

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА»

С.О. Зубович, Т.А. Сухова

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Методические указания



Волгоград
2015

УДК 53 (075.5)

Рецензент:

Канд. тех. наук, доцент А.Л. Суркаев

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

С.О. Зубович, **Спектр излучения атомарного водорода** [Электронный ресурс]: методические указания / С.О. Зубович, Т.А. Сухова //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Kb) – Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ, 2015.-Систем.требования:Windows 95 и выше; ПК с процессором 486+; CD-ROM.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению лабораторной работы, представленной в третьей части практикума кафедры «Прикладная физика и математика» Волжского политехнического института.
Предназначены для студентов всех форм обучения.

©Волгоградский
государственный
технический
университет, 2015
© Волжский
политехнический
институт, 2015

Лабораторная работа №332

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

332.1. Цель работы: Знакомство с планетарной и квантовой моделями атома при моделировании процесса испускания электромагнитного излучения возбужденными атомами водорода и экспериментальное определение постоянной Ридберга.

332.2. Краткая теория

Планетарная модель атома: в центре атома расположено очень малое положительно заряженное ядро, вокруг которого по определенным (разрешенным) стационарным орбитам движутся электроны, масса которых во много раз меньше массы ядра. При движении по орбите электрон не испускает электромагнитного излучения (ЭМИ). При поглощении ЭМИ (фотона) электрон переходит на более «высокую» разрешенную орбиту, на которой его энергия становится больше на величину $\Delta E_{эл}$, равную энергии поглощенного фотона E_{ϕ} . При обратном переходе электрон испускает фотон с такой же энергией $E_{\phi} = |\Delta E_{эл}|$.

Квантовая модель атома отличается от планетарной в первую очередь тем, что в ней электрон не имеет точно определенной координаты и скорости, поэтому бессмысленно говорить о траектории его движения. Можно определить (и нарисовать) только границы области его преимущественного движения (орбитали).

Спектром электромагнитного излучения (ЭМИ) называется совокупность электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых атомами (молекулами) данного вещества.

Линейчатый спектр состоит из отдельных компонент (линий), близких к гармоническим. Расстояние между линиями (по шкале длин волн или

частот) много больше ширины линий. Такой спектр излучают атомарные газы.

Кроме линейчатого выделяют еще *полосатый* спектр, который излучают молекулярные газы и *сплошной* спектр, излучаемый нагретыми твердыми телами.

Наиболее простейший спектр излучения имеет атомарный водород. Линейчатый спектр атомарного водорода представляет собой ряд серий и описывается, так называемой, *обобщенной формулой Бальмера*:

$$\frac{1}{\lambda_{nk}} = R_{\lambda} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad k > n, \quad (332.1)$$

или для частот излучения

$$\omega_{nk} = R_{\omega} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad k > n,$$

где $R_{\omega} = 2,067 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ - постоянная Ридберга, $R_{\lambda} = R_{\omega}/2\pi c = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, а n и k - целые числа.

Известны следующие серии спектральных линий излучения атома водорода, названные в честь их первооткрывателей (рис.332.1):

при переходе всех электронов с уровней $k > 1$ на уровень $n = 1$ - серия Лаймана (ультрафиолетовое излучение),

при переходе всех электронов с уровней $k > 2$ на уровень $n = 2$ - серия Бальмера (видимый свет),

при переходе всех электронов с уровней $k > 3$ на уровень $n = 3$ - серия Пашена (инфракрасное излучение),

при переходе всех электронов с уровней $k > 4$ на уровень $n = 4$ - серия Брэкетта (инфракрасное излучение),

при переходе всех электронов с уровней $k > 5$ на уровень $n = 5$ - серия Пфунда (инфракрасное излучение),

при переходе всех электронов с уровней $k > 6$ на уровень $n = 6$ - серия Хемфри (инфракрасное излучение).

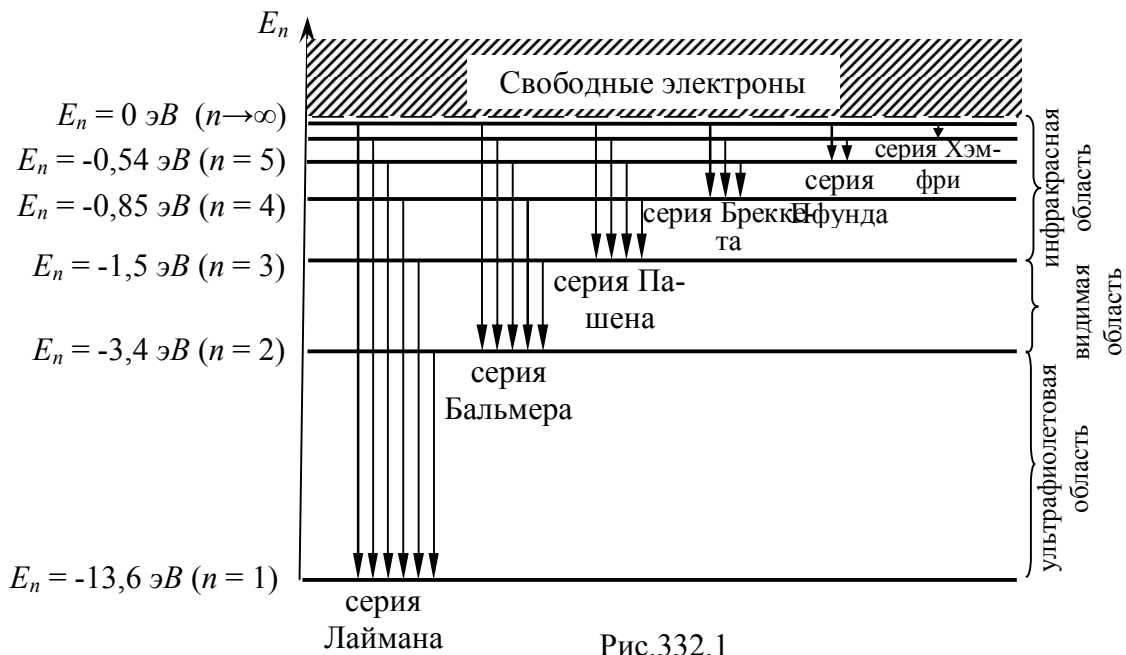


Рис.332.1

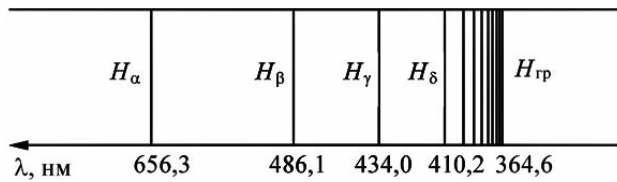


Рис.332.2

Схема линий серии Бальмера в видимой части спектра атома водорода приведена на рис.332.2. На рисунке символами H_α , H_β , H_γ , и H_δ обозначены характерные линии спектра излучения, а $H_{гр}$ указывает коротковолновую границу серии, соответствующую в формуле (332.1) значениям $n = 2$ и $k \rightarrow \infty$.

Значения энергии атома E_n получают при решении уравнения Шредингера для движения электрона в кулоновском поле ядра с зарядом Ze (Z – порядковый номер элемента в периодической системе Д.И. Менделеева). Они определяются формулой

$$E_n = -\frac{z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ – масса электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд электрона, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ м/Ф}$ – электрическая постоянная, $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число, определяет энергетические уровни электрона в атоме.

С возрастанием n соседние уровни энергии атома сближаются, и при $n \rightarrow \infty$ расстояние между ними стремится к нулю, дискретность энергетического спектра становится все менее заметной. Поэтому можно ожидать, что в таком случае квантовая система будет вести себя, как классическая. Это положение было выдвинуто Бором и названо им *принципом соответствия*.

На рис.332.1 изображена схема уровней энергии атома водорода ($Z=1$). Уровни здесь нумеруются квантовым числом n . За нуль принята энергия с $n=\infty$. Этот уровень изображен верхней горизонтальной пунктирной прямой. Все энергетические уровни, расположенные ниже, *дискретны*. Им соответствуют отрицательные значения полной энергии атома. Выше пунктирной линии энергия не квантуется, т.е. энергетический спектр непрерывен. При непрерывном энергетическом спектре ($E>0$) электрон может как угодно далеко удаляться от ядра (*ионизация атома*). В случае дискретного спектра ($E<0$) ядро и электрон образуют связанную систему – *атом*.

Уравнение Шредингера для движения электрона в кулоновском поле ядра атома водорода используется для анализа квантовой модели атома. В результате решения этого уравнения получается *волновая функция*, которая зависит не только от координаты \vec{r} и времени t , но и от 4-х параметров, имеющих дискретный набор значений и называемых *квантовыми числами*. Они имеют названия: главное, азимутальное, магнитное и магнитное спиновое.

Главное квантовое число n может принимать целочисленные значения 1, 2, Оно определяет величину энергии электрона в атоме $E_n = -\frac{E_i}{n^2}$, где E_i - энергия ионизации атома водорода (13.6 эВ).

Азимутальное (орбитальное) квантовое число ℓ определяет модуль момента импульса электрона при его орбитальном движении $|\vec{L}| = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)}$.

Оно принимает целочисленные значения $\ell = 0, 1, 2, \dots, n-1$.

Магнитное квантовое число m_ℓ определяет проекцию вектора момента импульса орбитального движения электрона L_Z на направление внешнего магнитного поля \vec{B} . Оно принимает положительные и отрицательные целочисленные значения, меньшие или равные ℓ : $L_Z = \hbar m_\ell$, где $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$.

Магнитное спиновое квантовое число m_s определяет проекцию вектора собственного момента импульса электрона (спина \vec{S}) на направление внешнего магнитного поля \vec{B} : $S_Z = \hbar m_s$ и принимает только два значения: $m_s = +1/2, -1/2$. Для модуля спина $|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s(s+1)}$, где s – спиновое квантовое число, которое у каждой частицы имеет только одно значение. Например, для электрона $s = 1/2$ (аналогично, для протона и нейтрона). Для фотона $s = 1$.

Вырожденными называются состояния электрона с одинаковой энергией.

Кратность вырождения равна количеству состояний с одной и той же энергией.

Распределение электронов в атоме подчиняется принципу Паули: *в одном и том же атоме не может быть более одного электрона с одинаковым набором четырех квантовых чисел n, ℓ, m_ℓ и m_s , т.е.:*

$$Z(n, \ell, m_\ell, m_s) = 0 \text{ или } 1,$$

где $Z(n, \ell, m_\ell, m_s)$ – число электронов находящихся в заданном квантовом состоянии.

Принцип Паули, утверждает, что два электрона, связанные в одном и том же атоме, различаются значениями по крайней мере одного квантового числа.

Согласно формуле $\sum_{\ell=0}^{n-1} (2\ell + 1) = n^2$, данному n соответствует n^2 различ-

ных состояний, отличающихся значениями ℓ и m_ℓ . Квантовое число $m_s = \pm 1/2$ принимает лишь два значения. Поэтому максимальное число электронов, находясь в состояниях, определяемых данным главным квантовым числом, равно:

$$Z(n) = \sum_{\ell=0}^{n-1} 2(2\ell + 1) \equiv 2n^2.$$

Совокупность электронов, имеющих одно и тоже главное квантовое число n , называется *электронной оболочкой*. В каждой из оболочек электроны распределяются *по подоболочкам*, соответствующим данному ℓ . Поскольку $\ell =$ от 0 до $n-1$, число подоболочек равно порядковому номеру n -оболочки.

Количество электронов в подоболочке определяется магнитным и магнитным спиновым квантовыми числами: максимальное число электронов в подоболочке с данным ℓ равно $2(2\ell + 1)$.

Обозначения оболочек и распределение электронов по оболочкам и подоболочкам показано в табл.332.1

Таблица 332.1. *Обозначения оболочек и распределения электронов по оболочкам и подоболочкам*

Главное квантовое число n	1	2			3			4			5				
Символ оболочки	K	L			M			N			O				
Мах число электронов в оболочке $2n^2$	2	8			18			32			50				
Орбитальное квантовое число ℓ	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4
Символ подоболочки	$1s$	$2s$	$2p$	$3s$	$3p$	$3d$	$4s$	$4p$	$4d$	$4f$	$5s$	$5p$	$5d$	$5f$	$5g$
Мах число электронов в подоболочке $2(2\ell + 1)$	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18

Краткая запись состояния электрона в атоме: цифра, равная главному квантовому числу, и буква, определяющая азимутальное квантовое число:

$^{11}\text{Na} = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ - пример электронной формулы.

Обозначения подболочек сведены в табл.332.2.

Спектральной серией называется совокупность линий излучения, соответствующих переходу электрона в атоме на один и тот же нижний уровень энергии: характеристики спектральных серий сведены в табл.332.3.

Таблица 332.2. Обозначения подболочек

Буква	<i>s</i>	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
Значение ℓ	0	1	2	3	4

Таблица 332.3. Характеристики спектральных серий

Серия	Лаймана	Бальмера	Пашена	Брэкета
Переходы	$np \rightarrow 1s$	$ns \rightarrow 2p,$ $nd \rightarrow 2p$	$nf \rightarrow 3d,$ $np \rightarrow 3d$	$ng \rightarrow 4f,$ $nd \rightarrow 4f$

332.3. Порядок выполнения работы

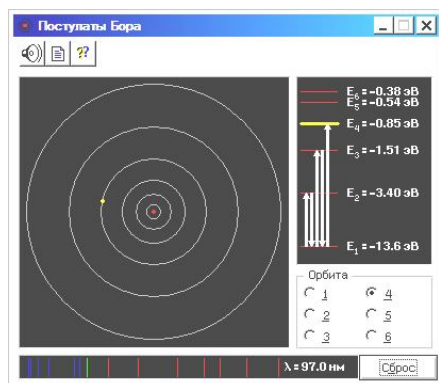


Рис.332.3

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите в содержании раздел «Квантовая физика», модель «Постулаты Бора» (рис.332.3).

2. Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

3. По полученному у преподавателя номеру варианта выберите по таблице 332.5 значение главного квантового числа для нижнего уровня n_0 .

4. Подведите маркер мыши к уровню энергии (орбите) электрона с выбранным номером n_0 и нажмите левую кнопку мыши. Наблюдайте поглощение электроном кванта излучения и переход атома в возбужденное состояние.

5. Подведите маркер мыши к орбите электрона с номером $n = n_0 + 1$ и нажмите левую кнопку мыши. Наблюдайте поглощение электроном кванта

излучения. Затем подведите маркер мыши к орбите электрона с номером n_0 и нажмите левую кнопку мыши. Наблюдайте излучение электроном кванта излучения. Запишите в табл.332.4 значение длины волны λ испущенного кванта излучения.

6. Повторите операции по пункт 5 для орбит электрона с номерами $n = n_0 + 2$ и $n = n_0 + 3$. Наблюдайте стрелки в правом верхнем поле программы, соответствующие линиям в данной серии.

7. Запишите в таблицу 332.4 величину главного квантового числа n_0 для нижнего уровня энергии данной серии и название серии.

Таблица 332.4. *Результаты измерений*
Серия _____ . $n_0 =$ _____

Номер линии	n	$1/n^2$	$\lambda, \text{ мкм}$	$1/\lambda, \text{ мкм}^{-1}$
1				
2				
3				
4				

Таблица 332.5. *Для выбора начальных условий*
(не перерисовывать)

Вариант	Гл. кв. число ниж. уровня n_0
1	1
2	2
3	3
4	4

332.4. Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в табл. 332.3 обратные длины волн $1/\lambda$ и $1/n^2$.
2. Определите, переходу между какими квантовыми состояниями электрона в атоме водорода соответствует каждая линия излучения. Запишите в таблицу значения n .
3. Постройте график зависимости обратной длины волны ($1/\lambda$) от обратного квадрата главного квантового числа ($1/n^2$) для данной спектральной серии.
4. Определите по наклону графика значение постоянной Ридберга:

$$R_\lambda = \frac{\Delta(1/\lambda)}{\Delta(1/n^2)}$$

5. Рассчитайте погрешности определения постоянной Ридберга.
6. Запишите ответ и, проанализировав ответ и график, сделайте вывод.

332.5. Контрольные вопросы

1. Что называется спектром? Какие виды спектров вы знаете?
2. Объясните происхождение линейчатых спектров атомов.
3. Какие закономерности наблюдаются в спектре атомарного водорода?
4. Как определяется первая линия и граница каждой серии?
5. Сформулируйте постулаты Бора.
6. Выведите формулы для радиуса орбиты электрона и энергии электрона на орбите атома.
7. В чем состоит принцип соответствия Бора?
8. Каков физический смысл квантовых чисел?
9. Объясните различия в схемах энергетических состояний с точки зрения классической теории и квантовой механики.
10. Какие состояния называются вырожденными?
11. Какой серии соответствуют переход $nd \rightarrow 2p$? С помощью условных обозначений состояний электрона запишите переходы, соответствующие сериям Лаймана, Бальмера, Пашена,

Литература, рекомендуемая для обязательной проработки: [1], §§2.1,..., 2.4; [2], §§59,..., 63; [3], §§9,..., 16; [4], §§208,..., 212; [5] §§39.1,..., 39.6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов. – 3-е изд. стер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 256 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, МФТИ, 2006. – Т.5. – 784 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 720 с.

Учебное издание

Сергей Олегович **Зубович**
Татьяна Александровна **Сухова**

СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Методические указания

в авторской редакции
Темплан 2007 г., поз.№ __27. В__
Лицензия ИД № 04790 от 18.05.2001 г.

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. _1,16__.

Уч.-изд. л. _1,2 на магнитоносителе

Волгоградский государственный технический университет.

400131, г. Волгоград, просп. им. В.И. Ленина 28.

РПК “Политехник” Волгоградского государственного
технического университета.

400131, Волгоград, ул. Советская, 35.