

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Общая физика»

## **ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 40  
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,  
220700.62, 220400.62, 80700.62, 221700.62, 090303.65, 190109.65,  
190600.62, 190110.65, 140400.62, 190600.62, 190700.62

Курган 2014

Кафедра: «Общая физика»

Дисциплина: «Физика»

(направления 231000.62, 151900.62, 150700.62, 220700.62, 220400.62, 80700.62, 221700.62, 090303.65, 190109.65, 190600.62, 190110.65, 140400.62, 190600.62, 190700.62).

Составили: канд. физ.-мат. наук, доцент Т.Н. Новгородова, канд. физ.-мат. наук, доцент В.М. Овсянов.

Утверждены на заседании кафедры «24» февраля 2014 г.

Рекомендованы методическим советом университета «5» марта 2014 г.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучение спектра атома водорода и определение постоянной Ридберга.

## ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1 Монохроматор-спектрометр УМ – 2.
- 2 Неоновая лампа.
- 3 Водородная газоразрядная трубка.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одной из характеристик атомов и молекул является набор частот излучаемых ими электромагнитных волн, называемый спектром.

Раздел физики, посвященный изучению спектров электромагнитного излучения, называется спектроскопией. Методами спектроскопии исследуют уровни энергии атомов, молекул и образованных из них макроскопических систем, а также возможные квантовые переходы между уровнями энергии, что дает важную информацию о строении и свойствах вещества. Теоретической базой современной спектроскопии являются квантовая механика и квантовая электродинамика.

В квантовой механике состояние микрочастицы описывается волновой функцией  $\psi$ , которая является функцией координат и времени и может быть найдена путем решения уравнения Шредингера.

Физический смысл  $\psi$ -функции заключается в том, что квадрат ее модуля дает плотность вероятности нахождения частицы в соответствующем месте пространства.

Для стационарного (не меняющегося со временем) состояния уравнение Шредингера имеет вид:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы;

$\hbar$  – постоянная Планка;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ;

$E$  – полная энергия частицы;

$U$  – потенциальная энергия частицы;

$\Delta$  – оператор Лапласа:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}.$$

В атоме водорода потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром описывается выражением

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (2)$$

Уравнение Шредингера в этом случае имеет вид:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0. \quad (3)$$

Оно имеет решения только при значениях полной энергии, называемых собственными, и равных:

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (4)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  – **главное квантовое число**, определяющее энергию электрона в атоме, которая может принимать только дискретный ряд значений.

Состояние атома с наименьшим значением энергии  $E_n$  (при  $n = 1$ ) называется основным состоянием. Любое состояние атома, в котором он имеет энергию, большую, чем в основном состоянии, называется возбужденным. Наибольшее значение  $E_{\max} = 0$  соответствует ионизации атома (т.е. отрыву электрона от ядра).

Из решения уравнения Шредингера следует, что каждому из возможных дискретных энергетических состояний, определяемых квантовым числом  $n$ , (при  $n > 1$ ) соответствует несколько  $\psi$ -функций. Каждое значение  $\psi$ -функции соответствует определенному состоянию электрона в атоме. Эти состояния могут отличаться не только значением энергии, но и величиной орбитального момента импульса  $\vec{L}$ , обусловленного вращением электрона вокруг ядра.

Для электрона в атоме водорода величина  $L$  квантована; для каждого значения энергии  $E_n$  она может иметь ряд дискретных значений

$$L = \hbar \cdot \sqrt{\ell(\ell + 1)}, \quad (5)$$

где  $\ell$  – **орбитальное квантовое число**, принимающее при заданном  $n$  значения:

$$\ell = 0, 1, 2, \dots, (n - 1).$$

В атомной физике применяются заимствованные из спектроскопии условные обозначения состояний электрона с различными значениями орбитального квантового числа. Состояние электрона с  $\ell = 0$  называют s-состоянием,  $\ell = 1$

соответствует p-состоянию,  $\ell = 2$  соответствует d-состоянию и т.д. Значение главного квантового числа указывается перед условным обозначением орбитального квантового числа. Например, электрон в состоянии с  $n=3$  и  $\ell = 1$  обозначается символом  $3p$ .

Вектор момента импульса  $\vec{L}$  может иметь лишь такие ориентации в пространстве, при которых его проекция  $L_z$  на направление внешнего магнитного поля (при условии его существования) равна:

$$L_z = m\hbar. \quad (6)$$

Здесь  $m$  – **магнитное квантовое число**, которое при заданном  $\ell$  может принимать значения:

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell.$$

Так как электрон обладает волновыми свойствами, то понятие электронной орбиты в квантовой механике утрачивает свой смысл. Электрон при своем движении вокруг ядра как бы «размазывается» по всему объему, образуя электронное облако, плотность которого характеризует вероятность обнаружения электрона в разных точках объема атома. Квантовые числа  $n$  и  $\ell$  характеризуют размер и форму электронного облака, а квантовое число  $m$  – его ориентацию в пространстве.

Для полного описания состояния электрона в атоме необходимо наряду с главным, орбитальным и магнитным квантовыми числами задать ещё магнитное спиновое число  $m_s$ .

Спин электрона  $L_s$  – квантовая величина, представляющая собой собственный неуничтожимый механический момент импульса, не связанный с движением электрона в пространстве.

Спин квантуется по закону

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}, \quad (7)$$

где  $s$  – **спиновое квантовое число**. Для электрона  $s = \frac{1}{2}$ .

Проекция спина на направление внешнего магнитного поля, являясь квантовой величиной, определяется выражением:

$$L_{sz} = m_s\hbar, \quad (8)$$

где  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  – **магнитное спиновое квантовое число**.

Переход электрона из состояния с одной энергией в другое состояние с другим значением энергии сопровождается излучением или поглощением фотона.

Спектры поглощения соответствуют переходам атомов из основного в воз-

бужденное состояние, спектры испускания – переходам из возбужденного в основное или менее возбужденное состояние. Энергия излучаемого при этом фотона равна разности энергий двух состояний, связанных переходом

$$h\nu = E_k - E_i. \quad (9)$$

В квантовой механике существуют правила отбора, ограничивающие число возможных переходов электронов в атоме, связанных с испусканием и поглощением света. Согласно им могут осуществляться только такие переходы, для которых:

1) изменение квантового орбитального числа  $\Delta l$  удовлетворяет условию:

$$\Delta l = \pm 1;$$

2) изменение магнитного квантового числа  $\Delta m$  удовлетворяет условию:

$$\Delta m = 0, \pm 1.$$

На рисунке 1 изображены уровни энергии атома водорода. Стрелками обозначены переходы между уровнями соответствующие спектральным линиям, с учетом правил отбора.

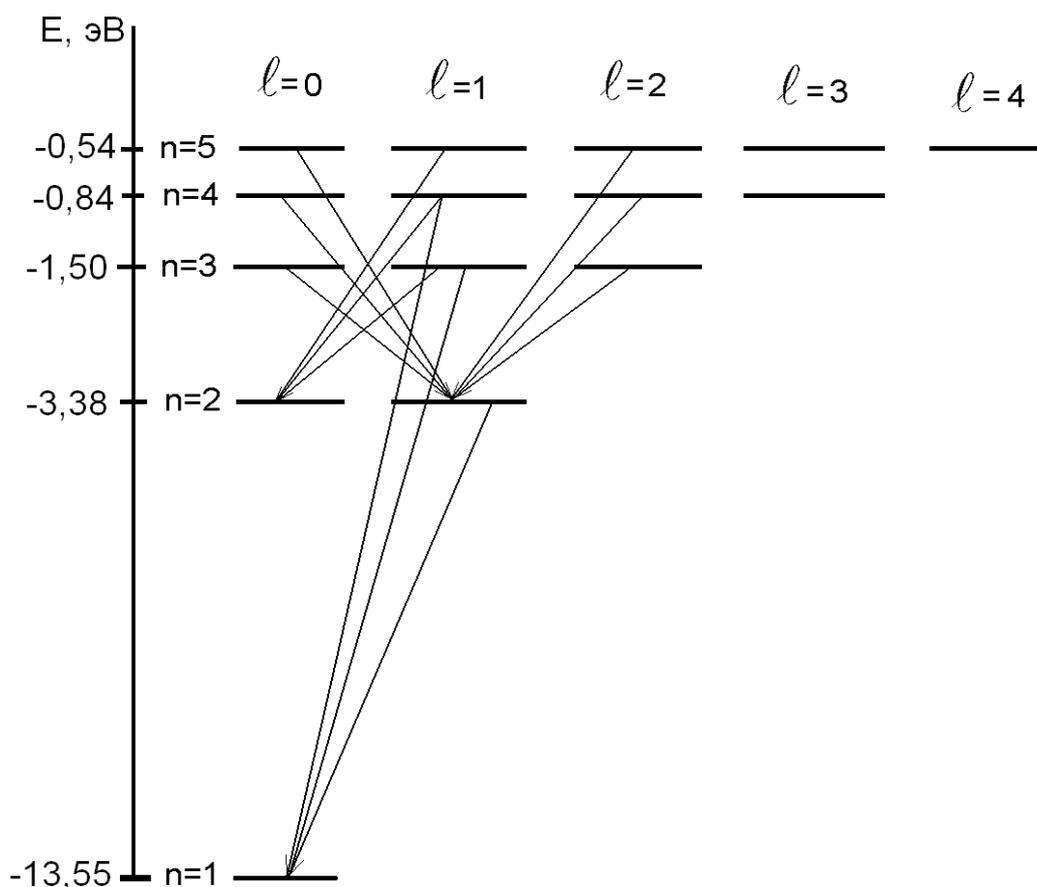


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней атома водорода.

Спектр излучения атомарного водорода представляет из себя группы линий, объединенных в серии, которые располагаются как в видимой, так и в невидимой частях спектра.

Переходы, которые, пользуясь условными обозначениями состояний электрона, можно записать в виде  $n_i \rightarrow 1s$  ( $n=2, 3, \dots$ ), приводят к возникновению серии Лаймана. Серии Бальмера соответствуют переходы  $n_i \rightarrow 2s$ ,  $n_i \rightarrow 2p$ ,  $n_i \rightarrow 2d$  ( $n=3, 4, \dots$ ). Серия Лаймана лежит в ультрафиолетовой области; серия Бальмера охватывает видимую область; остальные серии лежат в инфракрасной области.

Для атома водорода, подставив в (9) значение энергии из (4), найдем

$$\nu = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right). \quad (10)$$

Учитывая, что частота  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ,

где  $c$  – скорость света в вакууме, получим для длин волн спектральных линий атома водорода формулу:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2} \right), \quad (11)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга.

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}. \quad (12)$$

Для всех линий одной серии значение  $n_i$  в формуле (11) остается постоянным, а  $n_k$  может принимать любые значения от  $n_k = n_i + 1$  до  $\infty$ . Серии имеют следующие названия:

- $n_i = 1$  – серия Лаймана;
- $n_i = 2$  – серия Бальмера;
- $n_i = 3$  – серия Пашена;
- $n_i = 4$  – серия Бреккета;
- $n_i = 5$  – серия Пфунда;
- $n_i = 6$  – серия Хэмфри.

Для серии Бальмера формула (11) имеет вид

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_k^2} \right). \quad (13)$$

Наиболее яркими в этой серии являются следующие линии:

- красная –  $n_k = 3$ ,
- голубая –  $n_k = 4$ ,

фиолетовая –  $n_k = 5$ .

Таким образом, проведя измерения длин волн указанных линий серии Бальмера, можно рассчитать постоянную Ридберга по формуле:

$$R = \frac{1}{\lambda \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_k^2} \right)}. \quad (14)$$

### ОПИСАНИЕ ПРИБОРА УМ – 2

Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется стеклянно-призменный монохроматор – спектрометр УМ – 2, предназначенный для спектральных исследований в диапазоне от 380 до 1000 нм. В состав прибора входят следующие основные части (рисунок 2):

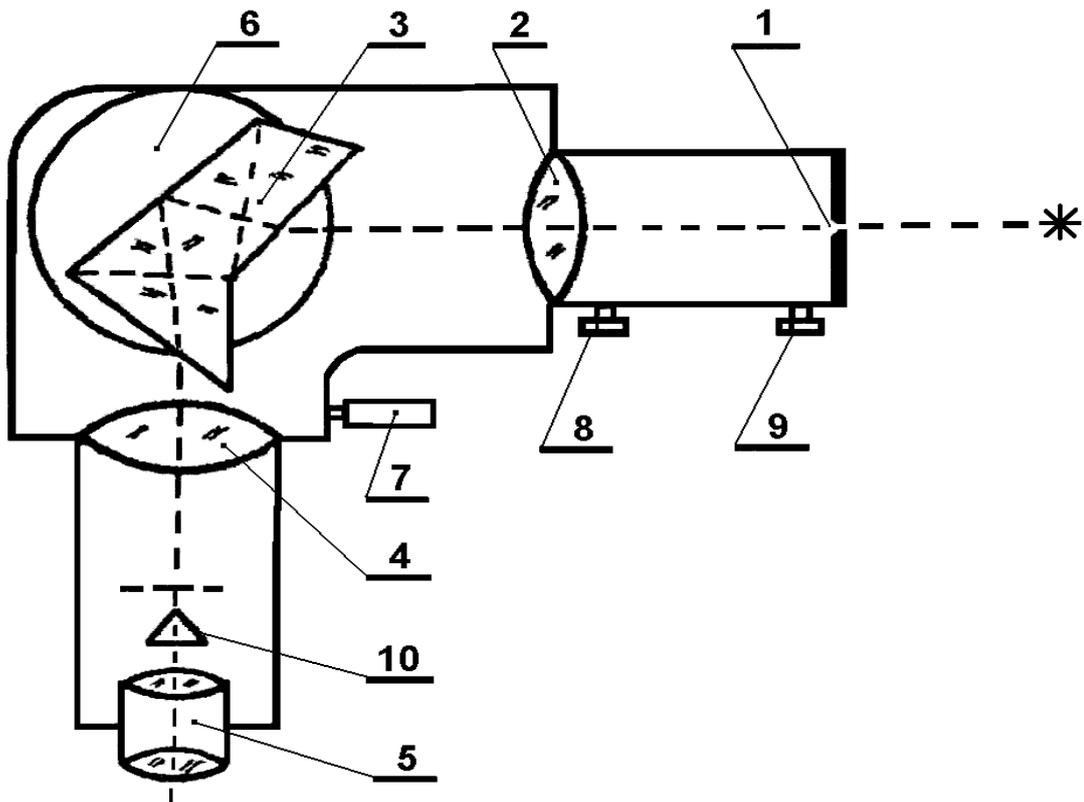


Рисунок 2 – Оптическая схема монохроматора – спектрометра УМ – 2

Входная щель 1, снабженная микрометрическим винтом 9, который открывает щель на нужную ширину.

Коллиматорный объектив 2, снабженный микрометрическим винтом 8, позволяющим смещать объектив относительно щели при фокусировке спектральных линий.

Сложная спектральная призма 3, при прохождении через которую световой пучок разлагается в спектр, установлена на поворотном столике 6. Поворотный

столик 6 вращается вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта с отсчетным барабаном 7. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. При вращении барабана призма поворачивается, и в центре поля зрения появляются различные участки спектра.

Зрительная труба состоит из объектива 4 и окуляра 5. Объектив 4 дает изображение входной щели 1 в своей фокальной плоскости. В этой же плоскости расположен указатель 10. Изображение рассматривается через окуляр 5. Для отсчета положения линии ее центр совмещается с острием указателя при помощи барабана 7. Отсчет производится по делениям барабана в градусах.

Для перевода градусных делений барабана в метры необходима градуировка прибора с использованием известного спектра. В данной работе для градуировки используется спектр неона.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### **Задание 1. Наблюдение спектра излучения неоновой лампы и градуировка монохроматора.**

1 Включите неоновую лампу и установите ее против входной щели коллиматора.

2 Добейтесь с помощью окуляра хорошей видимости линий. Совмещая поочередно линии спектра с указателем, проведите отсчет показаний барабана для всех линий, указанных в таблице 1. Результаты измерений занесите в таблицу.

Таблица 1 – Градуировка монохроматора

Линии в спектре неона	Длина волны $\lambda$ , нм	Показания барабана $\varphi$ , град.
Красная (5)	659,9	
Красная (6)	640,2	
Оранжевая	598,8	
Желтая	585,2	
Зеленая (левая)	540,1	
Зеленая (правая)	534,1	
Синяя (средняя)	488,5	

3 По данным таблицы 1 постройте градуировочную кривую. Для этого по оси абсцисс откладывают показания барабана  $\varphi$ , по оси ординат длины волн.

### **Задание 2. Наблюдение линейчатого спектра атомарного водорода и определение длин волн линий серии Бальмера.**

1 Установите против щели коллиматора трубку с водородом. Совмещая поочередно линии спектра с указателем, записывайте показания барабана в таблицу 2.

Таблица 2 – Спектральные линии серии Бальмера

Линия в спектре водорода	Показания барабана $\varphi$ , град.	Длина волны линии в спектре водорода, нм
Красная		
Голубая		
Фиолетовая		

2 Пользуясь градуировочной кривой, построенной по данным таблицы 1, найдите значения длин волн линий спектра водорода. Результаты занесите в таблицу 2.

3 Для каждого значения  $\lambda$  вычислите по формуле (14) постоянную Ридберга. Рассчитайте среднее арифметическое полученных результатов.

4 Сравните полученное значение с табличным и рассчитайте относительную погрешность измерений:

$$\gamma = \frac{|R_{\text{таб}} - R_{\text{эксп}}|}{R_{\text{таб}}} \cdot 100\%.$$

5 Сделайте вывод по результатам работы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Запишите уравнение Шредингера для атома водорода.
- 2 Каков физический смысл волновой функции?
- 3 Какими квантовыми числами определяется состояние электрона в атоме? Какие значения принимают эти квантовые числа? Что они характеризуют?
- 4 Какие значения в атоме водорода могут принимать энергия, момент импульса, проекция момента импульса, спин и проекция спина?
- 5 Объясните происхождение спектральных серий у атома водорода?
- 6 В чем суть метода определения постоянной Ридберга?
- 7 Расскажите об устройстве и назначении монохроматора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2003.
- 2 Детлаф, А. А. Курс физики [Текст] / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Издательский центр «Академия», 2003.
- 3 Савельев, И. В. Курс физики [Текст] / И. В. Савельев. – Т. 1-5. – М. : АКТ, 2005.

Новгородова Татьяна Назаровна  
Овсянов Виктор Михайлович

## ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 40  
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,  
220700.62, 220400.62, 80700.62, 221700.62, 090303.65, 190109.65,  
190600.62, 190110.65, 140400.62, 190600.62, 190700.62

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать 15.05.14	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 167	Тираж 100	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.