

43. Сравним макроскопические поля с полями, определяемыми *естественными единицами квантовой электродинамики*. По сравнению с ними даже электрические поля в атомах оказываются малыми. В качестве естественной единицы поля (электрического или магнитного) можно взять поле, соответствующее плотности энергии, равной

$$\frac{(\text{энергия покоя электрона})}{(\text{комптоновская длина волны электрона})^3}.$$

Этой плотности отвечает единица электрического поля, равная $4 \cdot 10^{17}$ В/м, и магнитного $1,3 \cdot 10^{13}$ Гс. Квантовая электродинамика предсказывает заметные отклонения от уравнений Максвелла в вакууме для таких полей. В частности, в таких полях будет нарушен принцип суперпозиции и электромагнитное поле нельзя будет описать линейными уравнениями. Для слабых полей, доступных в лаборатории, квантовая электродинамика также предсказывает отклонения от линейности. Эти отклонения, однако, фантастически малы и в макроскопическом масштабе не имеют практического значения. До сих пор их не удалось наблюдать в макроскопических опытах. Макроскопические поля, измеренные в естественных единицах, чрезвычайно малы. Это связано с малостью постоянной тонкой структуры α . Благодаря такой малости линейные уравнения Максвелла оказываются чрезвычайно точными.

О численных оценках

44. Скажем несколько слов о численных оценках некоторых физических величин. Читателю может показаться, что говорить об этом незачем. Вычисления кажутся ему необходимым злом (особенно в домашних заданиях), и он не видит в них никакой физики. Однако это неверно. Существуют «плохие» и «хорошие» вычисления. Последние требуют некоторой *физической интуиции*. Чтобы показать различие между «плохими» и «хорошими» расчетами, рассмотрим пример. При изучении тонких деталей спектра атома водорода было обнаружено, что спектральная линия, которая в спектрометре с плохим разрешением кажется одиночной, при переходе к прибору с лучшим разрешением разделяется на несколько близко расположенных линий. В этом случае говорят, что спектр имеет *тонкую структуру*. При теоретическом изучении тонкой структуры вводится энергия E_f , характеризующая типичное расстояние между соседними линиями. Теория дает следующее выражение для E_f :

$$E_f = e^8 m / 32 \hbar^4 c^2. \quad (44a)$$

Можно взять численные константы из табл. 2А и подставить их в выражение (44а). Это было бы, однако, «плохим» способом вычисления. Во-первых, потому, что неприятно вычислять e^8 или \hbar^4 , во-вторых, смысл формулы (44а) сильно затемнен: пока вычисления не окончены, мы не «знаем» порядка величины E_f и формула

(44a) ничего не говорит нам о физической природе эффекта тонкой структуры. Теперь сгруппируем константы формулы (44a) в отдельные множители, имеющие определенный смысл:

$$E_f = \frac{1}{16} \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^4 \left(\frac{mc^2}{2} \right) = \frac{1}{16} \alpha^2 \left(\frac{\alpha^2 mc^2}{2} \right) = \frac{\alpha^2}{16} R_\infty. \quad (44b)$$

Здесь правая часть делает весьма прозрачным смысл выражения E_f для расстояния между уровнями тонкой структуры. Это поправка порядка 10^{-5} от значения основных энергетических уровней. Очень просто получить значение этой поправки в электрон-вольтах: для этого нужно 13,6 эВ умножить на постоянную $\alpha^2/16$. Мы убедились, что простая перегруппировка множителей может сильно упростить вычисления и даже сделать большее — позволить проникнуть в физическую природу явления. В нерелятивистской теории атома водорода (если считать массу протона бесконечной, а электрон не имеющим внутреннего магнитного момента) нет места для эффекта тонкой структуры. Чтобы убедиться в этом, вспомним, что в такой теории фигурируют константы e , m и \hbar , но нет константы c . Действительно, энергия ионизации R_∞ не зависит от c . Скорость света c входит, однако, в знаменатель выражения для E_f , и если мы пользуемся нерелятивистским приближением, в котором $c = \infty$, то получаем $E_f = 0$. Таким образом, величину E_f можно считать релятивистской поправкой к основной структуре энергетических уровней. Можно ожидать, что эта поправка будет иметь порядок $(v/c)^2 R_\infty$, где v — скорость электрона. Выше мы производили оценку скорости электрона и нашли, что $v/c \sim \alpha$. Таким образом, мы получаем оценку, аналогичную (44b). Итак, тонкая структура спектральных линий водорода представляет собой релятивистский эффект.

45. «Постоянная тонкой структуры» — такое название величина α получила в связи с работой Зоммерфельда о тонкой структуре линий водорода. Важное значение этой постоянной было впервые осознано в связи с формулой (44b). Когда Бор создал свою теорию атома водорода, было не принято писать энергию ионизации атома водорода в виде

$$R_\infty = \alpha^2 mc^2 / 2, \quad (45a)$$

а писали так:

$$R_\infty = e^4 m / 2 \hbar^2. \quad (45b)$$

Если бы кто-нибудь в то время догадался написать выражение для R_∞ в виде (45a), то постоянная α , возможно, была бы названа «постоянной основной структуры», и против этого нельзя было бы возразить. Выражение (45a) является «лучшей» формулой для R_∞ : оно объясняет нам физический смысл этой величины. Как мы уже указывали, α является фундаментальной константой связи между электромагнитным полем и элементарным зарядом. Атом представляет собой «слабо связанную структуру» с «медленно» движущимся электроном, потому что α мала по сравнению с единицей. Именно по этой причине нерелятивистская теория атома является хорошим

приближением. Релятивистские поправки к этой теории имеют порядок $(v/c)^2$, или α^2 .

46. Мы надеемся, что рассмотренный пример дает некоторое представление о способе выполнения численных расчетов. В наших выражениях следует пытаться выделить комбинации физических констант, которые имеют ясный физический смысл, и сгруппировать множители или члены до того, как подставлять в формулу числа. Такая операция не проста, и, не понимая физического смысла явления, невозможно выполнить ее правильным образом.

Домашние задания, помещенные в этой книге, — не упражнения в арифметике. Их цель — познакомить читателя с порядками величин в квантовой физике и научить применению идей, рассмотренных в тексте, к конкретной физической ситуации.

Дополнительная тема: фундаментальные константы природы *)

47. Подумаем над следующим интересным вопросом: сколько в природе независимых фундаментальных констант?

За этим вопросом кроется следующая идея. Современные физические теории дают определенные соотношения между параметрами, характеризующими физическую систему. Например, энергия ионизации водорода может быть выражена через постоянные m , e , h или, если хотите, через m , c и α . Если значения констант m , e и h нам известны, то можно предсказать значение ионизационного потенциала и проверить нашу теорию, сравнив это предсказание с экспериментом. Таким же образом может быть «теоретически понято» весьма большое число других физических параметров: их можно выразить через несколько *фундаментальных констант*.

Мы должны объяснить выражение «теоретически понято». Мы рассматриваем некий параметр как «теоретически понятый», если можем указать на определенное уравнение, которое в принципе его определяет, независимо от того, достаточно ли наших ограниченных математических возможностей для получения численного значения параметра.

Разделение физических констант на фундаментальные константы и производные параметры в принципе весьма произвольно. Практически мы считаем фундаментальными такие константы, которые входят в наши уравнения наиболее «простым» путем и имеют наиболее ясный физический смысл. Очевидно, что разумнее считать постоянную тонкой структуры α фундаментальной константой, а энергию ионизации водорода — производным параметром, нежели наоборот.

Набор независимых фундаментальных констант представляет собой ряд физических параметров, не связанных друг с другом теоретически. Мы не можем вывести их численное значение. Каждая из них должна быть определена из опыта. Нас интересует вопрос

*) При первом чтении можно пропустить.