

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОСТОЯННЫМИ

© 2012 г. Н.А. Мискинова¹, Б.Н. Швилкин²

¹ *Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Приводятся эмпирические формулы, устанавливающие связь постоянной тонкой структуры и скорости света с отношением масс протона и электрона и позволяющие рассчитывать их значения с точностью, отличающейся от измеренных современными методами лишь в восьмой–десятой значащих цифрах. Формулы также предсказывают возможность возникновения излучения на частоте, близкой к 10^{12} Гц, и расчета потенциала ионизации атома водорода. Делается попытка объяснения формул.

Ключевые слова: физические постоянные, скорость света, масса, протон, электрон.

PACS: 030000, 0365-w, 0620Jr

Введение

В своих постулатах Н. Бору удалось сформулировать правила квантования, которые характеризуют пребывание электрона в атоме на так называемой стационарной орбите и переходы из одного квантового состояния в другое. Однако в них нет сведений о поведении электрона в процессе этих переходов и механизме схода электронов со “стационарных” орбит. Об этом, в частности, упоминается в работе [Фейнман, 1988].

Физические постоянные – 28 фундаментальных констант и их различные комбинации – играют важную роль в теоретической физике. Эти константы нельзя получить в рамках стандартной модели физических элементарных частиц. М. Планк, используя постоянную всемирного тяготения G , скорость света c и постоянную Планка \hbar , из соображений размерности ввел величину

$$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3},$$

называемую в настоящее время планковской длиной. Чрезвычайная малость длины ($l_{\text{Pl}} \approx 10^{-33}$ см) и времени ($t_{\text{Pl}} = l_{\text{Pl}}/c \approx 10^{-44}$ с) натолкнула физиков на мысль, что на таких расстояниях пространство – время может быть дискретно. Планковская длина l_{Pl} определяет “квант” пространственного расстояния, а время t_{Pl} определяет “квант” времени. В результате возникла новая теория – квантовая теория поля в дискретном пространстве – времени.

Другой классический пример полезного влияния эмпирических формул на развитие теории – это формула Бальмера, связывающая частоту излучения с физическими постоянными и квадратом целого числа. Именно отталкиваясь от этой формулы, сначала Н. Бор сформулировал свои постулаты, а затем Э. Шредингер построил свое знаменитое уравнение [Wichmann, 1974].

Таким образом, в ряде случаев наличие той или иной взаимосвязи между физическими постоянными может означать, что она – следствие пока неизвестной теории, из уравнений которой эта зависимость и следует.

Посмотрим под этим углом зрения на постоянную тонкой структуры – наиболее фундаментальную физическую константу. Постоянная тонкой структуры представляет

собой безразмерную величину. Впервые она была введена в 1916 г. [Зоммерфельд, 1926]. Постоянная тонкой структуры характеризует взаимодействие электрона с электромагнитным полем. Она также определяет расщепление уровней энергии в атоме. Постоянная тонкой структуры связывает три независимые друг от друга фундаментальные физические постоянные: e – квант электрического заряда, \hbar – квант действия, c – скорость света. Начиная с 1998 г. принято считать, что скорость света в вакууме $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ м/с, т.е. точно определяются девять значащих цифр величины скорости. Фундаментальные величины e , \hbar и c связаны между собой выражением

$$\alpha = e^2/\hbar c, \quad (1)$$

где α и есть постоянная тонкой структуры. Так она выглядит в системе единиц CGS. Постоянную тонкой структуры можно определить еще следующим образом:

$$\alpha = v_1/c, \quad (2)$$

где $v_1 = e^2/\hbar$ – скорость электрона на первой боровской орбите.

Для того чтобы величина α не зависела от выбора систем единиц, нужно ввести коэффициент k , который может быть размерным и зависит от выбора единиц заряда, длины и времени. В самом общем случае

$$\alpha = ke^2/\hbar c. \quad (3)$$

В системе единиц СИ $k = 1/4\pi\epsilon_0 \approx 9 \cdot 10^9$ м/Ф, где $\epsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Впервые попытка теоретического определения величины α была предпринята А. Эддингтоном [Eddington, 1929, 1930], который нашел, что $\alpha \approx 1/137$. В 1936г. В. Гайзенберг предложил эмпирическое соотношение $\alpha = 2^{-4}3^{-3}\pi$, в этом случае $\alpha^{-1} = 137.51$. В 1971г. А. Уайлер [Wyler, 1971] дал другое выражение:

$$\alpha = \frac{9}{8\pi^4} \left(\frac{\pi^5}{2^45} \right)^{1/4},$$

при этом $\alpha^{-1} = 137.03608$. Впоследствии теоретически получить численное значение α мечтали многие теоретики, но этого еще никому сделать не удалось. О постоянной тонкой структуры Р. Фейнман [1988, с.114] сказал, что она остается загадкой на протяжении более пятидесяти лет и любой хороший физик-теоретик записывает ее на стене и думает над ее значением, при этом возникает желание узнать, чем определяется численное значение этой константы - связано ли оно с числом π или, быть может, с основанием натуральных логарифмов? - «магическое число, которого человек совсем не понимает ...».

Эмпирическая формула для постоянной тонкой структуры

Экспериментальное определение α в настоящее время осуществляется достаточно точно. Для этого значение отношения e/\hbar , получаемое из эффекта Джозефсона, комбинируется с некоторыми столь же хорошо известными константами. При этом используется метод наименьших квадратов. Окончательные же значения констант получаются усреднением не всех экспериментальных данных, а лишь тех, которые хорошо согласуются друг с другом. Как видно из таблицы, по данным “CODATA”, значение α , определяется с точностью до девятой значащей цифры.

Таблица. Расчетные значения α_p^{-1} и экспериментальные α_s^{-1} и M/m , по данным CODATA (Cohen et al., 1973,1986, Mohr et al.,1998,2002,2006) в разные годы

Год	α_p^{-1}	α_s^{-1}	M/m
2006	137.036038999	137.035999679(94)	1836.15267247(80)
2002	137.03603882	137.03599911(46)	1836.15267261(85)
1998	137.03603882	137.03599976(50)	1836.1526675(39)
1986	137.03603604	137.0359895(61)	1836.152701 (37)
1973	137.03599675	137.03604(11)	1836.15152(70)

Согласно новейшим экспериментальным измерениям, обобщенным по многим исследованиям и опубликованным в 2008 г. [Mohr et al., 2008], $\alpha^{-1} = 137.035999679(94)$, в скобках здесь и далее указаны ошибки измерения величин. Данные работ [Gabrielse et al., 2006; Odom et al., 2006], имеющие на порядок меньшую погрешность, мало отличаются от приведенных в работе [Mohr et al., 2008].

Нами была получена эмпирическая формула для расчета постоянной тонкой структуры [Мискинова, Швилкин, 2002а,б; 2004]:

$$\alpha_p^{-1} = \frac{\pi \left[\left(\frac{M}{m} \right)^{1/2} + 1 - \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \right]}{1 + \frac{m}{\pi\sqrt{2}M}}, \quad (4)$$

где M – масса протона; m – масса электрона. Из формулы (4) видно, что α_p^{-1} зависит только от отношения масс протона и электрона M/m . Для измеренного недавно современными методами отношения масс $M/m = 1836.15267247(80)$ [Mohr et al., 2008] (гарантируется точность измерения до девятой значащей цифры), расчетное значение $\alpha_p^{-1} = 137.03603899$. Оно отличается от экспериментально найденного в восьмой значащей цифре: $\Delta\alpha^{-1} = 0.00003932$, $\Delta\alpha^{-1}/\alpha_s^{-1} = 2.9 \cdot 10^{-7}$ ($2.9 \cdot 10^{-5} \%$).

Для скорости света в вакууме имеем

$$c_p = \frac{\pi v_1 \left[\left(\frac{M}{m} \right)^{1/2} + 1 - \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \right]}{1 + \frac{m}{\pi\sqrt{2}M}}. \quad (5)$$

Рассчитанная по формуле (5) с учетом величины v_1 , взятой из работы [Mohr et al., 2008], скорость $c_p = 2.99792545 \cdot 10^8$ м/с только в восьмой значащей цифре отличается от принятого значения скорости света в вакууме $c_s = 2.99792458 \cdot 10^8$ м/с [Mohr et al., 2008], различие в значениях скоростей $\Delta c = 86$ м/с. Заметим, что это отличие может быть уменьшено при учете релятивистской поправки. При увеличении массы электрона, всего на $6 \cdot 10^{-5} \%$ достигается полное совпадение между измеренным и расчетным значениями скорости света в девятой значащей цифре.

Начиная с А. Зоммерфельда [1916, с.258], считалось, что “в теории тонкой структуры слились вместе три главных направления развития современной теоретической физики: электронная теория, квантовая теория и теория относительности. На это указывает само выражение для постоянной тонкой структуры (1), в которое входит e – представитель электронной теории, \hbar – основа основ квантовой теории, а c происходит из теории относительности”. Появление в формуле (4) для постоянной α_p^{-1} масс основных частиц вещества – протонов и электронов, возможно, имеет какое-то фундаментальное значение.

Отметим, что Р. Фейнман [1988] весьма скептически относился к эмпирическим закономерностям, считая, что при наличии компьютера такие формулы можно получить быстро. По нашему мнению, он не прав. Действительно, в знаменателе формулы (4) основным слагаемым является единица, а поправка к ней $\frac{m}{\pi\sqrt{2}M} = 1.226 \cdot 10^{-4}$, или

примерно $1.2 \cdot 10^{-2} \%$. В числителе же формулы (4) поправка к единице составляет примерно 0.68%. Таким образом, даже наименьшие по сравнению с единицей слагаемые, входящие в формулу (4), более чем на три порядка превышают расхождения экспериментальных и расчетных данных и, следовательно, не могут быть подгоночными параметрами.

Для сравнения в таблице представлены результаты расчетов α_p^{-1} по формуле (4) для более ранних экспериментальных данных о физических постоянных. Из таблицы следует, что значение $\alpha_p^{-1}/\alpha_s^{-1}$ уменьшилось по сравнению с ранними данными.

Эвристический “вывод” формулы

Остановимся на том, из каких соображений была получена формула (5). Рассмотрим трехчлен, имеющий размерность скорости

$$v = \pi \left[v_1 \left(\frac{M}{m} \right)^{1/2} + v_1 - \frac{v_1}{\pi\sqrt{2}} \right]. \quad (6)$$

Можно предположить, что выражение (6) характеризует собой электрон, покинувший стационарное состояние в атоме. Появление в нем множителя π может вытекать из правил квантования Бора при сходе электрона с круговой орбиты. Действительно

$$m(\pi v_1)2r = h.$$

Увеличение скорости v_1 в $(M/m)^{1/2}$ раз при сходе электрона из стационарного состояния в атоме происходит, возможно, по той же причине, что и при переходе электрона из квазистационарной ионно-звуковой волны в квазинейтральную плазму при прохождении по плазме такой волны. В квазинейтральной ионно-звуковой волне электроны тянут за собой ионы. Движение тех и других частиц происходит с одинаковой скоростью, называемой скоростью ионного звука [Шафранов, 1963; Швилкин, 1978; Швилкин, Мискинова, 1987]. Скорость электронов в волне замедляется. Скорость ионного звука определяется температурой электронов и массой ионов:

$$v_s = (kT_e / M)^{1/2}.$$

Получается, что скорость электронов в ионно-звуковой волне меньше, чем скорость их теплового движения:

$$v_{T_e} = (kT_e / m)^{1/2},$$

в $(M/m)^{1/2}$ раз. При выходе из волны скорость электрона возрастает в $(M/m)^{1/2}$ раз.

Таким образом, можно предположить, что волна де Бройля в атоме в каком-то смысле аналогична ионно-звуковой волне в квазинейтральной плазме, а скорость электрона в атоме при сходе со стационарной орбиты по какой-то причине возрастает в $(M/m)^{1/2}$ раз.

Последний член в числителе выражения (6) может, по-видимому, характеризовать тормозной импульс, необходимый для схода электрона со стационарной орбиты. (Это соответствует импульсу покидающего орбиту планеты спутника.)

Скорость c_0 и коротковолновая граница спектра реликтового излучения

Наряду со скоростью c_p , определяемой выражением (5), можно получить также выражение еще для одной скорости [Мускинова, Швилкин, 2002б]

$$c_0 = \frac{\pi v_1 \left[\left(\frac{M}{m} \right)^{1/2} + 1 - \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \right]}{1 + \frac{\pi\sqrt{2}M}{m}}, \quad (7)$$

отношение

$$c_0/c = \frac{m}{\pi\sqrt{2}M} .$$

(8)

Рассчитанная по формуле (8) величина $c_0 = 3.6749139 \cdot 10^4$ м/с. Физический смысл скорости c_0 не вполне ясен. Заметим только, что электроны, обладающие скоростью c_0 , при их торможении способны породить кванты излучения с частотами, простирающимися вплоть до частоты

$$\nu \approx mc_0^2/2h = m^3 c^2/4\pi^2 h M^2 . \quad (9)$$

Найденная по формуле (9) частота $\nu \approx 1 \cdot 10^{12}$ Гц. Длина волны такого излучения $\lambda \approx 0.03$ см. Интересно, что эти значения частоты и длины волны совпадают с соответствующими значениями граничных частот и длин волн коротковолновой границы микроволнового чернотельного фонового (реликтового) излучения (см., например, [Зельдович, Новиков, 1975]).

Отметим, что температуру, близкую к реликтовой, можно получить из соотношения

$$T_p = mc_0^2/3\pi^2 k , \quad (10)$$

где k – постоянная Больцмана. Действительно, измеренная реликтовая температура $T_s = (2.728187 \pm 0.000087)$ К [De Bernardis et al., 2000], а рассчитанная по формуле (10) температура $T_p = 3.0093901$ К. Следовательно, значения температур T_s и T_p отличаются друг от друга только на 0.2812031 К. Завышенная расчетная величина температуры T_p по сравнению с найденной экспериментально T_s можно, видимо, объяснить тем, что при расчетах бралась максимальная скорость свободного электрона при излучении. На самом деле следует использовать несколько меньшую скорость, соответствующую ее наиболее вероятному значению.

Считается, что наблюдаемый экспериментально микроволновый фон радиоизлучения есть результат Большого взрыва и последующего расширения Вселенной. Однако существует и другая точка зрения. Полученные, например, в работах [Троцкий, 1995, 1996] результаты позволяют сделать вывод о том, что Вселенная представляет собой практически стационарную неограниченную систему галактик, а фоновое излучение на сверхвысоких частотах – это суммарное тепловое излучение звезд в оптическом и радиодиапазонах (гипотеза звездной природы фона).

Возражение против формулы (10) может заключаться в том, что температура реликтового излучения есть некоторое свойство, относящееся к современной эпохе, а температура реликтового излучения должна меняться со временем. Формула же (10) содержит постоянные, не зависящие от эпохи, на что авторы хотели бы обратить внимание. С другой стороны, найденное экспериментально значение безразмерной энтропии – отношения числа реликтовых фотонов, характеризующих Большой взрыв, к числу нуклонов во Вселенной, равное $10^9 - 10^{10}$, не получило теоретического объяснения [Сахаров, 1967]. Это обстоятельство достаточно принципиально, так как влечет за собой недоверие к микроволновым измерениям.

Энергия ионизации атома водорода

Считается, что полная энергия электрона на основном уровне атома водорода равна энергии ионизации. Если же предположить, что эта энергия не равна энергии ионизации, а превышает ее, то она идет не только на вырывание электрона из атома, но и на сообщение ему некоторой минимальной энергии. При этом вылетевший свободный электрон в процессе ионизации атома не может иметь нулевую энергию. В соответствии с этим имеем

$$\frac{mv_1^2}{2} = qV_i + \frac{mc_0^2}{2}, \quad (11)$$

откуда потенциал ионизации

$$V_i = \frac{m}{2q}(v_1^2 - c_0^2) \quad (12)$$

Найденное из уравнения (12) расчетное значение потенциала ионизации атома водорода при массе m и заряде электрона q , взятых из [Mohr, 2008], $V_{ip}=13.60185$ В. Эта величина только на $2.5 \cdot 10^{-2}\%$ отличается от найденной на опыте величины $V_i=13.5984$ В [Handbook..., 1997]. Из проведенного здесь сравнения потенциалов ионизации, с учетом точности современного эксперимента по определению потенциала ионизации, можно считать, что расчетное и экспериментальное значения потенциалов ионизации атома водорода совпадают.

Выводы

Предложенные в работе формулы позволяют выразить постоянную тонкой структуры α и скорость света в вакууме c через отношение массы протона к массе электрона. В результате обнаруживается связь не только заряда электрона, постоянной Планка и скорости света, но и отношения масс M/m . При этом значения α и c отличаются от общепринятых соответствующих величин лишь в восьмой значащей цифре. Учет релятивистской поправки улучшает согласие между расчетом и экспериментом.

При получении формул учтено правило квантования Бора и предполагаемое изменение скорости, связанное с уходом электрона из квазинейтральной системы электрон – атомный остаток. Заметим, что при расчетах появляется скорость c_0 ($c_0 \approx 3.67 \cdot 10^4$ м/с). Обладающие такой скоростью электроны при их торможении могли бы породить кванты излучения, частота и длина волны которых совпадают с соответствующими значениями частот и длин волн коротковолновой границы микроволнового чернотельного фонового излучения. Учет найденной в работе скорости c_0 позволяет также рассчитать потенциал ионизации атома водорода, который отличается от найденного экспериментально современными методами примерно на $2.5 \cdot 10^{-2}\%$. Можно ожидать, что предложенная нами эмпирическая формула для постоянной тонкой структуры будет в дальнейшем получена теоретически, как это уже бывало ранее с некоторыми другими величинами в физике.

Литература

- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Структура и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 735 с.
Зоммерфельд А. Структура атома и спектры (пер. с нем. изд., 1922). Ч. 1 / Ред. А.Ф. Иоффе, П.И. Лукирский. М.; Л.: Госиздат, 1926. 258 с.
Мискинова Н.А., Швилкин Б.Н. О связи постоянной тонкой структуры с соотношением масс протона и электрона // Наука и технология в России. 2002а. № 4 (55). С.19.

- Мискинова Н.А., Швилкин Б.Н.* К вопросу о постоянной тонкой структуры // Наука и технология в России. 2002б. № 5/6 (56/57). С.20.
- Мискинова Н.А., Швилкин Б.Н.* Об эмпирической формуле постоянной тонкой структуры // Изв. вузов. Физика. 2004. №11. С.97–98.
- Сахаров А.Д.* Нарушение CP-инвариантности. C-симметрия и барионная асимметрия // Письма ЖЭТФ. 1967. № 5 (1). С.32–35.
- Троицкий В.С.* Экспериментальные свидетельства против космологии Большого взрыва // УФН. 1995. Т.165, № 6. С.703–707. (Доклад на научной сессии Отдела общей физики и астрономии РАН 30 ноября 1994г.).
- Троицкий В.С.* Наблюдательная проверка Космологической теории, состояние и перспективы // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 4. С.21–34.
- Фейнман Р.* КЭД странная теория света и вещества. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988. 114 с.
- Шафранов В.Д.* Вопросы теории плазмы. / Ред. М.А. Леонтович. М.: Государственное издательство литературы по атомной науке и технике Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР, 1963. Вып.3. С.3–140.
- Швилкин Б.Н.* Газовая электроника и физика плазмы в задачах. М.: Наука, 1978. 160 с.
- Швилкин Б.Н., Мискинова Н.А.* Физическая электроника в задачах. М.: Наука, 1987. 256 с.
- Cohen E.R., Taylor B.N.* The 1973 Least-Squares Adjustment of the Fundamental Physical Constants // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1973. V. 2, N 4. P.663–734.
- Cohen E.R., Taylor B.N.* The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants // Rev. Mod. Phys. 1987. V. 59 (4). P.1121–1148.
- De Bernardis P., Ade P.A., Bock J.J. et al.* A flat universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation // Nature. 2000. V. 404. P.955–959.
- Eddington A.S.* The Charge of an Electron // Proc. Roy. Soc. 1929. V. 122, N A789. P.358–369.
- Eddington A.S.* The Interaction of Electric Charges // Proc. Roy. Soc. 1930. V. 126, N 800. P.696–727.
- Gabrielse G., Hanneke D., Kinoshita T., Nio M., Odom B.* New Determination of Fine Structure Constant from the Electron g Value and QED // Phys. Rev. Lett. 2006. PRL 97, 030802. P.1–4.
- Handbook of Physical Quantities / Eds. I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov. New York; London; Tokyo: Boca Raton. CRC Press. Inc., 1997. P.516.
- Mohr P.J., Taylor B.N.* CODATA Recommended values of the fundamental physical constants: 1998 // Rev. Mod. Phys. 2000. V. 72, N 2. P.351–495.
- Mohr P.J., Taylor B.N.* CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2002 // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P.1–107.
- Mohr P.J., Taylor B.N., Newell D.B.* CODATA Recommended Values of the Fundamental physical constants: 2006 // Rev. Mod. Phys. 2008. V. 80. P.633–730.
- Odom B., Hanneke D., D'Urso B., Gabrielse G.* New Measurement of the Electron Magnetic Moment Using a One-Electron Quantum Cyclotron // Phys. Rev. Letters. 2006. PRL 97, 030801. P.1–4.
- Wichmann E.H.* Quantum physics. Berkeley physics course. V.IY. McGraw-Hill book Company, 1974. 414 p.
- Wyller A.* A mathematician's version of the fine-structure constant // Phys. Today. 1971. V.24 (8). P.17–19.