

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.07

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ РИДБЕРГА И ПЛАНКА СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

#### 1. Цель работы

Целью работы является изучение спектра излучения атомарного водорода, определение постоянных Ридберга и Планка на основе измерения длин волн первых трёх линий в серии Бальмера.

#### 2. Краткая теория

Постоянная планка  $h$  (или квант действия) является одной из основных физических констант. Введена эта величина в 1900 году Максом Планком для объяснения распределения по частотам интенсивности излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ). В современной физике постоянной Планка часто называют величину  $\hbar = h/2\pi$ . Постоянная Планка является величиной, характерной для квантовой механики. Если частица обладает импульсом  $p$ , то её движению можно сопоставить волновой процесс с длиной волны, равной  $\lambda = h/p$ ; если импульс  $p \gg h$ , то  $\lambda \rightarrow 0$  и волновыми свойствами частицы можно пренебречь.

В настоящей работе производится определение постоянной Планка на основании измерений длин волн спектральных линий атома водорода.

Оптическим спектром называется совокупность монохроматических компонент, составляющих данное излучение. Оптические спектры изолированных атомов возникают при переходах внешних электронов в атомах из одного состояния в другое и состоят из отдельных цветных спектральных линий,

разделенных темными промежутками. Такие спектры называются линейчатыми. Линии в спектрах атомов различных элементов расположены в определённом порядке. Они могут быть объединены в группы, или так называемые серии линий. Линии внутри серии расположены закономерно: расстояние между линиями убывает по мере того, как происходит переход от более длинных волн к более коротким. В конце серии можно заметить небольшой участок сплошного спектра. Интенсивность линий постепенно уменьшается при уменьшении длины волны. Наиболее яркой в данной серии является головная линия, обладающая наибольшей длиной волны.

Отчётливее всего строение спектра испускания обнаруживается в спектре атома водорода. У водорода в спектре испускания наблюдается пять серий, названных именами первооткрывателей: Лаймана, Бальмера, Пашена, Бреккета, Пфунда. Типичное расположение линий в одной из серий, серии Бальмера, схематически изображено на рисунке 1.

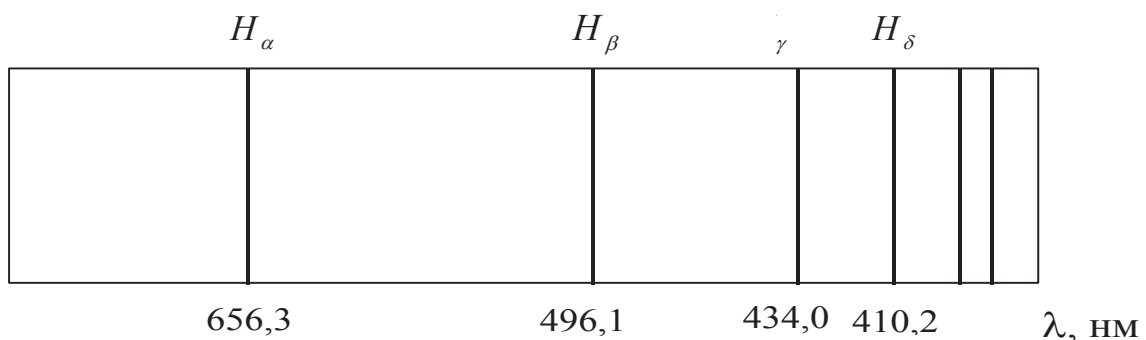


Рис. 1. Серия Бальмера в спектре атома водорода

Длины волн в любой серии выражаются соотношением

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (3.07.1)$$

где  $R$ —постоянная Ридберга, имеющая значение  $R = 1,097 \text{ м}^{-1}$ ,  $n_1, n_2$  — целые числа ( $n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ), причём  $n_2$  принимает значения, начиная с  $n_1 + 1$ .

В оптике спектральные линии характеризуют иногда не длиной волны, а частотой  $\nu$  или круговой частотой  $\omega$ , причем  $\nu = c/\lambda$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ .

Число  $n_1$  постоянно для данной серии, число  $n_2$  характеризует данную линию в серии. Физический смысл  $n_1$  и  $n_2$  выясняется при решении уравнения Шредингера для атома водорода.

Квантомеханическое решение задачи атома водорода в основных чертах совпадает с решением, следующим из полуклассической теории Бора. В основе теории Бора лежит планетарная модель атома, согласно которой электроны в атомах движутся вокруг положительно заряженного ядра по замкнутым орбитам. В соответствии с гипотезой Бора такая система является устойчивой в том случае, если она удовлетворяет двум постулатам:

1) Атом и атомная система могут длительно пребывать только в определённых стационарных состояниях. В этих состояниях атомы обладают энергиями, образующими дискретный ряд:  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Момент импульса электронов, находящихся в стационарном состоянии, кратен постоянной Планка.

$$m_0 \cdot \mathbf{v}_n \cdot r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad (3.07.2)$$

где  $m_e$  — масса электрона;

$n$  — номер стационарного состояния;

$\mathbf{v}_n$  — скорость в таком состоянии;

$r_n$  — радиус стационарной орбиты.

2) При переходе из одного состояния в другое атомы испускают или поглощают излучение строго определённой частоты. Частота излучения, испускаемого или поглощаемого при переходе из состояния  $n_1$  в основное состояние  $n_2$ , определяется из условия:

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}, \quad (3.07.3)$$

называемого условием частот Бора. Из (3.07.3) следует, что энергия системы изменяется только скачком при переходе из одного стационарного состояния в другое. При этом излучается или поглощается квант энергии  $h\nu$ , величина которого равна разности энергий начального или конечного состояний.

Бор впервые ввёл в физику понятие квантования энергии и момента импульса. Пользуясь постулатами Бора, можно получить выражение для энергий стационарных состояний атома водорода.

Полная энергия  $E_{\text{полн}}$  атома водорода и водородоподобных ионов складывается из потенциальной энергии и кинетической энергии движения электрона по круговой орбите и равна:

$$E_{\text{полн}} = -\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2}, \quad (3.07.4)$$

где  $Z$  – атомный номер элемента;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$e$  – заряд электрона.

Итак, энергия стационарных состояний водорода и водородоподобных ионов определяется числом  $n$ , которое называется главным квантовым числом.

Соотношение (3.07.4) при  $Z = 1$  описывает энергетический спектр атома водорода. Этот спектр представляет набор дискретных значений энергий  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Схематически какое-

либо энергетическое состояние изображается горизонтальной чертой, по этому говорят об уровнях энергии. Наименьшее значение энергии  $E_1 = -13,6$  эВ соответствует  $n = 1$ ; это основное состояние атома водорода. Все остальные состояния называются возбуждёнными. Наибольшее значение энергии ( $E = 0$ ) соответствует значению главного квантового числа  $n = \infty$ . Положительные значения энергии означают, что электрон свободен и обладает кинетической энергией. Энергия свободного электрона не квантуется. С возрастанием  $n$  расстояние между энергетическими уровнями уменьшается. Линии сгущаются при приближении числа  $n$  к бесконечности. Энергетический спектр атомов водорода схематически представлен на рисунке 2.

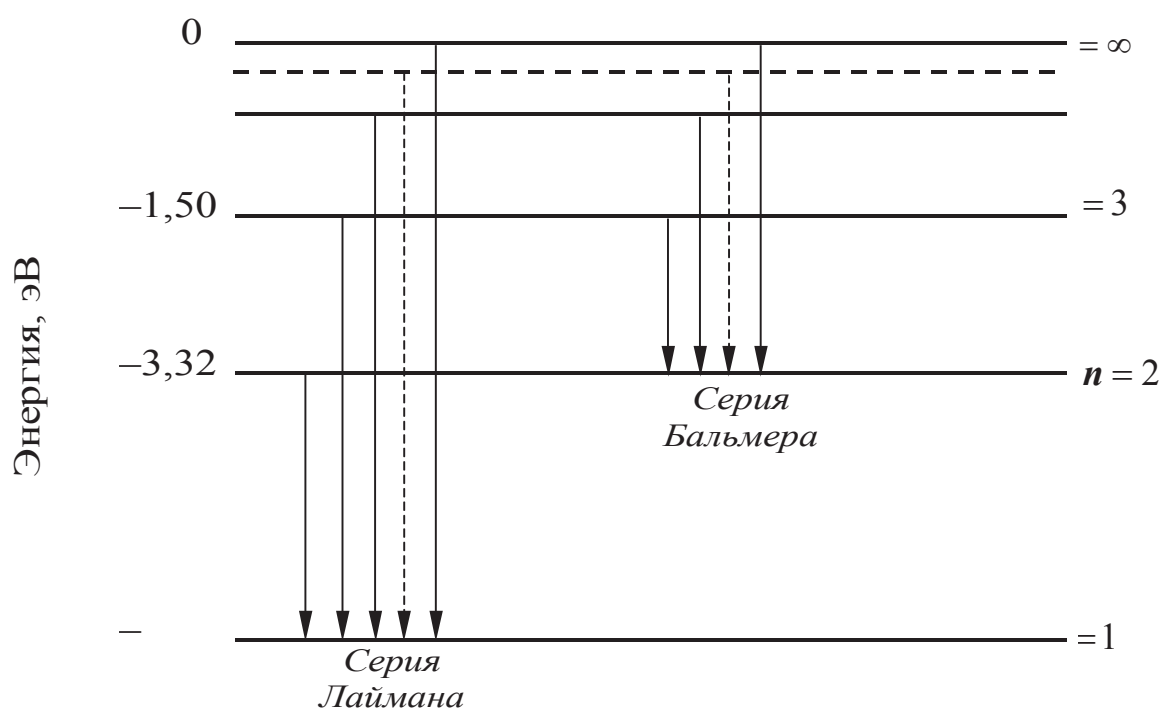


Рис. 2. Энергетический спектр атома водорода

Зная энергетический спектр, легко получить и оптический спектр. Атом излучает при переходе из одного энергетического состояния в другое, лежащее ниже в энергетической схеме. Переходы электронов в атомах на определённый энергетический

уровень со всех других, лежащих выше данного, образуют спектральную серию.

К примеру, переход атома водорода из любого возбуждённого состояния в основное ( $n=1$ ) приводит к появлению линий, принадлежащих серии Лаймана, переход на уровень ( $n=2$ ) приводит к появлению линий серии Бальмера и т. д.

Таким образом, обозначив

$$R = \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c}, \quad (3.07.5)$$

можно записать длины волн для различных серий атома водорода следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= R \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), & n = 2, 3, 4, \dots, \infty & - \text{серия Лаймана;} \\ \frac{1}{\lambda} &= R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), & n = 3, 4, 5, \dots, \infty & - \text{серия Бальмера;} \\ \frac{1}{\lambda} &= R \cdot \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right), & n = 4, 5, 6, \dots, \infty & - \text{серия Пашена;} \quad (3.07.6) \\ \frac{1}{\lambda} &= R \cdot \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right), & n = 5, 6, 7, \dots, \infty & - \text{серия Брэккета;} \\ \frac{1}{\lambda} &= R \cdot \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right), & n = 6, 7, 8, \dots, \infty & - \text{серия Пфунда.} \end{aligned}$$

Головной линией серии называется линия, соответствующая переходу на нижний для данной серии энергетический уровень с ближайшего возбуждённого (например,  $n_2 = 3 \rightarrow n_1 = 2$  для серии Бальмера). Первые четыре линии серии Бальмера лежат в видимой области спектра (рис.1) и соответствует переходам, показанным в таблице 1.

## Спектральные линии серии Бальмера.

Цвет линии	Переход	Обозначение
Красный	$n_2=3 \rightarrow n_1=2$	$H_\alpha$
Зелёно-голубой	$n_2=4 \rightarrow n_1=2$	$H_\beta$
Синий	$n_2=5 \rightarrow n_1=2$	$H_\gamma$
Фиолетовый	$n_2=6 \rightarrow n_1=2$	$H_\delta$

Таким образом, зная длину волны и соответствующий переход, можно определить постоянную Ридберга  $R$ , а значит, и постоянную Планка  $h$ .

$$h = \sqrt[3]{\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot R \cdot c}} \quad (3.07.7)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  
 $c = 1 \cdot 10^8$  м/с.

## 3. Выполнение работы

В данной работе определяются длины волн первых трех или четырех линий серии Бальмера в спектре испускания атома водорода, затем вычисляются значения постоянной Ридберга  $R$  и постоянной Планка  $h$ .

**Необходимые приборы:** монохроматор УМ-2, ртутная

**Описание экспериментальной установки:** Работа выполняется на монохроматоре УМ-2. Монохроматор УМ-2 предназначается для различных спектральных исследований. Оптическая схема монохроматора показана на рис. 3.

Свет через входную щель падает на объектив коллиматора и параллельным пучком падает на диспергирующую призму. Под углом  $90^\circ$  к падающему пучку света помещается выходная труба

монохроматора. Поворачивая призмный столик на различные углы относительно падающего пучка света, направляют на выходную щель свет различной длины волны.

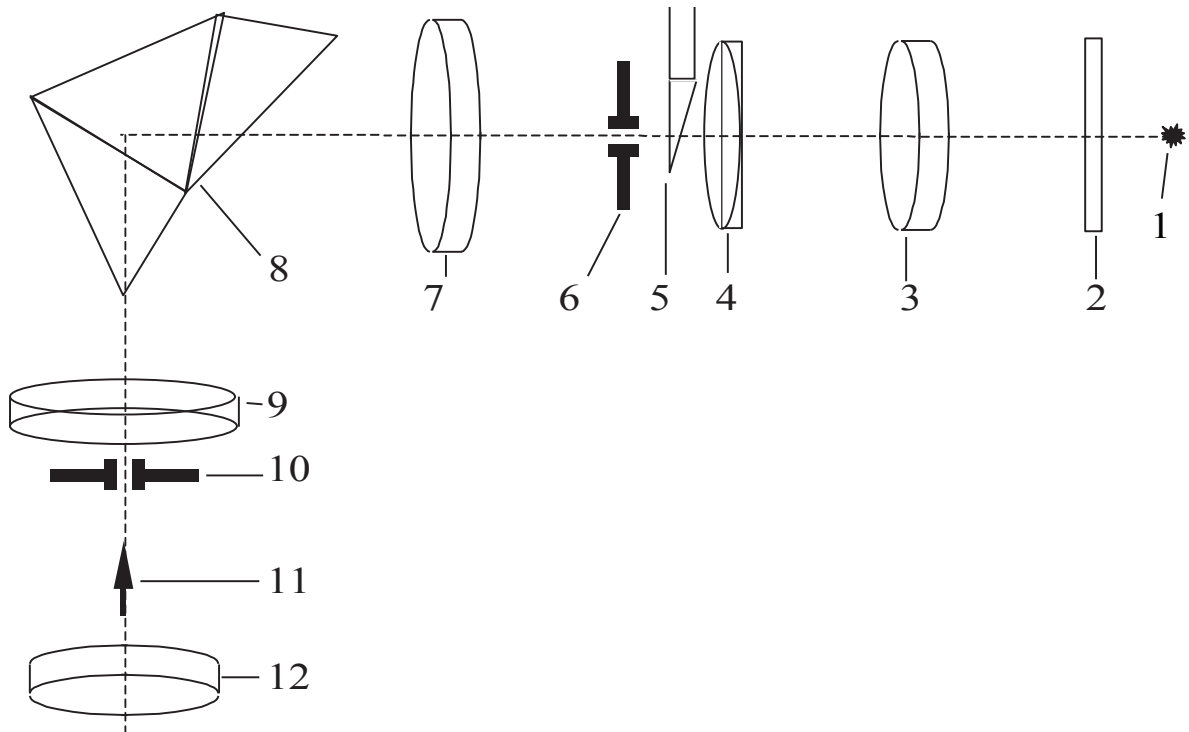


Рис. .3. Оптическая схема установки

На рис. 4 приведен общий вид монохроматора УМ-2, указаны его основные части: коллиматор 1, призмный столик 2, зрительная труба 3.

Призмный столик приводится в движение микрометрическим винтом 4 поворотного механизма. На барабане 5 нанесены относительные деления – градусы, отсчет берут около черты индекса 6, тумблером 7 включается освещение шкалы. Через окуляр 8 зрительной трубы визуально наблюдается спектр, в фокальной плоскости зрительной трубы находится указатель, освещаемый лампочкой через сменные светофильтры в оправе 9. Освещение регулируется реостатом 10 с тумблером 11. Спектральные линии совмещаются с острием указателя поворотом барабана 5.



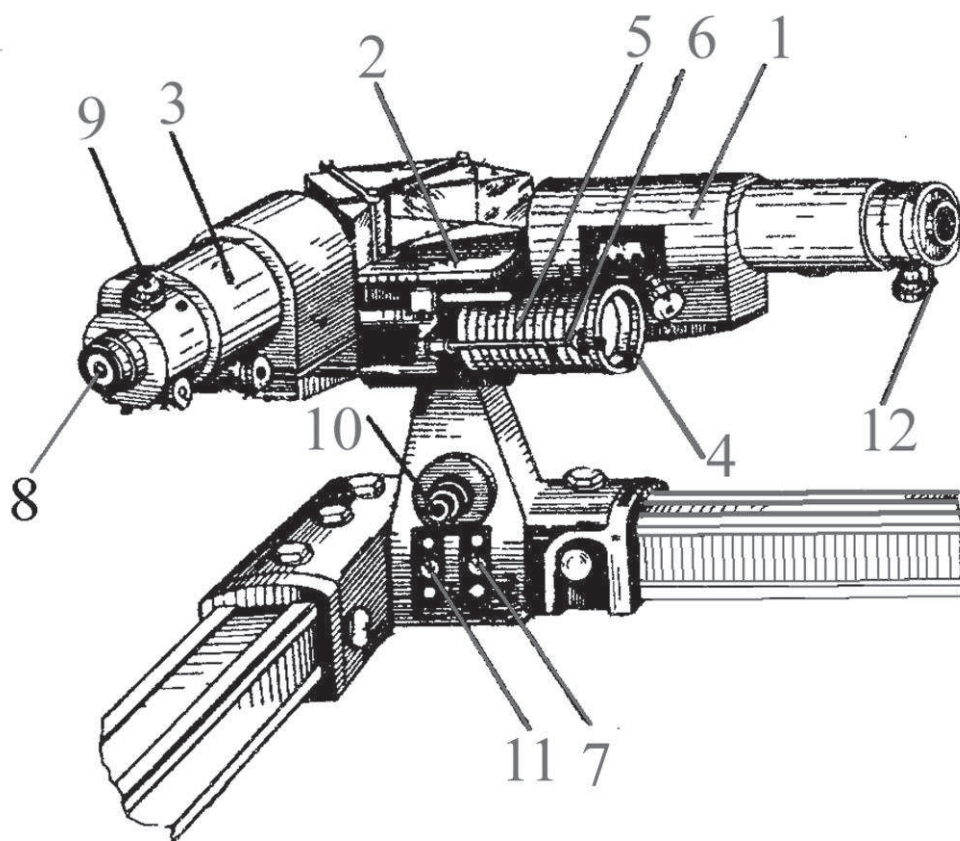


Рис. 4. Общий вид монохроматора УМ-2

Чтобы определить длину волны, соответствующую данной линии в спектре, необходимо иметь градуированную кривую  $\lambda = f(\varphi)$ , общий вид которой представлен на рисунке 5. Конкретный вид градуировочной кривой получают в процессе работы. Для градуировки прибора служит ртутная лампа ДРШ-250, установленная под защитным кожухом. Выходное окно кожуха закрывается стеклом для защиты глаз от ультрафиолетового излучения. Ртутная лампа является мощным источником света. Во время работы в лампе развивается давление до  $3 \cdot 10^6$  Па, поэтому обращаться с ней следует осторожно.

Нормальная работа лампы обеспечивается пультом питания ЭПС-110. Включение лампы производится только под руководством преподавателя или лаборанта.

Для исследования водородного спектра используется водородная трубка или водородная лампа.

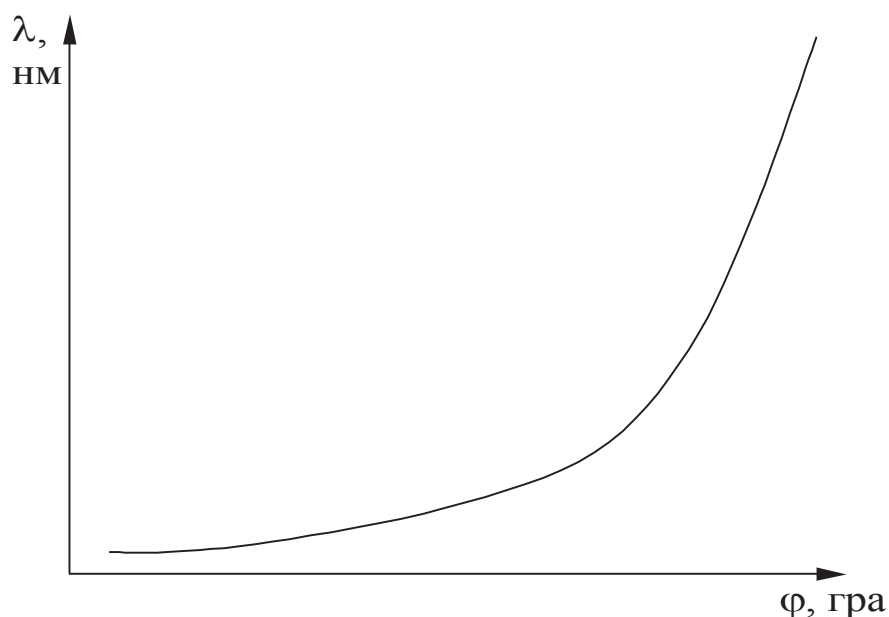


Рис. .5. Градуировочная кривая

**Градуировка монохроматора.** Включите ртутную лампу. С помощью линзы 3 (рис. 3) получите яркое пятно на колпачке, закрывающем щель. Наблюдая в окуляр, убедитесь, что щель достаточно освещена.

Вращая барабанчик раскрытия щели, добейтесь резкого изображения спектральных линий. При этом линии желтого дублета должны быть видны раздельно.

Вращая барабан длин волн 5 (рис. 4), совместите нижнюю спектральную линию с указателем в окуляре 8 (рис. 4). Снимите отсчёт угловой координаты линии по шкале барабана и занесите в таблицу 2.

Измерения проведите для всех указанных линий ртути. Каждое измерение повторите не менее трёх раз.

По средним значениям  $\varphi$  постройте градуировочный график.

Таблица 2.

## Спектральные линии ртути.

Цвет линии в спектре ртути	Отсчёт по шкале, град				Длина волны $\lambda$ , нм.
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi$	
Красная яркая					623,0
Жёлтая правая					577,0
Зелёная яркая					546,1
Зелёно-голубая яркая					491,6
Синяя яркая					435,9
Фиолетовая правая					404,6

**Определение длин волн водородного спектра и вычисление постоянных Ридберга и Планка.** Включите водородную лампу под руководством лаборанта. С помощью линзы получите равномерное освещение входной щели, наблюдая спектр водорода в окуляр. Вращая барабан длин волн, определите с помощью указателя положение трёх линий серии Бальмера ( $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ).

Определите длины волн водородного спектра по градуировочному графику.

Результаты измерений представьте в виде таблицы 3.

Соответствующий переход ( $n_2 \rightarrow n_1$ ) найдите в таблице 1.

Используя формулу (3.07.6) вычислите постоянную Ридберга для трёх линий серии Бальмера:

$$R_{3-2} = \frac{1}{\lambda_{3-2} \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)}; \quad R_{4-2} = \frac{1}{\lambda_{4-2} \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)}$$

$$R_{5-2} = \frac{1}{\lambda_{5-2} \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (3.07.8)$$

Таблица 3.

Определение длины волны водородного спектра и постоянной Ридберга

Цвет линии в спектре	Отсчет по шкале, град	Длина волны, нм	Соответствующий переход $n_2 \rightarrow n_1$	$R$ , м <sup>-1</sup>	$\langle R \rangle$ , м <sup>-1</sup>	$\Delta R$ , м <sup>-1</sup>	$\langle \Delta R \rangle$ , м <sup>-1</sup>

Усредните полученные результаты. Оцените погрешность измерений. Результат запишите в виде:

$$R = \langle R \rangle \pm \langle \Delta R \rangle. \quad (3.07.9)$$

Используя  $\langle R \rangle$ , по формуле (3.07.7) вычислите значение постоянной Планка. Найдите относительную ( $E_h$ ) и абсолютную ( $\langle \Delta h \rangle$ ) погрешности постоянной Планка:

$$E_h = \frac{1}{3} \cdot \frac{\langle \Delta R \rangle}{\langle R \rangle}, \quad (3.07.10)$$

(При вычислении погрешностей считаем, что погрешности при определении констант пренебрежимо малы).

$$\langle \Delta h \rangle = E_h \cdot \langle h \rangle. \quad (3.07.11)$$

Результат запишите в виде:

$$h = \langle h \rangle \pm \langle \Delta h \rangle \quad (3.07.12)$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ.

1. Опишите характерные особенности спектра испускания атома водорода.
2. Сформулируйте постулаты Бора. Получите выражение для энергии электрона в атоме водорода.
3. Каков энергетический спектр атомного водорода? Объясните основные закономерности спектра испускания.
4. Каким переходам соответствуют видимые линии серии Бальмера?
5. Получите расчётную формулу для определения постоянной Планка по спектру испускания атома водорода.
6. Опишите принцип действия и устройство монохроматора УМ – 2.
7. В чём заключается градуировка монохроматора?
8. Опишите порядок проведения работы.
9. Задача. Вычислить для атомарного водорода длины волн первых трёх линий серии Бальмера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 3. – М.: Наука, 1979. – 304 с.
2. Зисман Г. А., Тодес Щ. М. Курс общей физики. Т. 3. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
3. Лабораторные занятия по физике. Учебное пособие / Гольдина Л. Л., Игошин Ф. Ф., Козел С. М. Под. ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука, 1983. – 508 с.