

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**А. Н. ГОДЛЕВСКАЯ, В. Г. ШОЛОХ**

## **ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**Состояния и спектры  
многоэлектронных атомов и молекул**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

для студентов специальностей  
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»  
и 1-31 04 03 «Физическая электроника»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2015

УДК 539.18 : 539.19 (076)  
ББК 22.344.3я73 + 22.36 я73  
Г592

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук В. Н. Капшай;  
кандидат технических наук А. Н. Попов

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Годлевская, А. Н.**

Г592      **Физика атомов и атомных явлений: состояния и спектры  
многоэлектронных атомов и молекул : практическое пособие /  
А. Н. Годлевская, В. Г. Шолох ; М-во образования РБ, Гом.  
гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины,  
2015. – 41 с.**

ISBN 978-985-577-036-8

Практическое пособие подготовлено в целях оказания помощи студентам в овладении базовыми знаниями, а также в подготовке к выполнению лабораторных работ по разделам курса «Физика атомов и атомных явлений», связанным с квантово-механическим описанием состояний многоэлектронных атомов и простейших молекул, изучением характеристических рентгеновских спектров атомов.

Адресовано студентам физических специальностей 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»; 1-31 04 03 «Физическая электроника».

**УДК 539.18 : 539.19 (076)  
ББК 22.344.3я73 + 22.36 я73**

**ISBN 978-985-577-036-8**

© Годлевская А. Н., Шолох В. Г., 2015  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2015

## Оглавление

Предисловие .....	4
<b>Тема 1. Электронное строение сложных атомов .....</b>	<b>5</b>
<b>Лабораторная работа 1. Изучение электронного строения сложного атома на основе векторной модели Рассела – Саундерса .....</b>	<b>13</b>
<b>Лабораторная работа 2. Изучение электронного строения атома натрия .....</b>	<b>15</b>
<b>Тема 2. Рентгеновские спектры атомов .....</b>	<b>18</b>
<b>Лабораторная работа 3. Изучение закономерностей в рентгеновских спектрах на основе компьютерной модели .....</b>	<b>25</b>
<b>Тема 3. Электронное строение и спектры молекул .....</b>	<b>32</b>
<b>Лабораторная работа 4. Определение основных характеристик электронно-колебательной полосы поглощения .....</b>	<b>38</b>
Литература .....	41

## Предисловие

Физический практикум является одной из главных составляющих университетского образования по физике. В ходе выполнения лабораторных работ студенты осваивают современные методы измерения физических величин, исследуют физические явления, знакомятся с физическими приборами и приобретают навыки экспериментальной работы на натуральных установках и в виртуальной лаборатории, получают экспериментальное подтверждение физических закономерностей, применяют на практике теоретические знания, полученные на лекционных и семинарских занятиях.

Для успешного проведения занятий физпрактикума требуется не только хорошее оснащение учебной лаборатории современными приборами и оборудованием, но и их соответствующее методическое обеспечение. К сожалению, учебно-методическая литература по экспериментальному изучению основ физики атома в количестве, достаточном для обеспечения учебного процесса, отсутствует. Обновление учебно-методической базы необходимо и в связи с постановкой новых лабораторных работ, в том числе таких, выполнение которых связано с использованием компьютерных моделей физических явлений.

В практическом пособии приведены краткие теоретические сведения, необходимые студентам для самостоятельной подготовки к выполнению лабораторных работ, методические указания относительно порядка их выполнения и вопросы, предназначенные для самоконтроля. Дополнительную информацию, необходимую при оформлении отчёта о лабораторной работе и подготовке к его защите, студенты могут найти в литературе, список которой имеется в практическом пособии.

В данное практическое пособие включены соответствующие программе курса общей физики лабораторные работы по разделам, связанным с квантово-механическим описанием состояний многоэлектронных атомов и простейших молекул, изучением характеристических рентгеновских спектров атомов.

Методические материалы адресованы студентам, обучающимся по специальностям 1-31 04 01 02 «Физика (производственная деятельность)», 1-31 04 01 03 «Физика (научно-педагогическая деятельность)», 1-31 04 01 04 «Физика (управленческая деятельность)», 1-31 04 03 «Физическая электроника».

# Тема 1. Электронное строение сложных атомов

## Теоретические основы

В квантовой механике состояние электрона в атоме характеризуется следующими физическими величинами: полной энергией  $E_n$ , модулем орбитального момента количества движения  $|\vec{l}|$ , проекцией орбитального момента на выделенное направление  $l_z$  и проекцией спинового момента  $s_z$ . Идея о спиновом движении как специфическом свойстве микрочастицы естественным образом вытекает из релятивистского квантовомеханического рассмотрения (уравнение Дирака и его решение). Аналог этому свойству в классической теории отсутствует, однако для наглядного представления спиновый момент часто уподобляют моменту количества движения собственного вращения электрона (вращения относительно его оси).

Собственные значения операторов перечисленных выше физических величин квантованы и определяются соответственно через главное  $n$ , орбитальное  $l$ , магнитное  $m_l$  и спиновое магнитное  $m_s$ , квантовые числа следующим образом:

$$E_n = -\gamma^2 \frac{mZ^2 e^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (1.1)$$

(в кулоновском приближении);

$$|\vec{l}| = \hbar \sqrt{l(l+1)}; \quad (1.2)$$

$$l_z = \hbar m_l; \quad (1.3)$$

$$s_z = \hbar m_s, \quad (1.4)$$

где  $\gamma = 1/(4\pi\epsilon_0)$ ,

$m$  – масса покоя электрона;

$Z$  – зарядовое число ядра атома;

$e$  – модуль заряда электрона;

$\hbar = h/(2\pi)$  – приведённая постоянная Планка.

Возможные значения квантовых чисел  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$  таковы:

$$\begin{aligned} n &= 1, 2, 3, \dots, \infty; \\ l &= 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1); \\ m_l &= \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l; \\ m_s &= \pm 1/2. \end{aligned}$$

Модуль спинового момента электрона квантован по правилу

$$|\vec{s}| = \hbar\sqrt{s(s+1)},$$

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

Как следует из выражений (1.1)–(1.4), для характеристики определённого квантового состояния электрона достаточно указать набор из четырех квантовых чисел  $n, l, m_l, m_s$ . В соответствии с принципом Паули в каждом квантовом состоянии в атоме может находиться не более одного электрона. При заданном значении  $l$  в атоме существует  $2(2l + 1)$  состояний с различными  $m_l$  и  $m_s$ . Заданному значению главного квантового числа  $n$  соответствует  $2n^2$  разных состояний, которые характеризуются одинаковой энергией, которую в кулоновском приближении можно рассчитать по формуле (1.1). Такие состояния называют вырожденными, а сам факт их существования – явлением вырождения. Степень вырождения (статистический вес энергетического уровня) – это число квантовых состояний, соответствующих определённому значению энергии. При наличии, кроме кулоновского взаимодействия электрона с ядром, других взаимодействий (например, межэлектронного, спин-орбитального) энергия зависит также от других квантовых чисел (например, от  $l$  и  $m_l$ ), и вырождение по этим квантовым числам снимается, следствием чего является расщепление энергетических уровней и спектральных линий.

В одноэлектронном приближении для определения состояния сложного атома необходимо указать наборы четырёх квантовых чисел  $n, l, m_l, m_s$  для каждого из электронов, располагая их в порядке возрастания энергии.

Закономерность распределения электронов по состояниям в электронных оболочках атомов обуславливает периодичность физико-химических свойств атомов, отражённую в периодической системе элементов. Это распределение определяется на основе: 1) принципа Паули; 2) требования минимальности энергии атома.

Как обобщение результатов исследований был сформулирован ряд эмпирических правил, отражающих основные закономерности распределения электронов по состояниям в разных атомах. В соответствии с правилом Маделунга – Клечковского *наименьшей энергией электрон обладает в состоянии, для которого величина  $(n + l)$  минимальна; при равном значении  $(n + l)$  для нескольких состояний наименьшая энергия соответствует состоянию, в котором значение  $n$  меньше.*

Электронная структура атома может быть компактно представлена в виде символической записи, называемой *электронной конфигурацией*.

Записывая электронную конфигурацию, электронные оболочки располагают в порядке возрастания их энергии, а число электронов в них указывают в верхнем индексе справа от символа оболочки. Например, электронная конфигурация атома натрия ( $Z = 11$ ) в нормальном состоянии имеет вид  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ .

Для характеристики состояний сложного атома как единой системы, содержащей более одного электрона, необходимо определить значение полного момента количества движения атома  $\vec{J}$ , который складывается из орбитальных  $\vec{l}_i$  и спиновых  $\vec{s}_i$  моментов отдельных электронов. Выделяют два предельных типа связи электронов в атоме (векторные модели атома): нормальную (Рассела – Саундерса) и  $(\vec{j} - \vec{j})$ -связь.

В модели нормальной связи удовлетворительно описываются так называемые лёгкие и средние атомы, в которых спин-орбитальное взаимодействие незначительно.

В случае нормальной связи полный момент атома  $\vec{J}$  вычисляется по правилу

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}, \quad (1.5)$$

где

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i \quad (1.6)$$

– суммарный орбитальный момент атома;

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i \quad (1.7)$$

– суммарный спиновый момент атома.

Возможные значения квантовых чисел  $L$ ,  $S$ ,  $J$  положительны и определяются в соответствии с соотношениями (1.5)–(1.7) следующим образом:

$$L = l_1 + l_2 + \dots; l_1 + l_2 + \dots - 1; l_1 + l_2 + \dots - 2; \dots; L_{\min};$$

$$S = s_1 + s_2 + \dots; s_1 + s_2 + \dots - 1; s_1 + s_2 + \dots - 2; \dots; S_{\min};$$

$$J = L + S; L + S - 1; L + S - 2; \dots; |L - S|.$$

Правила квантования моментов количества движения атома как целого  $\vec{L}$ ,  $\vec{S}$ ,  $\vec{J}$  содержат соответственно квантовые числа  $L$ ,  $S$ ,  $J$  и имеют вид, аналогичный выражению (1.2):

$$|\vec{L}| = \hbar \sqrt{L(L+1)}; |\vec{S}| = \hbar \sqrt{S(S+1)}; |\vec{J}| = \hbar \sqrt{J(J+1)}.$$

Для компактного представления информации о состояниях атомов, в которых реализуется нормальная связь, используются *спектротические обозначения*. В зависимости от величины орбитального

квантового числа  $L$  состояния обозначаются прописными буквами:  $S$  ( $L = 0$ ),  $P$  ( $L = 1$ ),  $D$  ( $L = 2$ ),  $F$  ( $L = 3$ ) и т. д. Справа от прописной буквы в виде нижнего индекса указывается значение квантового числа  $J$ , а слева от неё в виде верхнего индекса – мультиплетность состояния  $\kappa = 2S + 1$ . Например, запись  ${}^3P_0$  соответствует состоянию атома, которое характеризуют квантовые числа  $L = 1$ ,  $S = 1$ ,  $J = 0$ .

В соответствии с правилами Хунда при заданной электронной конфигурации наименьшей энергией атом обладает в состоянии с наибольшим возможным значением  $S$  и с наибольшим возможным при таком  $S$  значением  $L$ . При этом квантовое число  $J$  равно  $|L - S|$ , если заполнено менее половины оболочки (то есть состояний с данным значением  $l$ ), и  $J = L + S$  в остальных случаях.

Связь  $\vec{j} - \vec{j}$  характерна для тяжёлых атомов, в которых спин-орбитальное взаимодействие существенно. В соответствии с этой моделью момент количества движения атома

$$\vec{J} = \sum_i \vec{j}_i, \quad (1.8)$$

где  $\vec{j}_i = \vec{l}_i + \vec{s}_i$  – полный момент  $i$ -го электрона.

Из числа сложных атомов наиболее простое описание реализуется для атомов щелочных металлов, состояния которых полностью определяются состояниями валентного электрона.

При квантовомеханическом описании электронных и спектральных свойств атомов щелочных металлов рассматривают движение единственного электрона внешней оболочки атома (валентного электрона) в поле атомного остова, то есть в поле, создаваемом ядром и полностью заполненными внутренними электронными оболочками. Решение уравнения Шрёдингера в таком приближении (в модели валентного электрона) для энергии стационарного состояния валентного электрона имеет следующий вид:

$$E_{nl} = -\gamma^2 \frac{mZ^2 e^4}{2\hbar^2 (n + \sigma)^2} = -\gamma^2 \frac{mZ^2 e^4}{2\hbar^2 n^{*2}}. \quad (1.9)$$

В отличие от формулы (1.1) для энергии водородоподобного атома в стационарном состоянии выражение (1.9) содержит поправочный член  $\sigma$  (квантовый дефект), посредством которого учитывается взаимодействие валентного электрона с другими электронами атома щелочного металла.

Квантовый дефект определяется следующим образом:



$$\sigma = -C_1 \cdot \gamma \frac{me^2}{\hbar^2 (l + 1/2)}, \quad (1.10)$$

где  $C_1$  – величина, постоянная для атома с заданным  $Z$ ;

$l$  – орбитальное квантовое число.

Величину  $n^* = n + \sigma$  называют эффективным квантовым числом.

Влияние внутренних электронных оболочек можно учесть также, вводя эффективный заряд ядра и постоянную экранирования  $a$ :

$$E_{nl} = -\gamma^2 \cdot \frac{mZ_{\text{эф}}^2 e^4}{2\hbar^2 n^2} = -Rch \frac{Z_{\text{эф}}^2}{n^2}, \quad (1.11)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга ( $\text{м}^{-1}$ );

$c$  – скорость света в вакууме,

$$Z_{\text{эф}} = Z - a \quad (1.12)$$

– эффективный заряд ядра. Для атома натрия в основном состоянии постоянная экранирования  $a = 9,156$ .

Анализируя формулы (1.9) и (1.10) видим, что энергия стационарного состояния атома щелочного элемента определяется не только значением главного квантового числа  $n$  (как у водородоподобных атомов), но и величиной орбитального квантового числа  $l$ , то есть имеет место снятие вырождения по  $l$ . На схеме энергетических уровней атома натрия (рисунок 1.1) видно, что при заданном значении  $n$  с увеличением квантового числа  $l$  энергия атома увеличивается.

Переходы атомов (в том числе и атомов щелочных металлов) из одного стационарного состояния в другое, сопровождающиеся испусканием или поглощением электромагнитного излучения, подчиняются правилам отбора:

$$\Delta L = \pm 1;$$

$$\Delta J = 0, \pm 1 \text{ (кроме переходов } J_1 = 0 \rightarrow J_2 = 0).$$

В спектрах атомов щелочных элементов, в соответствии с указанными правилами отбора, наблюдаются следующие основные серии (для определённости рассмотрим атом натрия, электронная конфигурация и спектральный терм которого в основном состоянии имеют вид  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1; ^2S_{1/2}$ ):

– главная серия, состоящая из спектральных линий, соответствующих переходам

$$3s^2 S_{1/2} \rightarrow np^2 P_{3/2};$$

$$3s^2 S_{1/2} \rightarrow np^2 P_{1/2};$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots$ ;



– первая побочная (диффузная) серия, обусловленная переходами

$$3p^2P_{3/2} \rightarrow nd^2D_{3/2,5/2};$$

$$3p^2P_{3/2} \rightarrow nd^2D_{3/2},$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots, \infty$ ;

– вторая побочная (резкая) серия, наблюдаемая при переходах

$$3p^2P_{3/2} \rightarrow ns^2S_{1/2};$$

$$3p^2P_{1/2} \rightarrow ns^2S_{1/2},$$

где  $n = 4, 5, 6, \dots, \infty$ ;

– серия Бергмана (фундаментальная), отнесенная к переходам

$$3d^2D_{3/2} \rightarrow nf^2F_{5/2};$$

$$3d^2D_{5/2} \rightarrow nf^2F_{5/2,7/2},$$

где  $n = 4, 5, 6, \dots, \infty$ .

При решении задачи о движении электрона в поле центральных сил в *релятивистском приближении* (уравнение Дирака) учитываются наличие спина и спин-орбитальное взаимодействие. В этом приближении для энергии щелочного атома в стационарном состоянии получено выражение

$$E_{nlj} = E_{nl} + \Delta E_{nlj} = -Rch \frac{Z'_{y\delta\delta}{}^2}{n^2} - \frac{\alpha^2 Rch Z'_{y\delta\delta}{}^4}{n^3} \left( \frac{1}{j+1/2} - \frac{3}{4n} \right), \quad (1.13)$$

где  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar \cdot c} = 1/137$  – постоянная тонкой структуры;

$j$  – внутреннее квантовое число;

$Z'_{y\delta\delta} = Z - a'$  – эффективный заряд ядра.

Поправка  $a'$  отличается от постоянной экранирования  $a$ , содержащейся в формулах (1.11), (1.12).

Сравнивая формулы (1.11) и (1.13) видим, что при учёте релятивистских эффектов и спин-орбитального взаимодействия в формуле для энергии стационарного состояния появляется добавка  $\Delta E_{nlj}$ , величина которой зависит от внутреннего квантового числа. Следовательно, указанными факторами обусловлено снятие вырождения по квантовому числу  $j$  и проявление тонкой структуры энергетических уровней. В соответствии с двумя возможными значениями  $j$  для валентного электрона в атоме щелочного металла ( $j_1 = l + 1/2$ ;  $j_2 = l - 1/2$ ) каждый энергетический уровень (кроме  $s$ -уровня, для которого  $j$  принимает единственное значение  $j = 1/2$ ) расщепляется на два подуровня, обуславливая дублетную структуру энергетических уровней. Рассмотренное расщепление энергетических уровней естественным

образом проявляется в спектрах испускания и поглощения атомов щелочных элементов в виде тонкой структуры линий. Применяя правило частот Бора с учетом формулы (1.13) можно получить следующее выражение для разности частот  $\Delta\nu$  компонентов спектрального дублета щелочного элемента:

$$\Delta\nu = \xi_{nl} \frac{1}{n^3 l(l+1)}, \quad (1.14)$$

где

$$\xi_{nl} = R c \alpha^2 Z_{\text{яд}}^4 \quad (1.15)$$

– постоянная мультиплетного расщепления.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какими физическими величинами характеризуют состояние электрона в атоме? Каковы правила квантования этих величин?
2. Какие значения могут принимать квантовые числа  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$ , характеризующие состояние электрона в атоме?
3. Какими положениями следует руководствоваться при определении порядка заполнения квантовых состояний электронами в сложном атоме?
4. Что называют электронной конфигурацией атома?
5. Каковы алгоритмы определения полного момента импульса  $\vec{J}$  сложного атома в соответствии с векторной моделью: а) нормальной связи; б)  $(\vec{j} - \vec{j})$ -связи?
6. Как определить спектроскопическое обозначение состояния многоэлектронного атома с нормальным типом связи?
7. Какова сущность понятия «спектральный терм атома»? Приведите примеры спектральных термов.
8. Какова сущность правил Хунда?
9. В чём суть модели валентного электрона (эффективного ядра)?
10. Как определяется энергия стационарного состояния атома щелочного металла на основе модели эффективного ядра?
11. В чём суть спин-орбитального взаимодействия и как оно проявляется в спектрах атомов щелочных металлов?
12. В соответствии с какими правилами реализуются дипольные переходы в сложных атомах?
13. Каковы серийные закономерности в спектрах атомов щелочных металлов?

# Лабораторная работа 1

## Изучение электронного строения сложного атома на основе векторной модели Рассела – Саундерса

**Цель работы:** изучить основные положения теории электронного строения сложного атома и правила отбора в дипольном приближении; научиться применять изученный материал, решая частные задачи (в соответствии с номером варианта, указанным преподавателем).

**Принадлежности:** электронный учебно-методический комплекс по курсу «Физика атома и атомных явлений», условия заданий (таблица 1.1).

### Задание 1. Определение электронной конфигурации многоэлектронного атома

#### Порядок выполнения работы

1. Считая применимым одноэлектронное приближение для определения состояния невозбужденного атома, которому соответствует зарядовое число  $Z$ , определите возможные наборы квантовых чисел  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ ,  $m_s$  для каждого электрона и занесите их в таблицу 1.1 в порядке возрастания энергии. Варианты заданий указаны в таблице 1.2. Сформулируйте правила, которыми вы руководствуетесь при выполнении задания.

Таблица 1.1 – Квантовые числа электронов атома

Условный номер электрона	$n$	$l$	$m_l$	$m_s$
1				
...				

2. Используя спектроскопические обозначения, запишите электронную конфигурацию атома в основном состоянии.

### Задание 2. Определение возможных спектральных термов атома на основе его электронной конфигурации

#### Порядок выполнения работы

1. Запишите правила, в соответствии с которыми определяют возможные значения квантовых чисел  $L$ ,  $S$ ,  $J$ , характеризующих состояние многоэлектронного атома.

Таблица 1.2 – Дополнительная информация для конкретизации заданий в соответствии с их вариантами

Но- мер зада- ния	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Z = 7	Z = 9	Z = 12	Z = 14	Z = 15	Z = 22	Z = 31	Z = 32
2	$s^2p^5$	$p^4$	$s^2p^2$	$s^2p$	$p^3$	$d^2$	$ds^2$	$d^9s$
3	$2^{1/2}S_{1/2},$ $3^2S_{1/2},$ $2^1P_{3/2}, 3^3P_0,$ $2^2D_{5/2},$ $3^2D_{3/2}, 2^3F_3$	$3^2S_0, 2^3S_1,$ $3^2F_{5/2}, 4^3S_{3/2},$ $3^1D_2, 2^2P_{1/2},$ $4^3F_3$	$4^3P_0, 2^2D_2,$ $3^0S_0, 4^5D_{1/2},$ $4^3P_1, 2^1F_2,$ $7^3G_3$	$2^2P_{3/2}, 2^2S_1,$ $5^1F_4, 3^2P_{5/2},$ $4^3D_2, 5^3P_1$ $3^4F_{3/2}$	$6^4S_{3/2}, 4^4F_{3/2},$ $2^1S_0, 4^4F_{9/2},$ $2^3P_0, 3^3D_{3/2},$ $3^5D_4$	$2^2P_{3/2},$ $8^1G_4, 3^3P_0,$ $3^2S_1, 4^2F_{5/2},$ $6^1S_0, 5^3P_1$	$3^3P_2,$ $2^2D_{3/2},$ $4^4F_{3/2},$ $2^1S_0, 3^3P_1,$ $5^4F_5, 3^2D_2$	$2^2P_{3/2},$ $4^5D_4, 3^3S_0,$ $4^3P_{5/2}, 5^3F_4,$ $2^1S_0, 4^3F_{9/2}$
4	${}^2F_4 \leftrightarrow {}^3D_1;$ ${}^2F_4 \leftrightarrow {}^3G_5;$ ${}^2S_{3/2} \leftrightarrow {}^2P_{3/2};$ ${}^2P_{3/2} \leftrightarrow {}^4F_{7/2};$ ${}^1F_3 \leftrightarrow {}^1F_4;$ ${}^4D_{5/2} \leftrightarrow {}^4F_{7/2}$	${}^1G_4 \leftrightarrow {}^1S_0;$ ${}^3S_1 \leftrightarrow {}^3P_1;$ ${}^4P_{3/2} \leftrightarrow {}^2P_{3/2};$ ${}^4P_{1/2} \leftrightarrow {}^4D_{7/2};$ ${}^4S_{3/2} \leftrightarrow {}^4P_{3/2};$ ${}^4P_{3/2} \leftrightarrow {}^4D_{5/2}$	${}^1F_3 \leftrightarrow {}^3D_2;$ ${}^3P_0 \leftrightarrow {}^3F_4;$ ${}^2P_{3/2} \leftrightarrow {}^2D_{5/2};$ ${}^3D_3 \leftrightarrow {}^3F_3;$ ${}^4P_{1/2} \leftrightarrow {}^4D_{7/2};$ ${}^4G_{11/2} \leftrightarrow {}^4F_{9/2}$	${}^2S_{1/2} \leftrightarrow {}^2D_{5/2};$ ${}^2P_{1/2} \leftrightarrow {}^2D_{3/2};$ ${}^1S_0 \leftrightarrow {}^3P_0;$ ${}^3F_3 \leftrightarrow {}^3D_1;$ ${}^4F_{9/2} \leftrightarrow {}^4F_{7/2}$	${}^2F_{5/2} \leftrightarrow {}^2P_{1/2};$ ${}^2F_{5/2} \leftrightarrow {}^2P_{3/2};$ ${}^4P_{1/2} \leftrightarrow {}^4S_{3/2};$ ${}^1F_3 \leftrightarrow {}^1D_2;$ ${}^1G_4 \leftrightarrow {}^3F_3;$ ${}^2P_{1/2} \leftrightarrow {}^2D_{5/2}$	${}^4D_{5/2} \leftrightarrow {}^4P_{1/2};$ ${}^3P_1 \leftrightarrow {}^3F_2;$ ${}^2P_{5/2} \leftrightarrow {}^4D_{7/2};$ ${}^1S_0 \leftrightarrow {}^3P_1;$ ${}^3D_3 \leftrightarrow {}^3F_4;$ ${}^4S_{3/2} \leftrightarrow {}^4D_{3/2}$	${}^4F_{5/2} \leftrightarrow {}^4G_{7/2};$ ${}^4S_{3/2} \leftrightarrow {}^2S_{1/2};$ ${}^3P_2 \leftrightarrow {}^4D_{3/2};$ ${}^1G_4 \leftrightarrow {}^3F_3;$ ${}^3F_4 \leftrightarrow {}^3D_3;$ ${}^4P_{3/2} \leftrightarrow {}^4D_{3/2}$	${}^2D_{5/2} \leftrightarrow {}^2G_{3/2};$ ${}^3D_3 \leftrightarrow {}^3F_3;$ ${}^4P_{3/2} \leftrightarrow {}^4F_{5/2};$ ${}^4D_{3/2} \leftrightarrow {}^2P_{3/2};$ ${}^2P_{3/2} \leftrightarrow {}^2P_{1/2};$ ${}^3P_0 \leftrightarrow {}^3D_2$

2. Обосновывая свои действия, определите спектроскопические обозначения возможных состояний атома, имеющего заданную электронную конфигурацию (таблица 1.2).

3. Применяя правила Хунда, расположите состояния атома в порядке возрастания энергии.

### **Задание 3. Выбор возможных состояний многоэлектронного атома на основе анализа спектроскопического обозначения термина**

#### **Порядок выполнения работы**

1. Определите значения квантовых чисел  $L$ ,  $S$ ,  $J$  на основе спектроскопических обозначений состояний, указанных в предложенном вам варианте (таблица 1.1).

2. Определите, какие из этих состояний возможны. Обоснуйте своё решение.

### **Задание 4. Анализ возможности излучательного квантового перехода между заданными состояниями атома**

#### **Порядок выполнения работы**

1. Запишите правила отбора, которые должны выполняться при изменении состояния атома, сопровождающемся испусканием или поглощением электромагнитного излучения.

2. Определите, возможны ли исходное и конечное состояния в переходах, указанных в условии (таблица 1.1).

3. Определите, какие из переходов, связывающих возможные состояния, разрешены. Ответ обоснуйте.

4. Обобщите результаты выполнения заданий 1–4.

## **Лабораторная работа 2**

### **Изучение электронного строения атома натрия**

**Цель работы:** изучение основных закономерностей электронного строения и спектров щелочных металлов; определение величины

дублетного расщепления спектральных термов, эффективного заряда и постоянной экранирования для атома натрия.

**Принадлежности:** компьютерная модель спектра и схема энергетических уровней атома натрия с указанными на ней значениями длин волн спектральных линий, соответствующих разным спектральным дублетам.

## Задание 1. Изучение структуры спектра атома натрия

### Порядок выполнения работы

1. Изучите закономерности построения схемы энергетических уровней атома натрия (рисунок 1.1) и выделите на ней пары переходов, соответствующие дублетам разных спектральных серий.

2. Определите положение спектральных дублетов на компьютерном изображении спектра атома. Произведите отнесение обнаруженных дублетов переходам между состояниями атома, отображёнными на схеме энергетических уровней.

3. Используя спектроскопические обозначения, запишите электронные переходы, соответствующие выделенным линиям, с указанием спектральной серии, которой они принадлежат.

## Задание 2. Определение постоянной экранирования<sup>1</sup>

### Порядок выполнения работы

1. Вычислите разность частот  $\Delta\nu$  для анализируемых дублетов из спектра атома натрия по формуле

$$\Delta\nu = c \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right).$$

2. Используя найденные значения  $\Delta\nu$  и формулу (1.14), вычислите значения постоянной расщепления  $\xi_{nl}$ .

3. Сравните значения  $\xi_{nl}$ , рассчитанные при разных значениях  $n$  и  $l = \text{const}$ . Сформулируйте вывод о тенденции в изменении  $\xi_{nl}$  при увеличении главного квантового числа  $n$ .

---

<sup>1</sup> Задания 2–3 выполняются с использованием длин волн каждого указанного преподавателем дублета атома натрия.



4. Пользуясь выражениями (1.15) и (1.12), определите значения эффективного заряда ядра  $Z'_{\hat{y}\hat{o}\hat{\delta}}$  и постоянной экранирования  $a'$ . Полученные результаты занесите в таблицу 1.3.

5. Сопоставьте результаты, полученные для термов с разными значениями  $n$ , постройте график зависимости  $r' = f(n)$  и истолкуйте физический смысл результата.

Таблица 1.3 – Результаты расчёта параметров атома натрия в модели эффективного ядра

Переход в атоме	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\Delta\nu$	$\xi_{nl}$	$Z'_{\hat{y}\hat{o}\hat{\delta}}$	$r'$

### Задание 3. Определение величины дублетного расщепления энергетических уровней для атома натрия

1. Пользуясь формулой (1.13), для каждого подуровня рассчитайте величину его смещения, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием,  $\Delta E_{nl}$ .

2. Определите полную ширину тонкой структуры уровня  $\Delta E_{nl} = |\Delta E_{nlj_1} - \Delta E_{nlj_2}|$ .

3. Результаты, полученные при выполнении пп. 1 и 2, занесите в таблицу 1.4.

4. Сопоставьте результаты, полученные для термов с разными значениями  $n$ , постройте график зависимости  $\Delta E_{nl}(n)$  и сопоставьте её с зависимостью, следующей из формулы (1.13).

Таблица 1.4 – Результаты расчёта тонкой структуры уровней

Квантовый переход	$\Delta E_{nlj_1}$ , Дж	$\Delta E_{nlj_2}$ , Дж	$\Delta E_{nl}$ , Дж

5. Обобщите результаты выполнения заданий. Сформулируйте выводы.

## Тема 2. Рентгеновские спектры атомов

### Теоретические основы

В исследовании строения атома (в частности, распределения электронов по оболочкам) большое значение имеют данные о спектрах рентгеновского излучения.

Рентгеновское излучение возникает при бомбардировке вещества потоками электронов с большой кинетической энергией. Источник рентгеновского излучения – рентгеновская трубка – состоит из трех частей (рисунок 2.1): баллона *B* (стеклянного или металлического), катода *K*, являющегося источником электронов и представляющего собой проволоку, накаливаемую электрическим током, и анода *A*, являющегося источником рентгеновского излучения.

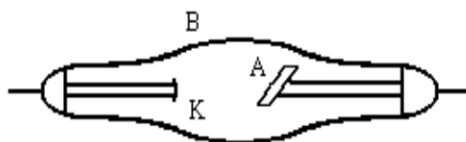


Рисунок 2.1 – Устройство рентгеновской трубки

Между катодом и анодом создается электрическое поле, ускоряющее электроны. Приобретая кинетическую энергию

$$E_k = eV, \quad (2.1)$$

электроны попадают на анод. В формуле (2.1)  $V$  – разность потенциалов между анодом и катодом,  $e$  – модуль заряда электрона.

Торможение электронов в веществе анода и их взаимодействие с его структурными элементами сопровождаются испусканием рентгеновского излучения. Для возбуждения рентгеновского излучения электрон должен иметь энергию порядка десятков тысяч электрон-вольт. Чтобы избежать потерь энергии в результате столкновения электронов с атомами газа, газ из баллона рентгеновской трубки откачивается до давления  $p \sim 10^{-6}$  мм рт. ст.

Рентгеновское излучение производит сильное фотографическое действие, возбуждает люминесценцию ряда веществ, способно ионизировать атомы и проникать вглубь вещества. На использовании этих

свойств основано обнаружение рентгеновского излучения и измерение его интенсивности.

Спектры рентгеновского излучения имеют сложную структуру, которая зависит как от энергии электронов, так и от вещества анода. На рисунке 2.2 приведен фрагмент типичного спектрального распределения интенсивности рентгеновского излучения. Спектр испускания представляет совокупность нескольких монохроматических линий (им соответствуют длины волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ ), имеющих вид острых пиков на фоне непрерывного спектра.

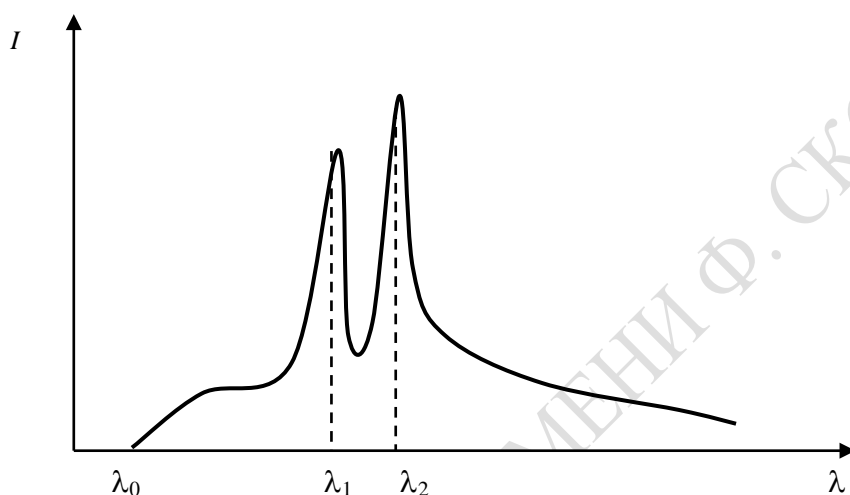


Рисунок 2.2 – Типичное спектральное распределение интенсивности в рентгеновском спектре испускания

Электромагнитное излучение, соответствующее острым пикам интенсивности, положение которых зависит только от природы вещества анода, называют *характеристическим рентгеновским излучением*, а совокупность длин волн, соответствующих максимумам интенсивности, составляет *линейчатый рентгеновский спектр* вещества анода.

Характер непрерывного (сплошного) спектра не зависит от вещества анода, а зависит от кинетической энергии бомбардирующих его электронов. На этом основании было сделано предположение, что непрерывный спектр излучается электронами пучка при их торможении веществом. По этой причине *сплошной рентгеновский спектр* называют *тормозным спектром*.

При торможении электрона только часть его энергии превращается в энергию рентгеновского излучения. Максимальная энергия кванта рентгеновского излучения, испускаемого при торможении электрона атомами вещества анода, соответствует процессу, при котором вся кинетическая энергия электрона преобразуется в энергию одного

кванта (рентгеновского фотона). В такой ситуации выполняется соотношение

$$h\nu_0 = eV, \quad (2.2)$$

где  $\nu_0$  – частота, соответствующая коротковолновой границе сплошного рентгеновского спектра. При этом граничная длина волны (рисунок 2.2)

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{ch}{eV}. \quad (2.3)$$

При ускоряющем напряжении, превышающем некоторое определённое значение, зависящее только от материала анода, в рентгеновском спектре, кроме тормозного, появляется также и характеристическое излучение.

То, что характеристический спектр состоит из отдельных линий, – следствие квантовой природы характеристического излучения: каждая линия рентгеновского спектра возникает в результате перехода атома из одного энергетического состояния в другое, и частота излучения определяется по правилу частот Бора:

$$h\nu = E_{n_1} - E_{n_2}. \quad (2.4)$$

Рентгеновское излучение характеризуется длинами волн  $\lambda \sim (10^{-12} \div 10^{-9})$  м. Следовательно, разность энергий атома в начальном и конечном состоянии в процессе испускания характеристического излучения очень велика. Для атомов тяжёлых элементов она в  $10^3 \div 10^5$  раз больше соответствующей разности в оптической области спектра. Объяснить этот факт можно, если предположить, что квантовые переходы, соответствующие испусканию рентгеновского излучения, совершаются *внутренними*, а не валентными электронами атома.

В соответствии с этими представлениями механизм возникновения спектра характеристического рентгеновского излучения следующий.

Электрон, падающий на материал анода, может выбить электрон с одной из внутренних оболочек атома, в результате чего в ней образуется вакантное квантовое состояние. Электроны с более удалённых от ядра оболочек, обладающие более высокой энергией, могут перейти в освободившееся состояние. В результате этого перехода испускается квант излучения, соответствующий рентгеновской области.

Энергию электрона, расположенного в одной из внутренних оболочек атома, можно представить в виде

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2}(Z - a_n)^2, \quad (2.5)$$

где  $a_n$  – постоянная экранирования ( $a_n \ll Z$ ).

Частота кванта, испущенного при переходе электрона из состояния, которое характеризуется главным квантовым числом  $n_1$ , в освободившееся состояние на внутренней оболочке, которому соответствует главное квантовое число  $n_2$ , определяется по правилу частот Бора:

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h} = \frac{Rc}{n_1^2} (Z - a_1)^2 - \frac{Rc}{n_2^2} (Z - a_2)^2. \quad (2.6)$$

Так как внутренние оболочки атомов имеют аналогичное строение, то поправки  $a_n$  в формуле (2.6) для определённой оболочки ( $1s$ ,  $2s$ ,  $2p$  и так далее) у разных атомов должны быть близкими по величине. Действительно, постоянная экранирования  $a_n$  очень слабо зависит от порядкового номера элемента  $Z$ , но заметным образом – от квантовых чисел  $n$  и  $l$ <sup>2</sup>. Поэтому структура рентгеновских спектров всех тяжёлых атомов должна быть аналогична; при этом у более тяжёлых атомов спектр смещается в направлении больших частот.

Общий вид рентгеновского терма, как следует из (2.5), может быть представлен следующим образом:

$$T(n) = \frac{R(Z - a_n)^2}{n^2}. \quad (2.7)$$

В 1913 году экспериментально был открыт закон Мозли: корень квадратный из частоты спектральной линии характеристического излучения элемента линейно зависит от его порядкового номера:

$$\sqrt{\frac{\nu}{R}} = \frac{Z - a_n}{n}, \quad (2.8)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга;

$a_n$  – постоянная экранирования;

$n$  – главное квантовое число.

Ясно, что зависимость (2.8) легко получить как приближённое следствие соотношения (2.6), подбирая в качестве значения постоянной  $a_n$  некоторое среднее из значений постоянных экранирования  $a_{n_1}$  и  $a_{n_2}$ .

Закон Мозли стал неопровержимым доказательством правильности размещения элементов в периодической системе элементов

---

<sup>2</sup> Для электронов  $K$ -слоя ( $n = 1$ ) экранирующее действие остальных электронов наименьшее, и постоянная экранирования  $a_n$  невелика: от 1 до 3. Электроны  $L$ -слоя экранируются сильнее. Точные значения  $a_n$  могут быть определены только экспериментально.

Д. И. Менделеева и важным средством для выяснения физического смысла величины  $Z$ . Кроме того, с применением этого закона были найдены правильные порядковые номера некоторых элементов. В частности, Мозли поменял местами никель и кобальт (до этого никель  $Ni$  имел меньший порядковый номер, чем кобальт  $Co$ ), а также оставил место для элемента с порядковым номером  $Z = 43$  (технеция), который ещё не был известен.

В зависимости от ряда факторов (в частности от числа нуклонов в ядре атома, состояния внешних электронных оболочек и др.) положение спектральных линий рентгеновского спектра может несколько изменяться. Изучая эти смещения, можно производить детализацию сведений об атоме. Таким образом, закон Мозли составляет основу *рентгеновского спектрального анализа*.

Каждый рентгеновский терм соответствует состоянию атома, из которого удалён один из электронов. Поэтому при рассмотрении спектров рентгеновского излучения пользуются схемой уровней энергии для таких состояний атома, в которых с некоторого рассматриваемого одноэлектронного уровня удалён один электрон, а число электронов на всех остальных уровнях осталось неизменным.

В результате удаления одного из электронов энергия атома возрастает на величину, равную энергии связи электрона, который был удалён из атома. Значение этой энергии тем больше, чем глубже на обычной диаграмме уровней лежит соответствующий одноэлектронный уровень. Поэтому схема рентгеновских уровней является *обращённой* по отношению к обычной схеме уровней атома (рисунок 2.3).

Подобно тому, как это было сделано для оптических спектров, линии характеристического рентгеновского спектра можно объединить в серии. Если электрон выбит из  $K$ -оболочки ( $n = 1$ ), то в рентгеновском спектре испускания наблюдается  $K$ -серия, при образовании вакансии в  $L$ -оболочке возникает  $L$ -серия и т. д.

У полностью заполненной оболочки полные моменты  $\vec{L}$ ,  $\vec{S}$ ,  $\vec{J}$  равны нулю. Если из этой оболочки удалён электрон, имеющий орбитальный, спиновый и полный моменты  $\vec{l}_i$ ,  $\vec{s}_i$ ,  $\vec{j}_i$  соответственно, то оставшаяся конфигурация характеризуется орбитальным, спиновым и полным моментами, отличающимися только зна́ком от соответствующих моментов удалённого электрона. Поэтому состояния замкнутой оболочки, потерявшей один электрон, характеризуются теми же квантовыми числами  $L$ ,  $S$  и  $J$ , что и состояния одного электрона. В частности, рентгеновские термы дублетные (рисунок 2.3).

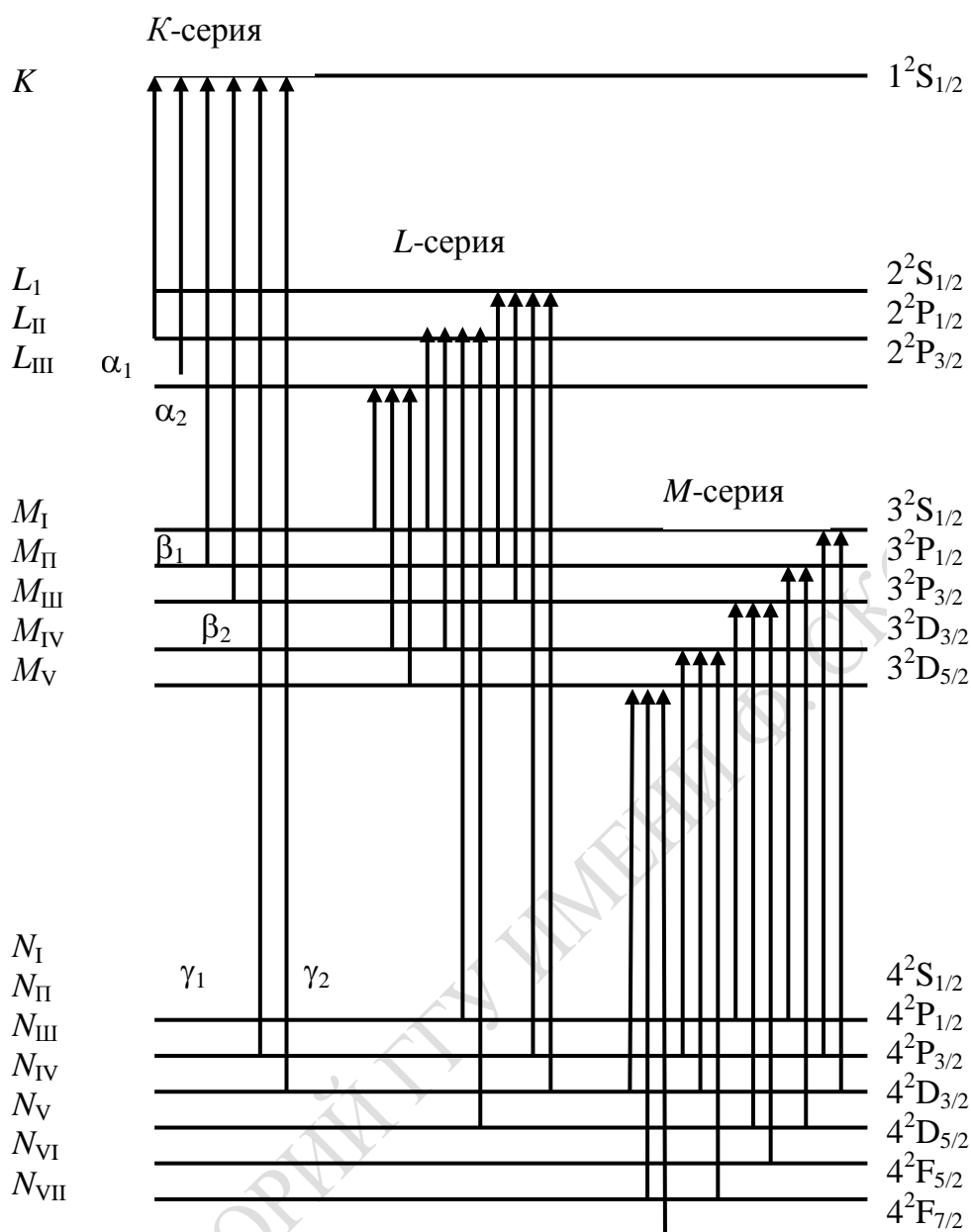


Рисунок 2.3 – Структура энергетических уровней рентгеновских термов с учётом мультиплетного расщепления (без соблюдения масштаба)

Пользуясь схемой, представленной на рисунке 2.3, проанализируем структуру рентгеновских спектров. Каждому электрону, находящемуся в  $K$ -оболочке, соответствуют квантовые числа  $n = 1$ ,  $l = 0$ ,  $s = 1/2$ ,  $j = 1/2$ . При удалении одного электрона орбитальное, спиновое и внутреннее квантовые числа оболочки имеют значения:  $L = 0$ ,  $S = 1/2$ ,  $J = 1/2$ , то есть реализуется состояние атома  $^2S_{1/2}$ , и расщепления энергетического уровня не происходит.

Заполненной  $L$ -оболочке соответствует электронная конфигурация  $2s^2 2p^6$ . Если электрон удалён из  $2s$ -оболочки, то возникает состояние  $^2S_{1/2}$ ; если же электрон удалён из  $2p$ -оболочки, то реализуется состояние  $^2P_{1/2}$  или состояние  $^2P_{3/2}$ . Таким образом, с  $L$ -оболочкой связаны три рентгеновских уровня:  $L_I$ ,  $L_{II}$ ,  $L_{III}$ . Аналогичным образом объясняется структура энергетических уровней, соответствующих и последующим рентгеновским термам.

Линии испускания в рентгеновских спектрах возникают в результате переходов между рентгеновскими уровнями, для которых выполнены правила отбора:

$$\Delta L = \pm 1, \quad \Delta J = 0, \pm 1.$$

В соответствии с этими правилами, в  $K$ -серии возникают линии  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$  (при переходах между  $L$ - и  $K$ -термами), линии  $K_{\beta 1}$  и  $K_{\beta 2}$  (при переходах между  $M$ - и  $K$ -термами) и т. д. (рисунок 2.3).

Из приведённого объяснения следует, что при возбуждении наиболее глубоко лежащего  $K$ -слоя возникает не только  $K$ -серия, но и весь характеристический рентгеновский спектр, а при возбуждении какой-либо серии или линии рентгеновского излучения появляются все линии рентгеновского излучения с большими длинами волн.

Практически сразу после открытия рентгеновского излучения были изучены закономерности его взаимодействия с веществом и возник новый раздел медицины – рентгенология, в которой изучается применение рентгеновского излучения для исследования строения и функций органов и систем, для рентгенодиагностики и рентгенотерапии заболеваний. Однако рентгеновское излучение может оказать нежелательное влияние на клетки здоровых тканей. Поэтому при использовании рентгеновского излучения должны соблюдаться все необходимые меры предосторожности.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что обозначают терминами «электронная оболочка» и «электронный слой»?
2. Как определяют максимальное число электронов в оболочке и в слое?
3. Какой диапазон длин волн соответствует рентгеновскому излучению?
4. Как устроена рентгеновская трубка?



5. В чём состоит принципиальное различие тормозного и характеристического рентгеновских спектров?
6. Каковы физические механизмы образования тормозного и характеристического рентгеновского излучения?
7. Какие факты указывают на то, что образование характеристического рентгеновского излучения обусловлено переходами во внутренних электронных слоях атома?
8. Поясните с использованием диаграммы уровней, как соотносятся между собой рентгеновские и оптические уровни энергии.
9. Какие физические взаимодействия в атоме учитываются при определении энергии рентгеновского подуровня?
10. Каково содержание закона Мозли?
11. При выполнении каких условий возможны излучательные переходы между рентгеновскими подуровнями?
12. Поясните сериальные закономерности, свойственные характеристическим рентгеновским спектрам.
13. В чём состоят и чем обусловлены отличия рентгеновских и оптических спектров атомов?

### **Лабораторная работа 3**

#### **Изучение закономерностей в рентгеновских спектрах на основе компьютерной модели**

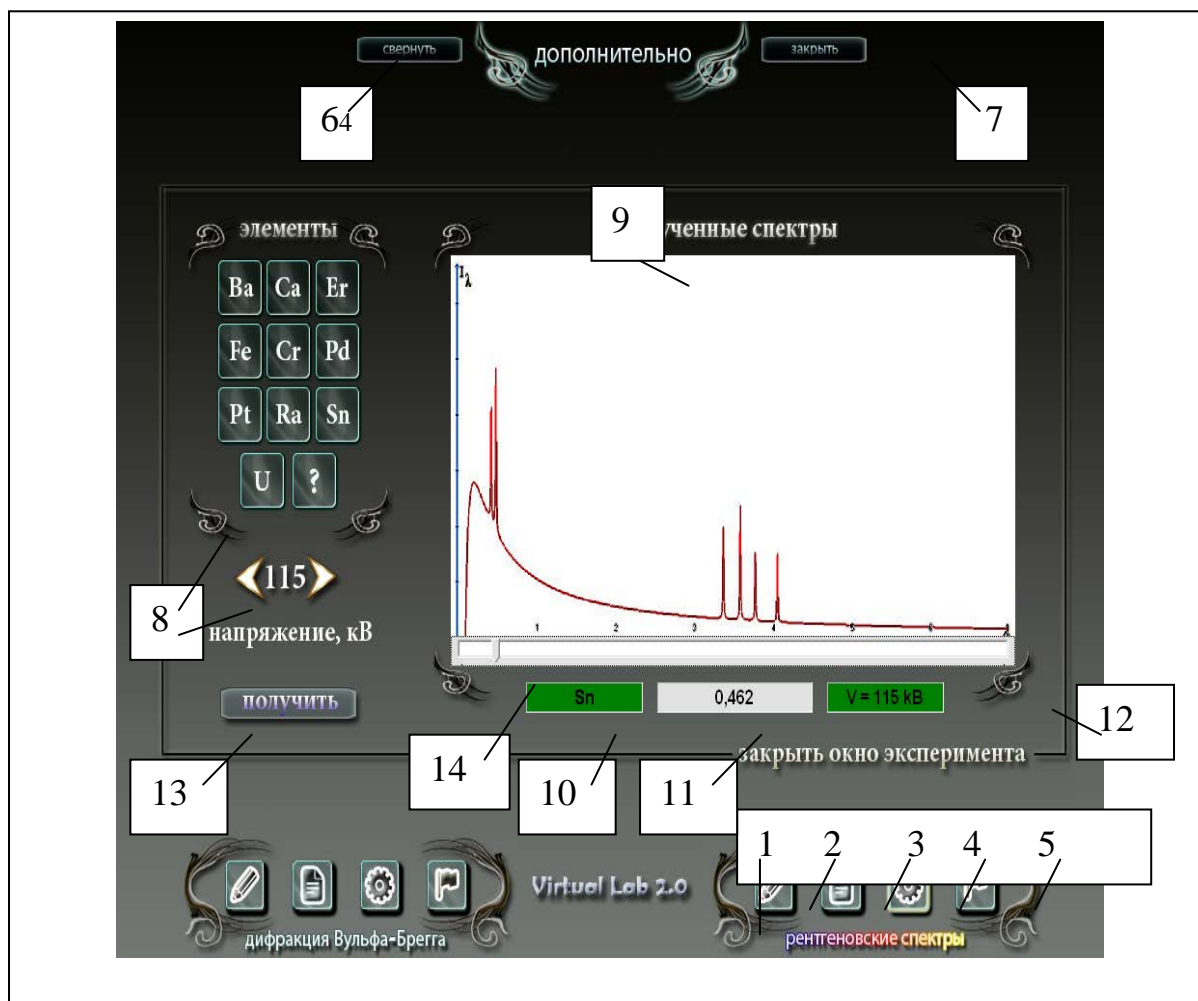
**Цель работы:** изучить механизм возникновения тормозного и характеристического рентгеновского излучения и сериальные закономерности в спектрах испускания; проверить выполнение закона Мозли и исследовать зависимость границы тормозного спектра от кинетической энергии электронов, бомбардирующих анод.

Для выполнения виртуальной лабораторной работы «Изучение закономерностей в рентгеновских спектрах на основе компьютерной модели» следует открыть файл Virtual Lab.2.0 из родительского каталога. Данный программный продукт предназначен для виртуальных экспериментов по темам «Дифракция электронов на кристалле» и «Изучение рентгеновских спектров атома».

После запуска программы на экране монитора появляется главное меню (рисунок 2.4).

Для начала работы необходимо выбрать один из пунктов меню блока управления 1:

- **Теория 2** (методические рекомендации);
- **Допуск 3** (тест по теме лабораторной работы);
- **Эксперимент 4** (реализация виртуального эксперимента);
- **Справка 5** (основная информация о программном продукте).



Чтобы программа не препятствовала работе с другими приложениями, её можно свернуть, нажимая кнопку 6. Для выхода из программы следует нажать кнопку 7 «Закреть».

Чтобы перейти к опыту по изучению закономерностей в рентгеновских спектрах, необходимо нажать кнопку 3 и пройти тестирование; после получения допуска следует нажать кнопку 4 «Эксперимент».

Область управления работой программы содержит:

- панель выбора элементов и регуляции напряжения 8;
- окно отображения рентгеновского спектра 9;
- окно отображения символа выбранного элемента 10;
- окно отображения длины волны (нм) 11;
- окно отображения значения выбранного напряжения 12;

– кнопку «Получить» 13, предназначенную для запуска программы.

По завершении выполнения исследований следует нажать кнопку «Закрывать окно эксперимента» и выйти из программы.

Посредством регуляторов 8:

– устанавливается напряжение на аноде рентгеновской трубки – 11, 42, 84 или 115 кВ;

– выбирается химический элемент для проведения виртуального эксперимента.

Для проведения виртуального эксперимента необходимо:

1) задать посредством регуляторов 8 необходимые значения параметров эксперимента;

2) нажать кнопку 13 (рисунок 2.4) и убедиться, что в окне 10 появилось изображение символического обозначения выбранного элемента, а в окне 12 – значение выбранного напряжения;

3) в окне отображения рентгеновского спектра 9 наблюдать его графическое отображение;

4) установить курсор на ползунок 14, нажать левую кнопку компьютерной «мыши» и перемещать ползунок вдоль шкалы длин волн, последовательно устанавливая его в положение, при котором визирная линия совпадает с каждым наблюдаемым в рентгеновском спектре максимумом интенсивности, записать соответствующие им длины волн;

5) по окончании эксперимента выйти из программы, нажимая кнопку «Закрывать окно эксперимента».

### **Задание 1. Исследование зависимости границы спектра тормозного излучения от напряжения на рентгеновской трубке**

При моделировании спектра испускания учитывается, что спектр состоит из двух составляющих – соответствующих тормозному и характеристическому излучению. Спектр испускания представляется на экране в виде графика зависимости спектральной плотности  $I_\lambda$  излучения рентгеновской трубки (или газовой струи, бомбардируемой электронами – для криптона и ртути) от длины волны:  $I_\lambda(\lambda)$ . Однако моделируется не вся характеристическая составляющая спектра, а только её фрагмент, содержащий наиболее интенсивные линии: две линии из *K*-серии и четыре – из *L*-серии. При этом можно моделировать указанный фрагмент спектра испускания при разных ускоряющих напряжениях.

## Порядок выполнения работы

1. Пройдите входное тестирование.
2. Выберите на панели управления программой атом бария (*Ba*), установите напряжение 11 кВ и нажмите кнопку 13.
3. Определите длину волны, соответствующую границе тормозного спектра, и запишите её значение в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Зависимость положения границы тормозного спектра от напряжения на аноде рентгеновской трубки

Химический элемент	Напряжение на аноде, кВ			
	11	42	84	115
	Длина волны $\lambda_0$ , нм			
Барий, <i>Ba</i>				
Эрбий, <i>Er</i>				
Палладий, <i>Pd</i>				

4. Определите положение границы тормозного спектра бария, последовательно устанавливая на панели 8 другие значения напряжения: 42, 84, 115 кВ. Запишите в таблицу 2.1 полученные при этом значения длины волны.

5. Постройте график зависимости  $1/\lambda_0 = f(U)$ . Сформулируйте вывод о характере этой зависимости.

6. Используя график зависимости  $1/\lambda_0 = f(U)$ , формулу связи между частотой и длиной волны излучения, определите значение постоянной Планка.

7. Повторите действия, описанные в пп. 3–6, выбирая на панели 8 другие химические элементы, указанные в таблице 2.1.

8. Найдите среднее значение постоянной Планка, используя результаты, полученные на основе рентгеновских спектров разных атомов.

9. Сравните рентгеновские спектры каждого элемента, полученные при разных напряжениях, и объясните причины наблюдаемых изменений.

10. Сформулируйте вывод о тенденции в изменении положения границы тормозного спектра:

- а) при увеличении напряжения на рентгеновской трубке;
- б) при увеличении порядкового номера элемента (при  $U = \text{const}$ ).

## Задание 2. Построение диаграмм Мозли

### Порядок выполнения работы

1. Активируйте изображение *спектра испускания* атома кальция *Ca* при максимальном напряжении 115 кВ.

2. Измерьте длину волны  $\lambda_1$  самой коротковолновой характеристической линии в *K*-серии атома кальция *Ca* и запишите результат в таблицу 2.2.

3. Последовательно получите изображения спектров испускания других девяти атомов, перечисленных в заголовке таблицы 2.2, и определите для них длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  самых коротковолновых линий в *K*-серии и *L*-серии соответственно. Результаты измерений занесите в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты определения коротковолновой границы *K*-серии характеристических рентгеновских спектров

Элемент	<i>Ca</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Sn</i>	<i>Ba</i>	<i>Pd</i>	<i>Pt</i>	<i>Er</i>	<i>Ra</i>	<i>U</i>	
<i>Z</i>											
$\lambda_1$											
$\sqrt{1/\lambda_1}$											
$\lambda_2$											
$\sqrt{1/\lambda_2}$											

4. По данным таблицы 2.2 постройте диаграммы Мозли – графики зависимости  $\sqrt{1/\lambda_1} = f(Z)$  и  $\sqrt{1/\lambda_2} = f(Z)$ . Сделайте вывод о том, выполняется ли закон Мозли в вашем модельном эксперименте. Объясните различия в результатах наблюдений и графических зависимостях.

5. Выполните измерения, указанные в п. 2, после активации спектра испускания неизвестного элемента и идентифицируйте его, пользуясь построенными вами диаграммами Мозли.

## Задание 3. Определение постоянных экранирования для *L*- и *M*-слоя

### Порядок выполнения работы

1. Активируйте изображение *спектра испускания* атома платины *Pt* при максимальном напряжении 115 кВ.

2. Измерьте длины волн всех шести моделируемых характеристических линий: двух в  $K$ -серии и четырёх – в  $L$ -серии. Результаты занесите в таблицу 2.3, сопоставляя длину волны квантовому переходу (рисунок 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты изучения квантовой структуры рентгеновских уровней и характеристического спектра

Элемент	Определяемые величины	Спектральная серия, квантовый переход					
		$K$ -серия		$L$ -серия			
		$K-M$	$K-L$	$L_{II}-M_I$	$L_{III}-M_I$	$L_{II}-M_{IV}$	$L_{III}-M_{IV}$
Pt	$\lambda_k$						
	Энергия кванта, $\epsilon_k$						
U	$\lambda_k$						
	Энергия кванта, $\epsilon_k$						

3. Вычислите энергию квантов  $E_k$ , соответствующих измеренным длинам волн, и запишите её значения в таблицу 2.3.

4. Используя длину волны линии  $K_a$ , соответствующую переходу  $K-L$ , формулу (2.6), принимая в ней значение постоянной экранирования равным  $a_1 = 1$  в состоянии с  $n_1 = 1$  (для  $K$ -слоя), вычислите для электрона в атоме платины постоянную экранирования  $a_2$  (для  $L$ -слоя).

Запишите вычисленное значение постоянной  $a_2$  в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Постоянные экранирования и уровни энергии

Электронный слой	$K$	$L$	$M$
Атом платины			
Постоянная экранирования			
Оценочное значение энергии уровней			
Атом урана			
Постоянная экранирования			
Оценочное значение энергии уровней			

5. Используя значение указанной преподавателем длины волны одной из линий, относящихся к  $L$ -серии, и формулу

$$\nu = \frac{E_{n_3} - E_{n_2}}{h} = \frac{Rc}{n_2^2}(Z - a_2)^2 - \frac{Rc}{n_3^2}(Z - a_3)^2,$$

в которой  $a_2$  – значение постоянной экранирования, найденное при выполнении п. 4, определите значение постоянной экранирования  $a_3$ , и запишите его в таблицу 2.4.

6. Применяя формулу (2.5) и учитывая значения постоянных  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  оцените последовательно значения энергии электрона в  $K$ -слое, в  $L$ -слое, в  $M$ -слое и запишите их в таблицу 2.4.

7. Активируйте изображение *спектра испускания* атома урана  $U$  при максимальном напряжении 115 кВ.

8. Выполните действия, описанные в пп. 2–6, применительно к атому урана.

9. Оформите отчёт о работе, завершая его выводами, формулируя их в соответствии с целями работы.

## Тема 3. Электронное строение и спектры молекул

### Теоретические основы

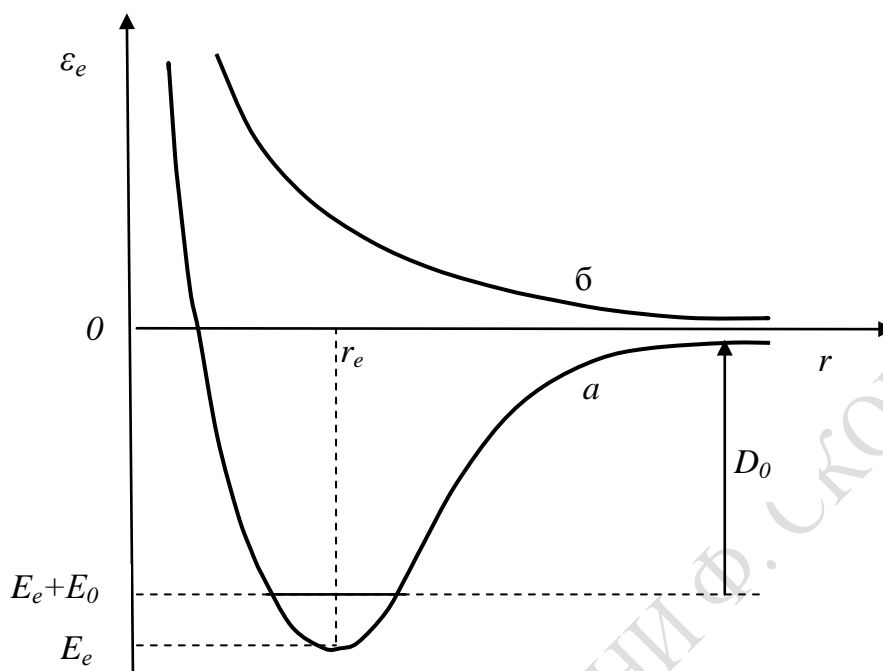
Молекула – это наименьшая устойчивая частица данного вещества, обладающая основными свойствами самого вещества и состоящая из атомов, соединенных в одно целое посредством химической связи. Связь между атомами осуществляется внешними (валентными) электронами. Поэтому характер и прочность химической связи молекулы определяется её *электронной энергией*. Обязательным признаком существования химической связи между атомами является устойчивость образованной ими молекулы. Устойчивым электронным состоянием атомной системы называется состояние, находясь в котором система не распадается на составляющие её компоненты в отсутствие внешнего воздействия. Если система состоит из двух атомов, их взаимное расположение определяется единственной переменной – расстоянием между ядрами атомов  $r$ . Молекула постоянно находится в колебательном движении, то есть расстояние между её ядрами периодически изменяется. Электронной энергией определяется потенциальная энергия колебаний двухатомной молекулы. Зависимость электронной энергии молекулы  $\varepsilon_l$  от расстояния между ядрами, выраженная графически, называется *потенциальной кривой* (рисунок 3.1).

Каждому электронному состоянию молекулы соответствует определенная потенциальная кривая. Наличие минимума на потенциальной кривой является признаком возможности химической связи между данными атомами (кривая *а*), его отсутствие – условие невозможности химической связи (кривая *б*).

Расстояние между ядрами атомов  $r_e$ , соответствующее минимуму электронной энергии молекулы, называют *равновесным* расстоянием, а величину  $E_e$  – чисто электронной энергией молекулы в данном устойчивом электронном состоянии. Как следует из квантовомеханического описания, колебательное движение молекулы характеризуется колебательной энергией  $L_0$ , минимальное значение которой равно  $E_0$ . Поэтому реальное минимальное значение энергии молекулы в данном электронном состоянии определяется величиной  $E_e + E_0$  (рисунок 3.1). Энергию  $D_0$ , необходимую для того, чтобы преодолеть



взаимодействие между атомами, называют энергией диссоциации молекулы в данном электронном состоянии.



- а) при наличии химической связи между атомами;  
 б) в отсутствие химической связи

Рисунок 3.1 – Потенциальные кривые двухатомной молекулы

В соответствии с результатами квантовомеханического расчёта электронная энергия стационарного состояния для двухатомной молекулы  $E_e$  определяется по формуле

$$E_e = E_1 + E_2 + \Delta E. \quad (3.1)$$

Кроме тривиального слагаемого  $E_1 + E_2$ , представляющего сумму энергий отдельных атомов, в выражении (3.1) содержится обменный член  $\Delta E$ , величина и знак которого зависят от взаимной ориентации спиновых моментов валентных электронов взаимодействующих атомов. При параллельных спинах валентных электронов –  $\Delta E > 0$ , а при антипараллельных –  $\Delta E < 0$ . В последнем случае электронная плотность в межъядерной области увеличена по сравнению с электронной плотностью в изолированных атомах на тех же расстояниях от ядра. Наличие повышенной электронной плотности между ядрами является обязательным и достаточным признаком реализации химической связи в любых молекулах.

Среди многообразных вариантов распределения электронной плотности в молекулах существует такой, при котором электронная плотность валентного электрона одного из связывающихся атомов

практически полностью (на 70–80 %) распределяется в поле ядра другого атома. В результате один атом (например,  $A$ ) приобретает положительный заряд  $(+0,7) \div (+0,8)$ , а другой (атом  $B$ ) – такой же по величине отрицательный заряд. Такая система вполне удовлетворительно описывается как система электростатически взаимодействующих ионов  $A^{+1}B^{-1}$ . Описанный тип связи называют *ионной* связью. Химическая связь, при которой реализуется симметричное распределение электронной плотности относительно обоих ядер, называют *ковалентной*. Связь, промежуточная между ионной и ковалентной, называют *полярной*. Ионная связь между атомами тем более вероятна, чем меньше энергия ионизации одного из них, и чем больше энергия, выделяемая при присоединении электрона к атому, у другого. Она наиболее вероятна между атомами галогенов и щелочных металлов.

Энергия молекулы  $E$  (без учета ядерной энергии и кинетической энергии поступательного движения молекулы) складывается из электронной энергии  $E_e$ , колебательной энергии ядер  $E_v$  и энергии вращательного движения молекулы  $E_j$ :

$$E = E_e + E_v + E_j. \quad (3.2)$$

Каждая из названных составляющих и, следовательно, полная энергия молекулы квантованы. Состояние молекулы, в котором ее энергия минимальна, называется *основным*, или *невозбужденным*. Под влиянием внешних воздействий молекула может перейти в *возбужденное* состояние, в котором её энергия больше, чем в основном состоянии.

Каждому электронному состоянию молекулы с энергией  $E_e$ , определяемой по формуле (3.2), соответствует определенный набор колебательных энергетических уровней. В соответствии с результатами квантовомеханических расчётов в приближении гармонических колебаний возможные значения колебательной энергии двухатомной молекулы определяются по формуле

$$E_v = hv_0 \left( v + \frac{1}{2} \right), \quad (3.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка;

$v_0$  – частота собственных колебаний молекулы;

$v = 0, 1, 2, \dots$  – колебательное квантовое число.

Возможные значения вращательной энергии двухатомной молекулы могут быть определены по формуле

$$E_J = \frac{\hbar^2}{2I} J(J+1), \quad (3.4)$$

где  $I$  – момент инерции молекулы;

$J = 0, 1, 2, \dots$  – вращательное квантовое число.

Молекулы могут поглощать или испускать только определённые порции энергии, переходя с одного энергетического уровня на другой. В результате поглощения или испускания энергии в виде электромагнитного излучения формируются соответствующие спектры молекул. Чисто колебательные и чисто электронные спектры молекул получить не удаётся – наблюдаются только смешанные колебательно-вращательные и электронно-колебательно-вращательные спектры, состоящие из полос вследствие наложения множества линий. Возможные значения энергии (энергетические уровни) и переходы между ними графически изображаются в виде схемы. При построении схемы следует учитывать, что разности энергий между энергетическими уровнями, соответствующими различным видам движения молекулы, соотносятся следующим образом:  $\Delta E_e \gg \Delta E_v \gg \Delta E_J$ . На рисунке 3.2 изображена модельная схема энергетических уровней двухатомной молекулы (без соблюдения масштаба), на которой отображены некоторые из возможных электронно-колебательных переходов между уровнями двух электронных состояний, характеризуемых энергиями  $E'_e$  и  $E''_e$ . Эти переходы проявляются в спектрах поглощения в ультрафиолетовой и видимой области.

Ослабление потока монохроматического излучения при прохождении его через слой однородного поглощающего вещества описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$\hat{O}_\lambda = \hat{O}_{0\lambda} \exp(-K_\lambda d) = \hat{O}_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda cd), \quad (3.5)$$

где  $\hat{O}_{0\lambda}$  – поток падающего на вещество монохроматического излучения;

$\hat{O}_\lambda$  – поток монохроматического излучения, прошедшего через слой вещества толщиной  $d$ ;

$c$  – концентрация поглощающего вещества;

$K_\lambda$  – коэффициент поглощения;

$\varepsilon_\lambda$  – коэффициент экстинкции.

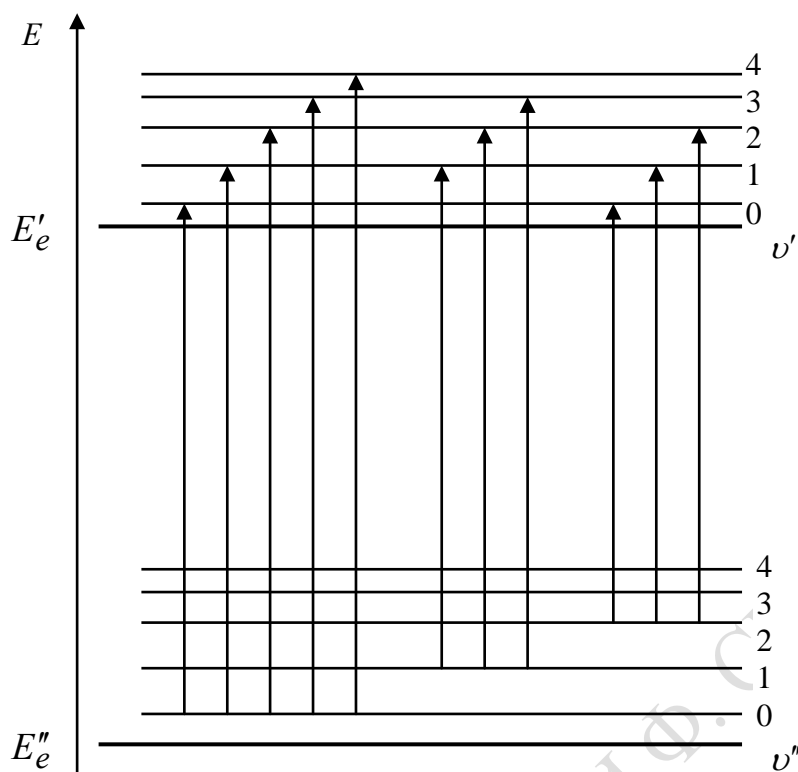


Рисунок 3.2 – Модельная схема формирования электронно-колебательной полосы поглощения двухатомной молекулы

Для описания поглощательных свойств вещества используются следующие величины:

а) коэффициент пропускания

$$T_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{0\lambda}}; \quad (3.6)$$

б) оптическая плотность

$$D_\lambda = \ln \frac{\Phi_{0\lambda}}{\Phi_\lambda} = -\ln T_\lambda; \quad (3.7)$$

в) коэффициент поглощения

$$K_\lambda = \frac{D_\lambda}{d}; \quad (3.8)$$

г) коэффициент экстинкции

$$\varepsilon_\lambda = \frac{D_\lambda}{cd}. \quad (3.9)$$

Молекулярный спектр поглощения может быть графически представлен в виде зависимостей  $T_\lambda(\lambda)$ ,  $T_\nu(\nu)$ ,  $D_\lambda(\lambda)$ ,  $D_\nu(\nu)$ ,  $K_\lambda(\lambda)$ ,  $K_\nu(\nu)$ ,  $\varepsilon_\lambda(\lambda)$ ,  $\varepsilon_\nu(\nu)$ . Если разрешающая способность спектрального прибора недостаточна, спектр поглощения, соответствующий одному

электронному переходу, регистрируется в виде электронно-колебательной полосы, схематический вид которой в координатах  $K_\lambda, \lambda$  отображён на рисунке 3.3.

Основными характеристиками молекулярной полосы поглощения являются (рисунок 3.3):

- максимальное значение коэффициента поглощения  $K_{\max}$  ;
- длина волны, соответствующая максимальному значению коэффициента поглощения,  $\lambda_{\max}$  ;
- полуширина полосы поглощения  $\Delta\lambda = \lambda'' - \lambda'$ , равная разности длин волн, при которых  $K_\lambda = (K_{\max} + K_{\min}) / 2$  ;
- интегральный коэффициент поглощения

$$K = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_\lambda(\lambda) d\lambda = \int_{\nu_1}^{\nu_2} K_\nu(\nu) d\nu. \quad (3.10)$$

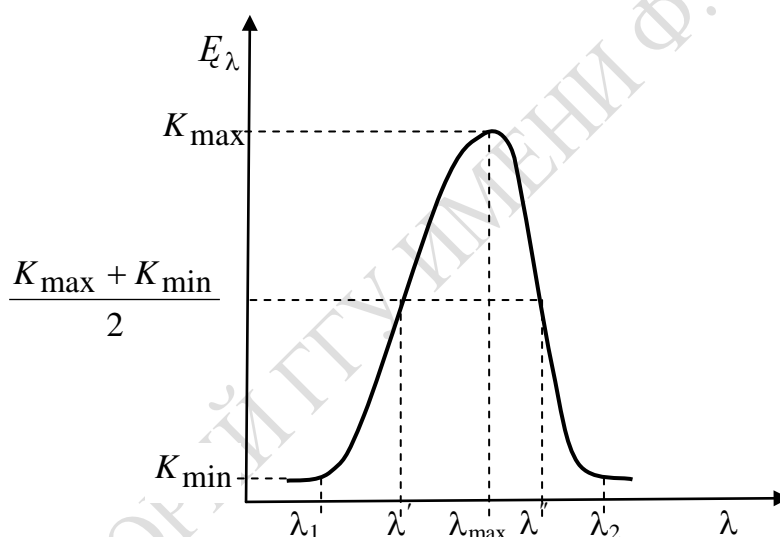


Рисунок 3.3 – Основные характеристики полосы поглощения

После регистрации молекулярного спектра поглощения в области, соответствующей определённой полосе, можно определить её основные характеристики и на этой основе получить информацию о поглощательных свойствах анализируемого молекулярного вещества.

## Вопросы для самоконтроля

1. Каково объяснение образования химической связи в рамках квантовомеханического описания?
2. Какие типы химической связи возможны в молекулах?

3. Графическое отображение какой зависимости называют потенциальной кривой электронного состояния?
4. Какими формулами выражают правила квантования колебательной и вращательной энергии двухатомной молекулы?
5. Какими процессами в молекулах обусловлено формирование их электронно-колебательной полосы поглощения? (Изобразите схему).
6. В каких координатах графически отображают спектры поглощения?
7. В чём состоит закон Бугера-Ламберта-Бера?
8. Какие величины используют для характеристики полосы поглощения?
9. В соответствии с какой формулой определяется интегральный коэффициент поглощения молекулярной полосы? Как определить его графически?

## **Лабораторная работа 4**

### **Определение основных характеристик электронно-колебательной полосы поглощения**

**Цель работы:** изучить сущность и типы химической связи в молекулах, проанализировать энергетическую структуру двухатомной молекулы и закономерности в её спектрах, изучить величины, характеризующие поглощательные свойства вещества, произвести экспериментальное изучение электронно-колебательного спектра молекулярного вещества, определить основные характеристики электронно-колебательной полосы поглощения.

**Приборы и принадлежности:** спектрофотометр СФ-16, набор кварцевых кювет, растворы исследуемых веществ.

#### **Задание 1. Изучение методики регистрации электронных спектров поглощения молекулярных веществ**

##### **Порядок выполнения работы**

1. Используя описание спектрофотометра СФ-16, изучите его оптическую схему, устройство, принцип действия и методику определения коэффициента пропускания  $T_\lambda$  и оптической плотности  $D_\lambda$  растворов.

2. Произведите проверку регулировки источников излучения в соответствии с техническим описанием прибора.

3. Определите диапазоны длин волн, в которых следует производить замену источников и приёмников излучения.

4. Произведите повторные (5–7 раз) независимые измерения коэффициента пропускания  $T$  и оптической плотности  $D$  анализируемого раствора, выбирая поочерёдно три указанные преподавателем длины волны  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ . Определите соответствующие им средние значения ( $\bar{T}$  и  $\bar{D}$ ), а также случайные абсолютные ( $\Delta T_{\text{н\ddot{e}}}$  и  $\Delta D_{\text{н\ddot{e}}}$ ) и относительные  $\left(\frac{\Delta T_{\text{н\ddot{e}}}}{\bar{T}}\right)$  и  $\left(\frac{\Delta D_{\text{н\ddot{e}}}}{\bar{D}}\right)$  погрешности измеряемых величин. Определите относительные приборные погрешности измерения коэффициента пропускания  $\frac{\Delta T_{\text{д\ddot{t}}}}{\bar{T}}$  и оптической плотности  $\frac{\Delta D_{\text{д\ddot{t}}}}{\bar{D}}$ , соответствующие указанным длинам волн. Вычислите значения полных относительных погрешностей  $\left(\frac{\Delta T}{\bar{T}}\right)$  и  $\left(\frac{\Delta D}{\bar{D}}\right)$  измерений. Результаты измерений и расчётов занесите в таблицы 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Результаты измерений коэффициента пропускания и расчета погрешностей его определения

$\lambda$ , нм	$T$	$\bar{T}$	$\Delta T_{\text{н\ddot{e}}}$	$\left(\frac{\Delta T_{\text{н\ddot{e}}}}{\bar{T}}\right)$	$\frac{\Delta T_{\text{д\ddot{t}}}}{\bar{T}}$	$\frac{\Delta T}{\bar{T}}$
$\lambda_1$						
$\lambda_2$						
$\lambda_3$						

Таблица 3.2 – Результаты измерений оптической плотности и расчета погрешностей её определения

$\lambda$ , нм	$D$	$\bar{D}$	$\Delta D_{\text{н\ddot{e}}}$	$\left(\frac{\Delta D_{\text{н\ddot{e}}}}{\bar{D}}\right)$	$\frac{\Delta D_{\text{д\ddot{t}}}}{\bar{D}}$	$\frac{\Delta D}{\bar{D}}$
$\lambda_1$						
$\lambda_2$						
$\lambda_3$						

Проанализируйте результаты и сформулируйте выводы.

## Задание 2. Определение основных характеристик электронной полосы поглощения молекулярного вещества

### Порядок выполнения работы

1. Зарегистрируйте спектр поглощения  $T_\lambda(\lambda)$  или  $D_\lambda(\lambda)$  водного раствора анализируемого молекулярного вещества в указанном преподавателем диапазоне с шагом 10 нм. Результаты занесите в таблицу 3.3.

2. Учитывая известную концентрацию  $c$  исследуемого вещества в растворе, толщину  $d$  используемых кювет и экспериментальные значения оптической плотности, в соответствии с формулой (3.8) рассчитайте значения коэффициента поглощения  $K_\lambda(K_\nu)$ . Результаты занесите в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Спектральные характеристики молекулярного вещества

$\lambda$	$\nu$	$T_\lambda (T_\nu)$	$D_\lambda (D_\nu)$	$K_\lambda (K_\nu)$

3. Постройте графики зависимости  $K_\lambda(\lambda)$  и  $K_\nu(\nu)$ . Сравните полученные графики и объясните их различие.

4. Используя график зависимости  $K_\lambda(\lambda)$ , определите значения основных характеристик полосы поглощения  $\lambda_{\max}$ ,  $K_{\max}$ ,  $\Delta\lambda$ , указанных на рисунке 3.3.

5. Определите интегральный коэффициент поглощения

$$K = \int_{\nu_1}^{\nu_2} K_\nu(\nu) d\nu,$$

используя программное приложение MathCad или применяя графический способ.

6. Определите интегральный коэффициент поглощения  $K$  по формуле

$$K = \int K(\nu) d\nu = 1,07 K_{\max} \Delta\nu,$$

применимой, если контур полосы поглощения  $K_\nu(\nu)$  симметричен и описывается функцией Гаусса. Сравните результаты, полученные при выполнении пунктов 5 и 6, и сформулируйте выводы.



## Литература

- 1 Ахиезер, А. И. Атомная физика: справочное пособие / А. И. Ахиезер. – Киев: Наукова думка, 1988. – 268 с.
- 2 Годлевская, А. Н. Физика атома и атомных явлений: тексты лекций для студентов физических специальностей университета / А. Н. Годлевская, В. Г. Шолох. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2006. – 202 с.
- 3 Граков, В. Е. Физика атома: лабораторный практикум для студентов физ. фак. / В. Е. Граков, А. А. Сокольский, Г. Ф. Стельмах; под ред. А. П. Клищенко. – Мн.: БГУ, 2006. – 200 с.
- 4 Ельяшевич, М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М. А. Ельяшевич. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 896 с.
- 5 Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума: учебное пособие / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Мн.: Бестпринт, 1997. – 90 с.
- 6 Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
- 7 Матвеев, А. Н. Атомная физика: учебное пособие для студентов вузов / А. Н. Матвеев. – М.: Высш. шк., 1989. – 439 с.
- 8 Сивухин, Д. В. Общий курс физики: атомная и ядерная физика / Д. В. Сивухин. – Т. V. – М.: Наука, 1986. – Ч. I. Атомная физика. – 416 с.
- 9 Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров; редкол.: Д. М. Бонч-Бруевич [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
- 10 Фриш, С. Э. Оптические спектры атомов / С. Э. Фриш. – М.–Л.: гос. из-во физ.-матем. лит., 1963. – 640 с.
- 11 Шпольский, Э. В. Атомная физика / Э. В. Шпольский. – 6-е изд., исправл. – М.: Наука, 1974. – Т. 1. Введение в атомную физику. – 575 с.
- 12 Шпольский, Э. В. Атомная физика / Э. В. Шпольский. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука, 1974. – Т. 2. Основы квантовой механики и строение электронной оболочки атома. – 447 с.
- 13 Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд. – М.: Оникс, Мир и образование, 2006. – 1056 с.

Производственно-практическое издание

**ГОДЛЕВСКАЯ** Анна Николаевна,  
**ШОЛОХ** Валентина Григорьевна

## **ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**Состояния и спектры  
многоэлектронных атомов и молекул**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

для студентов специальностей  
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»  
и 1-31 04 03 «Физическая электроника»

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 16.09.2015. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,55.  
Уч.-изд. л. 2,79. Тираж 25 экз. Заказ 542.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.  
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

**А. Н. ГОДЛЕВСКАЯ, В. Г. ШОЛОХ**

**ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**Состояния и спектры  
многоэлектронных атомов и молекул**

Гомель  
2015

