

теряли это исключительное положение; их свойства объяснила квантовая электродинамика с помощью более элементарных объектов. То же самое можно сказать и о ядрах. Невозможно объяснить свойства ядер на основании некоторых простых принципов, но тем не менее мы твердо уверены, что ядра — сложные системы, образованные из протонов и нейтронов.

После того как стал ясен сложный характер атомов и ядер, число частиц, которые можно считать элементарными, резко уменьшилось. Но затем их число начало неуклонно возрастать, и сейчас их не меньше, чем было в начале века. Место атомов заняли электроны, мюоны, нейтрино, протоны, нейтроны, гипероны, пионы, каоны и многие другие частицы. Мы уже объяснили, в каком смысле эти частицы являются элементарными.

Сейчас еще не существует фундаментальной теории элементарных частиц, и мы не знаем, какую форму примет будущая теория. Эта область широко открыта для новых идей.

Задачи

1. а) Рассмотрите и кратко опишите идеи и опыты, на основании которых можно определить атомные и молекулярные массы.

б) В 1815 г. В. Прут предположил, что все элементы «построены» из водорода, который является, таким образом, первичной материей, из которой сделано все в мире. Что привело его к этой гипотезе и почему в XIX веке она была отвергнута?

2. Многие атомы (точнее, ядра атомов) испытывают спонтанный распад, при котором обычно происходит испускание электрона или α -частицы (ядро атома гелия). В этом заключается явление *радиоактивности*, открытое Беккерелем в 1896 г. Скорость распада определяется статистическим законом, который предсказывает, что из N_0 атомов, существовавших в начальный момент времени ($t=0$), к моменту времени t останется $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ атомов. Постоянная λ , определяющая скорость распада, является характеристикой данного ядра. Время T , по истечении которого останется половина первоначально имевшихся ядер, называется периодом полураспада. Легко показать, что $T = \lambda^{-1} \ln 2$.

а) Покажите, что приведенный выше закон радиоактивного распада можно вывести из предположения, что каждое ядро распадается независимо от остальных, а вероятность того, что атом, выживший до момента времени t , распадется в интервале времени $(t, t+dt)$, не зависит от t .

б) При распаде ядра радия испускается α -частица. При ее падении на экран из сернистого цинка возникает световая вспышка (*сцинтилляция*), что позволяет непосредственно подсчитать число α -частиц, испущенных 1 г радия за 1 с. Это число, впервые определенное Гессом и Лоусоном, равно $3,72 \cdot 10^{10}$. Атомная масса радия равна 226. Воспользовавшись этими цифрами, определите период полураспада радия. (Измерения с радиоактивными веществами были использованы для независимого определения постоянной Авогадро. В приведенной задаче процедура обратная — зная постоянную Авогадро, мы определяем период полураспада радия.)

3. Движущиеся элементы ручных часов весьма «малы». Сделав разумные оценки физических параметров для «типичных» ручных часов, покажите на основании общего критерия, данного в п. 20, что квантовая механика не имеет отношения к искусству изготовления часов.

4. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из конденсатора емкостью 100 пФ и индуктивности 0,1 мГн. Допустим, что в цепи существуют колебания и максимальная разность потенциалов на емкости равна 1 мВ. Найдите «естественную» физическую переменную с размерностью действия и сравните ее значение с постоянной Планка h .

5. Антенна радиостанции излучает радиоволны на частоте 1 МГц при мощности 1 кВт. Чему равно число фотонов, испускаемых за 1 с? Это число объясняет, почему квантовая природа электромагнитного излучения антенны непосредственно не обнаруживается. Данная задача, а также две предыдущие (3 и 4) кажутся нелепыми, столь огромно соответствующее число фотонов. В дальнейшем мы не будем пытаться применять квантовую механику к очевидно макроскопическим задачам. Все же полезно хоть один раз решить подобную задачу и ощутить несоизмеримость макро- и микромасштабов.

6. Утверждение, что электромагнитное излучение распространяется пакетами с энергией $h\nu$, где ν — частота, не находится в противоречии со «здравым смыслом» (т. е. с тем, чего мы ожидаем на основании опыта, приобретенного с макроскопическими явлениями). Чтобы показать это, вычислите число фотонов, испущенных за 1 с источником с силой света 1 кд. Допустим для простоты, что испускается желтый свет с длиной волны 5600 Å. Мощность источника с силой света 1 кд близка к 0,01 Вт.

Допустим, что источник света изотропен, а наблюдатель удален на расстояние 100 м. Вычислите число фотонов, попадающих в глаз наблюдателя за 1 с, если диаметр входного зрачка глаза равен 4 мм. Число фотонов столь велико, что мы не заметим никакого «мерцания», даже если энергия светового потока, падающего на глаз, мала в макроскопическом смысле.

7. Мы знаем, что звезды «мерцают». Чтобы выяснить, может ли это мерцание быть проявлением квантовой природы света, оцените число фотонов видимого света, попадающих в глаз наблюдателя, когда он смотрит на звезду первой величины (в видимом свете). Поток энергии, создаваемый такой звездой на поверхности Земли, близок к 10^{-6} лм/м². Один люмен при длине волны максимальной «видности», равной 5560 Å, соответствует мощности 1,6 мВт. Звезды первой величины кажутся весьма яркими, ясно видимыми невооруженным глазом, хотя они и не принадлежат к очень ярким звездам. Примером является звезда Альдебаран.

Предположим, что за 1 с в глаз наблюдателя попадает N фотонов. Какова средняя флуктуация этой величины? Определите значение N и подумайте, как объяснить мерцание звезды. Почему мерцание планет слабее или вовсе отсутствует?

8. а) Обратимся к закону смещения Вина. Допустим, что излучатель является абсолютно черным телом при температуре 2500 К. Вычислите (в ангстремах) длину волны λ_{\max} , определяемую законом Вина. Находится ли она в видимой части спектра?

б) Получите закон смещения Вина из формулы Планка (39а).

в) Покажите на основании закона излучения Планка (39а), что полная мощность излучения абсолютно черного тела (просуммированная по всем частотам) пропорциональна четвертой степени температуры T .

9. Делая обзор истории открытия закона Планка, мы отмечали, что, по Планку, гармонический осциллятор, колеблющийся с частотой ν , может приобретать энергию лишь порциями, равными $h\nu$. Интересно увидеть связь между гипотезой Планка и гипотезой Бора, высказанной им для объяснения строения атома водорода, но имеющей общий характер.

Рассмотрим гармонический осциллятор, состоящий из массы и «пружины» жесткости K , который ведет себя в соответствии с гипотезой Планка. Это значит, что его энергия может меняться лишь на целые кратные величины $h\nu$, где ν — частота осциллятора. Введем переменную действия

$$J = \pi q_0 p_0,$$

где q_0 — максимальное смещение точечной массы осциллятора, а p_0 — ее максимальный импульс.

а) Напишите квантовое условие Бора для этого осциллятора.

б) Выразите полную энергию осциллятора через его текущую координату $q(t)$ и импульс $p(t)$ и постройте график зависимости p от q при заданной энергии.

в) При каком условии из квантового условия Бора следует гипотеза Планка? Это условие называется «правилом отбора» для гармонического осциллятора.

Дополнительная литература *)

Чтобы получить представление об эксперименте в области атомной физики, рекомендуем книгу:

Гарнвелл Дж. П., Ливенгуд Дж. Экспериментальная атомная физика.— М.: ОНТИ, 1936.

Для интересующихся историей современной физики рекомендуем следующие книги:

Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике.— М.: Мир, 1974.

Jammer M. The Conceptual Development of Quantum Mechanics.— N. Y., 1966.

Эта книга очень интересна, но требует знания квантовой механики. В ней имеются тщательно подобранные ссылки на оригинальные работы.

Whittaker E. A History of the Theories of Aether and Electricity.— N. Y., 1960. Второй том посвящен квантовой механике.

Планк М. Единство физической картины мира: Сборник статей.— М.: Наука, 1966.

Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики.— М.: Наука, 1965.

Борн М. Атомная физика.— М.: Мир, 1965.

В тексте даны ссылки на ранние оригинальные работы, знакомство с которыми интересно, поучительно и не требует предварительных знаний. Они рассеяны по старым журналам, но можно указать на книги, где такие работы собраны:

Great Experiments in Physics / Ed. by M. N. Shamos.— N. Y., 1962. Работы иногда сокращены и снабжены комментариями редактора.

The World of Atom / Ed. by H. A. Boorse and L. Motz. Vol. I and II, N. Y., 1966. Это очень полное собрание работ. Примечания редактора дают исторический фон и библиографические сведения.

Многие экспериментальные и теоретические работы, рассмотренные в этом томе, удостоены Нобелевской премии. Популярные лекции нобелевских лауреатов, прочитанные в Стокгольме, представляют большой интерес. Они собраны в книге:

Heathcote N. H. de V. Nobel Prize Winners in Physics 1901—1950.— N. Y., 1953.

*) Ко всем главам книги много интересного дополнительного материала можно найти в сборниках «Над чем думают физики» (М.: Наука, 1962—1977, вып. 1—11). В этих сборниках помещены переводы статей из журнала «Scientific American». Рекомендуем также популярные статьи из журнала «Успехи физических наук». Постепенно читатель сможет перейти к чтению более специальных обзоров из этого журнала и оригинальных экспериментальных работ из физических журналов.— *Прим. ред.*