

схемы уровней атомов, помещенные в этой главе, мы видим, что почти у всех возбужденных состояний атомов возможен электрический дипольный переход в состояния с меньшей энергией. Структура ядерных уровней не обладает таким свойством, и мы часто видим, что первый возбужденный уровень отличается по значению j от основного уровня на несколько единиц. Такое возбужденное состояние не может «высветиться» дипольным переходом и, соответственно, существует долго. Если различие в значениях j велико, а разность энергий мала, время жизни может оказаться порядка минут, так как испущенный фотон должен иметь высокую мультипольность. Такие состояния называют *измеренными*.

Задачи

1. Ниже приведены измеренные в начале века волновые числа (в см^{-1}) спектральных линий некоторого атома:

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_1 &= 82\,258,27; & \tilde{\nu}_2 &= 97\,491,28; & \tilde{\nu}_3 &= 102\,822,84; \\ \tilde{\nu}_4 &= 105\,290,58; & \tilde{\nu}_5 &= 15\,232,97; & \tilde{\nu}_6 &= 20\,564,57; \\ \tilde{\nu}_7 &= 23\,032,31; & \tilde{\nu}_8 &= 5\,331,52; & \tilde{\nu}_9 &= 7799,30; & \tilde{\nu}_{10} &= 2469. \end{aligned}$$

а) Найдите возможно большее число случаев, доказывающих комбинационный принцип Ритца, т. е. случаев, когда волновое число равно разности двух других волновых чисел.

б) Покажите, что все линии возникают из комбинаций пяти термов. Найдите их (с точностью до общей для всех термов произвольной постоянной) и изобразите схему термов и переходов, отвечающих измеренным линиям.

в) Можете ли вы найти простую формулу для термов? Встречалась ли где-либо в книге такая схема термов? (Закончив анализ приведенных данных, вы можете обратиться к таблице длин волн, чтобы узнать, о каком атоме идет речь.)

2. Для изучения резонансной флуоресценции содержимое кварцевого сосуда S было облучено ультрафиолетовым светом с длиной волны 2537 \AA , испускаемым ртутной лампой. (В этой лампе происходит электрический разряд в парах ртути, заключенных в кварцевый сосуд.) При этом наблюдались следующие явления:

а) Если сосуд S содержал только пары ртути, то они очень сильно рассеивали падающее на них излучение: атомы паров резонировали. Длина волны рассеянного излучения также равна 2537 \AA .

б) Если в сосуде S были только пары таллия, он оказывался прозрачным для излучения и рассеяние было весьма мало.

в) Если в сосуде S были пары таллия и ртути, то он являлся источником излучения линии ртути 2537 \AA , а также ряда линий таллия с длинами волн $2768, 3230, 3529, 3776$ и 5350 \AA . Если между сосудом S и источником света поместить стеклянную пластину, то ни одна из этих линий не возбуждается.

г) В условиях в) было найдено, что линия таллия 3776 \AA гораздо шире линии 2768 \AA и, кроме того, ее ширина больше доплеровского расширения, соответствующего температуре сосуда, и больше ширины той же линии, когда ее источником является разрядная трубка, наполненная парами таллия.

Попытайтесь объяснить все эти явления. Вам поможет схема термов атома таллия (рис. 34А этой главы). Интересно отметить, что в описанном опыте наблюдались лишь некоторые линии таллия. Линии 2826 и 5584 \AA , например, отсутствовали.

3. Время жизни $3p_{1/2}$ -состояния атома натрия (рис. 32А) близко к 10^{-8} с. Рассмотрим сосуд, наполненный газообразным аргоном при давлении 10 мм рт. ст. и температуре около 200°C . В сосуде находится небольшая частичка натрия, после нагревания которой сосуд наполняется небольшим количеством паров натрия. Мы наблюдаем поглощение линии 5896 \AA из излучения накаливаемой вольфрамо-

вой нити, проходящей через сосуд. (Излучение накаливаемой вольфрамовой нити имеет непрерывное спектральное распределение.)

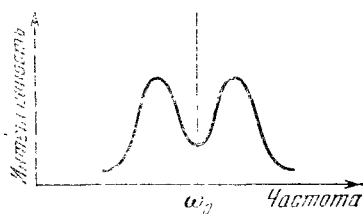
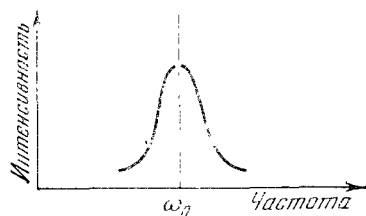
Оцените:

- естественную ширину линии;
- доплеровское расширение линии;
- расширение вследствие столкновений.

Выразите полученные результаты в волновых числах. Сравните эти ширины с расстоянием между желтыми линиями D_1 и D_2 натрия (расщепление тонкой структуры).

г) В схеме термов на рис. 32А показан переход, которому отвечает линия 5688,22 Å. Увидим ли мы эту линию в описанном выше опыте по поглощению?

Аргон, находящийся в сосуде, служит лишь для создания давления и средней температуры. Его присутствие необходимо принять во внимание при оценке влияния столкновений на ширину линии: так как атомов натрия в сосуде гораздо меньше, чем атомов аргона, то атомы натрия сталкиваются главным образом с атомами аргона.



К задаче 4. Слева вид спектральной линии (при большом разрешении) обычный, например, для источника в виде газовой разрядной трубки. В некоторых условиях та же линия, испускаемая тем же источником, может иметь вид, показанный справа

4. Рассмотрим форму спектральной линии испускания для атома. Допустим, что атомы в источнике присутствуют в виде газа, и мы измеряем с помощью спектрометра с очень хорошим разрешением зависимость интенсивности от частоты. Для некоторых источников света форма линии показана слева на рисунке к этой задаче. Для других источников линия будет иметь форму, показанную справа. Заметим, что, как правило, показанную справа форму имеют лишь линии, возникающие при переходе в основное состояние. Можете ли вы объяснить это явление? Какими свойствами должен обладать источник, чтобы форма линии соответствовала левой части рисунка?

5. Оцените для экспериментальных условий задачи 3 на основании формулы (7а) этой главы долю атомов натрия, находящихся в первом возбужденном состоянии. (Предположим, что $T=200^\circ\text{C}$.)

6. а) На основании экспериментальных данных, представленных на рис. 37А, вычислите постоянную C в уравнении (37b).

б) При изучении рентгеновского излучения найдено, что для появления одной из характеристических линий (частоты ω) энергия E бомбардирующих электронов должна быть несколько больше $\hbar\omega$. Для K_α -линий, к которым относится рис. 37А, приблизительное условие появления линий имеет вид $E > (4/3)\hbar\omega$. Почему линии не возникают, как только $E > \hbar\omega$?

7. Автор не может отвечать за последствия, могущие произойти, если читатель слишком серьезно воспримет боровскую планетарную модель атома, но и не хочет заходить так далеко, чтобы запретить студенту рассматривать эту модель. Бор предполагал, что электрон в атоме водорода движется по круговым орбитам таким образом, что момент импульса равен целому кратному числа \hbar . Эта модель дает значения энергетических уровней атома водорода с большой точностью, что является замечательной случайностью. Боровская модель имела большое значение в свое время, и читателю будет интересно пойти по следам Бора и получить схему термов и энергии переходов для линий, показанных на рис. 1В этой главы. (Длины волн для линий на фотографии равны 4861,3, 4340,5, 4101,7, 3970,1, 3889,1 и 3835,4 Å.)

8. Радиоактивное ядро ${}_{84}^{212}\text{Po}$ (другое его обозначение ThC') испускает α -частицы нескольких различных энергий. В этом случае объяснение, показанное на рис. 40А этой главы, не подходит. Найдите правильное объяснение. Изобразите соответствующую схему уровней и обозначьте уровни, принадлежащие различным ядрам.

9. На рис. 38А показана упрощенная версия диаграммы, взятой из обзора: *Ajzenberg F., Lauritsen T.*— *Rev. Mod. Phys.*, 1955, v. 27, p. 107, Fig. 15. Рассмотрите рисунок в самом обзоре. Над уровнем, обозначенным ${}^7\text{Li} + \alpha$, вы увидите кривую с рядом максимумов. Они совпадают с некоторыми из уровней ядра ${}^{11}\text{B}$. Эта кривая изображает результаты реального эксперимента. Объясните смысл кривой и обсудите измерения, на основании которых она получена.

В правой части кривой (в обзоре) вы увидите горизонтальную черту, обозначенную ${}^{11}\text{B} + p - p'$, и над ней короткую горизонтальную черту, на которой стоит цифра 15.6. Этот последний уровень соединен с некоторыми уровнями ${}^{11}\text{B}$ линиями со стрелками. Эта часть диаграммы также связана с некоторыми опытами. Обсудите их и объясните значение стрелок.

10. Рассмотрим опыт, в котором пучок атомов движется параллельно экрану с узкой щелью. Щель перпендикулярна к направлению пучка. Для простоты положим, что все атомы пучка имеют одну и ту же скорость v . На определенном расстоянии x до щели некоторые атомы приводятся в возбужденное состояние. При переходе из возбужденного состояния в основное атом испускает фотон (частоты ω). Пусть τ — среднее время жизни возбужденного атома. Мы изучаем свет, проходящий через щель.

а) Как зависит интенсивность проходящего через щель света от расстояния x ?

б) Предположим, что свет из щели попадет на фотоземлю и мы определяем задерживающий потенциал, прекращающий работу фотоземли. Будет ли этот потенциал зависеть от расстояния x ?

11*). Интересно получить угловое распределение интенсивности излучения электрического квадруполь (источник на рис. 50А) и сравнить его с соответствующим угловым распределением излучения электрического диполя. Интенсивность пропорциональна квадрату модуля напряженности электрического поля. Покажите, что зависимость интенсивности от направления наблюдения определяется выражениями

$$I_{E1}(\theta) = A \sin^2 \theta \quad (\text{для электрического диполя}),$$

$$I_{E2}(\theta) = B \sin^2 2\theta \quad (\text{для электрического квадруполь}).$$

Здесь A и B — постоянные. Интенсивность не зависит от азимутального угла. Этот пример показывает, как можно различить тип мультипольного излучения по угловой зависимости излучения.

Дополнительная литература

Схемам уровней атомов, молекул и ядер посвящено огромное число книг, среди которых укажем следующие:

Герцберг Г. Атомные спектры и строение атомов.— М.: ИЛ, 1948.

White H. Introduction to Atomic Spectra.— N. Y., 1934.

Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул.— М.: ИЛ, 1949.

Herzberg G. Molecular Spectra and Molecular Structure.— Vol. I. Spectra of Diatomic Molecules.— N. Y., 1953.

Halliday D. Introductory Nuclear Physics.— N. Y., 1950.

Segre E. Nuclei and Particles.— N. Y., 1964.

Волькенштейн М. В. Строение молекул.— М.: Наука, 1967.

Кондратьев В. Н. Строение атомов и молекул.— М.: Физматгиз, 1960.

Схемы уровней многих атомов можно найти в книге:

Grottrian W. Graphische Darstellung der Spektren von Atomen und Ionen mit Ein, Zwei und Drei Valenzelektronen. Bd II.— Berlin, 1928.

*) Эта задача относится к дополнительной теме (п. 50).

Схемы уровней ядер см. в справочниках:

Aizenberg F., Lauritsen T. Energy Levels of Light Nuclei.—*Rev. Mod. Phys.*, 1955, v. 27, p. 77.

Джелепов Б. С., Пекер Л. К. Схемы распада радиоактивных ядер $A < 100$.— М.: Наука, 1966.

Статьи из журнала «*Scientific American*» в сборниках «Над чем думают физики» (М.: Наука):

Блум А. Оптическая накачка.— 1967, вып. 5, с. 34.

Лайонс Г. Атомные часы.— 1967, вып. 5, с. 20.

Пейк Д. Магнитный резонанс.— 1972, вып. 8, с. 91.

Шавлов А. Успехи в создании оптических лазеров.— 1967, вып. 5, с. 47.

Де Бенедетти С. Эффект Мёссбауэра.— 1967, вып. 5, с. 5.