

УДК 530.1

МОДЕЛЬ СТАБИЛЬНОЙ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЧАСТИЦЫ**Е. И. Тимофеев**

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Из бесконечной системы, равномерно распределенных неподвижных одинаковых частиц, выделена подсистема частица-поле. Поле заряженных частиц определяется только электромагнитным взаимодействием зарядов. Движение частицы, обусловленное ее спином, происходит в шаровом слое, так что центр ее массы неподвижен. Внешняя поверхность слоя связана со сферическим потенциалом, складывающимся из дискретных излучений поля частицей и дискретных поглощений ею поля всех других зарядов. Излучение и поглощение происходят мгновенно и совпадают по времени в каждой точке поворота. Трехмерность задачи поворотом координат приводится к случаю одномерного движения частицы в потенциальном ящике. Для решения задачи уравнения для спина и дискретных уровней энергии дополнены уравнением, связывающим энергию, ширину потенциального ящика с квадратом заряда. В результате этого для основного состояния получены средние радиусы, значения потенциала на сферической поверхности и частоты электромагнитного поля электрического заряда для протона и электрона.

Когда были открыты первые элементарные частицы, то представление о них было как о шариках или сферах. После обнаружения спина у частиц представление о них стало как о вращающихся волчках, хотя очень скоро выяснилось, что это не так. Позднее [1], на основании аномальных значений магнитного момента протона было сделано предположение о существовании частиц (виртуальных пионов), окружающих Дираковский протон. Это предположение не противоречит зависимости магнитного формфактора протона [2] от величины передаваемого ему импульса при рассеянии электронов на водородных мишенях, что привело к представлению о наличии распределения массы (заряда) в протоне.

В такой постановке возникает вопрос о возможности распада протона и наблюдения этого процесса на экспериментальных установках. Как известно, к настоящему времени распад протона экспериментально не обнаружен, что первоначально списывалось на недостаточные возможности ускорителей.

Однако, источником высокоэнергетических протонов являются не только ускорители. Эти частицы обнаружены в космических лучах, в которых их максимальная энергия составляет порядка 10^6 ГэВ [3], что примерно в 500 раз превышает возможности ускорителей, работающих на встречных пучках [1]. Зарегистрировано множество взаимодействий космических лучей с атмосферой и специальными мишенями [3], которые не дали возможности сделать вывод о распаде протона. Вопрос оставался открытым до введения в физику элементарных частиц барионного числа и экспериментально найденного закона его сохранения, что привело к устоявшемуся сейчас мнению о невозможности распада протона на элементарные частицы.

Совсем другое объяснение различия между теоретически предсказываемым и экспериментально измеренным значениями магнитного момента дается для электрона. Это объяснение основано на предположении (например, [1]), что при измерении g -фактора электрона он взаимодействует с реальными фотонами, а присутствие виртуальных фотонов изменяет это взаимодействие, а, следовательно, и g -фактор.

Другая модель, также работающая с мезонами и барионами, основана на теории кварков. При всей привлекательности этой модели она имеет ряд

известных особенностей. Так кварки должны иметь дробный электрический заряд, и они должны быть обнаруживаемыми [1]. Оценка энергии связи кварков имеет очень широкий диапазон, например, в работе [1] (без конкретизации типа пары кварков) приведена величина энергии связи, равная около 10 ГэВ, в работе [4] эта величина составляет 10^{13} ГэВ. Наличие в космических лучах высокоэнергетических протонов и, главным образом, вероятностный характер распада элементарных частиц сохраняет возможность обнаружения распада протона. Согласно [4], в тонне воды за один год может происходить распад одного протона. К настоящему времени это не получило экспериментального подтверждения.

Отметим, что обе упоминаемые модели не работают с таким лептоном, как электрон.

Отсутствие единой модели стабильной элементарной частицы привело к ситуации, в которой некоторые неясные вопросы остались нерешенными.

Так, например, неясные вопросы относятся к связи электрического заряда со спином частицы. В квантовой электродинамике доказано, что электрический заряд проявляется в окружающем пространстве в виде электромагнитного излучения (собственное поле). Фотоны этого поля обладают импульсом. Для создания этого излучения частица должна затрачивать некоторую энергию, а для поддержания спина частица энергию должна получать. Такие противоположные процессы должны быть некоторым образом увязаны между собой. Кроме того, в простейшем случае неподвижной частицы неясным является вопрос о частоте электромагнитного поля электрического заряда.

Всем хорошо известно определение классического радиуса электрона и его величина, которая часто встречается в аналитических формулах. Однако такая величина, как классический радиус протона, в физике сейчас практически не используется, а представление о размере этой частицы (средняя величина около 10^{-15} м) сложилось в результате усреднения экспериментальных данных, полученных в исследованиях по рассеянию [1].

В настоящей статье делается попытка построить модель стабильной элементарной частицы, описывающей лептон и барион, и на ее основе ответить на поставленные вопросы.

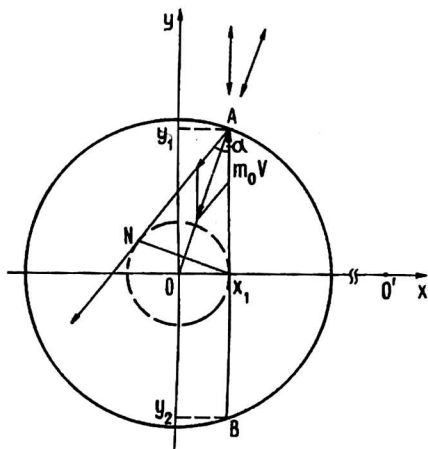
Постановка задачи

Пусть имеется бесконечное число неподвижных и равномерно расположенных частиц, имеющих одинаковый электрический заряд. Между частицами имеется поле Кулоновского и гравитационного взаимодействия. Из имеющейся системы выделим подсистему — неподвижная частица-поле. Поле, окружающее частицу, складывается из собственного поля и поля всех других частиц.

Частица имеет спин, которому соответствует движение одной единственной частицы. Аналогия с известной моделью вращающегося волчка только внешняя.

Для корректного построения модели и записи уравнений введем двух неподвижных наблюдателей, один из которых находится на некотором удале-

нии от центра массы частицы в т. О (рисунок). Масса частицы известна и равна массе покоя. Второй наблюдатель находится в центре массы частицы в т. О, вокруг которой совершается ее движение. Чтобы условие неподвижности центра массы выполнялось, на движение частицы надо наложить ограничение.



Схема, поясняющая движение частицы:

A, B — точки поворота; m_0V — импульс частицы; α — угол между радиус-вектором и вектором скорости.

Движение частицы происходит в шаровом слое, которое соответствующим поворотом координат приводится к случаю одномерного движения. Стрелками для т. А обозначены крайне возможные направления акта излучение — поглощение электромагнитной волны

Наложим ограничение в виде потенциала (его численное значение для протона и электрона будет найдено ниже), имеющего сферическую поверхность. Почему потенциал имеет сферическую поверхность, выясним позже, а пока будем рассматривать движение частицы на плоскости. Дадим следующее объяснение природы этого потенциала.

Частица создает во внешнем пространстве два поля: поле тяжести и поле электрического заряда. Эти поля дискретны. Механизм создания полей и механизм их воздействия на частицу тоже должен быть дискретным. В промежутках времени между этими воздействиями частица находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения, при этом она не может двигаться через т. О ввиду наличия ненулевого спина. Легко заметить, что движение с постоянной скоростью и массой относительно т. О осуществляется с постоянным спином. Поскольку поле тяжести на несколько десятков порядков слабее поля электрического заряда, то его оставим здесь без рассмотрения.

В некоторой т. А пространства на потенциальной поверхности частица должна проявить свойство электрического заряда в виде излучения электромагнитной волны. Будем полагать, что излучение происходит мгновенно.

Поскольку т. А (с координатами x_1, y_1) является точкой поворота, то частица должна изменить направление своего движения и сохранить момент количества движения. Это может быть только тогда, когда не изменилась величина скорости и массы, а угол поворота относительно радиус-вектора совпадает с углом, под которым частица приближалась к т. А. На рисунке этот угол обозначен буквой α . Таким образом, после точки поворота частица снова находится в состоянии прямолинейного и равномерного движения. Эти условия будут выполняться, если внешнее поле мгновенно вернет частице ту энергию, которая была ею потрачена на излучение. Это предположение основано на том, что окружающий нас мир находится в практически равновесном состоянии. Случаи возможного несовпадения энергии излучения с энергией поглощения не рассматриваются.

Легко заметить, что спин не изменится и в том случае, когда вектор скорости частицы (при сохранении ее абсолютного значения) после t . А направлен по касательной к любой точке окружности, диаметром которой является отрезок x_1N . При этом потенциальная поверхность имеет сферическую форму, а одному и тому же энергетическому состоянию частицы будет соответствовать спектр излучения (поглощения), имеющий минимальную и максимальную энергии. Минимальная энергия излучения соответствует случаю радиального взаимодействия. Максимальная энергия излучения соответствует случаю, когда вектор скорости частицы после акта излучения — поглощения направлен в противоположную сторону относительно вектора скорости до этого акта. На рисунке эти два крайних случая обозначены стрелками.

Фиксируя частицу многократно в различных точках пространства, можно заметить, что t . O является точкой центра массы частицы, что для внешнего наблюдателя является пригодным. Это позволяет относительно этой точки записывать выражение для спина, дающее численное значение величины, совпадающее с экспериментально измеренной.

Поскольку спин, масса и скорость частицы после точки поворота не меняются, то нам безразлично, с какой точки пространства начинать рассматривать движение частицы. Также можем не учитывать многомерность задачи, а рассматривать движение в одномерном потенциальном ящике.

Поскольку в предлагаемой модели, в пространстве между точками поворота, отсутствуют взаимодействия частицы с полем, то в этом пространстве потенциал равен нулю.

Теперь допустим, что в некоторый момент времени вектор скорости перпендикулярен оси z и оси x . Траектория частицы, имеющей скорость V , (см. рисунок) направлена в этом случае вдоль оси y и проходит на расстоянии x_1 от точки O .

Основные соотношения

Относительно наблюдателя, находящегося в t . O , масса частицы равна m_0 . В системе отсчета, связанной с частицей, ее масса равна m_{00} . Эту массу можно назвать массой абсолютного покоя. Несложно заметить, что в задаче имеется четыре неизвестных: x_1 , y_1 , m_{00} и V , значения которых будем искать, используя, в том числе, стационарное волновое уравнение Шредингера для частицы, находящейся в потенциальном ящике. Для нахождения четырех неизвестных необходимо иметь четыре уравнения. Выпишем первоначально очевидные:

$$S = m_0 V x_1; \quad (1)$$

$$m_0 = \frac{m_{00}}{(1 - V^2/C^2)^{0,5}}; \quad (2)$$

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 (\hbar/a)^2}{2m_0}, \quad (3)$$

где S — момент количества движения; E — кинетическая энергия осциллятора; n — квантовое число; \hbar — постоянная Планка; C — скорость света; a — ширина потенциального ящика.

Для того, чтобы записать четвертое уравнение, сделаем следующее предположение.

Напомним, чему равна размерность квадрата электрического заряда q^2

$$\text{размерность} \left[\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \right] = \text{размерность [энергия}\cdot\text{длина]},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

В квантовой механике имеется уравнение, позволяющее получить такую размерность, это волновое уравнение Шредингера. Действительно, для волновой функции ψ выражение

$$\frac{\hbar^2}{2m_0} \cdot \frac{d^2\psi}{dy^2} = -E\psi,$$

где ψ — волновая функция, несложно привести к виду

$$\frac{\hbar^2}{2m_0} \left[d \left(\frac{d\psi}{dy} \right) \right] \frac{1}{\psi} = -E dy. \quad (4)$$

Теперь будем считать, что уравнение Шредингера описывает не только волновые свойства частицы, но в нашем случае содержит и значения некоторых физических величин, являющихся константами. Будем считать, что интеграл от правой части (4) равен

$$\int_{y_1}^{y_2} dy E = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0}. \quad (5)$$

Пределы интегрирования соответствуют координатам точек поворота. Использованное здесь предположение в виде соотношения (5), в которое вошла величина электрического заряда и отсутствует гравитационная постоянная, говорит о наличии только электромагнитного взаимодействия между частицами. Напомним, что из бесконечного числа одинаковых частиц в качестве объекта рассмотрения мы выбрали одну.

Вынося E за знак интеграла, после подстановки y_1 и y_2 , несложно получить необходимое четвертое уравнение в явном виде

$$\frac{\pi^2 \hbar^2}{m_0 a} = \frac{q^2}{2\pi\epsilon_0}. \quad (6)$$

Из соотношений (1, 3, 6) при $n = 1$ — основное состояние частицы, для которой $S = 0,5\hbar$, получим

$$\begin{aligned} \text{tg}\alpha &= 1/\pi, \\ V &= \frac{q^2}{2\pi^2 \hbar \epsilon_0} \end{aligned} \quad (7)$$

и скорость частицы в потенциальном ящике не зависит от ее массы.

Результаты расчетов

Во всех расчетах значения величин массы протона, скорости света, постоянной \hbar Планка, электрической постоянной и электрического заряда брались с точностью до $m_0 = 1,67252 \cdot 10^{-27}$ кг, $C = 2,998 \cdot 10^8$ м/с, $\hbar = 1,0545 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $\epsilon_0 = 8,8543 \cdot 10^{-12}$ Кл²/нм² и $q = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ К. Расчеты по нахождению неизвестных x_1 , y_1 , m_{00} , V проводились по соотношениям (1, 2, 6, 7). В результате расчетов получены следующие значения: $x_1 = 2,2636 \cdot 10^{-14}$ м, $y_1 = 7,1113 \cdot 10^{-14}$ м, $V = 1\,392\,600$ м/с. Время движения частицы, как осциллятора, между точками поворота составляет около 10^{-19} с.

Как видно, величина скорости примерно в 215 раз меньше скорости света, так что использование нерелятивистского волнового уравнения оказывается оправданным, а значение массы абсолютного покоя очень близко к m_0 .

Проверку полученных результатов и модели проведем с помощью вычисления среднего радиуса электрона. Для этого предварительно найдем значения тех же величин для электрона, масса покоя которого принята равной $m_0 = 9,10965 \cdot 10^{-31}$ кг. В результате расчетов получено: $x_1 = 4,156 \cdot 10^{-11}$ м, $y_1 = 1,306 \cdot 10^{-10}$ м, а время движения между точками поворота составляет около $1,85 \cdot 10^{-16}$ с.

Как видно, электрон более "пухлый" (занимает большее пространство) по сравнению с протоном, что соответствует современным представлениям о размерах этих частиц. Зная x_1 и y_1 для электрона, найдем средний по времени радиус частицы и сравним получившийся результат с известными данными. Для среднего радиуса R имеем

$$R = \frac{\int_0^T r dt}{T},$$

где $t = T$ — время движения частицы от $y = 0$ до $y = y_1$. Эти координаты выбраны в виду симметрии движения. Поскольку $r = (x_1^2 + V^2 t^2)^{0,5}$, то после подстановки этого соотношения в интеграл и значений скорости и координат можно получить выражение для R . Расчет среднего радиуса частицы дал следующие значения: $R = 4,40235 \cdot 10^{-14}$ м — для протона и $R = 8,0843 \times 10^{-11}$ м — для электрона. Радиус первой боровской орбиты равен $a_1 = 5,2917 \cdot 10^{-11}$ м, а средний радиус электрона в атоме водорода в основном состоянии равен

$$R_1 = 3/2 a_1 = 7,937 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Как видно, полученный средний радиус электрона достаточно хорошо согласуется с радиусом R_1 . Имеющееся различие можно объяснить тем, что в атоме на движение частицы оказывает влияние кулоновское взаимодействие электрона с ядром. Объяснения отличия полученных величин от классического радиуса электрона и размера протона (по средним оценкам порядка 10^{-15} м·см, например, [1]) будут даны ниже.

С помощью полученных значений теперь несложно найти минимальный импульс электромагнитного поля (P), а в приближении однофотонного

излучения (поглощения) в радиальном направлении, и соответствующую ему минимальную частоту ω . Действительно, поскольку

$$P = m_0 V \cos \alpha \quad \text{и} \quad P = \hbar \omega / C,$$

то $\omega = 6,3103 \cdot 10^{21}$ Гц — для протона и $\omega = 3,437 \cdot 10^{16}$ Гц — для электрона.

Частота электромагнитного поля электрического заряда пропорциональна массе частицы, а ее максимальное значение, соответствующее движению частицы в противоположном направлении относительно начального, несколько больше ($\cos \alpha = 1$) приведенной.

Зная величину энергии, излучаемую и поглощаемую частицей, можно найти величину потенциала W , окружающего протон и электрон, на значение которого приближение однофотонного излучения (поглощения) не влияет. Расчеты (с использованием частоты) дали следующие значения потенциала: $W = 8,3$ МэВ — для протона и $W = 4,5$ КэВ — для электрона.

Несколько слов необходимо сказать о таких стабильных элементарных частицах, как фотон и гравитон. Отвлекаясь от обсуждения вопроса о возможности или невозможности существования нулевой массы покоя этих частиц, приведем значения $\text{tg } \alpha$, им соответствующие. Поскольку спин фотона и гравитона равны \hbar и $2\hbar$ соответственно, то $\text{tg } \alpha = 2/\pi$ и $\text{tg } \alpha = 4/\pi$ также соответственно. Отсюда видно, что толщина шарового слоя, в котором находится движущаяся частица, тем меньше, чем больше спин.

Обсуждение результатов

Введение соотношения типа (5) по сути не является новым. Очень похожим путем находился классический радиус электрона. Используя ту же закономерность с размерностями, можно записать [5]

$$Er = q^2 / 4\pi\epsilon_0.$$

Понимая под E величину энергии массы покоя, можно получить, что классический радиус электрона равен $2,17 \cdot 10^{-15}$ м. Как видно в рассматриваемой модели, радиус электрона оказывается примерно на четыре порядка больше приведенной величины. Такое различие можно объяснить следующим образом. Для излучения и поглощения электромагнитной волны в т. А частице реально требуется конечное время, в течение которого она проходит некоторое расстояние. Автор полагает, что классический радиус электрона (протона) примерно соответствует этому расстоянию, поскольку именно в окрестности этой точки частица проявляет свойство электрического заряда.

На основе этой модели можно выдвинуть гипотезу, объясняющую распределение электрического заряда в протоне. При облучении протона частицами высоких энергий осуществляется его возбуждение, время существования которого конечно. При возбуждении частицы возрастают ее импульс и масса. Точно описать поведение частицы в настоящее время, по видимому, невозможно. Качественное описание поведения частицы заключается в следующем. Представим себе на некоторое время, что покоящийся протон, имеющий большую массу по сравнению с электроном, является некоторым его возбужденным состоянием. Из сравнения их размеров, приведенного выше, видно, что протон проявляет свойство электрического заряда ближе к центру массы по сравнению с электроном. Отсюда можно

предположить, что при возбуждении протона он проникает в ту область пространства (ближе к центру массы), которая до возбуждения ему была недоступна. В этой области, при возвращении в исходное состояние, протон один раз, а возможно, и несколько, проявляет свойство электрического заряда.

Облучающий мишень поток частиц конечен. Возбуждение осуществляется первыми частицами этого потока, так что последующие взаимодействуют с возбужденным протоном там (ближе к центру массы), где прежде он находиться не мог. Такое поведение возбужденной частицы и ее взаимодействие с облучающим потоком экспериментатору представляется в виде распределения массы (заряда) протона. Осреднение этого распределения [1] дает величину радиуса протона порядка 10^{-15} м.

Отметим, что в рассматриваемой модели частицы проблема точечности электрического заряда и массы решается сама собой.

Кроме этого, поскольку существует время, в течение которого частица, при проявлении свойства электрического заряда, проходит некоторое расстояние в окрестности точек поворота, то в этот отрезок времени она имеет массу, отличную от массы покоя. Следовательно, такие величины, как масса покоя, энергия покоя, а возможно, и спина, можно рассматривать как средние величины.

Удивительным результатом является величина потенциала (8,3 МэВ), окружающего протон. Хорошо известно, что средняя энергия связи в ядре, приходящаяся на один нуклон, равна около 8 МэВ [4]. Сравнение этих величин дает основание полагать, что сильное взаимодействие между нуклонами в ядре и электромагнитное взаимодействие имеют единую природу.

В теории относительности (вспоминая преобразования, полученные Лоренцем), сам Лоренц полагал, что электрон относительно неподвижного наблюдателя сжимается в направлении своего движения. Отвлекаясь от детального рассмотрения вывода Лоренца, напомним, что критика его рассуждений направлена, главным образом, именно на это предположение. Абсолютное совпадение преобразований Лоренца с преобразованиями Эйнштейна считается удивительным. Воспользовавшись преобразованиями Эйнштейна, легко заметить, что сферическая поверхность, ограничивающая движение частицы в неподвижной системе координат, приобретает форму эллипсоида вращения в движущейся системе координат, так что малая его ось совпадает с направлением движения. Отсюда выясняется, что предположение Лоренца верно.

Найденная величина потенциала протона и электрона позволяет вести поиск их связанных состояний ($n = 2, 3 \dots$), экспериментальное нахождение которых явилось бы хорошим дополнительным подтверждением предлагаемой модели стабильной элементарной частицы.

Автор выражает благодарность Н. М. Кузнецову и А. А. Рухадзе за полезные советы и замечания.

Л и т е р а т у р а

1. Фрауэнфельдер Г., Хенли Э. Субатомная физика. — М.: Мир, 1979.
2. Hofstadter R. // Review of modern physics, 1956. V. 28. P. 214.
3. Астрофизика космических лучей/ Под ред. В. Л. Гинзбурга. — М.: Наука, 1984.
4. Ахизер А. И., Рекало М. П. Элементарные частицы. — М.: Наука, 1986.
5. Борн М. Атомная физика. — М.: Мир, 1965.

MODEL OF STABLE ELEMENTARY PARTICLE

E. I. Timofeev

General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

From unlimited system of regularly distributed motionless similar particles a field-particle subsystem has been taken for consideration. The charged particles field is determined only by electromagnetic interaction of charges. The particle movement, determined by its spin, is going in spherical layer, so its mass center is motionless. The layer upper surface is connected with the spherical potential consisted of the particle discret field irradiation and of the particle discret field absorption of all others charges. The irradiation and absorption are committed instantaneously and coincide as to time in each turning point. Three dimension task is transformed into the case of one dimension particle movement in the potential box by the turn of coordinates. To solve the task the equations for ψ_{sin} and discret energy levels are completed by the equation which connects the energy, the potential box width with the charge square. As a result the average radiuses, potential values on the spheric surface and the electromagnetic field frequency of electrical charge for proton and electron are received for the basic state.