

ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АТОМОВ ЩЕЛОЧНЫХ И ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение

В лабораторной работе №6 были рассмотрены спектры одновалентных атомов и показано, что серии, наблюдаемые в этих спектрах, объясняются снятием вырождения относительно орбитального квантового числа l : уровни энергии с заданным главным квантовым числом n и различными l в атомах щелочных металлов становятся неравными. Число этих уровней вполне достаточно для того, чтобы объяснить все серии атомов с одним валентным электроном, однако это недостаточно для объяснения тонкой структуры линий в спектре этих атомов.

Структура уровней энергии и спектральных линий связана с тем, что электрон обладает собственным моментом количества движения (спином) и собственным магнитным моментом, причем этот момент взаимодействует с орбитальным моментом. Дополнительная энергия атома за счет спин-орбитального взаимодействия и приводит к расщеплению уровней энергии.

Ц е л ь р а б о т ы: изучение тонкой структуры уровней энергии и спектров атомов щелочных и щелочноземельных элементов; определение эффективного заряда и постоянной экранирования.

Квантование механических и магнитных моментов, квантовые числа

Согласно квантовой механике состояние электрона в атоме, а также самой атомной системы характеризуется значениями независимых друг от друга величин, число которых равно числу степеней свободы. Движение электрона относительно ядра определяется тремя независимыми координатами, поэтому для определения его состояния необходимо задать значения трех независимых физических величин. Этими величинами являются энергия электрона E , момент количества движения P_l относительно ядра (так называемый орбиталь-

ный момент количества движения) и одна из проекций этого момента (обычно проекция по оси z) P_{Lz} .

Релятивистские свойства электрона приводят к необходимости введения четвертой величины - собственного момента количества движения электрона P_s (спин электрона). Для учета спина электрона берется проекция собственного момента P на ось z .

Заданием значений этих четырех величин (E, P_l, P_{Lz}, P_{sz}) для всех электронов определяют состояние атомной системы. Возможные значения этих величин находят путем решения квантовомеханической задачи для атомной системы. Моменты и их проекции, а также энергия (при движении электрона внутри атома) принимают дискретные значения, то есть квантуются. Поэтому возможные значения указанных физических величин выражаются через квантовые числа - целые или полуцелые. В общем случае численные значения момента определяются соотношением

$$P_k = \frac{h}{2\pi} \sqrt{k(k+1)}, \quad (1)$$

где k - квантовое число, которое может принимать значения $0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, \dots$; h - постоянная Планка. Проекции момента количества движения квантуются следующим образом:

$$P_{kz} = \frac{h}{2\pi} m_k, \quad (2)$$

где m_k - магнитное квантовое число для момента P_k , принимающее при заданном k $2k+1$ различных значений, а именно:

$$m = k, k-1, k-2, \dots, -(k-2), -(k-1), -k.$$

Квантование проекций механических моментов представляет собой пространственное квантование: момент может иметь только определенные ориентации относительно произвольно выбранного направления (в данном случае оси z).

Правила квантования (1) и (2) относятся как к отдельным элементарным частицам (например, электронам), так и к системам, состоящим из этих частиц. Квантовые числа, определяющие состояние отдельного электрона, обозначают

прописными буквами, а определяющие состояние атомной системы - заглавными буквами.

Конкретные моменты и их проекции квантуются на основе формул (1) и (2).

Орбитальный момент количества движения можно представить в следующем виде:

$$P_l = \frac{h}{2\pi} \sqrt{l(l+1)}, \quad (3)$$

при заданном главном квантовом числе n орбитальное квантовое число принимает l различных значений: $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$; соответственно состояния электронов принято обозначать буквами s, p, d, f, \dots (это обозначение произошло от первых букв английских названий спектральных серий в спектрах щелочных металлов).

Проекция орбитального момента представляется в виде:

$$P_{lz} = \frac{h}{2\pi} m_l, \quad (4)$$

где магнитное квантовое число для орбитального момента m_l при заданном l принимает $2l+1$ различных значений: $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

Собственный момент количества движения (спин) представляется в виде:

$$P_s = \frac{h}{2\pi} \sqrt{s(s+1)}, \quad (5)$$

где спиновое квантовое число $s = 1/2$.

Проекция собственного момента представляется в виде:

$$P_{sz} = \frac{h}{2\pi} m_s, \quad (6)$$

где магнитное спиновое квантовое число $m_s = \pm 1/2$.

Энергия электрона в атоме определяется приближенно главным квантовым числом n , которое принимает значения любых целых положительных чисел ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Таким образом, физические величины, характеризующие состояние электрона в атоме, определяются квантовыми числами, при этом состояние каждого электрона в атоме определяется четырьмя квантовыми числами: n, l, m_l, m_s . Электроны с одинаковым главным квантовым числом n образуют электронный слой атома. Электроны с одинаковыми квантовыми числами n и l образуют электронную оболочку. Распределение электронов по слоям и оболочкам определяет электронную конфигурацию атома. Например, 8 электронов невозбужденного атома кислорода находятся в состояниях, образующих электронную конфигурацию $1s^2 2s^2 2p^4$. Числа справа сверху символов квантового числа l обозначают число электронов с данными значениями n и l .

С каждым механическим моментом связан магнитный момент. Квантование магнитных моментов и их проекций определяется квантованием соответствующих механических моментов и их проекций.

Отношение магнитного момента к соответствующему механическому моменту называется гиромангнитным отношением.

В общем виде соотношение между этими моментами можно записать следующим образом:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{P}, \quad (7)$$

где $\vec{\mu}$ и \vec{P} - векторы магнитного и механического моментов, γ - гиромангнитное отношение.

Векторная модель атома с одним валентным электроном.

Уровни энергии щелочных металлов

Орбитальный и собственный моменты электрона взаимодействуют между собой, как взаимодействуют два круговых тока. Энергия взаимодействия (так называемого спин-орбитального взаимодействия) двух магнитных моментов пропорциональна их скалярному произведению:

$$\Delta E \sim \vec{\mu}_l \vec{\mu}_s = \gamma_l \gamma_s \vec{P}_l \vec{P}_s, \quad (8)$$

где γ_l и γ_s - гиромангнитные отношения для орбитальных и спиновых моментов соответственно.

Моменты \vec{P}_l и \vec{P}_s складываются векторно в полный момент количества движения \vec{P}_j , то есть

$$\vec{P}_j = \vec{P}_l + \vec{P}_s. \quad (9)$$

Моменты \vec{P}_l и \vec{P}_s располагаются относительно друг друга только таким образом, чтобы согласно правилу квантования (1)

$$P_j = \frac{h}{2\pi} \sqrt{j(j+1)}, \quad (10)$$

где j – внутреннее квантовое число, принимающее следующие значения:

$$j = l + m_s \begin{cases} l + 1/2 & \text{при } l \neq 0 \\ 1/2 & \text{при } l = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Различные значения j при заданном l соответствуют различным взаимным ориентациям векторов \vec{P}_l и \vec{P}_s (или $\vec{\mu}_l$ и $\vec{\mu}_s$) и, следовательно, согласно формуле (8) различным величинам дополнительной энергии ΔE . Поэтому у атома с одним валентным электроном уровни энергии будут расщепляться на два подуровня. Эта структура уровней, возникающая в результате спин-орбитального взаимодействия, называется тонкой структурой уровней энергии, которая, в свою очередь, приводит к тонкой структуре спектральных линий.

Состояние атома щелочных металлов определяется состоянием одного внешнего валентного электрона, так как сумма моментов электронов заполненных внутренних оболочек равна нулю. Поэтому уровни энергии атомов щелочных металлов будут дублетными (двойными) за исключением S-уровня ($L=0$).

Для описания состояния атома и уровней энергии применяются следующие обозначения:

$$n^{2S+1}L_J, \quad (12)$$

где n - главное квантовое число; L - буквенное обозначение орбитального квантового числа для атома ($L=S, P, D, F, \dots$); $2S+1$ - число, определяющее мультиплетность уровня, S - спиновое квантовое число; J - внутреннее квантовое число. В случае атома с одним валентным электроном квантовые числа

L, S, J совпадают с квантовыми числами l, s, j электрона. Поэтому $2S+1=2$ (так как $s = 1/2$), т.е. уровни расщепляются на два подуровня. Следует отметить, что хотя S-уровни ($L=0$) являются одиночными, однако они относятся к системе дублетных состояний и в символе уровня мультиплетность равна 2.

Состояние атома с наименьшей энергией называется основным или нормальным. Остальные состояния с большей энергией являются возбужденными.

Атом может переходить из одного энергетического состояния в другое с испусканием или поглощением кванта электромагнитной энергии только в том случае, если при таком переходе удовлетворяются следующие правила отбора, определяющие дозволённые изменения квантовых чисел при переходах с излучением или поглощением электромагнитной энергии:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \pm 1; \\ \Delta J &= \pm 1; \text{ (кроме перехода: } 0 \rightarrow 0); \\ \Delta S &= 0. \end{aligned} \tag{13}$$

Эти правила отбора возникают в силу закона сохранения момента количества движения при квантовых переходах с изменением электрического дипольного момента

Для наглядности совокупность значений энергий, соответствующих возможным стационарным состояниям, принято изображать в виде схемы (диаграммы). На шкале слева указываются энергии уровней, а на шкале справа - энергии возбуждения (в эВ и см^{-1}). Горизонтальными линиями (уровни энергии) показаны значения энергии атома. Каждый уровень энергии обозначается символом, отражающим состояние атома. Уровни с различными значениями квантового числа L разнесены в различные столбцы.

На схемах приводятся возможные переходы между уровнями в виде линий, соединяющих эти уровни. На линиях даны длины волн спектральных линий (в ангстремах), которые возникают при переходе электронов из одного энергетического состояния в другое. Система энергетических уровней является индивидуальной характеристикой определенной квантовой системы.

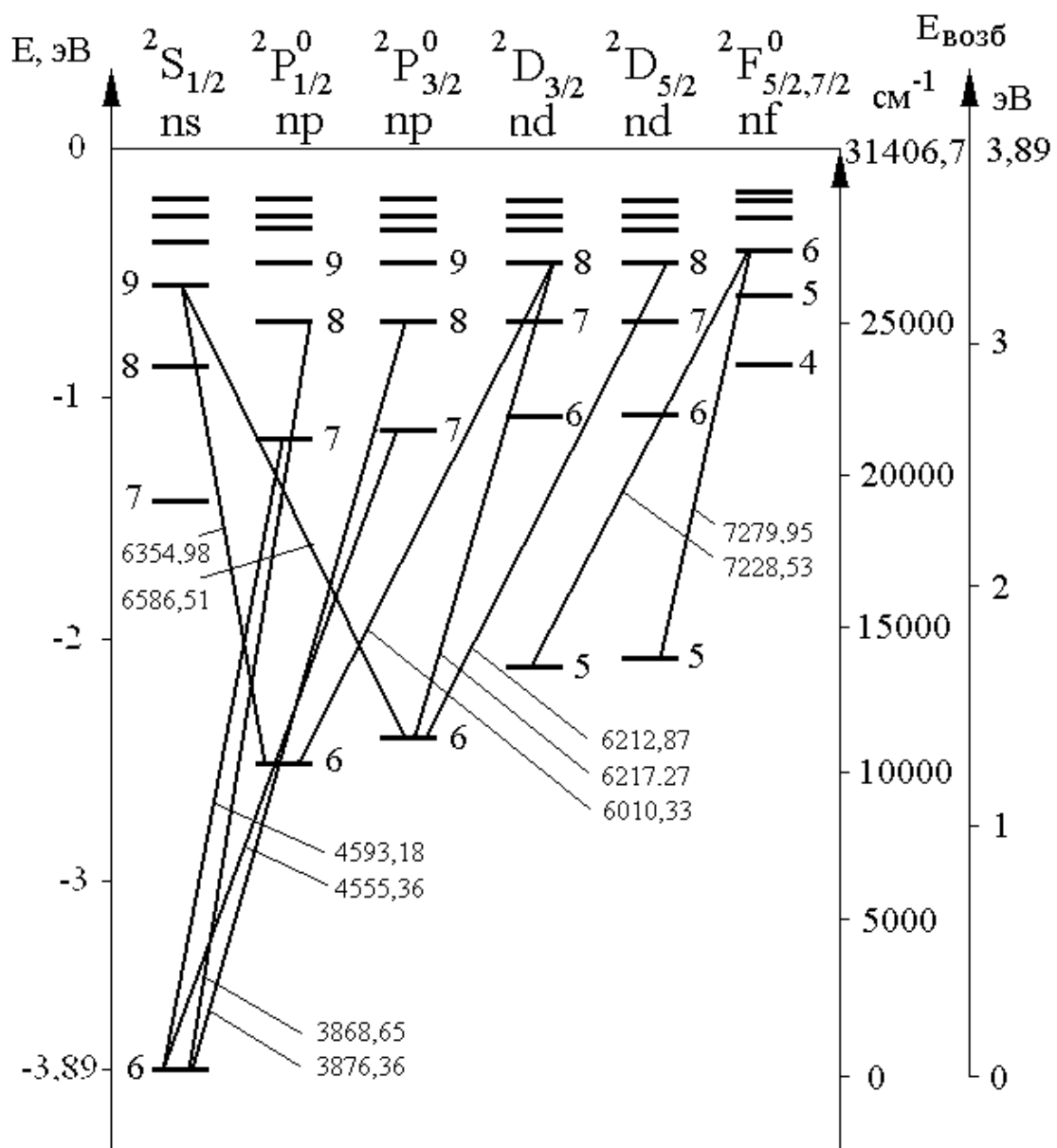


Рис. 1. Схема уровней энергии и оптических переходов атома цезия

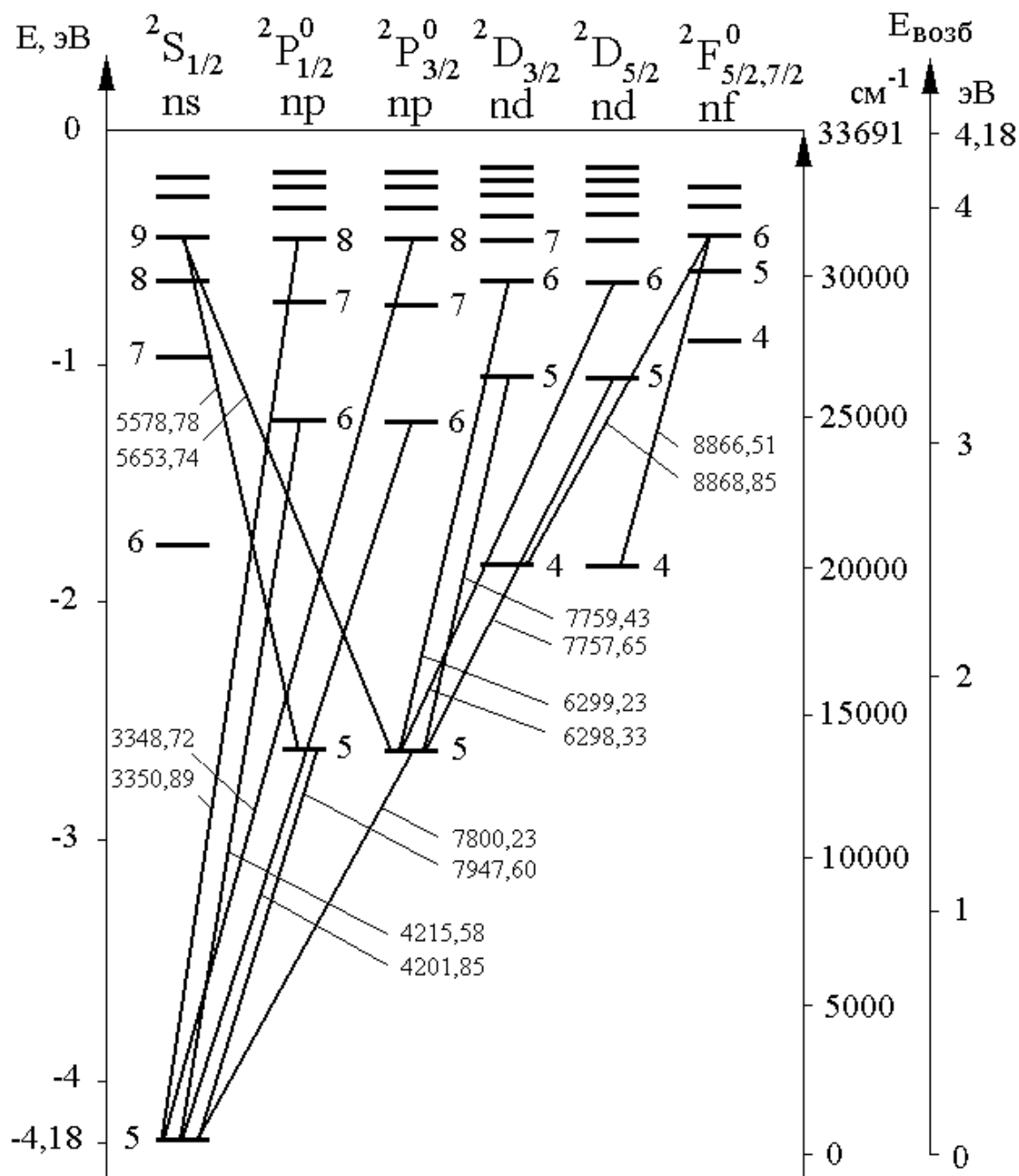


Рис. 2. Схема уровней энергии и оптических переходов атома рубидия

На рис. 1 и 2 приведены схемы уровней энергии и некоторые переходы между уровнями атомов цезия (Cs) и рубидия (Rb).

Видно, что имеются группы последовательных квантовых переходов с более высоких уровней энергии на одни и те же более низкие уровни. Такие последовательные переходы дают совокупность спектральных линий, которые называются спектральными сериями. В спектрах щелочных металлов наблюдаются следующие серии спектральных линий (эти серии могут быть представлены также в виде сериальных формул, как и для атома водорода):

1) г л а в н а я с е р и я связана с переходами с уровней энергии 2P на основной уровень ${}^2S_{1/2}$:

$$\tilde{\nu} = n_1 {}^2S_{1/2} - n_2 {}^2P_{3/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2S_{1/2} - n_2 {}^2P_{1/2}, \quad (14)$$

где $n_2 = n_1, n_1+1, n_1+2, \dots$; главные квантовые числа n_1 и n_2 для атомов различных элементов будут иметь разные значения;

2) р е з к а я с е р и я связана с переходами с уровней ${}^2S_{1/2}$ на уровни 2P :

$$\tilde{\nu} = n_1 {}^2P_{3/2} - n_2 {}^2S_{1/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2P_{1/2} - n_2 {}^2S_{1/2} \quad (15)$$

где $n_2 = n_1+1, n_1+2, n_1+3, \dots$; линии главной и резкой серии дублетные;

3) д и ф ф у з н а я с е р и я возникает при переходах с уровней энергии 2D на уровни 2P :

$$\tilde{\nu} = n_1 {}^2P_{3/2} - n_2 {}^2D_{5/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2P_{3/2} - n_2 {}^2D_{3/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2P_{1/2} - n_2 {}^2D_{3/2}, \quad (16)$$

где $n_2 = n_1, n_1+1, n_1+2, \dots$;

4) ф у н д а м е н т а л ь н а я с е р и я возникает при переходах с уровней энергии 2F на уровни 2D :

$$\tilde{\nu} = n_1 {}^2D_{5/2} - n_2 {}^2F_{7/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2D_{5/2} - n_2 {}^2F_{5/2}, \quad \tilde{\nu} = n_1 {}^2D_{3/2} - n_2 {}^2F_{5/2}, \quad (17)$$

где $n_2 = n_1, n_1+1, n_1+2, \dots$

Спектральные линии диффузной и фундаментальной серий представляют собой триплеты, компоненты которых имеют различные интенсивности.

Векторная модель атома с несколькими валентными электронами.

Уровни энергии атомов щелочноземельных элементов

Рассмотрим уровни энергии и спектры атомов с несколькими валентными электронами. Для определения квантовых чисел, характеризующих состояние атома и уровни энергии, используют квантовый закон векторного сложения моментов.

Последовательность сложения моментов определяется относительными величинами взаимодействий между электронами данного атома.

Сначала складываются моменты с максимальной величиной взаимодействия, а затем - с меньшей. Более распространенным типом связи электронов в атоме является нормальная связь или связь Рассел-Саундерса. Этот тип связи осуществляется тогда, когда электростатическое взаимодействие между электронами больше магнитного взаимодействия спинового и орбитального моментов каждого электрона (спин-орбитального взаимодействия). Поэтому для такого типа связи последовательность сложения векторов моментов следующая:

$$\vec{P}_L = \sum_{i=1}^N \vec{P}_{li}, \quad (18)$$

$$\vec{P}_S = \sum_{i=1}^N \vec{P}_{si}, \quad (19),$$

$$\vec{P}_J = \vec{P}_L + \vec{P}_S, \quad (20)$$

где li и si - квантовые числа i -го электрона; J , L , S - суммарные квантовые числа, определяющие соответственно результирующие полный момент P_J , орбитальный момент P_L и спиновый момент P_S . Возможные взаимные ориентации векторов в соотношениях (18)-(20) определяются численными значениями результирующих моментов, а именно:

$$P_L = \frac{h}{2\pi} \sqrt{L(L+1)}, \quad (21)$$

$$P_S = \frac{h}{2\pi} \sqrt{S(S+1)}, \quad (22)$$

$$P_J = \frac{h}{2\pi} \sqrt{J(J+1)}. \quad (23)$$

Орбитальное квантовое число L принимает значения от $(\sum l_i)_{\min}$ до $(\sum l_i)_{\max}$, которые отличаются друг от друга на единицу.

Спиновое квантовое число S принимает отличающиеся на единицу значения от $(\sum s_i)_{\max}$ до минимального значения, которое равно $1/2$ при нечетном числе электронов и нулю при четном числе электронов.

Внутреннее квантовое число J принимает значения

$$J = (L + S), (L + S - 1), \dots, |L - S|, \quad (24)$$

при этом число различных значений J равно $2S + 1$ при $S \leq L$ и $2L + 1$ при $L < S$.

Различным значениям J соответствуют различные ориентации векторов \vec{P}_L и \vec{P}_S и, согласно (8), различные значения дополнительной энергии, связанной со спин-орбитальным взаимодействием. Поэтому число значений J определяет число подуровней тонкой структуры. Величина $2S + 1$ называется м у л ь т и п л е т н о с т ь ю; реальная мультиплетность в случае $L < S$ определяется величиной $2L + 1$. Обозначение уровней энергии такое же, как показано в (12). Тонкая структура уровней энергии приводит к тому, что спектральные линии также имеют тонкую структуру.

Следует отметить, что кроме нормального типа связи электронов в атоме существуют и другие типы связей. Для атомов с большим числом электронов последовательность сложения моментов отличается от рассмотренной выше.

Рассмотрим структуру уровней энергии и спектральных линий атомных систем с двумя валентными электронами. К таким системам относятся, в частности, атомы щелочноземельных элементов, а также цинк, кадмий, ртуть. У этих элементов в основном состоянии два валентных s -электрона ($l = 0$), то есть электронная конфигурация ns^2 , которой соответствует основной уровень энергии n^1S_0 ($L = 0, S = 0, 2S + 1 = 1, J = 0$).

Рассмотрим возбужденные состояния атома, когда один электрон остается в состоянии ns , а второй электрон переходит в одно из возбужденных состояний. В этом случае имеются две системы уровней энергии.

Во-первых, имеется система одиночных (синглетных) уровней, когда спины электронов антипараллельны ($S=0$) и мультиплетность $2S+1=1$. Тогда $J=L$ и получается система уровней

$${}^1S_0, {}^1P_1, {}^1D_2, {}^1F_3.$$

Во-вторых, имеется система триплетных уровней, когда спины электронов параллельны ($S=1$) и мультиплетность $2S+1=3$. В этом случае $J=L+1, L, L-1$ и получается система уровней

$${}^3S_1, {}^3P_0, {}^3P_1, {}^3P_2, {}^3D_1, {}^3D_2, {}^3D_3, \dots$$

Разрешенные переходы между уровнями энергии определяются правилами отбора (13). Правила отбора по S ($\Delta S=0$) приводят к тому, что возможны переходы между уровнями одной мультиплетности, то есть синглетно-синглетные переходы и триплетно-триплетные переходы. Квантовые переходы между синглетными уровнями проявляются в спектре в виде синглетных линий. Переходы между триплетными уровнями ${}^3S_1 - {}^3P_{0,1,2}$ и ${}^3P_{0,1,2} - {}^3S_1$ дают триплетные спектральные линии, а переходы ${}^3P_{0,1,2} - {}^3D_{1,2,3}$ и ${}^3D_{1,2,3} - {}^3F_{2,3,4}$ дают секстетные (шесть) спектральные линии. В спектре проявляются также линии, которые возникают в результате переходов между синглетными и триплетными уровнями энергии, то есть с нарушением правил отбора ($\Delta S \neq 0$) из-за сильного спин-орбитального взаимодействия. Такие переходы называются **интеркомбинационными**.

На рис. 3 и 4 приведены схемы уровней энергии и некоторых переходов между уровнями для атомов цинка и кадмия.

Энергия спин-орбитального взаимодействия.

Тонкая структура уровней энергии

У всех атомов уровни энергии имеют тонкую структуру, что обуславливает тонкую структуру спектральных линий. Дополнительная энергия атома, которая определяет тонкую структуру уровней энергии, получается из уравнений квантовой механики с учетом специальной теории относительности (уравнения Дирака). Однако тонкая структура уровней энергии атома водорода и водородопо-

добных ионов следует из наглядных физических представлений при учете поправок к энергии, возникающих за счет двух эффектов.

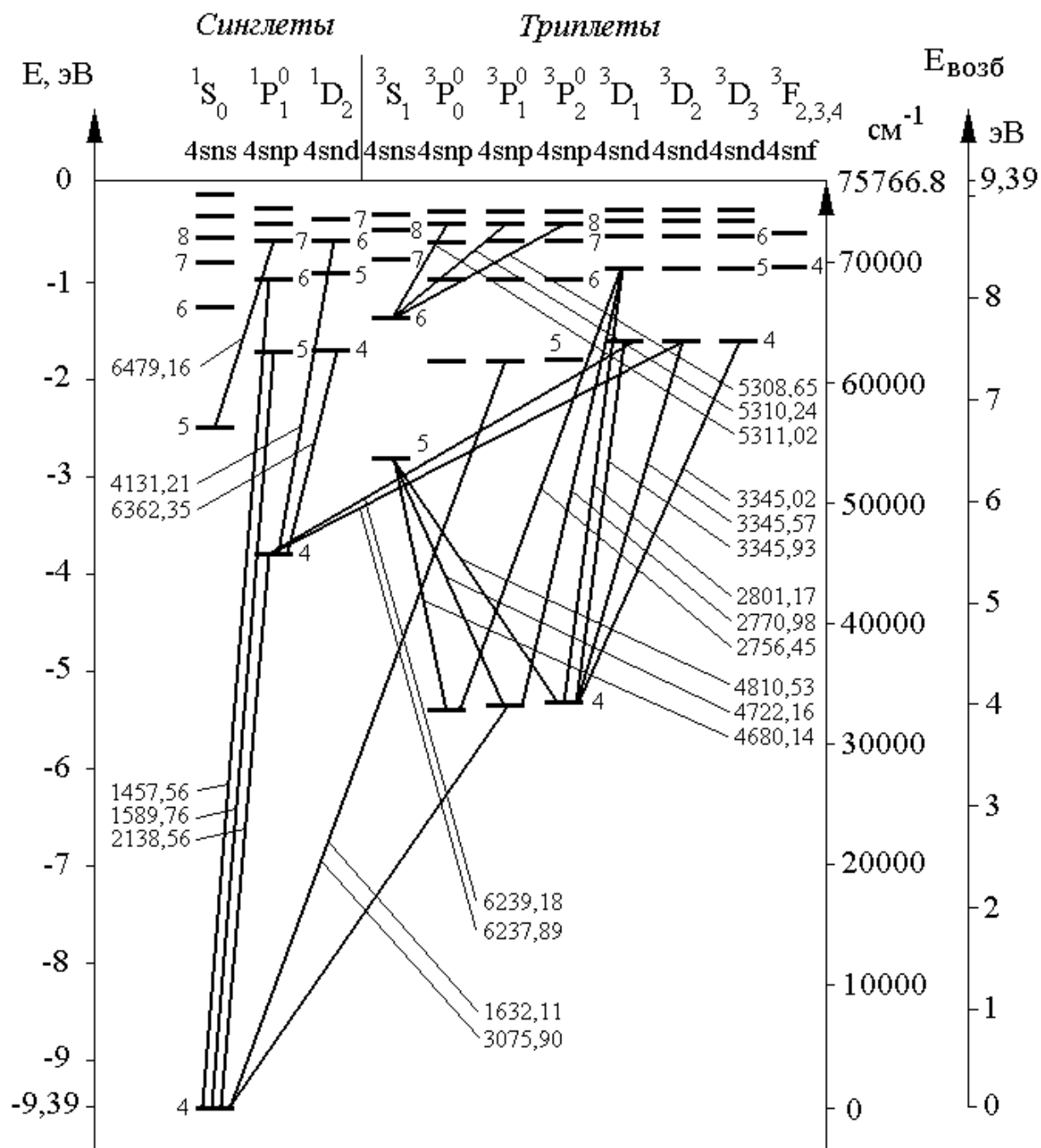


Рис. 3. Схема уровней энергии и оптических переходов атома цинка

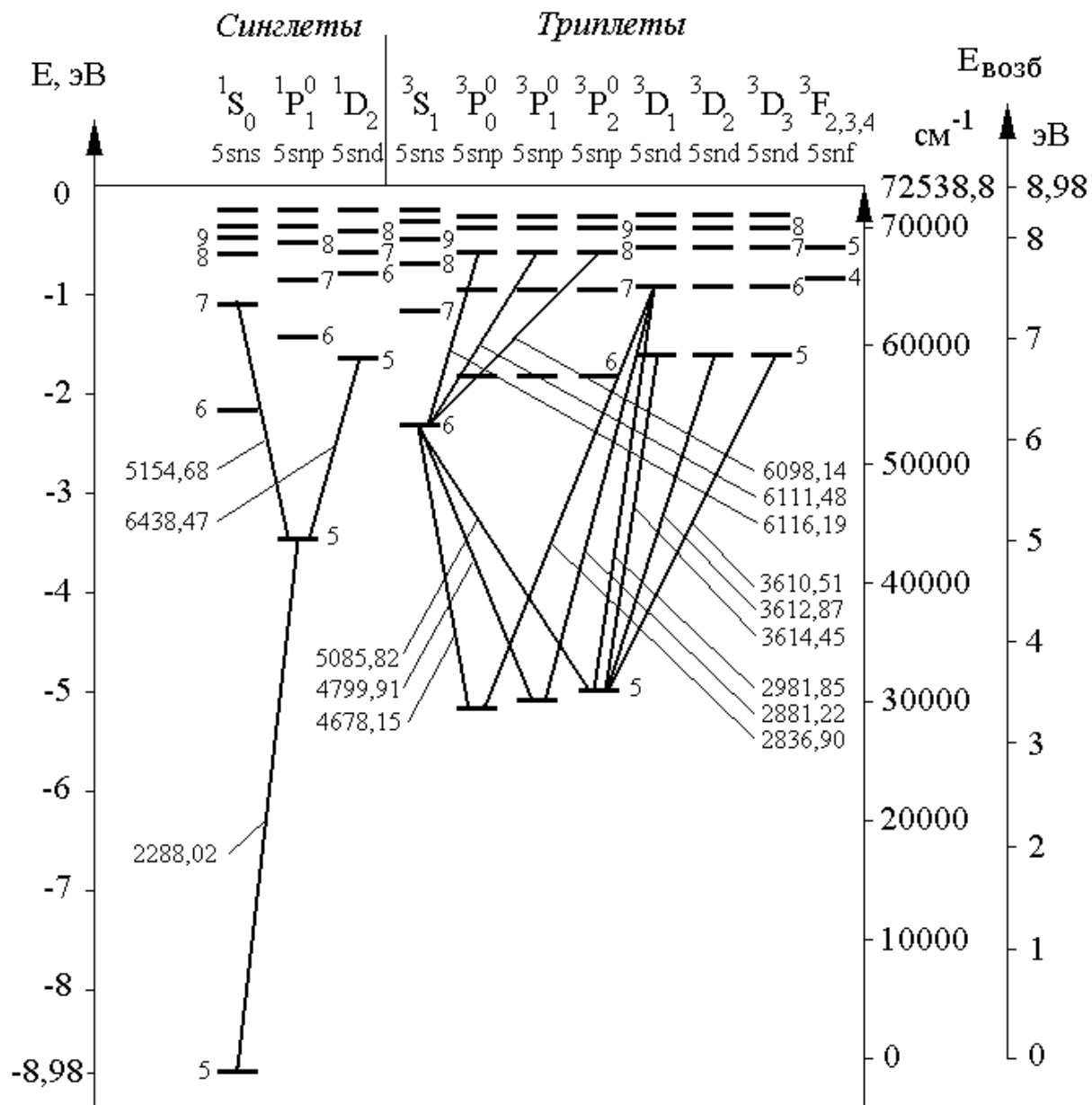


Рис. 4. Схема уровней энергии и оптических переходов атома кадмия

Во-первых, релятивистский эффект зависимости массы электрона от скорости его движения относительно ядра приводит к смещению уровней энергии. Второй эффект связан с магнитным взаимодействием орбитального и спинового моментов электрона, так называемым спин-орбитальным взаимодействием. Дополнительная энергия $\Delta E_{n,l,j}$ возникает в результате взаимодействия собственного магнитного момента электрона μ_s с магнитным полем B_l , создаваемым его же движением относительно ядра (орбитальным движением), то есть

$$\Delta E_{n,l,j} = -\vec{\mu}_s \vec{B}_l. \quad (25)$$

Так как магнитное поле B_l определяется орбитальным магнитным моментом μ_l , то формула (25) совпадает с (8). Если поправку $\Delta E_{n,l,j}$, связанную со спин-орбитальным взаимодействием, прибавить к значению энергии E_n , то получим выражение для энергии водородоподобной атомной системы в виде

$$E_{n,l,j} = E_n + \Delta E_{n,l,j} = -\frac{RchZ^2}{n^2} - \frac{Rch\alpha^2 Z^4}{n^3 l(l + \frac{1}{2})(l+1)} \frac{j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)}{2}, \quad (26)$$

где c - скорость света, $\alpha = 2\pi e^2 / hc = 1/137,09$ - постоянная тонкой структуры, e

В атомах щелочных металлов валентный электрон движется в поле атомного остатка с эффективным зарядом $Z_{eff}e = (Z - \sigma_{n,l})e$, где $\sigma_{n,l}$ - постоянная экранирования, учитывающая экранирование поля ядра электронами и зависящая от квантовых чисел n и l .

Выражение для значений энергии с учетом спин-орбитального взаимодействия и экранирования ядра получается, если в (26) заменить зарядовое число Z на $(Z - \sigma_{n,l})$:

$$E_{n,l,j} = -\frac{Rch(Z - \sigma_{n,l})^2}{n^2} - \frac{Rch\alpha^2 (Z - \sigma_{n,l})^4}{n^3 l(l + \frac{1}{2})(l+1)} \frac{j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)}{2}. \quad (27)$$

Энергия спин-орбитального взаимодействия $\Delta E_{n,l,j}$ зависит от внутреннего квантового числа j , которое при заданном l принимает следующие значения: $j = l \pm 1/2$ при $l \neq 0$ и $j = 1/2$ при $l = 0$. Поэтому энергия атомных систем с одним валентным электроном принимает при заданных n и $l \neq 0$ два различных значения, то есть уровни расщепляются на два подуровня по числу возможных значений j . Относительная величина дополнительной энергии

$$\frac{\Delta E_{n,l,j}}{E_{n,l}} \approx \frac{\alpha^2 Z^2}{n}$$

составляет для $Z=1$ несколько сотысячных. Поэтому структура уровней энергии спектральных линий, которые появляются в результате спин-орбитального взаимодействия, называется тонкой структурой уровней энергии и спектральных линий (мультиплетное расщепление)

Разность энергии δ между уровнями тонкой структуры можно получить, если принять в формуле (26) $j = l + 1/2$ и $j = l - 1/2$:

$$\delta = \Delta E_{n,l+1/2} - \Delta E_{n,l-1/2} = \frac{Rch\alpha^2(Z - \sigma_{n,l})^4}{n^3 l(l+1)}. \quad (28)$$

Формулу (28) можно записать в виде:

$$\delta = A_{n,l} \left(l + \frac{1}{2} \right), \quad (29)$$

где $A_{n,l}$ называется фактором расщепления:

$$A_{n,l} = \frac{Rch\alpha^2(Z - \sigma_{n,l})^4}{n^3 l(l+1/2)(l+1)}. \quad (30)$$

Расстояние между уровнями дублета можно выразить в шкале волновых чисел (см^{-1}):

$$\Delta \tilde{\nu} = \frac{A_{n,l}}{hc} \left(l + 1/2 \right) = \frac{R\alpha^2(Z - \sigma_{n,l})^4}{n^3(l+1)l}. \quad (31)$$

Выражение (31) можно упростить, подставляя численные значения R и α :

$$\Delta \tilde{\nu} = 5.822 \frac{(Z - \sigma_{n,l})^4}{n^3(l+1)l}. \quad (32)$$

Как видно из формулы (32), расстояние между уровнями тонкой структуры сильно зависит от квантового числа n и от зарядового числа Z . Для элементов одной группы расстояния между уровнями сильно возрастает с увеличением Z : если для элементов с малым Z расщепление составляет сотые доли эВ, то для тяжелых элементов величина расщепления достигает нескольких эВ.

В случае атомов щелочноземельных элементов с двумя валентными электронами (в частности, атомов цинка и кадмия) дополнительная энергия за счет магнитного взаимодействия спинового и орбитального моментов может быть выражена аналогично, как и для атомов щелочных металлов, а именно:

$$\Delta E_{n,L,J} = A_{n,L} \frac{J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)}{2}, \quad (33)$$

где $A_{n,L}$ - фактор мультиплетного расщепления.

Возможные уровни энергии атомов с двумя валентными электронами были рассмотрены ранее. Теперь определим относительное расстояние между уровнями триплета. Возбужденные состояния возникают, когда один электрон остается в состоянии n_1s (то есть $l_1=0$), а второй электрон переходит в состояние n_2l_2 .

Триплетные уровни возникают, когда спиновое квантовое число S равно 1, а J принимает три различных значения:

$$J_1 = L + 1 = l_2 + 1, \quad J_2 = L = l_2, \quad J_3 = L - 1 = l_2 - 1.$$

Если подставить эти значения J в формулу (33), то получим отношение интервалов между тремя уровнями в виде:

$$\frac{\Delta E_{n,L,J_1} - \Delta E_{n,L,J_2}}{\Delta E_{n,L,J_2} - \Delta E_{n,L,J_3}} = (L + 1) / L \quad (\text{или } J_1 / J_2). \quad (34)$$

Из соотношения (34) следует, что в случае уровней ${}^3D_{1,2,3}$ интервал энергий между уровнями ${}^3D_1 - {}^3D_2$ относится к интервалу энергий между уровнями

$^3D_2 - ^3D_3$ как 2:3.

Аналогично могут быть найдены отношения интервалов и для других триплетных уровней.

Описание установки

Схема экспериментальной установки, на которой выполняется работа, показана на рис.5, а общий вид универсального монохроматора УМ-2 - на рис.6.

В качестве источника излучения в работе используется безэлектродная высокочастотная лампа 1 (ВСБ-2). Эта лампа, выполненная в виде шарика ($d=2$ см), содержит небольшое количество исследуемого вещества и инертный газ (криптон) при давлении порядка 1,5 мм.рт.ст.

Шариковая лампа помещается внутри катушки индуктивности (КИ) генератора 2. работающего на частоте 100 МГц. В таких высокочастотных полях осуществляется индуктивная связь между возбуждающим контуром и газом внутри лампы. Газ нагревается, вызывая испарение металла с внутренней поверхности стеклянного шарика. Через несколько минут устанавливается такая температура, при которой возникает излучение атомов металла, а излучение атомов газа подавляется. Питание генератора осуществляется через блок питания 3 от сети переменного тока 220 в.

Режимы работы для каждой лампы даны в указаниях к экспериментальной установке. Изучение тонкой структуры спектральных линий и уровней энергии производится на элементах 1-й группы (цезия и рубидия) и элементах 2-й группы (кадмия или цинка).

Градуировочный график монохроматора (зависимость длины волны от деления барабана прибора) приведен в указаниях к экспериментальной установке. Его проверка производится по линиям спектра ртути (зеленая - 546,07 нм, зелено-голубая - 491,61 нм, сине-фиолетовая - 435,83 нм и фиолетовая - 407,78 нм).

Деления барабана 4 (рис. 6), соответствующие этим линиям ртути, приведены на градуировочном графике.

В случае, если имеются отклонения от градуировочного графика, необходимо вносить поправки при измерениях длин волн спектральных линий. На барабане длин волн нанесены относительные деления - градусы. Отсчет читается

против индекса, скользящего по спиральной канавке. В фокальной плоскости окуляра (ОК) зрительной трубы имеется указатель 8 (рис. 5) освещаемый лампочкой через сменные светофильтры в револьверной оправе 5 (рис. 6). Таким образом, при работе в любой области спектра указатель может быть освещен светом примерно той же длины волны. Для регулировки освещения указателя на приборе установлен реостат 3 (рис. 6) с выключателем 1 (рис. 6). Резкое изображение острия указателя можно получить перемещением окуляра.

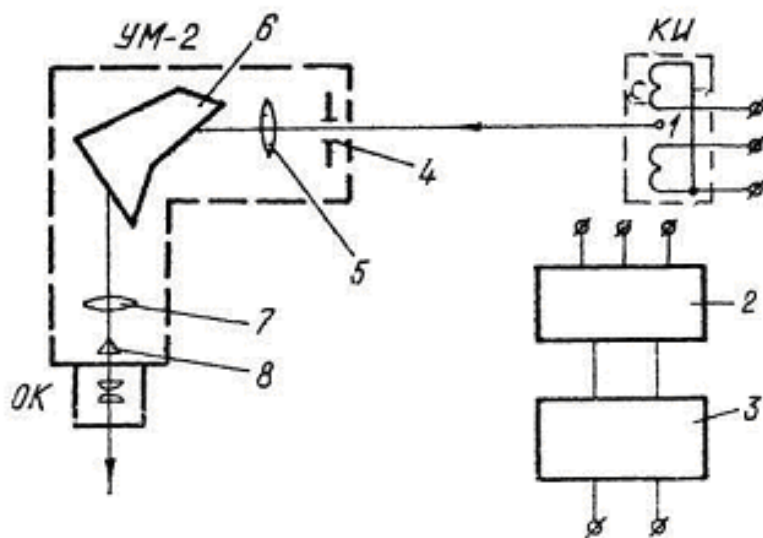


Рис. 5. Схема установки для изучения тонкой структуры спектральных линий:
 1 - источник света (безэлектродная высокочастотная лампа), 2 - генератор высокой частоты, 3 - блок питания генератора, 4 - входная щель, 5 - объектив коллиматора, 6 - диспергирующая призма, 7 - объектив зрительной трубы, 8 - указатель, КИ- катушка индуктивности в защитном кожухе, УМ-2 - универсальный монохроматор, ОК- окуляр монохроматора с указателем

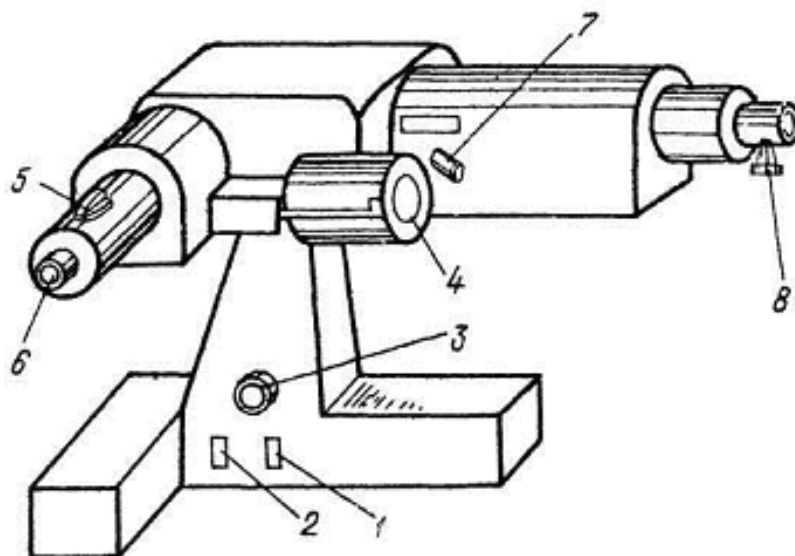


Рис.6. Общий вид монохроматора УМ-2: 1 - включение подсветки указателя, 2 - включение подсветки индекса и шкалы, 3 - реостат регулирования освещения указателя, 4 - барабан длин волн, 5 - сменные светофильтры подсветки указателя, 6 - окуляр 10^x, 7-маховичок фокусировки объектива, 8 - барабанчик раскрытия щели (цена деления 0,01 мм)

Вращая барабан длин волн и наблюдая в окуляр зрительной трубы спектрального прибора, приводят данную спектральную линию в центральное положение, совместив ее с указателем в окуляре. Ясное изображение спектральных линий в различных областях спектра можно получить при помощи маховичка 7 (рис. 6), который перемещает объектив коллиматора.

Установка нужной газоразрядной лампы и ее включение производятся в присутствии преподавателя или инженера лаборатории. Для разгорания лампы необходимо 5-10 мин. В нормальном режиме работы лампа дает интенсивное свечение. Необходимо строго соблюдать режимы работы ламп, данные в указаниях к установке.

Задание 1. Исследование тонкой структуры спектральных линий и уровней энергии атомов щелочных металлов.

Порядок выполнения задания.

1. Установить газоразрядную лампу, содержащую цезий или рубидий. Включить ее.

2. Найти дублетные спектральные линии, расположенные в синефиолетовой части спектра.

3. Определить длины волн этих линий и по диаграмме уровней энергии установить, к каким переходам между уровнями, а также к какой спектральной серии относятся наблюдаемые линии.

4. Определить величину спин-орбитального расщепления уровней энергий (в эВ и см^{-1}).

5. Рассчитать по формуле (32) значение эффективного заряда $Z_{eff} = (Z - \sigma_{n,l})$ и величину постоянной экранирования $\sigma_{n,l}$.

6. Построить схему уровней энергии (в эВ и см^{-1}) и переходы между ними для исследованных спектральных линий.

7. Объяснить наблюдаемую на опыте мультиплетность линий.

Задание 2. Исследование тонкой структуры спектральных линий и уровней энергии атомов щелочноземельных элементов.

Порядок выполнения задания.

1. Установить газоразрядную лампу, содержащую кадмий или цинк. Включить ее.

2. Найти синглетные линии в красной части спектра и триплетные линии в зелено-фиолетовой части спектра.

3. Определить длины волн этих линий и по диаграмме уровней энергии установить, к каким переходам между уровнями относятся наблюдаемые линии.

4. Построить схему уровней энергии (в эВ и см^{-1}) и переходы между ними для исследованных спектральных линий.

5. Определить отношение интервалов между триплетными уровнями и сопоставить с результатами согласно формуле (34).

6. Объяснить наблюдаемые на опыте системы спектральных линий. Объем заданий определяет преподаватель.

Контрольные вопросы

1. Правила квантования моментов и их проекций.
2. Векторная модель атома с одним валентным электроном.
3. Векторная модель атома с несколькими валентными электронами. Нормальный тип связи электронов в атоме.

4. Спин-орбитальное взаимодействие и тонкая структура уровней энергий и спектральных линий.

5. Зависимость тонкой структуры от зарядового числа Z и квантового числа n .

Литература

Савельев И. В. Курс общей физики. Т.3. Оптика, атомная физика, физика ядра и элементарных частиц. М.: Наука, 1989.

Сивухин Д.А. Общий курс физики. Т.5. Атомная и ядерная физика. М.: МФТИ, ФМЛ, 2002.

Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику. М.: Наука, 1988.