

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

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  $\alpha$ . 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  $\alpha$  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.

о достаточном числе независимых констант, т. е. о числе констант, которые нужно знать, чтобы иметь возможность теоретически вычислить все другие физические параметры.

Очевидно, что такой вопрос имеет смысл лишь в рамках современных физических теорий. Величина, которую мы сегодня считаем чисто эмпирической, завтра, может быть, будет «объяснена» с помощью новой теории.

48. Чтобы понять современное состояние рассматриваемой проблемы, перечислим ряд фундаментальных констант.

1) Постоянная тонкой структуры:

$$\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137.$$

2) Отношение масс электрона и протона:

$$\beta = m/M_p \approx 1/1836.$$

3) Гравитационная постоянная в естественных атомных единицах:

$$\gamma = \frac{(\bar{M}_p^2 G)/(\hbar/M_p c)}{M_p c^2} = 5,902 \cdot 10^{-39}.$$

4) Константа, характеризующая силу так называемого *слабого взаимодействия*, ответственного за распад многих ядер. В настоящее время мы считаем, что слабые взаимодействия не имеют ничего общего с ядерными силами, электромагнетизмом и гравитацией. Все явления, связанные со слабыми взаимодействиями, можно считать следствием некоторого универсального взаимодействия, характеризуемого *одной-единственной* константой связи. Это фундаментальное взаимодействие примерно в  $10^{14}$  раз меньше ядерного взаимодействия.

5) Отношение масс электрона и  $\mu$ -мезона:

$$m/m_\mu \sim 1/200.$$

*Мюон* (или  $\mu$ -мезон) представляет собой элементарную частицу, которая ничем, кроме массы, не отличается от электрона. В настоящее время совершенно не ясно, какова роль  $\mu$ -мезонов в строении вещества.

6) Наконец, существует несколько констант, описывающих *сильные взаимодействия*. Частным случаем этих взаимодействий являются ядерные силы. Теоретическая ситуация весьма неясна, и нам неизвестно, сколько нужно иметь независимых констант, чтобы описать ядерные силы. Рассмотрим две такие константы:

$$S_1 = \frac{(\text{масса } \pi\text{-мезона})}{(\text{масса протона})} \approx 0,15, \quad S_2 = \frac{B_D}{M_p c^2} \approx 2,35 \cdot 10^{-3}.$$

Здесь  $B_D = 2,23$  МэВ — энергия связи дейтрона.

Выбор константы  $S_2$  произволен. Мы остановились на ней, так как ее физический смысл хорошо понятен. Это одна из возможных констант, пригодных для описания ядерных сил. В ней нет ничего особенно «фундаментального», но она является мерой ядерных

сил. Другими словами, мы считаем, что энергии связи всех остальных ядер могут быть в принципе выражены через константы  $S_1$  и  $S_2$ . В этом случае мы обнаруживаем весьма большую широту взгляда на «теоретическое понимание проблемы». Ведь нам неизвестны «правильные уравнения» и наша оптимистическая надежда, что такие уравнения, включающие  $S_1$  и  $S_2$ , существуют, может оказаться совершенно необоснованной.

Действительно, в настоящее время мы не можем вычислить массы таких частиц, как  $K$ -мезоны, нуклоны,  $\Lambda$ -частицы и т. п. Мы не имеем соответствующей теории, и отношения всех этих масс следовало бы внести в наш перечень фундаментальных констант. С другой стороны, в один прекрасный день может появиться теория, которая позволит вычислить массы некоторых, а может быть и всех, сильно взаимодействующих частиц. Предельно оптимистическая точка зрения заключается в том, что «точная» теория сильных взаимодействий не будет содержать эмпирических констант. Все, включая и константы  $S_1$  и  $S_2$ , можно будет вычислить. Однако в настоящее время вопрос о числе констант, описывающих сильные взаимодействия, остается совершенно открытым.

49. Мы не включали в перечень констант весьма замечательную эмпирическую константу — отношение заряда электрона к заряду протона. Опыты Кинга, выполненные в 1960 г., показали, что это отношение равно  $-1$  с погрешностью  $1/10^{20}$ , т. е.  $e_e/e_p = (-1 \pm 10^{-20})$ .

Кинг измерил также отношение заряда ядра гелия к заряду протона и показал с той же фантастической точностью, что это отношение равно  $2$  \*). Эти результаты в сильнейшей степени поддерживают идею, согласно которой заряд любой частицы кратен заряду электрона. Существует много доводов в ее пользу, но ни один из них не обладает точностью опыта Кинга. Физики уже давно верят в «квантование заряда». Однако они не могут объяснить с высот теории, почему все заряды кратны заряду электрона.

Почему же мы тогда не включим в наш перечень константу  $(-1 \pm 10^{-20})$ ? Потому, что все наши теории оказались бы опрокинутыми, если бы выяснилось, что эта величина не равна в точности  $-1$ . Мы можем спокойно допустить, что эмпирические константы, приведенные в нашем перечне, будут несколько иными; в этом смысле они и эмпирические. Например, квантовая электродинамика вполне устояла бы, если бы более точные измерения показали, что постоянная тонкой структуры оказалась на  $1\%$  больше. Это не изменило бы известных нам законов природы. Иначе обстоит дело с квантованием заряда: на этом принципе основана структура нашей теории.

50. Квантовая электродинамика, как теория атомов, молекул и вещества в целом, содержит, в сущности, лишь две фундаменталь-

---

\* Это вывод, следующий из опытов Кинга. В действительности Кинг показал, что молекула водорода и атом гелия нейтральны с указанной точностью (King J. G. Search for a Small Charge Carried by Molecules.— Phys. Rev. Lett., 1960, v. 5, p. 562).

ные эмпирические константы:  $\alpha$  и  $\beta = m/M_p$ . Это означает, что все физические величины в этой области физики зависят от двух указанных констант и теория, по крайней мере в принципе, может дать эту зависимость. В такой теории свойства различных атомных ядер проявляют себя через *целые* числа  $Z$  и  $A$ , а другие физические характеристики ядер влияют на атомы, молекулы и вещество в целом лишь в виде очень «слабых» эффектов.

Наше утверждение, таким образом, упрощает истинную ситуацию, но интересно продолжить обсуждение этой идеи. С первого взгляда она может показаться неверной, так как число «фундаментальных констант» в табл. 2А превышает две. Следует, однако, заметить, что перечисленные там константы выражены в совершенно произвольных (макроскопических) единицах и численные значения констант не имеют поэтому абсолютного значения.

Существенным обстоятельством является то, что мы различаем фундаментальные физические величины и величины, зависящие от наших произвольных единиц. Рассмотрим для примера скорость звука в кристалле. Число, выражающее эту скорость в сантиметрах в секунду, не будет фундаментальной константой, так как число зависит от произвольно выбранных единиц сантиметр и секунда. Большой смысл с точки зрения теории имеет, например, отношение этой скорости к скорости света; *эта* величина не зависит от макроскопических единиц, и мы верим, что квантовая электродинамика в принципе может ее вычислить.

51. Чтобы понять истинный смысл приведенных в табл. 2А констант, рассмотрим, как определяется макроскопическая система единиц.

*Килограмм* определен международным соглашением как масса определенного куска металла, хранящегося в Париже. Чтобы отметить, что мы имеем в виду именно этот кусок металла, обозначим эту единицу как  $(\text{кг})_p$  — «парижский килограмм». Этот кусок металла содержит определенное число, скажем  $n_1$ , нуклонов. Точное значение  $n_1$  неизвестно, но в принципе может быть подсчитано. Теперь предположим, что теория сильных взаимодействий и теория ядра дают нам возможность вычислить постоянную  $c_1$ , равную отношению массы нуклона (средней для данного ядра) к массе протона. Эта постоянная близка к единице. Мы запишем массу парижского килограмма в виде

$$(\text{кг})_p = n_1 c_1 M_p = n_1 c_1 \beta^{-1} m. \quad (51a)$$

Строго говоря, постоянная  $c_1$  будет зависеть от  $\alpha$  и  $\beta$ , но слабо. Точное значение числа  $n_1$  неизвестно, но это численная константа, выбранная международным соглашением. Она равна числу нуклонов в парижском килограмме.

52. Для *метра* существуют (или, скорее, существовали) два эталона. Старый эталон метра был определен как расстояние между двумя метками, нанесенными на определенном металлическом стержне, хранящемся в Париже. Мы назовем этот метр «парижским» и обозначим  $(\text{м})_p$ . Новый эталон является «атомным». Соот-

ветствующий атомный метр, который мы обозначим  $(m)_a$ , определяется как длина, равная некоторому числу длин волн определенной оранжевой линии в спектре криптона. Это число по международному соглашению принято равным  $n_2=1\ 650\ 763,73$ .

Длина волны выбранной линии криптона может быть в принципе вычислена, и ее можно записать в виде

$$\lambda = c_2 \alpha^{-2} (\hbar/mc). \quad (52a)$$

Здесь  $c_2$  — постоянная, слабо зависящая от  $\alpha$  и  $\beta$ . В первом приближении это просто численная константа, и, изучив математические методы атомной физики, можно было бы ее вычислить. Атомный метр можно теперь записать в виде

$$(m)_a = n_2 c_2 \alpha^{-2} (\hbar/mc). \quad (52b)$$

53. Введение «атомного эталона» времени не может вызвать затруднений, но в настоящее время *секунда* определяется астрономически. Предположим, однако, что атомный эталон принят и что секунда выражена через частоту какого-нибудь определенного перехода в атоме цезия, которая лежит в области радиочастот. Эту частоту можно интерпретировать как частоту прецессии спина ядра цезия в магнитном поле орбитальных электронов. Она может быть измерена чрезвычайно точно. Ее значение равно

$$1/T_0 = \nu_0 = 9\ 192\ 631\ 770 \pm 10 \text{ Гц}. \quad (53a)$$

Точность измерения этой величины определяется точностью, которая может быть достигнута в радиочастотных измерениях. Квантовая электродинамика дает теоретическое выражение для этой частоты:

$$\nu_0 = c_3 \alpha^4 \beta \left( \frac{mc^2}{\hbar} \right); \quad (53b)$$

здесь  $c_3$  — постоянная, почти не зависящая от  $\alpha$  и  $\beta$ . В принципе, но не на практике, ее можно определить, если знать некоторые характеристики ядра цезия. Предположим теперь, что мы *определяем* секунду [назовем ее «атомной секундой» и обозначим  $(c)_a$ ] следующим образом:

$$(c)_a = 9\ 192\ 631\ 770 \cdot T_0 = n_3 c_3^{-1} \alpha^{-4} \beta^{-1} (\hbar/mc^2), \quad (53c)$$

где  $T_0 = 1/\nu$  — период атомных колебаний, а число  $n_3 = 9\ 192\ 631\ 770$  определяется по международному соглашению.

54. Рассмотрим, наконец, старый эталон длины — парижский метр  $(m)_p$ . Он определен как расстояние между двумя метками на металлическом стержне и равен поэтому длине определенной цепочки атомов. Число  $n_4$  атомов этой цепочки определено международным соглашением, хотя оно известно не слишком точно. Расстояние между двумя соседними атомами в металлическом стержне может быть (в принципе, разумеется) вычислено. Оно будет иметь вид  $c_4 a_0$ , где  $a_0$  — боровский радиус, а  $c_4$  — постоянная, очень слабо зависящая от  $\alpha$  и  $\beta$ . Поэтому мы можем написать следующее

выражение для парижского метра:

$$\langle \lambda \rangle_P = n_4 c_4 \alpha^{-1} (\hbar / m c \epsilon). \quad (54a)$$

Этот эталон длины неудовлетворителен по очевидной причине: расстояние между двумя метками не может быть измерено очень точно. С гораздо большей точностью, например, может быть выполнено сравнение двух длин волн в оптической части спектра, и нет никаких причин, по которым мы должны были бы выражать эти длины через длину металлического стержня.

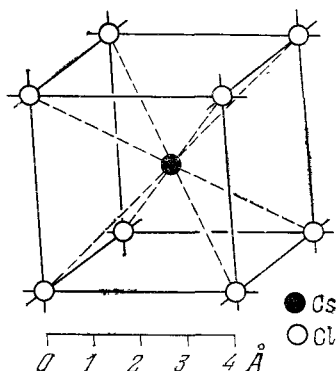


Рис. 54А. Структура кристалла CsCl. Расстояния между атомами твердого тела имеют порядок боровского радиуса  $a_0$ . Такая решетка носит название объемно-центрированной кубической решетки: атомы хлора расположены в вершинах куба, а в центре каждого куба расположен атом цезия. Заметьте, что эта решетка отличается от решетки кристалла NaCl, показанной на рис. 30А в гл. I. В соответствии с формулой CsCl кристалл содержит равное число атомов Cs и Cl, хотя из рассмотрения изолированной ячейки, показанной на рисунке, может показаться, что атомов хлора больше, чем атомов цезия.

55. Наши рассуждения объясняют истинную природу макроскопических эталонов. Они могут быть определены через произвольным образом выбранные атомные параметры и числа  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , устанавливаемые некоторым соглашением (мы указывали, что в действительности число  $n_1$  известно недостаточно точно; оно было задано неявно).

Отметим следующее.

1) Измерение длины волны заключается в сравнении ее с длиной волны оранжевой линии криптона. Такое сравнение можно выполнить очень точно, поэтому длины волн видимой части спектра известны с хорошей точностью. В сущности, постоянная Ридберга является волновым числом, вот почему она известна с большой точностью. Наиболее точные измерения длины заключаются в измерении отношений длин волн в видимой области спектра. Эти измерения имеют *потенциально* большое значение для теории. Если она сможет с такой же степенью точности предсказать отношения длин волн, то мы сможем с большой точностью сравнить теорию и опыт. Наши вычислительные возможности, однако, слишком ограничены, и это уменьшает значение указанных измерений для теории.

2) В радиочастотной области спектра наиболее точно можно измерить отношение двух частот. Измеряя частоту перехода в атоме или молекуле, мы в действительности сравниваем ее с цезиевым эталоном.

3) Измерение скорости света сводится к сравнению *частоты*, соответствующей оранжевой линии криптона, с цезиевой частотой. Такое измерение, в сущности, не является определением «фундаментальной физической константы». Скорее его можно считать выражением нашего произвольного стандарта длины через произвольный стандарт времени.

56. Рассмотрим формулы (51a), (52b), (53c) и (54a). Они дают теоретические выражения макроскопических эталонов: а) через числа  $n_1, n_2, n_3$  и  $n_4$ , определенные международным соглашением; б) через фундаментальные константы  $m, \hbar/mc$  и  $\hbar/mc^2$  квантовой электродинамики; в) через величины  $c_1, c_2, c_3, c_4$ , которые в принципе могут быть вычислены.

Даже если практически мы не в состоянии точно вычислить  $c_1, c_2, c_3$  и  $c_4$ , то известно, что в первом приближении это численные параметры, не зависящие от  $\alpha$  и  $\beta$ . Если бы мы могли *вычислить* эти величины, то это означало бы, что можно вычислить скорость света в единицах  $(m)_a/(c)_a$ .

Наши теоретические выражения для макроскопических эталонов позволяют нам поставить следующий вопрос: как изменился бы мир, если бы наши постоянные *слегка* изменились? Иными словами: как изменился бы мир, если бы константы  $\alpha$  и  $\beta$  были *немного* другими? Это интересный вопрос. Он позволяет выяснить наше понимание роли констант  $\alpha$  и  $\beta$  в строении нашего мира.

57. Поставим другой вопрос: почему размеры атома близки к  $10^{-10}$  м? Почему атомы столь малы? Вопрос кажется метафизическим, но на самом деле это не так. Поставим вопрос иначе: почему линейные размеры человеческих существ имеют порядок  $10^{10} a_0$ ?

Мы ответим на этот вопрос, если сможем объяснить число атомов в человеке, а эта проблема в принципе может быть решена. Было бы абсурдным пытаться получить точное значение этого числа, но, возможно, мы будем в состоянии получить его, скажем, с погрешностью до  $10^6$  (разумеется, если мы будем лучше знать биологию, и близкие науки). Все эти досужие рассуждения, которые могут казаться весьма шаткими, имеют целью лишь подчеркнуть, что *все* свойства макроскопического мира, в котором мы живем, тесно связаны со свойствами элементарных частиц и их взаимодействиями.

## Задачи

1. В 1903 г. Пьер Кюри и Лаборд измерили количество теплоты, выделяемое 1 г радия. Поместив его в калориметр ( $\alpha$ -частицы поглощались в самом источнике или в калориметре, и их кинетическая энергия превращалась в теплоту), они нашли, что 1 г чистого радия (теперь мы знаем, что это был изотоп  $^{226}_{88}\text{Ra}$ ) выделяет около 100 кал/ч. Зная период полураспада радия  $T$ , найдите энергию (в мегаэлектрон-вольтах)  $\alpha$ -частицы, испускаемой при распаде радия. Период полураспада радия  $T=1622$  года.

2. а) Ядро радия (мы имеем в виду изотоп  $^{226}_{88}\text{Ra}$ ) имеет *положительный* дефект массы, тем не менее оно нестабильно и распадается. Как это объяснить? Является ли положительный знак дефекта массы необходимым и достаточным условием стабильности? Рассмотрите эту проблему подробно.