исаак Ньютон), вещественные объекты как части вещества – одной из форм материи (являющейся единственно возможной субстанцией), представленные телами, состоящими из частиц (свободных или соединившихся в молекулы атомов), должны обладать одним обязательным физическим свойством, которое можно выразить количественно – массой.

Масса тела:

1) определяет количество содержащегося в нем вещества, так как количество вещества определяется количеством однотипных структурных единиц, составляющих тело (например, молекул, атомов);

2) определяет его свойство инертности согласно второму закону классической механики (Ньютона) (рис. 1), т. е. свойство противодействия воздействующей на тело силе

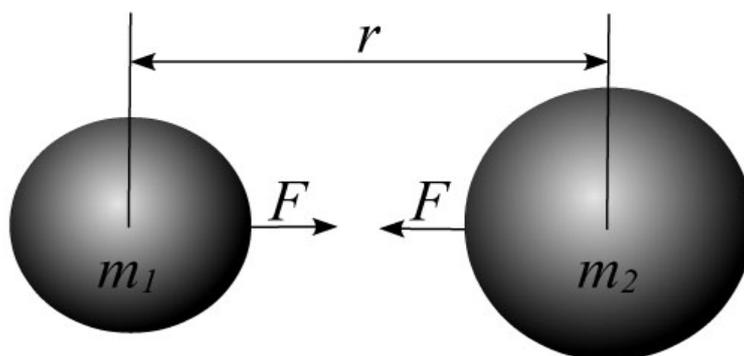
$$\overline{a} = \frac{\overline{F}}{m}$$

Рис. 1 Одна из современных формул второго закона классической механики (Ньютона):

\overline{a} – ускорение тела;
 \overline{F} – сила, приложенная к телу;
 m – масса тела.

(поэтому массу называли инертной);

3) определяет его гравитационные свойства согласно открытого Ньютоном закону всемирного (всеобщего) тяготения (рис. 2), т. е. силу притяжения к другому телу (при этом



$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Рис. 2 Закон всемирного тяготения:
 F – сила тяготения, возникающая между двумя телами;
 G – гравитационная постоянная;
 m_1 – масса первого тела;
 m_2 – масса второго тела;
 r – расстояние между двумя телами.

другое тело притягивается с той же силой к данному телу) (поэтому массу назвали гравитационной).

Причем эта масса как «скалярная физическая величина»¹ должна характеризовать тело не только в случае механического движения (в виде различных сочетаний смещения и вращения), но даже в покое (хотя покой, да и смещение и вращение, относительны, т. е. покоящееся тело может оказаться смещающимся или вращающимся, а смещающееся или вращающееся – покоящимся в зависимости от того, смотря в какой системе отсчёта его изучают).

К тому же масса должна оставаться неизменной, инвариантной несмотря на движение вещественного объекта, т. е. несмотря на то, как бы он ни изменялся бы, что бы с ним ни происходило бы.

В итоге разная масса у различных индивидуальных тел или молекул объяснялась тем, из каких атомов они образованы, так как разные атомы различались своей массой, а также ещё тем, сколько имелось в теле или молекуле тех или иных различающихся по массе атомов.

Но оставался неразрешимым вопрос: почему атомы различаются массой, или чем определяется масса того или иного атома?

¹ Масса. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%F1%D0%F1%D0%F1>

2. Открытие электрона, планетарная (ядерная) модель строения атома Резерфорда, строение атомного ядра и нуклонов, конфайнмент как основания для ответа на вопрос, почему у разных атомов различная масса

В 1897 г. британский физик сэр Джозеф Джон Томсон открыл первую элементарную частицу, имевшую отрицательный электрический заряд и, как позже выяснилось, обладавшую массой покоя, – электрон, который должен входить в состав атомов. А в 1911 г. его ученик британский физик новозеландского происхождения Эрнест Резерфорд предложил планетарную (ядерную) модель атома, согласно которой в центре атома расположено компактное (в 100 тыс. раз меньше самого атома) положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена бóльшая часть массы атома, а вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца, движутся электроны (рис. 3). Согласно выдвинутой в 1932 г. независимо друг от друга советско-

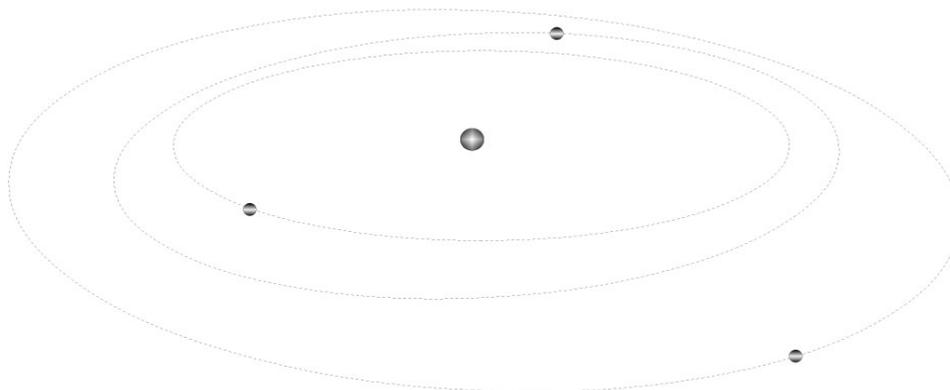


Рис. 3 Планетарная (ядерная) модель атома по Резерфорду

российским физиком-теоретиком Дмитрием Дмитриевичем Иваненко и германским физиком-теоретиком Вернером Карлом Гейзенбергом гипотезе, в последующем полностью подтверждённой экспериментами, атомное ядро образовано нуклонами, а именно положительно заряженными протонами и не имеющими электрического заряда нейтронами (рис. 4). Как



Рис. 4 Модель атомного ядра по Иваненко и Гейзенбергу

оказалось, они более чем в 1800 раз тяжелее электрона. В 1964 г. американские физик Мюррей (Маррей) Гелл-Манн и физик и нейробиолог Джордж Цвейг независимо друг от друга предложили квантовую теорию сильного взаимодействия, получившую название квантовой хромодинамики, согласно которой нуклоны как и другие элементарные частицы, объединяемые в группу адронов по той простой причине, что они участвуют в сильном взаимодействии, – составные элементарные частицы, состоящие из еще меньших специфических субъединиц – кварков.

Считается надежно установленным, что протон является связанным состоянием двух «верхних» и одного «нижнего», а нейтрон – одного «верхнего» и двух «нижних» кварков (рис. 5). Кварки и электроны пока что считаются бесструктурными, а следовательно, фунда-

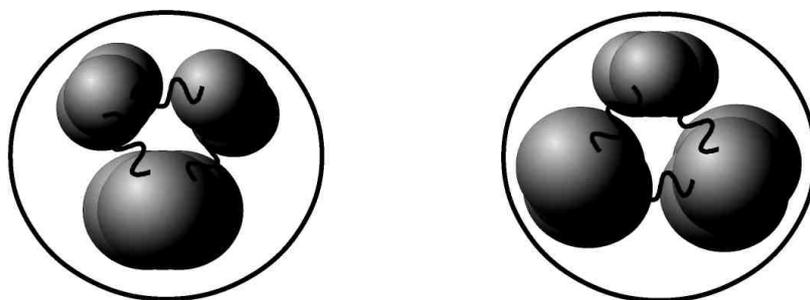


Рис. 5 Кварковая модель нуклонов (слева – протона, справа – нейтрона) по Гелл-Манну и Цвейгу

ментальными частицами. Но, в отличие от электронов, которые могут покидать атомы, «верхние» и «нижние» кварки могут быть только лишь в связанном состоянии. Это явление называют конфайнментом. Несмотря на то, что в свободном состоянии кварк обнаружить не представляется возможным, первое экспериментальное доказательство существования «нижнего» кварка было получено в 1967 г., а «верхнего» кварка – в 1968 г. в Стэнфордском центре линейного ускорителя SLAC (США). «Верхний» кварк почти в 4 раза тяжелее электрона, а «нижний» кварк более чем в 9 раз тяжелее электрона.

Ну что же, стало понятно, что масса атома определяется количеством и массой образующих его электронов, а также нуклонов, в том числе «верхних» и «нижних» кварков.

3. Единство противоположных свойств света – корпускулярных (квантовых) и волновых (электромагнитных) и двойственная природа фотона, усовершенствованная Бором планетарная (ядерная) модель строения атома, сочетающая в себе классические представления (механико-электродинамические) и неклассические (квантовые), двойственная природа электрона, принцип корпускулярно-волнового дуализма частиц вещества и полей, принцип неопределённости координаты и импульса частицы как основания для ответа на вопрос, почему масса частицы вещества может не проявляться

Еще с XVII в. были известны волновые свойства света: впервые экспериментально наблюдавшаяся в 1669 г. датским медиком, анатомом, физиком и математиком Расмусом Бартолином поляризация света, в 1672 г. английско-британским физиком, математиком и астрономом Исааком Ньютоном дисперсия света, в 1800 г. британским физиком, врачом, астрономом и востоковедом Томасом Юнгом (Янгом) интерференция света, в 1818 г. французским физиком, астрономом и политическим деятелем Домиником Франсуа Жаном Араго дифракция света. Создавший в 1864 г. теорию электродинамики британский физик и математик Джеймс Клерк Максвелл высказал теоретически обоснованную гипотезу о том, что свет является потоком непрерывно распространяющихся поперечных электромагнитных волн, являющихся своеобразными колебаниями электромагнитного поля, как впоследствии стало известно – одного из квантованных полей. А квантованные поля являются основной формой материи, не имеющей массы покоя.

«Для объяснения излучения света нагретыми телами»² германский физик-теоретик Макс Карл Эрнст Людвиг «Планк в 1900 г. выдвинул»³ гипотезу о том, «что световая энергия»⁴ (а энергия как физическая величина количественно выражает движение, т. е. изменение материи) «передается в виде порций, названных квантами, а не любым количеством, как думали ранее (вроде звеньев, а не сплошной ленты)»⁵. Кванты света как порции поперечных электромагнитных волн назвали фотонами. «По мнению Планка, это было всего лишь математической операцией, позволившей решить возникшие трудности. Однако в 1905 г.»⁶ швейцарско-германско-американский физик-теоретик «Альберт Эйнштейн отнёсся к идее Планка иначе. Он показал, что если свет действительно имеет квантовую природу, то этим объясняется загадка фотоэлектрического эффекта.»⁷

² Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки. М. ФАИР-ПРЕСС. 2005. С. 26.

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

Обнаруженный экспериментально еще в 1887 г. германским физиком Генрихом Рудольфом Герцем фотоэлектрический эффект проявляется выходом электронов из металлической пластинки при падении на него света. «Однако испускание электронов прекращается при свете со слишком малой частотой независимо от мощности источника света. Эйнштейн заключил, что свет действует подобно частице»⁸, передающей «свою энергию электрону и тем самым высвобождая его. Кроме того, отношение Планка, связывавшее энергию с частотой, объясняло отсутствие электронов при низкой частоте падающего света»⁹: «световым фотонам просто не хватало энергии для»¹⁰ выталкивания из металла свободных электронов. Получается, что в явлении фотоэффекта свет больше выглядел как поток прерывных частиц – фотонов, нежели как поток непрерывных поперечных электромагнитных волн.

Получалось, что свет имеет двойственную природу: он представляет единство противоположных свойств – корпускулярных (квантовых) и волновых (электромагнитных). Фотон имеет двойственную природу частицы, не имеющей массы покоя, и волны.

Планетарная (ядерная) модель атома, предложенная Резерфордом, противоречила классическим представлениям электродинамики. Согласно этим представлениям обладающий отрицательным электрическим зарядом электрон, вращаясь вокруг положительно заряженного ядра как частица, должен был непрерывно излучать и, теряя на излучение свою кинетическую энергию, с каждым оборотом должен был приближаться к ядру и упасть на него, а увеличивая тем самым частоту своего вращения должен давать сплошной спектр излучения атома. В экспериментах же наблюдалась высокая устойчивость атомов, да и спектры излучения атомов были линейчатыми – в виде отдельных линий определенных частот.

Разрешил эти противоречия в 1913 г. датский физик-теоретик и общественный деятель Нильс Хенрик Давид Бор, усовершенствовавший планетарную (ядерную) модель атома, из-за чего она сочетала в себе классические представления (механико-электродинамические) и неклассические (квантовые). Согласно усовершенствованной модели электроны в атоме вращаются на определенных расстояниях от ядра, ничего не излучая, располагаясь на стационарных атомных орбиталях, заполняя их в определенной последовательности, начиная от ближайшей к ядру. Поглотив фотон света, электрон переходит в возбужденное состояние (с некоторым избытком энергии) и перескакивает на более удаленную от ядра орбиталь. Но в таком неустойчивом состоянии электрон долго находиться не может и, испуская фотон, возвращается на свою орбиталь. Конкретные переходы электронов с одной атомной орбитали на другую соответствуют определенным линиям в атомных спектрах поглощения или излучения. Самое интересное было то, что переходы электронов между орбиталями рассматривали

⁸ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 26.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

как скачкообразные, мгновенные, без промежуточных точек и без траектории, что никак не соответствовало представлениям об электроны как частице вещества: несмотря на наличие массы покоя электроны должны были обладать волновыми свойствами (рис. 6). Да и как оказалось электрон как частица может находиться в любой точке орбитали, образуя как волна электронное облако той же конфигурации, что и орбиталь (например, сферической на s-орбитали, гантелеобразной или восьмеркообразной на p-орбитали и др.).

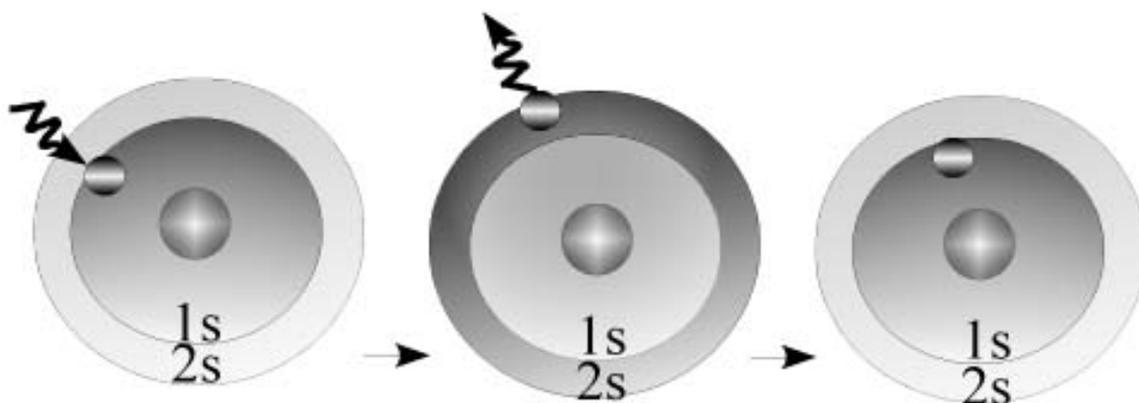


Рис. 6 Перескакивание электрона в атоме водорода с 1s-орбитали на 2s-орбиталь при его возбуждении фотоном с последующим возвращением на 1s-орбиталь с испусканием фотона

И в 1927 г. волновые свойства электрона впервые удалось экспериментально подтвердить американским физикам Клинтону Джозефу Дэвиссону и Лестеру Хэлберту Джермеру, наблюдавшим дифракцию электронов. Пучок быстрых электронов, проходя сквозь кристалл никеля, вел себя подобно пучку волн, проходящему мимо малых отверстий или узких щелей. Другими словами, распределение электронов, проходивших через состоящее из частиц тело и летевших лишь по некоторым избранным направлениям, было таким же, как если бы проходили поперечные электромагнитные волны с длиной волны, равной длине волны электрона. И это несмотря на то, что электрон считался частицей, да ещё имеющей массу покоя! Получается, что и электрон имеет двойственную природу частицы и волны.

Так подтвердилась гипотеза, высказанная в 1923 г. французским физиком-теоретиком Луи Виктором Пьером Раймоном де Бройлем, о корпускулярно-волновом дуализме не только фотонов света и электронов вещества, но и любых частиц (от элементарных частиц до молекул), ставшая впоследствии одним из принципов новой физической теории – квантовой механики, описывающей и объясняющей физические явления на уровне элементарных частиц, атомных ядер, атомов и молекул, для которых классическая механика оказалась неприменимой. Согласно этому принципу любая частица связывается как с корпускулярными характеристиками – энергией и импульсом, так и с волновыми характеристиками – частотой и дли-

ной волны. Причем у частиц, имеющих массу покоя, энергию и импульс можно вычислить и через массу, и через частоту или длину волны, а у частиц, не имеющих массы покоя – только через частоту или длину волны.

В 1927 г. германский физик-теоретик Вернер Карл Гейзенберг открыл принцип неопределённости, ставший одним из следствий квантовой механики. Принцип неопределённости Гейзенберга дает в частности соотношение неопределённостей координаты и импульса частицы, которое означает, что чем точнее установлено местоположение частицы (по координате), тем менее точно можно узнать её импульс, и наоборот. Получается, что несмотря на то, что и элементарные частицы, и атомные ядра, и атомы, и молекулы имеют двойственную природу частицы и волны, в конкретных условиях эксперимента возможно изучать либо корпускулярные, либо волновые их свойства: одновременно точно и корпускулярные, и волновые их свойства определить не представляется возможным. Вот и приходим к пониманию того, что масса электрона или другой частицы вещества проявляется лишь в тех экспериментах, где проявляются корпускулярные свойства, а в тех экспериментах, где проявляются волновые свойства (как, например, в опытах по обнаружению дифракции электронов), масса никак не проявляется, даже у частиц вещества.

4. Специальная и общая теория относительности об относительности массы в зависимости от скорости смещения и близости тяготеющих масс

Еще оказалось, что масса вещественных объектов (тел и частиц) является не инвариантной, а относительной величиной (в смысле изменяющейся в зависимости от того, с чем её сопоставляют, соотносят) и может принимать разное значение в зависимости от условий, в которых производится измерение. Например, еще в 1901-1903 гг. германский физик Вальтер Кауфман (Кауфманн) в серии экспериментов обнаружил, что масса электрона возрастает с увеличением его скорости смещения. Этот факт может рассматриваться в качестве одного из релятивистских эффектов предложенной в 1905-1908 гг. швейцарско-германско-американским физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном специальной теории относительности, согласно которому значение массы вещественных объектов (тел и частиц) возрастает с увеличением скорости смещения системы отсчета. А согласно предложенной в 1915-1916 гг. им же общей теории относительности чем ближе к источнику гравитации (тяготеющей массе) производятся измерения и чем больше его масса, тем и большие значения будут получены масс вещественных объектов (тел и частиц).

5. Специальная теория относительности об эквивалентности массы и энергии, несохранение суммарной массы и сохранение суммарной энергии материальной системы

Из специальной теории относительности была выведена «эквивалентность массы и энергии»¹¹, означающая, что энергия материального объекта (материальной «системы) равна его (её) массе, умноженной на размерный множитель квадрата скорости света в вакууме»¹² (рис. 7). Это значит, что масса (определяющая количество вещества, инертные и гравита-

$$E = m \cdot c^2$$

Рис. 7 Эквивалентность массы и энергии:

E – энергия;

m – масса;

c – скорость распространения света в вакууме.

ционные свойства вещественного объекта) может приниматься как разновидность энергии (количественно характеризующей движение). Теперь понятно, почему не проявляется масса электрона в явлении дифракции, – массу можно выразить энергией. Масса покоя – это есть энергия покоя, т. е. внутренняя энергия, заключённая в покоящемся теле или покоящейся частице. А у распространяющегося не имеющего массы покоя фотона энергию можно выразить некоей массой (но не массой покоя!). Если тело или частица обладают массой (в том числе массой покоя), то они тем самым уже обладают эквивалентным запасом энергии, которую можно частично или даже полностью превратить в другие формы энергии. Таким образом, возможно превращение массы в эквивалентное количество энергии, а энергии в эквивалентное количество массы. Такие превращения сопровождают экзо- и эндотермические химические реакции: в экзотермической реакции суммарная масса всех продуктов меньше по сравнению с суммарной массой всех реагентов на эквивалентное количество выделившейся тепловой энергии, а в эндотермической реакции суммарная масса всех продуктов больше суммарной массы всех реагентов на эквивалентное количество поглощенной тепловой энергии. Но изменения массы в химических реакциях незначительны и не берутся во внимание. А вот в ядерных процессах превращение части массы в энергию при соединении нуклонов в ядро, а также энергии в массу при разделении ядра на нуклоны достигает существенных значений (известно как дефект массы). Также два кванта (две энергетические порции) физического ва-

¹¹ Эквивалентность массы и энергии. URL:

http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%EA%E2%E8%E2%E0%EB%E5%ED%E2%ED%EE%E1%E2%FC_%E0%E1%E1%FB_%E8_%FD%ED%E5%E0%E3%E8%E8

¹² Там же.

куума (обычного состояния свободных фундаментальных полей в отсутствие вещества) могут превратиться в массу появляющихся из физического вакуума частицы и античастицы вещества (различающихся только лишь знаком электрического заряда). Ну а масса частицы с соответствующей ей античастицей в процессе их аннигиляции превращается в энергию физического вакуума. Рождение из физического вакуума электрон-позитронных пар и их аннигиляцию впервые наблюдали в 1932 г. британский физик-экспериментатор Патрик Мейнард Стюарт Блэкетт и итальянский физик Джузеппе Паоло Станислао Оккиалини. Получается, что суммарная масса материальной системы сохраняется не всегда (в виду возможности превращения ее в энергию, а энергии в массу), но всегда сохраняется ее суммарная энергия, включающая и выраженную через энергию массу.

6. Открытие античастиц, а также нестабильных частиц, которым не находилось места в строении вещества, квантово-полевой механизм передачи и обменная природа электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий, объединение электромагнитного и слабого взаимодействий в одно электрослабое взаимодействие, допущение существования поля Хиггса и бозона Хиггса, объединение элементарных частиц в группы барионов, мезонов, лептонов

Британский физик Поль Дирак, объединив квантовую механику со специальной теорией относительности, в 1928 г. предсказал существование античастиц, отличающихся от частиц противоположным знаком электрического заряда.

Впоследствии были открыты не только античастицы (например, в 1932 г. позитрон), которым не находилось места в строении вещества, но и такие частицы, которым тоже не находилось места в строении вещества. Так, в 1936 г. американский физик-экспериментатор Карл Дейвид Андерсон со своим студентом-дипломником Сидом Недермейером обнаружил в космических лучах неустойчивые отрицательно заряженный мюон и положительно заряженный антимюон. Масса покоя мюона или антимюона в 207 раз превышала массу покоя электрона или позитрона. В 1949 г. группа исследователей под руководством британского физика Сесила Фрэнка Пауэлла обнаружила в космических лучах неустойчивые положительно и отрицательно заряженные пионы (пи-мезоны). В 1950 г. был идентифицирован и неустойчивый не имеющий электрического заряда пион. Масса покоя пиона в 270 раз больше массы электрона. В 1947-1951 гг. в космических лучах были открыты неустойчивые положительно и отрицательно заряженные, а также не имеющие электрического заряда каоны (К-мезоны). Масса покоя каона более чем в 900 раз больше массы электрона. В 1951 г. в космических лучах был обнаружен неустойчивый не имеющий электрического заряда лямбда-

гиперон (его масса более чем в 2000 раз больше массы электрона), а в 1954 г. – также неустойчивый и не имеющий электрического заряда анти-лямбда-гиперон. И хотя получаемые «частицы были нестабильны, распались вскоре на более привычные»¹³, они значительно различались массой (или эквивалентной энергией), и «все это свидетельствовало о том, что материя таит в себе еще много неожиданного»¹⁴. Американские физики Фредерик Райнес и Клайд Коуэн в излучении ядерного реактора зафиксировали стабильные частицы с крайне малой массой покоя (в 1,8 млн. раз меньше массы электрона) – нейтрино (в 1955 г.) и электронное антинейтрино (в 1956 г.).

Согласно созданной в 1940-х гг. американским учёным Ричардом Филлипсом Фейнманом, американским физиком Джулианом Сеймуром Швингером, японским физиком Синъитира Томонага и американским физиком-теоретиком британского происхождения Фрименом Джоном Дайсоном теории квантовой электродинамики электромагнитное взаимодействие электрически заряженных тел или частиц с помощью электромагнитного поля имеет обменную природу и осуществляется с помощью частиц-переносчиков – фотонов, которые во время излучения и поглощения становятся реальными, а во время непрерывного распространения электромагнитного поля становятся виртуальными (возможными).

В 1964 г. британский физик-теоретик Питер Во Хиггс и другие (бельгийские физики-теоретики Роберт Браут и Франсуа Энглерт, американские физики Геральд Гуральник и Карл Ричард Хаген, британский физик Томас Вальтер Баннерман Киббл), «исходя из чисто математических соображений, допустили существование вездесущего»¹⁵ скалярного «поля, позже названного полем Хиггса. Все взаимодействующие с полем Хиггса частицы»¹⁶ могут приобрести вследствие этого разную массу. Иначе говоря, определённая, конкретная масса, имеющаяся у той или иной фундаментальной (бесструктурной) частицы, порождена взаимодействием её с полем Хиггса. «Механизм обретения массы схож с прохождением строя солдат через разлитую на земле патоку. Они становятся тяжелее вследствие прилипания патоки при ходьбе.»¹⁷ Колебания поля Хиггса, вызванное взаимодействием его с частицами, порождает его кванты в виде бозонов Хиггса (возможно пяти типов).

В 1965 г. американский физик корейского происхождения Хан Мо-Ён и японско-американский физик-теоретик Ёитиро Намбу, развивая теорию квантовой хромодинамики, отметили, что кварки в адронах (в том числе три кварка в нуклонах, да и сами адроны) взаимодействуют с помощью квантов глюонных полей в виде не имеющих массы покоя глюонов – частиц-переносчиков сильного взаимодействия.

¹³ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 33.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же. С. 47.

¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

В 1968 г. независимо друг от друга американскими физиками Шелдоном Ли Глэшоу и Стивеном Вайнбергом, а также работавшим в Италии пакистанским физиком-теоретиком Абдусом Саламом предложена теория, объединяющая «электромагнитное и слабое взаимодействия в одно, электрослабое взаимодействие»¹⁸. Согласно этой теории должны были быть частицы-переносчики слабого взаимодействия трех типов: с положительным электрическим зарядом, отрицательным электрическим зарядом и без электрического заряда. Они должны были обладать значительной массой покоя.

В 60-70-е годы XX века физики были совершенно сбиты с толку многочисленностью, разнообразием и необычностью вновь открытых и открываемых субатомных частиц. Казалось, им не будет конца. Совершенно непонятно, для чего столько частиц. В основе такого возрастающего разнообразия элементарных частиц (и образующих обычное вещество, и нестабильных, распадающихся на образующие обычное вещество, и переносчики взаимодействия) должен быть какой-то порядок. И «физики, исходя из теоретических соображений, пытались по-разному группировать частицы в поисках»¹⁹ этого порядка. Более тяжёлые из адронов, которые оказались трёхкварковыми по структуре, назвали барионами, а менее тяжёлые, оказавшиеся двухкварковыми по структуре, назвали мезонами. Легкие частицы, участвующие в электромагнитном и слабом взаимодействиях, но не в сильном, назвали лептонами.

Но чтобы объяснить, почему одни элементарные частицы, в том числе образующие обычное вещество, имеют разную массу покоя, а другие (из квантов полей) ее вовсе не имеют, требовалась более основательная теория. Кроме того, квантовая механика не могла объяснить превращения одних элементарных частиц в другие, связанные с исчезновением одних и появлением других элементарных частиц.

7. Квантовая теория поля и стандартная модель об устройстве материи на микроуровне её организации и различии массы элементарных частиц

«К середине 1970-х гг. все теоретические и опытные наработки»²⁰, объясняющие взаимодействие и движение элементарных частиц и квантованных полей, слились в единую квантовую теорию поля как обобщение квантовой механики в связи с необходимостью решения проблем описания процессов порождения, поглощения и взаимных превращений элементарных частиц. В 1974 г. с некоторыми дополнениями квантовая теория поля вылилась в

¹⁸ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 37.

¹⁹ Там же. С. 34.

²⁰ Там же. С. 37.

стандартную модель – теоретическую конструкцию в физике элементарных частиц, описывающую электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц.

«Согласно стандартной модели:»²¹

1) исходными элементами материи являются не частицы вещества, а квантованные поля в виде свободных фундаментальных полей: фермионных (спинорных) и бозонных (калибровочных);

2) в результате квантования фермионных (спинорных) полей появляются крошечные сгустки энергии в виде имеющих различную массу покоя 12 фундаментальных частиц и соответствующих им 12 фундаментальных античастиц (с противоположным электрическим зарядом), объединяемых в группу фермионов (они подчиняются ряду статистических правил, установленных итальянско-американским физиком Энрико Ферми и британским физиком-теоретиком Полем Андриеном Морисом Дираком);

3) фундаментальные фермионы делятся на 3 поколения (или семейства) по 2 кварка (и соответствующих антикварка) и 2 лептона (и соответствующих антилептона) в каждом: в первом поколении верхний и нижний кварки (и антикварки), а также электрон (и позитрон) и электронное нейтрино (и антинейтрино), во втором поколении очарованный и странный кварки (и антикварки), а также мюон (и антимюон) и мюонное нейтрино (и антинейтрино), в третьем поколении истинный и прелестный кварки (и антикварки), а также таон (и антитаон) и таонное нейтрино (и антинейтрино);

4) кварки и антикварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях, электрически заряженные лептоны электрон, мюон и таон (и соответствующие антилептоны) – в слабых и электромагнитных, а лептоны нейтрино (и антилептоны антинейтрино) – только в слабых взаимодействиях, путём объединения кварков образуются разные адроны, превращение одних элементарных частиц в другие сопровождается выделением или захватом фундаментальных частиц;

5) фермионы взаимодействуют между собой посредством обмена появляющимися в результате квантования полей другими сгустками энергии в виде своеобразных фундаментальных частиц – переносчиков соответствующего взаимодействия, объединяемых в группу бозонов (они «подчиняются другому ряду правил, выдвинутых индийским физиком Шатьендранатом Бозе и»²² швейцарско-германско-американским физиком-теоретиком Альбертом Эйнштейном), переносчиками сильного взаимодействия являются 8 типов не имеющих массы покоя глюонов, переносчиками слабого взаимодействия являются 3 тяжелых калибровоч-

²¹ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 39.

²² Там же. С. 42.

ных бозона (W^+ , W^- и Z^0), а переносчиками электромагнитного взаимодействия являются не имеющие массы покоя фотоны;

б) разная масса покоя фермионов и тяжелых калибровочных бозонов, а также отсутствие массы покоя у глюонов и фотона обусловлены разным взаимодействием их полей с полем бозонов Хиггса (предположительно пяти типов);

7) фундаментальные частицы способны к превращению обратно в поле.

Согласно стандартной модели здесь прослеживается механизм функционирования атома. Протоны и нейтроны удерживает в ядре обмен виртуальными глюонами между составляющими эти частицы кварками. Связь электронов с протонами в ядре обеспечивается обменом виртуальными фотонами.

«Заметим, что три семейства кварков в точности соотносятся с тремя семействами лептонов. Вот только неизвестно, почему их ровно три. Первое семейство кварков и лептонов стабильно и составляет»²³ все вещество «вокруг нас. Другие два семейства нестабильны, распадаясь через короткое время на более устойчивых собратьев. Если же говорить о возможности существования большего числа семейств кварков и лептонов, имеется два экспериментальных подтверждения, что таких семейств три. Одно подтверждение получено в 1998 году на»²⁴ ускорителе «при распаде нейтрального лямбда-гиперона»²⁵ («лямбда-ноль-гиперона»²⁶) «с образованием нейтрино, а другое – из астрономических наблюдений.»²⁷ Если бы существовало четыре или больше семейств «элементарных частиц, количество гелия, образованного в первые минуты после «большого взрыва», должно составлять свыше 26 % ... вещества ... нынешней Вселенной.»²⁸ Но так как выявлено лишь 25 % гелия, то это служит убедительным опытным подтверждением существования именно трёх семейств элементарных частиц.

Таким образом, разная масса у разнообразных частиц связана с тем, из каких фундаментальных частиц они образованы и какая часть их массы превратилась в энергию их связи. А масса фундаментальных частиц зависит от того, как их поля взаимодействовали с полем бозона Хиггса.

8. Экспериментальная проверка стандартной модели

²³ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 41.

²⁴ Там же.

²⁵ Там же.

²⁶ Там же.

²⁷ Там же.

²⁸ Там же. С. 44.

Когда была предложена стандартная модель, имелись экспериментальные подтверждения ряда фундаментальных частиц: в 1897 г. был открыт электрон, в 1905 г. стало известно о фотоне, в 1936 г. был открыт мюон, в 1947 г. было получено экспериментальное указание на существование странного кварка, в 1962 и 1964 гг. были открыты соответственно электронное и мюонное нейтрино, в 1967 г. было получено экспериментальное указание на существование нижнего кварка, а в 1968 г. – верхнего кварка. В последующие 26 лет «благодаря проведению опытов на более мощных ускорителях»²⁹ были открыты остальные фундаментальные частицы, «за исключением бозона Хиггса»³⁰: в 1974 г. очарованный кварк, в 1975 г. таон, в 1977 г. прелестный кварк, в 1979 г. один из глюонов, в 1983 г. W^+ , W^- и Z^0 -бозоны, в 1995 г. истинный кварк, в 2000 г. таонное нейтрино.

«Помимо наблюдений самих частиц опытным путём проверялись многие свойства частиц, предсказанные стандартной моделью. В результате выяснилось, что предсказанные и экспериментально полученные данные прекрасно согласовывались друг с другом. Примером может служить лэмбовский сдвиг. В 1947 году американский физик Уиллис Лэмб измерил частотный сдвиг в излучении, поглощаемом или испускаемом при переходе атома водорода из одного энергетического состояния в другое с вырожденными энергетическими уровнями.»³¹ «Измеренное Лэмбом значение равнялось $1057,65 \pm 0,009$ МГц.»³² «Значительно позже стандартная модель дала»³³ почти ту же «величину $1057,860 \pm 0,009$ МГц»³⁴. «Обе величины различаются всего на $1/100\ 000$. С учетом погрешности оказалось, что»³⁵ экспериментально полученное Лэмбом и рассчитанное с помощью стандартной модели «значения фактически совпали. Такое удивительное соответствие теории эксперимента наблюдалось во многих случаях, что служило еще большим подтверждением верности данной модели.»³⁶

И только существование бозона Хиггса долгое время никак не могли подтвердить экспериментально, чтобы окончательно подтвердить стандартную модель.

«Как определить, действительно ли существует поле Хиггса или это просто математический прием? Надо поступить следующим образом. Достаточно крепкий удар вроде удара частиц с очень высокой энергией по космической патоке, именуемой полем Хиггса, вызовет дрожание этой патоки. Колебания же самого поля можно зарегистрировать, поскольку долж-

²⁹ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 43.

³⁰ Там же.

³¹ Там же.

³² Там же.

³³ Там же.

³⁴ Там же.

³⁵ Там же. С. 43.

³⁶ Там же.

на появиться частица Хиггса, переносчик хиггсова поля, подобно тому как фотон служит переносчиком электромагнитного поля.»³⁷

В 2005 году вступил в строй «Большой ускоритель со встречными протон-протонными пучками (LHC)»³⁸, известный как Большой адронный коллайдер, с «27-километровым накопительным кольцом»³⁹, с максимальной проектной энергией столкновения 14 ТэВ. 4 июля 2012 г. было объявлено об обнаружении бозона с энергией (массой) 125-126 ГэВ. Предполагается, что это и есть бозон Хиггса, но для полной уверенности требуются дополнительные исследования.

Если все-таки бозон Хиггса обнаружится, то это будет свидетельствовать в пользу стандартной модели. «Данный шаг, конечно же, не решит до конца вопроса о происхождении массы или всех трудностей стандартной модели, но послужит все же неким началом.»⁴⁰ Как полагают ученые, «поля Хиггса – лишь временная мера, не решающая вопроса о происхождении массы»⁴¹. Бозон Хиггса – своеобразный первый шаг в «своего рода долгий ящик неведения, куда откладываются основополагающие трудности стандартной модели»⁴².

9. Другие слабые места стандартной модели

«Самая серьезная критика стандартной модели касается тяготения»⁴³. «Стандартная модель не учитывает тяготения и требует, чтобы масса, заряд и некоторые другие свойства частиц измерялись опытным путем для последующей постановки в уравнения.»⁴⁴ То, что «стандартная модель недоучитывает тяготения»⁴⁵, – «это другая сторона нерешенного вопроса с массой»⁴⁶.

«Прямым ответом здесь послужило бы создание квантовой теории тяготения (гравитации). Лучшей теорией тяготения считается общая теория относительности Эйнштейна, и почему бы в таком случае просто не приложить квантовые законы к общей теории относительности? Потому что сделать это нелегко.»⁴⁷ Общая «теория относительности является классической в отношении связи геометрии Вселенной как»⁴⁸ неискривленного в «больших масштабах четырехмерного многообразия с массой. Она хорошо работает при больших рас-

³⁷ Там же. С. 47.

³⁸ Там же. С. 48.

³⁹ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 48.

⁴⁰ Там же.

⁴¹ Там же. С. 49-50.

⁴² Там же. С. 50.

⁴³ Там же. С. 46.

⁴⁴ Там же.

⁴⁵ Там же. С. 50.

⁴⁶ Там же.

⁴⁷ Там же.

⁴⁸ Там же.

стояниях, но на расстояниях между частицами меньше 1 мм никаких опытов не проводилось. Это означает, что сила тяготения попросту экстраполируется в микромир. Вместе с тем стандартная модель проводит квантование полей в виде дискретных частиц и имеет дело с крайне малыми масштабами. Поэтому, когда ученые пытаются провести квантование для общей теории относительности, теория дает бесконечные значения для явно конечных величин.

Другая трудность вызвана крайней слабостью тяготения по сравнению с другими силами. Чтобы быть на равных с сильным и электрослабым взаимодействием, тяготение должно иметь сравнимую силу. Это так называемая проблема иерархии взаимодействий. Огромный энергетический разрыв существует между энергиями, для которых применима стандартная модель, и энергией, при которой наиболее слабо выраженное тяготение становится сравнимым по величине с сильным и электрослабым взаимодействиями. Неизвестно, чем вызван такой огромный разрыв.»⁴⁹

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Закон сохранения массы и энергии. [Электронный ресурс] URL: <http://www.himhelp.ru/section23/section1/section3/> (дата обращения: 06.10.2012)

Масса. [Электронный ресурс] URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%80%D0%90> (дата обращения: 29.12.2012)

Перл, Рентген – Фридман. [Электронный ресурс] URL: http://n-mir.org/index2.php?option=com_content&task=view&id=566&pop=1&page=0 (дата обращения: 06.10.2012)

Уиггинс, А. Пять нерешенных проблем науки [Текст] / Артур Уиггинс, Чарлз Уинн ; пер. с англ. А. Гарькавого. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2005. – 304 с.

Цюпка, В. П. Естественнонаучная картина мира: концепции современного естествознания [Текст] : учеб. пособие / В. П. Цюпка. – Белгород : ИПК НИУ «БелГУ», 2012. – 144 с.

Цюпка, В. П. Концепции современной физики, составляющие современную физическую картину мира [Электронный ресурс] / В. П. Цюпка // Научный электронный архив Российской Академии Естествознания : заоч. электрон. науч. конф. «Концепции современного естествознания или естественнонаучная картина мира» URL: <http://econf.rae.ru/article/6315> (размещено: 31.10.2011)

Цюпка, В. П. О понимании движения материи, способности ее к саморазвитию, а также связи и взаимодействия материальных объектов в современном естествознании [Электронный ресурс] / В. П. Цюпка // Научный электронный архив Российской Академии Естествознания

⁴⁹ Уиггинс А., Уинн Ч. Пять нерешенных проблем науки... С. 50.

вознания URL: <http://econf.rae.ru/article/7487> (размещено: 25.02.2013)

Цюпка, В. П. О понимании материи, вечности ее бытия, а также единства ее прерывности и непрерывности в современном естествознании [Электронный ресурс] / В. П. Цюпка // Научный электронный архив Российской Академии Естествознания URL: <http://econf.rae.ru/article/7488> (размещено: 25.02.2013)

Цюпка, В. П. О понимании структурности и системной организации материи, структурной бесконечности, а также пространства, времени, пространственной и временной бесконечности материи в современном естествознании [Электронный ресурс] / В. П. Цюпка // Научный электронный архив Российской Академии Естествознания URL: <http://econf.rae.ru/article/7486> (размещено: 25.02.2013)

Цюпка, В. П. Философские проблемы естествознания [Текст] : учеб. Пособие / В. П. Цюпка. – Белгород : ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2013. – 60 с.

Эквивалентность массы и энергии. [Электронный ресурс] URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%EA%E2%E8%E2%E0%EB%E5%ED%E2%ED%EE%E1%E2%FC_%E0%E1%E1%FB_%E8_%E0%ED%E5%E0%E3%E8%E8 (дата обращения: 06.10.2012)

Яндекс. Словари. [Электронный ресурс] URL: <http://slovari.yandex.ru/>

The Free Encyclopedia Wikipedia. [Electronic resource] URL: <http://en.wikipedia.org/>