

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 α и β . 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 α и β были *немного* другими? Это интересный вопрос. Он позволяет выяснить наше понимание роли констант α и β 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 (α -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) α -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.

б) Изотоп радия ^{226}Ra был открыт Пьером и Марией Кюри. Распад этого изотопа сопровождается испусканием α -частицы, представляющей собой ядро атома гелия ^4_2He . В тексте мы отмечали, что существующие в природе элементы могут быть либо стабильными, либо очень долгоживущими, так как изотопы с малым временем жизни за геологические времена распались бы. В масштабе жизни Земли период полураспада $T=1622$ года — срок крайне малый. Как можно объяснить существование в природе радия?

3. Отметим замечательную особенность распада радиоактивных ядер, подобных ^{226}Ra : времена жизни их «необычайно велики». Попробуйте, исходя из фундаментальных констант ядерной физики и электродинамики, найти «естественную единицу» времени и выразить ее в секундах. Какую бы комбинацию констант вы ни взяли, очевидно, что ^{226}Ra живет *слишком* долго. Здесь мы сталкиваемся с проблемой, решение которой приведено в гл. 7. Дело в очень интересном и важном квантовомеханическом эффекте (так называемом туннельном эффекте), который объясняет долгое время жизни α -излучателей, подобных ^{226}Ra .

4. Мощность излучения с поверхности Солнца равна $3,86 \cdot 10^{23}$ Вт. До появления ядерной физики было трудно понять, в чем источник такого огромного количества энергии.

Сделаем несколько простых оценок. Возраст Солнца составляет не менее 4 миллиардов лет. Его масса равна $1,98 \cdot 10^{30}$ кг.

а) Какая часть массы Солнца будет излучена в виде энергии излучения в течение года? (Ответ на этот вопрос согласуется с предположением, что за время существования Солнца его масса не уменьшилась сколько-нибудь заметно.)

б) Почему источником энергии Солнца не могут быть химические реакции?

в) Можете ли вы указать ядерные процессы, которые могли бы быть источником солнечной энергии? Посмотрите книги по астрофизике или сделайте собственные оценки разумности ваших гипотез.

5. Мы указывали, что плотность вещества внутри ядра (плотность ядерной материи) приблизительно постоянна для всех ядер. Оцените эту плотность в макроскопических единицах (например, в граммах на кубический сантиметр).

6. а) На основании рассуждений п. 17 оцените среднюю энергию и среднюю скорость молекулы азота N_2 при комнатной температуре (в электрон-вольтах).

б) При атмосферном давлении и комнатной температуре 1 моль азота (или любого газа) занимает объем, равный 22,4 л. Оцените число столкновений, испытываемых молекулой азота в секунду, предполагая, что она имеет «типичный молекулярный размер». Сравните частоту столкновений с оптической частотой для видимого света.

7. Для одной из линий спектра водорода длина волны равна 4861,320 Å. В 1932 г. Ури обнаружил в спектре водорода близкую линию 4859,975 Å (Phys. Rev., 1932, v. 39, p. 164; 1932, v. 40, p. 1). Объяснение заключается в том, что обычный водород представляет собой смесь изотопов ^1_1H и $^2_1\text{H}=\text{D}$. Примесь атомов более тяжелого изотопа D (дейтерия) составляет 0,015 %, и именно атомы дейтерия являются источником второй линии.

При изучении спектра атома водорода в первом приближении движением ядра можно пренебречь. Попробуем, однако, принять его во внимание. Теперь будет покоиться не ядро, а центр масс системы ядро — электрон. Теория, учитывающая движение ядра, предсказывает небольшое смещение спектральных линий относительно положения, предсказываемого теорией для неподвижного (бесконечно тяжелого) ядра. Это смещение зависит от массы ядра (в нашем случае это массы протона и дейтрона).

Попробуйте получить простую теорию которая объяснила бы о тношение двух приведенных длин волн. Воспользуйтесь их значениями, чтобы получить отношение масс дейтрона и протона, и сравните полученное значение с тем, какое следует из таблицы ядерных масс.

8. Однократно ионизованный гелий представляет собой атом гелия, из которого удален один электрон. Такая система аналогична атому водорода, так как состоит из ядра и электрона. Можно ожидать, что спектральные линии однократно ионизованного гелия будут полностью подобны спектральным линиям атома водорода. Разумеется, обе системы не тождественны: ядро гелия несет два элементарных заряда, а ядро водорода (протон) — лишь один. Различие в спектрах связано с

различием в заряде ядер гелия и водорода. На основании рассуждения п. 27 этой главы легко найти соответствие между спектральными линиями водорода и однократно ионизованного гелия. Другими словами, не входя в детали строения атома, можно найти *отношение* соответственных длин волн.

Одна из водородных линий видимой области спектра имеет длину волны 6562,99 Å. Какова длина волны соответствующей линии иона гелия? Принадлежит ли эта линия видимой области спектра? Оба ядра будем считать бесконечно тяжелыми.

9. Предположим, что α -частица испытывает лобовое столкновение с ядром, имеющим зарядовое число Z и массовое число A . Получите выражение для зависимости энергии (в мегаэлектрон-вольтах), которой должна обладать α -частица, чтобы достичь поверхности ядра, от массового числа A . Для простоты положим, что ядро остается неподвижным, $A=2Z$ и α -частица представляет собой точечный заряд. Мы считаем, что, пока α -частица не достигла поверхности ядра, на нее не действуют ядерные силы. Вычисленная нами энергия является неким характерным для данного ядра параметром: при больших энергиях на результатах опытов по рассеянию скажется действие ядерных сил, а при меньших энергиях рассеяние будет определяться электростатическими силами отталкивания.

10. В этой задаче мы рассмотрим ядерную электростатическую энергию отталкивания. Плотность ядерного вещества постоянна, поэтому будем считать ядро равномерно заряженной сферой. Это разумная модель для не слишком легких ядер.

а) Покажите, что электростатическая энергия U_e ядра с массовым числом A и зарядовым числом Z равна

$$U_e \approx 0,7 A^{5/3} (Z/A)^2 \text{ МэВ.} \quad (1)$$

Предположим, что число нейтронов равно числу протонов, т. е. $A \approx 2Z$. Тогда из (1) получаем выражение для электростатической энергии, приходящейся на один нуклон:

$$U_e/A \approx 0,17 A^{2/3} \text{ МэВ.} \quad (2)$$

Сравнивая эту энергию со средней энергией связи B нуклона, которая близка к 8 МэВ, видим, что для не слишком больших A электростатическая энергия, приходящаяся на один нуклон, довольно мала. Она возрастает с увеличением A , и этим объясняется медленное систематическое уменьшение энергии связи B , о котором мы говорили в п. 33. Свойства ядерных сил таковы, что если бы действовали только они, то наиболее стабильными оказались бы ядра с равным числом протонов и нейтронов. Если же действуют еще и электростатические силы, то конечным результатом является сдвиг стабильных состояний к ядрам с избытком нейтронов. Эта тенденция к возрастанию числа нейтронов становится сильнее с ростом массового числа A .

б) Чтобы проверить эти представления, рассмотрим такой пример. Разность масс изотопа (нестабильного) фтора $^{17}_9\text{F}$ и изотопа кислорода $^{17}_8\text{O}$ равна

$$M(17,9) - M(17,8) = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ а. е. м.}$$

Первое ядро содержит 9 протонов и 8 нейтронов, второе — 8 протонов и 9 нейтронов. Одно ядро может быть получено из другого заменой протонов на нейтроны. В таких случаях говорят о паре *зеркальных ядер*.

Мы говорили, что физически нейтрон и протон ничем, кроме заряда, не различаются. Если это верно, *дефекты* масс обоих ядер должны быть равны. Следует, однако, принять во внимание, что нейтрон и протон отличаются зарядом и в этом же заключается различие между парой зеркальных ядер. Предполагая, что во всем остальном такие ядра идентичны, можно объяснить различие в их дефектах масс электростатической энергией отталкивания. Проверьте эти идеи вычислением.

11. Некоторые из наиболее тяжелых ядер могут спонтанно делиться. Процесс деления заключается в расщеплении ядра на две приблизительно равные части. При этом освобождается энергия, близкая к 200 МэВ на один акт деления. Деление может быть также вызвано бомбардировкой нейтронами. Ядро поглощает нейтрон и переходит в возбужденное состояние, из которого происходит деление. Приме-

ром ядра, делящегося после поглощения нейтрона, является ядро ^{235}U . Тяжелые ядра имеют избыток нейтронов по сравнению с ядрами средней массы, поэтому деление сопровождается испусканием некоторого числа «лишних» нейтронов. Именно они делают возможным цепную реакцию: нейтроны, испущенные при делении, заставляют делиться новые ядра, что вызывает появление новых нейтронов, и т. д. На этом принципе основаны ядерные реакторы и атомная бомба (деления).

а) Определите энергию (в калориях и киловатт-часах), которая освобождается при полном делении 1 г ^{235}U . Сравните ее с типичной энергией, освобождающейся в химической реакции, в которой участвует 1 г вещества.

б) Небольшой кусок металлического урана ^{235}U стабилен, тогда как большой кусок может самопроизвольно взорваться. Как это объяснить?

в) Постараемся понять происхождение энергии, освобождающейся при делении. Воспользовавшись выражением (1) задачи 10, вычислим электростатическую энергию ядра (например, ^{235}U) до деления и полную электростатическую энергию осколков. Очевидно, часть электростатической энергии ядра ^{235}U освобождается при делении. Оцените эту энергию и сравните с энергией 200 МэВ, характерной для деления ядра ^{235}U .

12. Масса двух ядер дейтерия больше массы α -частицы (ядро ^4_2He) (см. на стр. 53 табл. 4А, в которой приведены атомные массы).

а) Вычислите энергию, освобождающуюся при «сгорании» 1 г дейтерия, образующего гелий. Сравните ее с энергией, освобождающейся при делении.

б) Почему не происходит самопроизвольный взрыв контейнера, наполненного дейтерием?

13. Допустим, что электрон является классической точечной частицей и что в атоме он движется по орбите, плоскость которой перпендикулярна к оси z . Пусть, далее, его момент импульса постоянен и равен \hbar .

а) Чему равен эффективный магнитный момент электрона? Эта величина носит название магнетона Бора.

б) Какова разность энергий (в электрон-вольтах) двух состояний, отличающихся направлением магнитного момента, равного 1 магнетону Бора? В первом состоянии магнитный момент направлен вдоль магнитного поля с индукцией 1000 Гс, во втором состоянии — против поля.

в) Допустим, что в кристалле ферромагнетика каждый атом имеет магнитный момент, равный 1 магнетону Бора, и что все эти моменты параллельны друг другу. Сравните результирующую намагниченность с намагниченностью ферромагнетика в состоянии насыщения.

Мы произвели оценку магнитного момента атома на основании классических представлений. К такой наивной классической модели не следует относиться слишком серьезно, хотя магнитные моменты атомов действительно имеют порядок магнетона Бора. В квантовомеханической теории атомного магнетизма различают два типа магнитных моментов. Один из них происходит вследствие «орбитального движения» электрона и аналогичен классическому магнитному моменту. Другой связан со спином электрона. Электрон обладает внутренним моментом импульса, в известной степени аналогичным моменту импульса шарика, вращающегося вокруг своей оси. Спиновый момент равен $\hbar/2$, а соответствующий магнитный момент почти в точности равен 1 магнетону Бора.

Оценка в) имеет целью выяснить, можно ли объяснить ферромагнетизм магнитным моментом атомов. Результат оказывается обнадеживающим. Следует, однако, заметить, что ферромагнетизм — сложное явление, которое не исчерпывается такими простыми оценками.

14 *). В п. 51—56 мы обсуждали «атомную природу» некоторых макроскопических эталонов измерений. Допустим, что сравнение наших эталонов показало, что в данный момент $(m)_p = (m)_a$, а основные атомные константы e , m , M_p , c и \hbar имеют значения, приведенные в табл. 2А и выраженные через эти эталоны. Допустим, далее, что 30 мая 1988 г. в 13 ч 00 мин константы α и β внезапно изменятся, так что

$$\alpha' = \alpha(1 + u), \quad \beta' = \beta(1 + w),$$

и в дальнейшем сохранят свои новые численные значения. Предположим, что числа

*) Задача к дополнительной теме.

u и w малы, например имеют порядок 1%, и поэтому изменения, происходящие в мире, не будут катастрофическими. Заметив изменения констант, физики стараются установить их новые значения, которые мы обозначим штрихами.

а) Найдите $(m)'_p / (m)'_a$.

б) Чему равны новые значения: массы электрона и массы протона в $(g)'_p$, скорости света в $(m)'_a / (c)'_a$, постоянной Планка \hbar' ; заряда электрона в единицах СГС и СИ, плотности меди в $(g)'_p / (cm^3)'_a$?

Дополнительная литература

Таблицы физических констант:

Handbook of Chemistry and Physics.—Ohio: Chemical Rubber Publishing Company. Ежегодное издание.

American Institute of Physics Handbook.—N. Y., 1957.

Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных.— М.: Физматгиз, 1962.

Сандерс Дж. Основные атомные константы.— М.: Госатомиздат, 1962.

Тейлор Б., Лангенберг Д., Паркер У. Фундаментальные физические постоянные.— УФН, 1972, т. 105, с. 756.

Критический обзор фундаментальных констант:

Cohen E. R., DuMond J. Our Knowledge of the Fundamental Constants of Physics and Chemistry in 1965.— Rev. Mod. Phys., 1965, v. 37, p. 537.