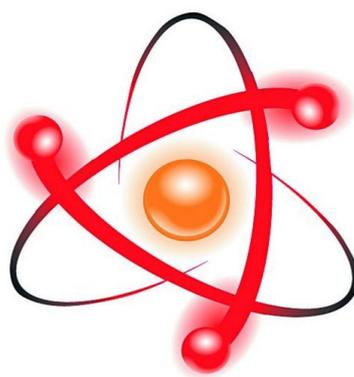


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



**ФКЛ-1**

**ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА.**

Тула, 2013 г.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА.

Цель работы: наблюдение и идентификация спектров спонтанного излучения, возбуждаемого электрическим разрядом в парах водорода при низком давлении; измерение длин волн линий серии Бальмера и определение постоянной Ридберга.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Уровни энергии и спектр атома водорода.

Состояние атома в квантовой механике описывается волновой функцией  $\psi_n$ , а его энергия  $E_n$ . В случае простейших атомов - атома водорода и водородоподобных ионов с зарядом ядра  $+Ze$ , состоящих из  $Z$  протонов ( $Z=1$  для атома водорода) и одного валентного электрона на внешних электронных оболочках, квантовая механика позволяет получить точные решения волнового уравнения Шредингера (1):

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{ke^2}{r} \right) \psi = 0, \quad (1)$$

где  $m$  - масса электрона,  $e$  - его заряд,  $E$  - полная энергия,  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  (для расчетов часто принимают  $k=9 \cdot 10^9 \text{ м/}\Phi$ ). Его решение (получаемое в курсе «Квантовой теории») для атома водорода дает набор дискретных уровней энергии. Для связанных состояний ( $E_n < 0$ ):

$$E_n = - \frac{k^2 Z^2 m e^4}{2\hbar^2 n^2} = - \frac{|E_1|}{n^2}, \quad (2)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  - главное квантовое число. Обычно формулу (2) записывают в виде:

$$E_n = -A \frac{1}{n^2}, \quad (2a)$$

где  $A=13,6$  эВ.

Таким образом, у атома водорода закономерность расположения уровней энергии  $E_n$  является наиболее простой.

Диаграмма уровней энергии атома водорода (рис. 1.1) построена на основании формулы (2). Энергия ионизации атома водорода:

$$W_i^H = |E_1| = |W_1| = A$$

Следовательно, по своему физическому смыслу энергетическая постоянная  $A$  характеризует энергию ионизации атома водорода.

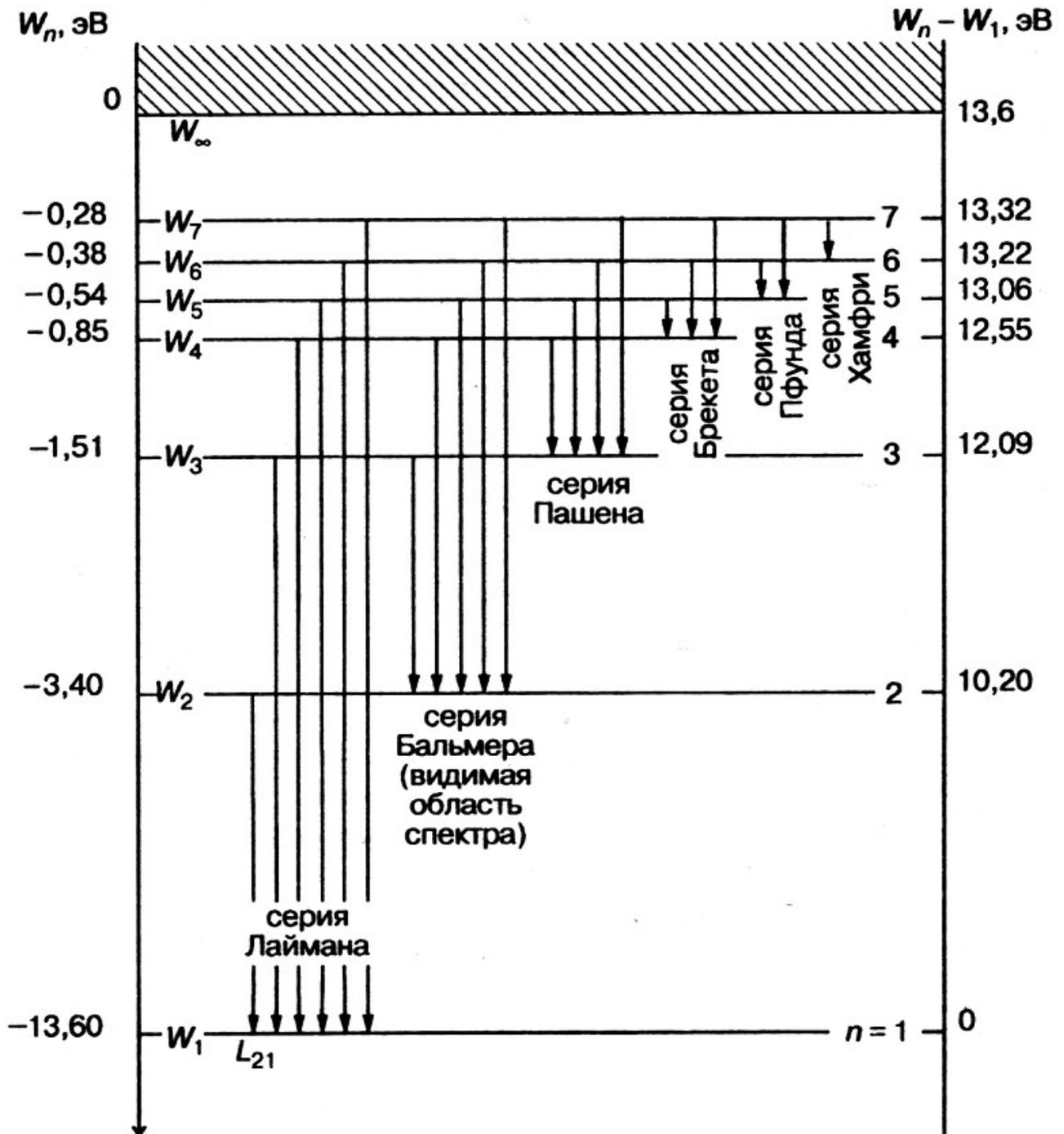


Рис. 1.1. Энергетическая диаграмма атома водорода. Здесь принято  $E_n = W_n$  – полная энергия электрона в атоме на  $n$ -ом уровне.

Диаграмма рис. 1.1 дает наглядное объяснение спектра испускания атомов водорода. Линии спектра группируются в серии. Серию образуют линии, возникающие вследствие квантовых переходов на общий нижний энергетический уровень ( $m=\text{const}$ ) со всех более высоких уровней ( $m < n < \infty$ ). Такая группировка удобна тем, что спектральные линии, принадлежащие к данной серии, располагаются в одной спектральной области.

Первые 5 серий (см. рис. 1.1) названы в честь открывших их физиков:

$m = 1$  - серия Лаймана (далекая УФ область);

$m = 2$  - серия Бальмера (видимая и близкая УФ область);

$m = 3$  - серия Пашена (близкая ИК область);

$m = 4$  - серия Брэкета (средняя ИК область);

$m = 5$  - серия Пфунда (далекая ИК область).

Самое длинноволновое излучение атома водорода ( $\lambda=15,7$  м), зарегистрированное при исследованиях межгалактических газовых туманностей, принадлежит переходу  $n=701 \rightarrow m=700$ .

### Атом водорода в модели атома Бора.

С ростом  $n$  уровни энергии атома сближаются, в пределе ( $n \rightarrow \infty$ ) дискретный спектр приближается к непрерывному, а квантовая система к классической. Это и есть принцип соответствия Бора, который позволяет выразить постоянную Ридберга через фундаментальные постоянные.

Для атома водорода и сходных с ним водородоподобных ионов правило квантования энергии (2) можно найти из простых модельных представлений. Для простоты Бор принял, что в атоме водорода либо водородоподобного иона единственный электрон с зарядом  $-e$  и массой  $m_e$  вращается по круговой орбите радиусом  $r$  вокруг неподвижного ядра с зарядом  $+Ze$ , причем линейная скорость электрона равна  $v$  (рис. 1.2). Ядро считается неподвижным, а масса ядра бесконечной  $M_\infty$ , по сравнению с массой электрона  $m_e$ .

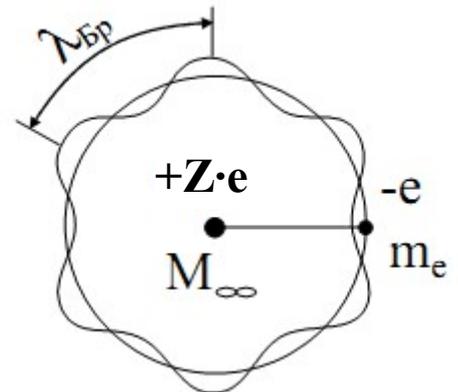


Рис. 1.2. Модель атома водорода и водородоподобных ионов в представлении Бора.

Кулоновская сила взаимодействия между ядром и электроном играет роль центростремительной силы, и, согласно второму закону Ньютона, имеем:

$$\frac{k \cdot Z \cdot e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r}, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{\Phi}{M} \right]$  - диэлектрическая постоянная, или диэлектрическая проницаемость вакуума.

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) существует связь между энергией и импульсом  $p$  релятивистской частицы (релятивистский инвариант):

$$\boxed{\mathcal{E}^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4} \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}$  — полная энергия частицы с массой покоя  $m$ .

Для безмассовых частиц, например, для фотона, связь (4) примет вид:

$$\boxed{\mathcal{E}_\phi = p_\phi c.} \quad (5)$$

Т. к. энергия фотона определяется как  $\varepsilon_\phi = h \cdot \nu$ , то можно записать:

$$p_\phi = h \cdot \frac{\nu}{c} = \frac{h}{\lambda_B} \quad (6)$$

Длина волны  $\lambda_B = \frac{h}{p_\phi}$  называется длиной волны де Бройля.

Де Бройл предположил, что если электромагнитное излучение с длиной волны, определяемой по формуле (6), проявляет свойства частицы-фотона с энергией  $\varepsilon_\phi = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda_B}$  и импульсом  $p_\phi = \frac{\varepsilon_\phi}{c}$  то и материальные частицы с энергией  $E$  и импульсом  $p$  должны обладать свойствами волны с частотой  $\omega_B = \frac{E}{\hbar}$  и длиной волны  $\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{p}$ , где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $\omega_B = 2\pi\nu_B = 2\pi\frac{c}{\lambda_B}$ .

Условие образования стоячей волны де Бройля на круговой орбите длиной  $2\pi r$  имеет вид (рис. 1.2):

$$2\pi r = n\lambda_B, \quad n=1,2,3 \dots \quad (7)$$

Учитывая определение длины волны де Бройля  $\lambda_B = \frac{2\pi\hbar}{p}$ , получим условие квантования момента импульса электрона в атоме Бора:

$$p \cdot r = n \cdot \hbar, \quad n=1,2,3 \dots \quad (8)$$

Согласно полученному принципу квантования состояния электрона в атоме (8) и записывая импульс  $p$  электрона в виде  $p = m_e v$ , получим:

$$m_e v r = n \hbar, \quad n=1,2,3 \dots \quad (9)$$

Решение системы (3), (9) дает выражение для радиусов круговых орбит электронов в атоме водорода:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m k Z e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9$ . Здесь и далее массу электрона мы будем обозначать  $m = m_e$ .

Выражая из системы уравнений (3), (9) скорость электрона  $v$ , имеем:

$$v_n = \frac{k Z e^2}{n \hbar}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Формулу (10) обычно записывают в виде:

$$r_n = n^2 r_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (12)$$

где  $r_1$  – боровский радиус или радиус первой боровской орбиты (для атома водорода ( $Z=1$ ) он равен  $5,291 \cdot 10^{-11}$  м).

Энергия электрона складывается из кинетической энергии и потенциальной энергии кулоновского взаимодействия с ядром:

$$E_n = \frac{m v_n^2}{2} - \frac{k Z e^2}{r_n}.$$

С учетом выражений (3), (10), (11) получаем формулу, выражающую полную энергию электрона в водородоподобном атоме на  $n$ -ой стационарной орбите:

$$E_n = -\frac{k^2 Z^2 m e^4}{2 \hbar^2 n^2} = -\frac{|E_1|}{n^2}, \quad (13)$$

где целое число  $n = 1, 2, 3, \dots$  называется главным квантовым числом.

Видно, что формула (13), полученная с помощью постулатов Бора, совпадает с формулой (2), полученной с помощью точного решения уравнения Шредингера для атома водорода.

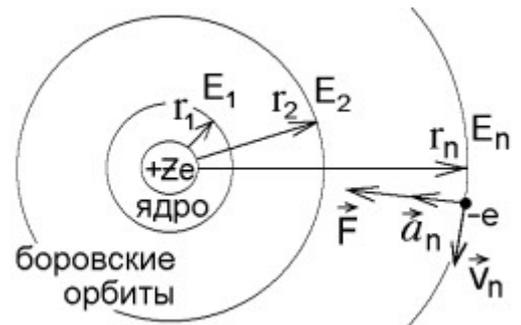


Рис. 1.3. Боровские орбиты для водородоподобных атомов.

Однако, к сожалению, теория Бора, достаточно правильно описывая закономерности в атоме водорода и водородоподобных ионах (содержащих один электрон), даёт неправильные результаты уже для атома гелия, следующего за водородом и содержащем всего два электрона.

Таким образом, теорию Бора можно рассматривать лишь как промежуточный этап на пути поиска верной теории - квантовой механики, точно описывающий закономерности микромира.

При переходе атома водорода либо водородоподобного иона из состояния  $n_2$  с энергией  $E_2$  в состояние  $n_1$  с энергией  $E_1$  излучается квант света с частотой  $\omega$ , равной:

$$E_2 - E_1 = \hbar\omega. \quad (14)$$

Подставляя энергию электрона в состоянии  $n_2$  и в состоянии  $n_1$  из формулы (2) (или, что то же самое, из (13)), имеем:

$$E_2 - E_1 = \frac{k^2 Z^2 e^4 m}{2 \hbar^2} \cdot \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (15)$$

Для водорода  $Z=1$ .

Далее, вспоминая, что  $E_2 - E_1 = \hbar\omega$ ,  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ , можем записать:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (16)$$

Формула (16) называется обобщенной формулой Бальмера. В данном случае  $R = \frac{me^4}{64 \pi^3 \epsilon_0^2 c \hbar^3} = \frac{k^2 me^4}{4 \pi c \hbar^3} = 1,096 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ . Следует отметить, что

постоянную Ридберга иногда вводят не для волнового числа  $\frac{1}{\lambda}$ , а для частоты  $\omega$ . В этом случае  $R' = R \cdot 2\pi c = 2,067 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ .

В формуле (16) с увеличением  $n_2$  разность между волновыми числами  $\frac{1}{\lambda}$  уменьшается, стремясь при  $n_2 \rightarrow \infty$  к предельному значению (для  $n_1 = 2$ ,  $\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{4}$ ). При этом линии сближаются, и уменьшается их интенсивность.

Как было сказано выше, спектр атома водорода может быть разделен на наблюдающиеся на опыте спектральные серии, соответствующие переходам электрона на определенный уровень энергии со всех лежащих выше возбужденных энергетических уровней (рис. 1.4). Соответствующие переходы между боровскими орбитами показаны на рис. 1.4. **Визуально мы можем наблюдать только серию Бальмера: для водорода -  $n_1=2, n_2=3,4,5...$**

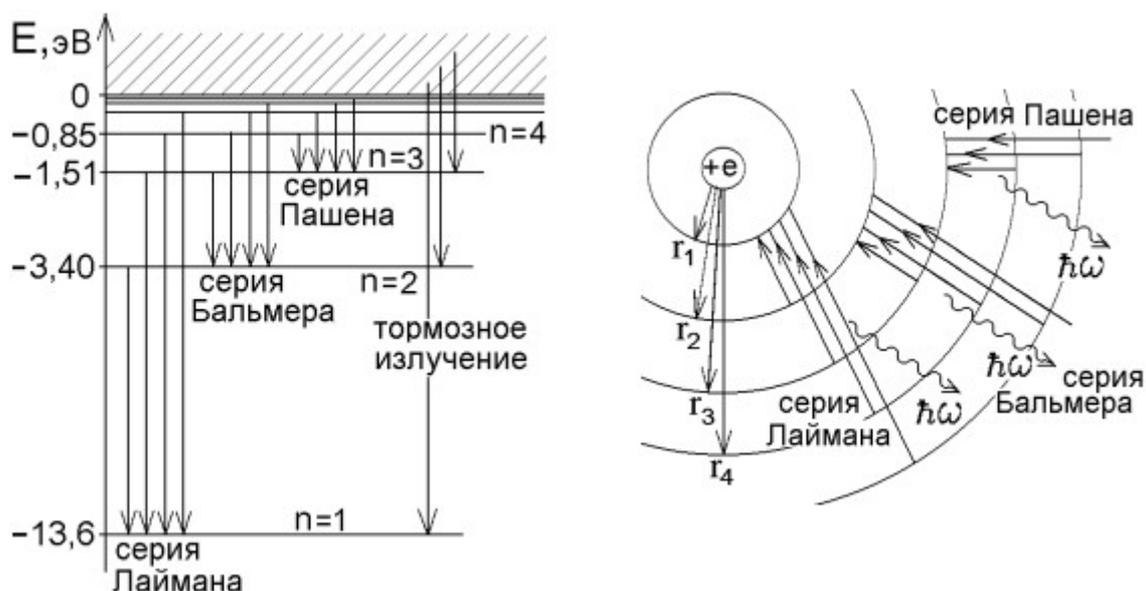


Рис. 1.4. Серийные закономерности в спектре атомарного водорода.

Вычисленные по формуле (16) длины волн спектральных серий водорода изображены на рис.1.5. Так как разрешенные уровни энергии расположены все более плотно с ростом главного квантового числа  $n$ , то и линии спектральной серии располагаются все более часто с уменьшением длины волны и оканчиваются областью сплошного спектра тормозного излучения (заштрихованные участки на рис.1.5). Видимый спектр изображен на рис. 1.6.

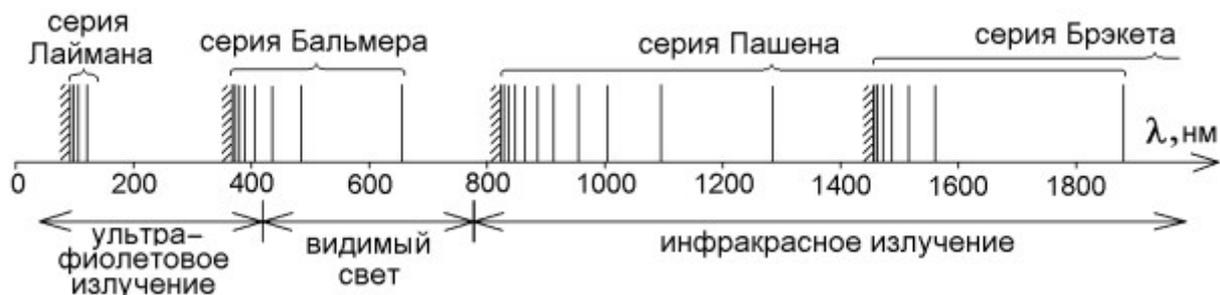


Рис. 1.5. Спектр атомарного водорода.

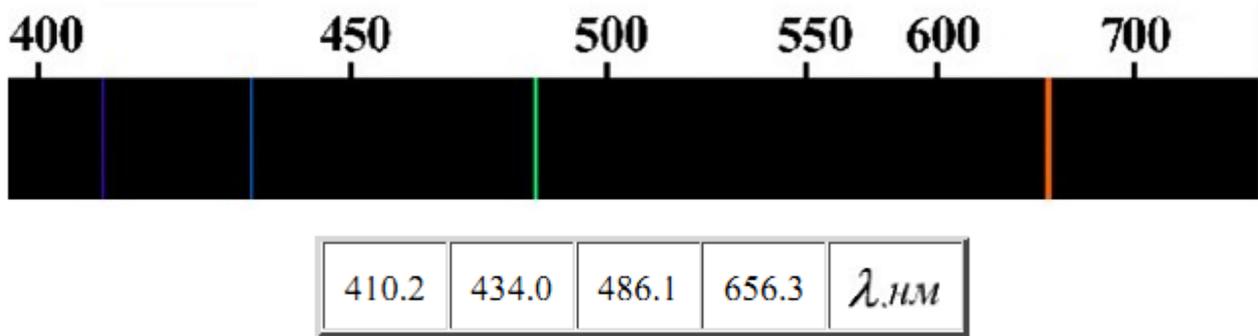


Рис. 1.6. Видимая часть спектра атома водорода.

Состояние атома, в котором электрон находится на низшем энергетическом уровне (для атома водорода это состояние с энергией  $E_1 = -13,6$  эВ), называется основным. Атом без внешних возмущений может находиться в этом состоянии неопределённо долго. Энергетический уровень  $E_1$ , соответственно, является бесконечно тонким. Этот вывод вытекает непосредственно из соотношения неопределенностей:  $\Delta E_1 \Delta \tau_1 \sim \hbar$ , где  $\Delta E_1$  - неопределенность значения энергии,  $\Delta \tau_1$  - неопределенность времени пребывания атома в этом состоянии. Так как  $\Delta \tau_1 \rightarrow \infty$ , то  $\Delta E_1 \rightarrow 0$ . Остальные энергетические уровни являются возбужденными, так как возникают под действием внешних воздействий и могут существовать ограниченное время  $\Delta \tau$ , поэтому возбужденные уровни несколько размыты, по порядку величины  $\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta \tau}$ .

Как видно из этого рисунка, из-за большого промежутка между уровнями  $E_1$  и  $E_2$  серия Лаймана попадает в ультрафиолетовую область. Серия Пашена и перекрывающаяся с ней серия Брэкета и т.п. оказывается в инфракрасной области. Глаз увидит только три первые линии серии Бальмера с  $\lambda_{3 \rightarrow 2} = 656$  нм (красный цвет),  $\lambda_{4 \rightarrow 2} = 486$  нм (бирюзовый цвет) и  $\lambda_{5 \rightarrow 2} = 434$  нм (темно-фиолетовый цвет). Поэтому свечение возбужденного водорода имеет розоватую окраску (смесь указанных цветов).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

### Приборы и оборудование.

Лабораторная работа выполняется на учебном комплексе ФКЛ-1. Схема эксперимента приведена на рис. 2.1.

Установка содержит УСТРОЙСТВО ОСВЕТИТЕЛЬНОЕ 1 и монохроматор МУМ-01 жестко укрепленный на ПУЛЬТЕ УПРАВЛЕНИЯ 2. Блок осветителя содержит водородную лампу ДВС-25 (либо аналогичные ДДС-30; ЛД-2(D)) и ртутную лампу ДРСк-125.

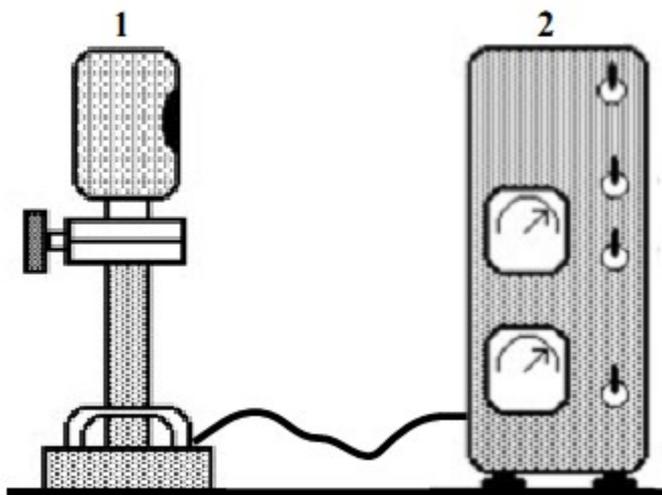


Рис. 2.1. Принципиальная блок — схема эксперимента для исследования спектра атома водорода. 1 — осветитель с водородно-дейтериевой лампой типа ДВС-25 и ртутной лампой типа ДРСк-125; 2 – ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ и источник питания для лампы.

Питание ламп осуществляется от специального источника. Под действием высокого напряжения, вырабатываемого блоком питания ламп, электроны в атомах газа переходят на высшие энергетические уровни. Через время  $\Delta t \approx 10^{-9}$  с, они обязаны перейти на более низкий энергетический уровень, испустив квант света, частота которого определяется формулой (16). Так как в разрядном промежутке содержится огромное число атомов, то, под действием напряжения, периодически электроны в них переходят на случайный более возбужденный уровень, излучая квант света какой-то определенной частоты – и, т. о., в окуляре монохроматора мы видим весь набор спектральных линий.

Лампа ДВС-25 представляет собой стеклянный баллон с впаянными внутрь электродами – катодом и анодом. Разряд в лампе возникает при столкновении ускоренных электронов с молекулами  $H_2$  или  $D_2$ . Образующие при этом электроны и ионы поддерживают разряд. Эти же частицы ответственны за появление интенсивного рекомбинационного свечения разряда в ультрафиолетовой области спектра. Кроме областей непрерывного спектра, при рекомбинации наблюдаются также спектральные линии, соответствующие обычному эмиссионному спектру атомов и молекул водорода и дейтерия.

Возбуждение их происходит главным образом за счет электронных ударов. Кроме этого, для облегчения зажигания лампы, внутрь трубки введено небольшое количество примеси неона. Если давление водорода (дейтерия) в трубке достаточно, то в спектре свечения на фоне молекулярного спектра  $H_2$  появятся яркие линии атомов водорода. Поэтому спектр излучения лампы ДВС-25 в видимой области имеет большое число линий, среди которых отчетливо видны линии, обусловленные излучением атома водорода.

Питание анода лампы ДВС-25 осуществляется от специального источника питания с регулировкой тока анода в диапазоне до 320 мА. В цепь катода (накала) лампы ДВС-25 подаётся ток от регулируемого источника тока в диапазоне 0 — 2,5 А. После зажигания разряда между катодом и анодом, ток накала снижается до нуля. В случае нестабильного разряда, можно увеличить ток накала до 1 Ампера, при этом поддерживая ток анода в диапазоне 250 — 300 мА. Ток анода во время работы лампы не должен превышать 300 мА. Ток анода является током разряда в водородно-дейтериевой смеси, наполняющей лампу.

Пульт управления содержит переключатель «СЕТЬ»; переключатель «ЛАМПА», предназначенный для переключения источников спектра (водородная — ртутная лампы) и необходимые ручки регулировки анодного и накального тока. **Перед началом работы проверить положения всех ручек регулировки. Ручки регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и «ТОК НАКАЛА» для лампы ДВС-25 должны быть повернуты до упора против часовой стрелки. При этом ток накала на катод лампы не подается, анодное напряжение также выключено.**

Необходимое питание подаётся на лампу от ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ, который соединяется с осветителем специальным трех проводным кабелем для водородной лампы ДВС-25 и обычными многожильными проводами типа ПВ-3 сечением не менее  $\varnothing 1 \text{ мм}^2$  для ртутной лампы ДРСк-125.

**Включать водородную лампу ДВС-25 необходимо строго соблюдая следующий порядок:**

1) Подать на накал (катод) лампы ток в диапазоне 2 — 2,5 А, регулируя этот ток ручкой «ТОК НАКАЛА» и контролируя значение тока накала амперметром.

2) После примерно 30 секундного прогрева катода включается анодное напряжение плавным вращением ручки «АНОДНЫЙ ТОК». При этом должен начаться дуговой разряд в лампе.

3) Сразу после возникновения дугового разряда в лампе, снизить ток накала до значения 0,5 — 1 Ампера, регулируя этот ток ручкой «ТОК НАКАЛА» и контролируя значение тока накала амперметром.

4) Отрегулировать анодный (разрядный) ток лампы, вращением ручки регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и контролируя этот ток миллиамперметром. **Анодный ток следует поддерживать в диапазоне 250 — 300 мА. Ток анода во время работы лампы не должен превышать 300 мА.**

5) После окончательного прогрева лампы, для которого обычно требуется не более 3 — 5 минут выключить «ТОК НАКАЛА» плавно убавив его до нуля ручкой «ТОК НАКАЛА».

6) Для отключения установки следует сначала ручкой регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» убавить анодный ток лампы ДВС-25 до нуля и выключить прибор переключателем «СЕТЬ».

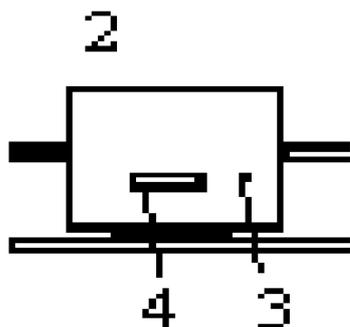


Рис. 2.2. Монохроматор МУМ-01 вид сбоку.

Монохроматор МУМ-01 (рис. 2.2) предназначен для выделения и исследования монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 2000 до 8000 ангстрем. Сканирование спектра осуществляется вращением ручки 3 рядом с индикатором цифрового счетчика длин волн 4. Первые три цифры счетчика 4 соответствуют длине волны в нм, по барабану с рисками отсчитываются десятые доли нм в том же окне (см. рис. 2.3).

Свет от ртутной лампы поступает на вход (объектив) 2.5 монохроматора МУМ-01 (рис.2.4). Монохроматор имеет сферическую дифракционную решетку 2.6, боковой выход 2.3, задний выход 2.1, механизм 2.8 поворота решетки и связанный с ним механизм 2.7 отсчета длины волны излучения с приводом от вала с ручкой 2.9. на входе и на выходах имеется возможность устанавливать сменные щели. Излучение, вошедшее во входную щель 2.5, направляется на дифракционную решетку 2.6 неподвижным зеркалом 2.4. Длина волны излучения, отраженного от решетки в направлении выхода монохроматора зависит от ориентации решетки. Поворот

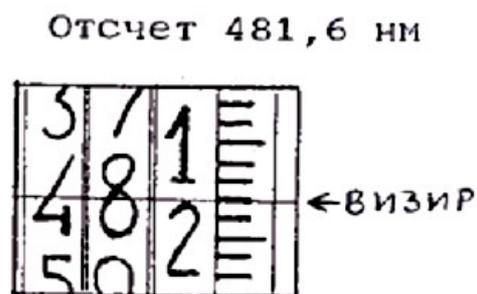


Рис. 2.3. Шкала монохроматора МУМ-01.

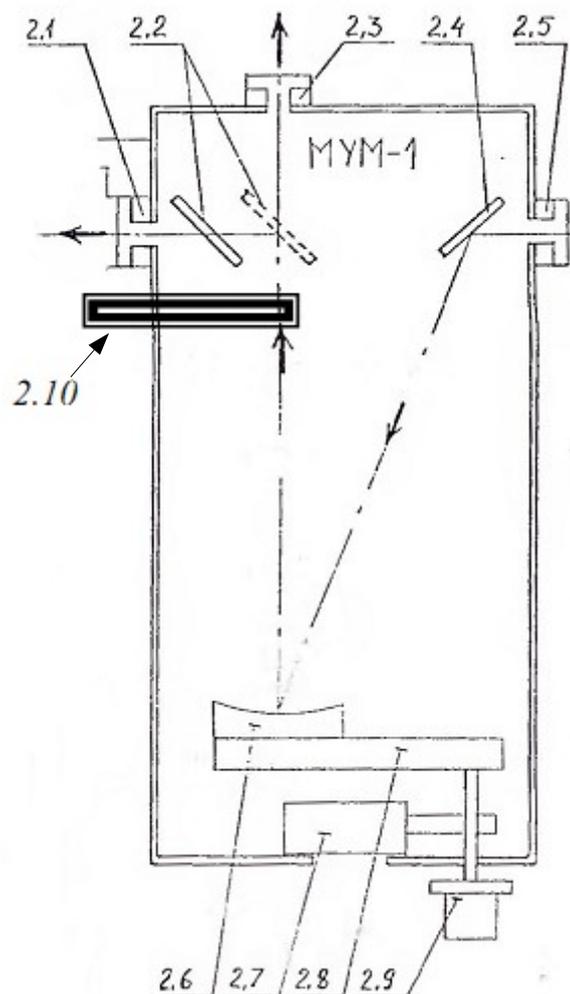


Рис. 2.2. Монохроматор МУМ-01 вид сверху.

решетки осуществляется вращением ручки 2.9. Длина волны отсчитывается по шкале 2.7 отсчетного устройства. Шкала имеет три барабана, показывающее значение длины волны в нанометрах. Правый барабан имеет дополнительную шкалу с ценой деления 0.2 нм, отсчет по которой производится по горизонтальной визирной линии (рис.6). Выбор выхода монохроматора осуществляется с помощью подвижного зеркала 2.2, перемещаемого штоком 2.10.

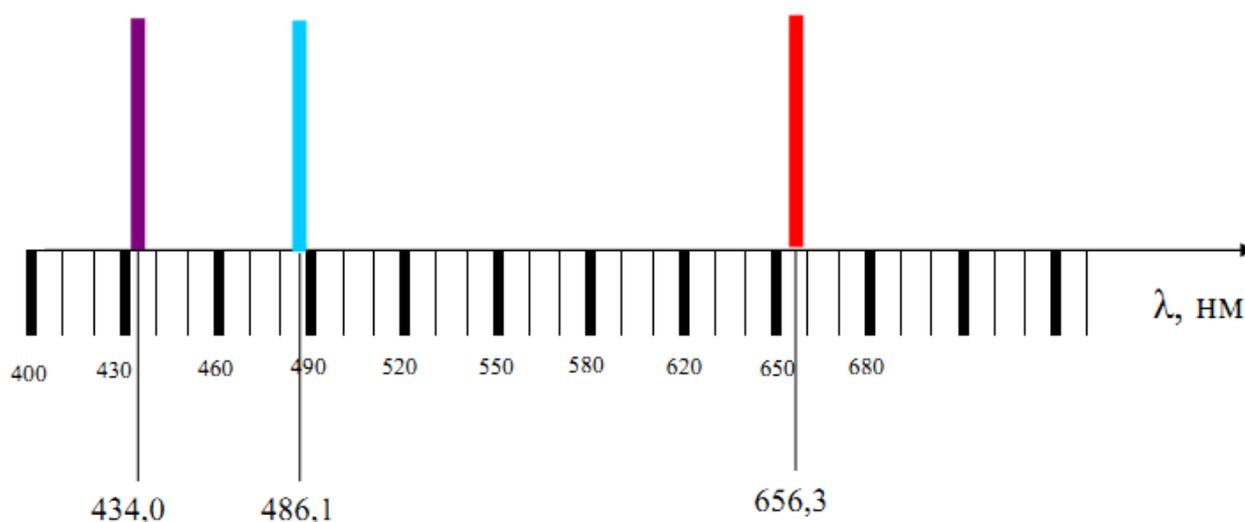
Шкала монохроматора уже откалибрована в показаниях длин волн, однако для получения более точных результатов рекомендуется произвести дополнительную калибровку спектрального прибора с помощью ртутной лампы. Параметры лампы ДРСк-125 стабилизируются через 3-5 минут после включения.

**В процессе разгорания, запрещается выключать лампу от сети. Горевшую лампу возможно зажечь повторно лишь после 10-ти минутного перерыва. Ртутная лампа является мощным источником света в ультрафиолетовой области спектра, поэтому следует избегать попадания прямого светового потока излучения от лампы в глаза и длительного облучения кожи**

Таблица 1

## Спектр атомарного водорода.

Название линии	Цвет	Длина волны $\lambda$ , нм
$H_{\alpha}$	Красная	656,3
$H_{\beta}$	Зелено - голубая	486,1
$H_{\gamma}$	Фиолетово-синяя	434,0
$H_{\delta}$	Фиолетовая	410,2



### Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов. Разобраться с принципиальными блок-схемами опытов, в назначении кнопок, переключателей и ручек прибора. Подключить осветитель к блоку управления, используя соответствующие провода из комплекта, соединив выходы «ЛАМПА ДВС-25» и «ЛАМПА ДРСк-125» с соответствующими входами осветителя.
2. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки, разобраться в назначении кнопок и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода. Проверить положения всех ручек регулировки. Ручки регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и «ТОК НАКАЛА» для лампы ДВС-25 должны быть повернуты до упора против часовой стрелки. При этом ток накала на катод лампы не подается, анодное напряжение также выключено.
3. В начале работы следует включить источник света — ртутную лампу ДРСк-125. Для этого переключатель «ЛАМПА» установить в положении «N» - нейтрально (если доступно) либо в положении «РТУТНАЯ».
4. Поставить переключатель «СЕТЬ» в положение «ВКЛ», переключатель «ЛАМПА» в положение «РТУТНАЯ». При этом должен начаться процесс розжига дугового разряда в ртутной лампе. Дать лампе прогреться 3-5 минут. **Во время разгорания запрещается отключения лампы от сети!**
5. Повернуть осветитель спектральной ртутной лампой к приемному окну монохроматора и расположить его соосно на расстоянии 10-15 см от приемного окна.
6. Поставить щели, обеспечивающие возможность поиска и четкого изображения спектральных линий. Для этого, вследствие интенсивности излучения ртутной лампы, рекомендуется на входе и выходе зрительной трубы монохроматора поставить щели 0,05 мм в положение II (римская цифра II на щелях обращена наружу).
7. Наблюдение спектра ртути рекомендуется начинать с фиолетовой области. Для чего медленно вращая ручку поворота решетки 2.9 монохроматора добиться изображения первой фиолетовой линии ртути в центре окуляра (выходного зрительного окна) монохроматора. **Вращение ручки против часовой стрелки соответствует движению в область уменьшения длины волны, по часовой – увеличение длины волны.** Медленно вращая столик с осветителем или монохроматором, добейтесь наиболее яркого изображения спектральной линии ртути в выходном окне монохроматора.
8. Записать показания измерительной шкалы монохроматора  $\lambda_{\text{шкалы}}$  в таблицу 2.

9. Провести аналогичные измерения для всех остальных видимых в монохроматор линий спектра ртути, записывая измеренные значения длины волны  $\lambda_{шкалы}$  в таблицу 2.

Таблица 2

Окраска линии	Относительная яркость	Длина волны, табличная, $\lambda_{табл}$ , нм	Длина волны, измеренная, $\lambda_{шкалы}$ , нм	Ошибка определения длины волны, $\Delta\lambda$ , нм
Фиолетовая 1	2	404,66		
Фиолетовая 2	1	407,78		
Синяя	8	435,83		
Голубая	1	491,60		
Зеленая	10	546,07		
Желтая 1	8	576,96		
Желтая 2	10	579,07		

$$\langle \Delta\lambda \rangle = \dots$$

10. Найти ошибку определения длины волны для каждой спектральной линии  $\Delta\lambda = \lambda_{табл} - \lambda_{шкалы}$  и среднюю ошибку определения длины волны  $\langle \Delta\lambda \rangle$ .
11. Формулу, определяющую истинное значение длины волны  $\lambda_{истинная}$  в зависимости от показания шкалы монохроматора можно записать следующим образом:

$$\lambda_{истинная} = k \cdot \lambda_{шкалы} + \Delta\lambda \quad (3.1)$$

Следует учитывать, что в формуле (3.1) ошибка  $\Delta\lambda$  может быть как положительная так и отрицательная. С хорошей степенью точности можно принять  $k=1$ . Таким образом, найдя среднюю ошибку определения длины волны  $\langle \Delta\lambda \rangle$ , можно более точно определить значение длины волны спектральной линии. Более точный результат дает нахождение коэффициентов формулы (3.1) с помощью метода наименьших квадратов (см. приложение).

12. Проверить положения ручек регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и «ТОК НАКАЛА». Ручки регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и «ТОК НАКАЛА» для лампы ДВС-25 должны быть повернуты до упора против часовой стрелки. При этом ток накала на катод лампы не подается, анодное напряжение также выключено.
13. Поставить переключатель «ЛАМПА» в положение «водородная» и поверните осветитель спектральной водородной лампой к приемному окну монохроматора, расположив его соосно на расстоянии  $\sim 7-12$  см от приемного окна.

**14. Включить водородную лампу, соблюдая следующий порядок включения лампы ДВС-25:**

- a) Подать на накал (катод) лампы ток в диапазоне 2 — 2,5 А, регулируя этот ток ручкой «ТОК НАКАЛА» и контролируя значение тока накала амперметром.
- b) После примерно 30 секундного прогрева катода включается анодное напряжение плавным вращением ручки «АНОДНЫЙ ТОК». При этом должен начаться дуговой разряд в лампе.
- c) Сразу после возникновения дугового разряда в лампе, снизить ток накала до значения 0,5 — 1 Ампера, регулируя этот ток ручкой «ТОК НАКАЛА» и контролируя значение тока накала амперметром.
- d) Отрегулировать анодный (разрядный) ток лампы, вращением ручки регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» и контролируя этот ток миллиамперметром. **Анодный ток следует поддерживать в диапазоне 250 — 300 мА. Ток анода во время работы лампы не должен превышать 300 мА.**
- e) После окончательного прогрева лампы, для которого обычно требуется не более 3 — 5 минут выключить «ТОК НАКАЛА» плавно убавив его до нуля ручкой «ТОК НАКАЛА».
- f) После прогрева лампы включается цифровая часть цепей питания прибора нажатием клавиши «СЕТЬ. ЦИФРОВАЯ ЧАСТЬ». Это сделано для исключения влияния паразитных переходных процессов во время включения лампы на микропроцессорную систему управления учебной установкой.
- g) Для отключения установки следует сначала ручкой регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» убавить анодный ток лампы ДВС-25 до нуля и выключить прибор переключателем «СЕТЬ»

15. Дать лампе прогреться в течение трех минут.

16. Поставить щели, обеспечивающие возможность поиска и четкого изображения спектральных линий. Для этого рекомендуется на входе и выходе зрительной трубы монохроматора поставить щели 0,05 мм в положение II (римская цифра II на щелях обращена наружу).

17. Как уже упоминалось ранее, в спектре водородной лампы наряду с линиями атомарного водорода наблюдаются полосы эмиссионного спектра молекулярного водорода. Поэтому поиск линий нужно начинать с наиболее интенсивной четкой красной линии  $H_{\alpha}$ . Она располагается практически на самой границе красного спектра (линии спектра лампы далее практически отсутствуют). Для поиска линии следует медленно вращать **ручку 2.9** монохроматора в пределах 640 - 670 нм, дожидаясь появления в смотровом окне монохроматора соответствующей яркой линии, контролируя значение длины волны по индикатору цифрового счетчика длин волн. Записать измеренное

значение  $\lambda_{H_\alpha}$  с учетом поправки  $\langle \Delta\lambda \rangle$  в таблицу 3:

Таблица 3

Номер орбиты, с которой осуществлен переход $n_2 \rightarrow 2$	Обозначение линии	Длина волны измеренная, нм	Длина волны с учетом поправки, нм	Постоянная Ридберга, $R_i \text{ м}^{-1}$
	$H_\alpha$			
	$H_\beta$			
	$H_\gamma$			

$$\langle R \rangle = \dots \text{ м}^{-1}$$

$$\langle \hbar \rangle = \dots \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

18. Вторая линия в спектре атома водорода  $H_\beta$  - это яркая интенсивная зелено-голубая линия. В промежутке между  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  располагаются множество красно-желтых и зеленых сравнительно слабых размытых молекулярных полос. Для поиска этой линии необходимо медленно вращать ручку 2.9 монохроматора в области длин волн 470-500 нм.

19. Уточнив длину волны  $H_\beta$ , записать её значение в таблицу 3.

20. Третья линия атомарного водорода -  $H_\gamma$  - фиолетово-синяя. В спектре излучения лампы ДВС-25 она видна слабо, поэтому измерение рекомендуется проводить при минимальной внешней освещенности (например в затемненной комнате). Перед этой линией также могут располагаться слабые размытые молекулярные полосы синего цвета. Вращая ручку 2.9 монохроматора как можно более тщательно в области длин волн 430-440 нм. Уточнив положение линии  $H_\gamma$ , записать значение длины волны, соответствующей этой линии в таблицу 2. Глаз лучше замечает слабые линии в движении. Поэтому при наблюдении удобно слегка поворачивать барабан 2.9 в обе стороны от среднего положения линии.

21. Сравнить измеренные вами значения длин волн в серии Бальмера с табличными значениями, приведенными в таблице 1.

22. Для серии Бальмера формула (16) переписывается в виде:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (3.2)$$

23. С помощью формулы (3.2) вычислите для каждой линии  $\lambda_{H_\alpha}$ ,  $\lambda_{H_\beta}$ ,  $\lambda_{H_\gamma}$ ,  $\lambda_{H_\delta}$  постоянную Ридберга  $R_i$ . Не забудьте все вычисления производить в СИ. Вычислите и запишите среднее значение  $\langle R \rangle$ .

24. Из формулы  $R = \frac{me^4}{64\pi^3 \varepsilon_0^2 c \hbar^3}$  получите выражение для вычисления постоянной Планка. Используя среднее значение  $\langle R \rangle$ , с помощью этого выражения вычислите постоянную Планка.

При вычислении принять:  $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

25. Сравнить полученное значение постоянной Ридберга  $R_{\text{экспер.}}$  с теоретическим значением  $R_{\text{теор.}} = \frac{me^4}{64\pi^3 \varepsilon_0^2 c \hbar^3} = \frac{k^2 me^4}{4\pi c \hbar^3} = 1,096 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

26. Сравните полученные Вами результаты с табличными значениями. Объясните возможные расхождения в расчетах и сделайте выводы о точности эксперимента.

27. По окончании работы следует сначала ручкой регулировки «АНОДНЫЙ ТОК» убавить анодный ток лампы ДВС-25 до нуля, выключить прибор переключателем «СЕТЬ» и вынуть сетевую вилку из розетки.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Воспользовавшись квазиклассической теорией Бора, получить формулу для энергии электрона  $E_n$  в однократно ионизированном атоме гелия. В чём, по вашему мнению, основной недостаток теории Бора?
2. Пользуясь энергетической диаграммой для атома водорода, представленной на рисунке 1.1, определите энергию ионизации атома водорода. Определить по той же диаграмме первый потенциал возбуждения атома водорода.
3. Что такое линейчатый и сплошной спектр? Какой спектр вы наблюдали в этом опыте?
4. Почему спектр водорода и других газов линейчатый, а спектр лампы накаливания сплошной?
5. Получите обобщенную формулу Бальмера (16) и выражение  $R_{\text{теоретич.}}$  через основные константы.
6. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.
7. Во сколько раз минимальная длина волны в серии Пашена спектра водорода больше максимальной длины волны в серии Бальмера?
8. Вычислить наибольшие длины волн в сериях Лаймана, Бальмера, Пашена в спектре водорода.
9. Объясните причины размытия энергетических уровней электрона в атоме. Какой уровень будет «размыт» в наименьшей степени. Почему?
10. Какой метод возбуждения атомов для получения спектра используется в данной установке? Объясните методику эксперимента: необходимость в монохроматоре, принцип его устройства, принцип работы излучателя.
11. Как вы думаете, как меняется после включения высокого напряжения сопротивление газоразрядного промежутка в лампах ДВС-25? Чему равно сопротивление этого промежутка до включения и после? Почему происходит резкое изменение сопротивления трубки? С какими физическими явлениями, происходящим в газе, заполняющим трубку, это связано?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

**Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)**  
Рассмотрим случай совместных измерений двух величин  $\beta$  и  $\alpha$ . Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения  $\beta$  и  $\alpha$  в результате многократных измерений некоторых других величин  $x_i$  и  $y_i$  получится линейная система условных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$y_i = \beta x_i + \alpha \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  - результаты  $i$ -го измерения величин  $x$  и  $y$ ;  $\beta$  и  $\alpha$  - искомые величины.

Система уравнений (1) будет, вообще говоря, несовместна, так как результаты измерений  $x$  и  $y$  неизбежно содержат погрешности. Поэтому из этих уравнений можно определить только оценки величин  $\beta$  и  $\alpha$  (соответственно  $B$  и  $A$ ), которые являются случай-

ными величинами.

Для наглядности изложения представим все опытные данные  $x_i$  и  $y_i$  на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения  $\alpha$  и  $\beta$  состоит в определении параметров некоторой прямой: значения ординаты при нулевом значении абсциссы и тангенса угла наклона соответственно.

Так как между точками на графике можно провести не одну прямую, возникает задача - провести прямую наилучшим образом. Такая прямая характеризуется наиболее точными оцен-

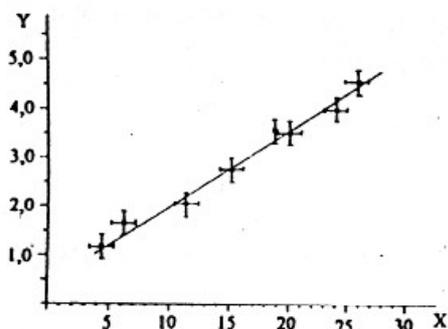


рис. 1

ками коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$ , т.е. наиболее вероятным.

Оценка  $\beta$  (значение  $B$ ) определяется выражением

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Оценка  $\alpha$  (значение  $A$ ) определяется выражением

$$A = \bar{y} - B\bar{x}$$

Можно показать, что оценка стандартного отклонения коэффициента  $B$  выражается следующим образом:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Интервал, в котором с установленной вероятностью  $\alpha_0$  может находиться коэффициент  $\beta$ , записывается в виде  $\Delta B = t_{\alpha_0, (n-2)} S_B$

Тогда можно записать:

$$\beta = B \pm \Delta B$$

Стандартное отклонение коэффициента  $A$  определяется по формуле

$$S_A = \sqrt{\left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{n-2}}$$

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.**

1. Иродов И. Е., Квантовая физика. Основные законы., М. 2002
2. Савельев И. В. Курс общей физики. М., 1982, т. 3
3. Шпольский Э. В., Атомная физика т.1, т.2
4. Курс физики, под редакцией Лозовского В.Н., С-Пб 2001.
5. Рохлин Г. Н., Разрядные источники света, М., Энергоатомиздат,1991.
6. Лабораторный практикум по физике, под ред. К. А. Барсукова, М. 1988.
7. Давыдов А. С., Квантовая механика, Наука, 1973, издание – 2-ое.
8. П. В Елютин, Квантовая механика с задачами. Наука, 1976.
9. И. И. Гольдман. Сборник задач по квантовой механике., 1957.
10. М. И. Фугенфиров. Электрические схемы с газоразрядными лампами
11. В. М. Скобелев. Источники света и пускорегулирующая аппаратура.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**