

## 7. РЕНТГЕНОВСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Экспериментально строение атомов изучают, исследуя спектры испускания и поглощения атомами электромагнитного излучения. Переходам валентных электронов соответствует оптический диапазон излучения, а при переходах электронов на внутренних оболочках возникает характеристическое рентгеновское излучение. Схема переходов приведена на рис.11. Частоту и длину волны соответствующего излучения можно определить, используя закон Мозли:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right); \quad (7.1)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R'(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (7.2)$$

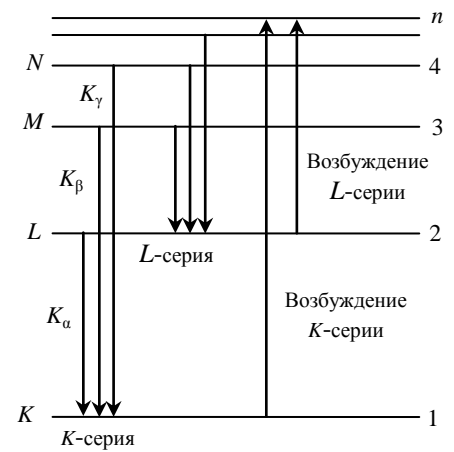


Рис.11

где  $Z$  – порядковый номер элемента в системе Менделеева;  $R$  и  $R'$  – постоянные Ридберга для частоты и волнового числа,  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ,  $R' = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ;  $n_1$  – главное квантовое число уровня, с которого уходит электрон;  $n_2$  – главное квантовое число уровня, на который переходит электрон;  $\sigma$  – постоянная экранирования, учитывающая экранировку внутренними электронами кулоновского взаимодействия ядра и рассматриваемого электрона.

При переходах атома из одного состояния ( $J_{\text{нач}}$ ) в другое ( $J_{\text{кон}}$ ) с поглощением или испусканием электромагнитного излучения допустимы только такие переходы, при которых выполняются следующие соотношения, называемые правилами отбора:

$$\Delta j = 0; \pm 1; \Delta m_j = 0; \pm 1; \Delta \ell = \pm 1; \Delta m_\ell = 0; \pm 1; \Delta m_s = 0;$$

$$\Delta J = \pm 1; 0 \text{ при } J_{\text{нач}} \neq 0 \text{ и } J_{\text{кон}} \neq 0;$$

$$\Delta J = \pm 1 \text{ при } J_{\text{нач}} = 0 \text{ или } J_{\text{кон}} = 0; \Delta m_j = \pm 1; 0;$$

$$\Delta S = 0; \Delta m_s = 0;$$

$$\Delta L = \pm 1; 0 \text{ при } L_{\text{нач}} \neq 0 \text{ и } L_{\text{кон}} \neq 0;$$

$$\Delta L = \pm 1 \text{ при } L_{\text{нач}} = 0 \text{ или } L_{\text{кон}} = 0; \Delta m_L = \pm 1; 0.$$

В магнитном поле  $B$  вследствие снятия вырождения уровни расщепляются. Величина расщепления соответствующих спектральных линий в слабом поле

$$\Delta\omega = (m_{J1}g_{L1} - m_{J2}g_{L2})\mu_B B / \hbar,$$

где  $m_{J1}$ ,  $g_{L1}$  и  $m_{J2}$ ,  $g_{L2}$  – квантовые числа и факторы Ланде соответствующих энергетических уровней.

При излучении вдоль магнитного поля зеемановские компоненты, обусловленные переходами  $m_{J1} \rightarrow m_{J2}$ , отсутствуют.

При наличии большого количества атомов и при  $T \neq 0$  в каждый момент времени часть атомов будет находиться в возбужденных состояниях. Доля атомов, имеющих в термодинамическом равновесии энергию  $E$ , при температуре  $T$  определяется распределением Больцмана

$$N = (g/g_0) \exp[-(E - E_0)/kT],$$

где  $g$  и  $g_0$  – кратность вырождения возбужденного и основного состояний;  $E_0$  – энергия основного состояния.

**Пример 1.** Длина волны линии  $L_\alpha$  вольфрама равна 0,148 нм. Найти постоянную экранирования.

**Решение.** Используем закон Мозли (7.2). С учетом того, что  $Z = 74$  – порядковый номер вольфрама,  $n_1 = 3$  для  $L_\alpha$ -линии,  $n_2 = 2$  – номер уровня, на который переходит электрон, для  $L$ -серии,  $\sigma = 7,4$ .

**Пример 2.** Определить энергию фотона  $K_{\alpha}$ -линии рентгеновского спектра, излучаемого вольфрамом при бомбардировке его быстрыми электронами.

**Решение.**  $K_{\alpha}$ -линия возникает при переходе электрона с  $L$ - на  $K$ -слой. Частота этой линии определяется по закону Мозли (7.1). В нашем случае  $n_1 = 2$ ,  $n_2 = 1$  и  $\sigma = 1$ ,  $Z = 74$ . Отсюда энергия фотона  $E_{K_{\alpha}} = h\nu = 54,4$  кэВ.

**Пример 3.** Найти зеемановское расщепление спектральной линии  ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ . Указать число компонентов в расщепленной линии.

**Решение.** Состояние  ${}^2D_{3/2}$  означает, что  $J = 3/2$ ,  $L = 2$ ,  $S = 1/2$ . Фактор Ланде для этого состояния

$$g_{J1} = 1 + \frac{(3/2) \cdot (5/2) + (1/2) \cdot (3/2) - 2 \cdot 3}{2 \cdot (3/2) \cdot (5/2)} = \frac{4}{5}.$$

Дополнительная энергия этого состояния в магнитном поле

$$\Delta E_1 = \frac{4 e\hbar B}{5 2m_e} m_{J1}.$$

Аналогично для состояния  ${}^2P_{1/2}$  получим  $J = 1/2$ ,  $L = 1$ ,  $S = 1/2$ . Фактор Ланде и дополнительная энергия соответственно

$$g_{J2} = 1 + \frac{(3/4) + (3/4) - 2}{(3/2)} = \frac{2}{3}; \quad \Delta E_2 = \frac{2 e\hbar B}{3 2m_e} m_{J2}.$$

Возможны переходы с изменением квантового числа  $m_J$  на 0, 1 и  $-1$ . Рассматривая эти варианты, получим, что возможны расщепления

$$\Delta\omega = \left\{ \pm \frac{13}{15}, \pm \frac{11}{15}, \pm \frac{1}{15} \right\} \frac{eB}{2m_e}.$$

**Пример 4.** Атомарный литий с концентрацией  $n = 3,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  находится при температуре  $T = 1500$  К. При этом мощность излучения резонансной линии  $\lambda = 671$  нм ( $2P \rightarrow 2S$ ) в расчете на единицу объема газа  $P = 0,3$  Вт/см<sup>3</sup>. Найти среднее время жизни атомов лития в состоянии резонансного возбуждения.

**Решение.** Среднее время жизни атомов определяется вероятностью перехода атома из резонансного состояния в основное:  $\tau = 1/w$ . Вероятность перехода есть отношение среднего количества излучающих (переходящих) атомов к общему числу атомов в резонансном состоянии:  $w = \langle N_{2P, \text{изл}} \rangle / N_{2P}$ . В резонансном состоянии находится  $N_{2P} = (g_{2P}/g_{2S}) N_{2S} \exp(-(E_{2P} - E_{2S})/kT)$  атомов. Здесь  $g_{2S} = 2$  и  $g_{2P} = 6$  – кратность вырождения основного и резонансного уровней соответственно. Так как и  $h\nu = hc/\lambda$ , мощность излучения складывается из количества испущенных в единицу времени фотонов  $\langle N_{2P, \text{изл}} \rangle = P/h\nu$ . Таким образом, среднее время жизни атомов

$$\tau = 1/w = \frac{g_{2P}}{g_{2S}} \frac{hc}{P\lambda} n \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right).$$

Подставляя числовые данные, получим  $\tau = 65$  нс.

#### Задачи.

1. Установить, какие из следующих переходов запрещены правилами отбора: а)  ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ ; б)  ${}^3P_1 \rightarrow {}^2S_{1/2}$ ; в)  ${}^3F_3 \rightarrow {}^3P_2$ ; г)  ${}^4F_{1/2} \rightarrow {}^4D_{5/2}$ .

2. Установить, какие из следующих переходов запрещены правилами отбора: а)  ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ ; б)  ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2D_{3/2}$ ; в)  ${}^2D_{5/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$ ; г)  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2D_{3/2}$ .

3. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к рентгеновской трубке с вольфрамовым анодом, чтобы в спектре характеристического рентгеновского излучения были все линии  $K$ -серии?

4. Вычислить с помощью закона Мозли разность энергий связи  $K$ - и  $L$ -электронов ванадия.

5. Сколько элементов содержится в ряду между теми, у которых длина волны  $K_{\alpha}$ -линии равна 250 и 179 пм?

6. У какого легкого элемента в спектре поглощения разность частот  $K$ - и  $L$ -краев поглощения рентгеновских лучей  $\Delta\omega = 6,85 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$ ?
7. У некоторого легкого атома длина волны  $K_{\alpha}$ - и  $K_{\beta}$ -линий соответственно 275 и 251 пм. Что это за атом?
8. В атоме молибдена электрон переходит с  $M$ - на  $L$ -слой. Определить длину волны и энергию рентгеновского излучения. Постоянная  $\sigma = 5,6$ .
9. В атоме циркония электрон переходит с  $M$ - на  $K$ -слой. Определить длину волны и энергию рентгеновского излучения. Постоянная  $\sigma = 1$ .
10. Длина волны, соответствующей  $K_{\alpha}$ -линии рентгеновского излучения,  $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$ . Определить элемент, из которого сделан антикатод. Постоянная  $\sigma = 1$ .
11. К рентгеновской трубке с серебряным антикатодом приложено напряжение, достаточное для возбуждения всей  $K$ -серии. Определить суммарную энергию двух квантов, соответствующих  $\alpha$ - и  $\beta$ -линиям этой серии. Постоянная  $\sigma = 1$ .
12. При переходе электрона в атоме меди с  $M$ -слоя на  $L$ -слой испускаются лучи с длиной волны 1,2 нм. Вычислить постоянную экранирования в формуле Мозли.
13. Длина волны  $K_{\alpha}$ -линии характеристического рентгеновского излучения равна 0,194 нм. Из какого материала сделан антикатод?
14. При исследовании характеристического спектра некоторого элемента было найдено, что длина волны  $K_{\alpha}$ -линии равна 76 пм. Какой это элемент?
15. Определить порядковый номер элемента в периодической системе, если граничная частота  $K$ -серии составляет  $5,55 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$ . Принять  $\sigma = 1$ .
16. Вычислить энергию фотона, соответствующего линии  $K_{\alpha}$  в характеристическом спектре марганца.
17. Рассчитать постоянную экранирования для  $L$ -серии рентгеновского излучения, если при переходе электрона в атоме вольфрама с  $M$ - на  $L$ -оболочку длина волны испущенного фотона 140 пм.
18. Какую наименьшую разность потенциалов надо приложить к рентгеновской трубке, антикатод которой покрыт ванадием, чтобы в спектре рентгеновского излучения появились все линии  $K$ -серии ванадия? Граница  $K$ -серии ванадия  $\lambda = 226 \text{ пм}$ .
19. Спектральная линия, обусловленная переходом  ${}^3D_1 \rightarrow {}^3P_0$ , испытывает расщепление в слабом магнитном поле. При наблюдении перпендикулярно к направлению магнитного поля интервал между соседними компонентами зеемановской структуры линии  $\Delta\omega = 1,32 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ . Найти индукцию  $B$  магнитного поля в месте нахождения источника.
20. Определить спектральный символ синглетного терма атома, если при расщеплении этого терма в слабом магнитном поле с индукцией  $B = 0,3 \text{ Тл}$  полная ширина 104 мкэВ.
21. Длина волны дуплета желтой линии натрия ( ${}^2P \rightarrow {}^2S$ ) 589,59 и 589,00 нм. Найти отношение интервалов между соседними подуровнями зеемановского расщепления термов  ${}^2P_{3/2}$  и  ${}^2P_{1/2}$  в слабом магнитном поле.
22. Известно, что спектральная линия с  $\lambda = 612 \text{ нм}$  атома обусловлена переходом между синглетными термами. Вычислить интервал  $\Delta\lambda$  между крайними компонентами этой линии в магнитном поле с индукцией  $B = 1,0 \text{ Тл}$ .
23. Какая относительная часть атомов водорода находится в состоянии с главным квантовым числом  $n = 2$  при  $T = 3000 \text{ К}$ ?
24. Определить отношение числа атомов газообразного натрия в состоянии  $3P$  к числу атомов в основном состоянии  $3S$  при температуре  $T = 2400 \text{ К}$ . Известно, что переходу  $3P \rightarrow 3S$  соответствует спектральная линия с  $\lambda = 589 \text{ нм}$ .
25. Разреженные пары ртути, атомы которой практически все находятся в основном состоянии, осветили светом с  $\lambda = 253,65 \text{ нм}$ , соответствующей резонансной линии ртути. Оказалось, что мощность испускания данной линии парами ртути  $P = 35 \text{ мВт}$ . Найти число атомов в состоянии резонансного возбуждения, среднее время жизни которого  $\tau = 0,15 \text{ мкс}$ .