

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Вишнякова С.М., Вишняков В.И.

**СЕРИЯ БАЛЬМЕРА В СПЕКТРЕ ВОДОРОДА.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА.**

Методические указания к лабораторной работе

К-72

по курсу общей физики

Москва 2014

Цель работы.

Изучение элементов теории излучения атомов, спектров излучения атома водорода. Определение длин волн серии Бальмера в видимой области с помощью дифракционной решетки. Расчет постоянной Ридберга, энергии ионизации электрона в атоме водорода и ряд других характеристик строения и излучения атома водорода.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Спектр в физике – это совокупность различных значений, которые может принимать данная физическая величина. Например, спектр звука выражает его частотный состав, т.е. совокупность гармонических волн определенных частот, на которые можно разложить данную звуковую волну.

Оптическое излучение – это электромагнитное излучение, включающее в себя ультрафиолетовое излучение с длинами волн от 0,001 мкм до 0,4 мкм, видимое излучение (свет) с длинами волн от 0,40 мкм до 0,76 мкм, инфракрасное излучение с длинами волн от 0,76 мкм до 1000 мкм (границы диапазонов длин волн даны приближенно). Оптическое излучение обнаруживает одновременно и волновые, и корпускулярные свойства.

Оптические спектры представляют собой совокупность длин волн электромагнитного оптического излучения определенного источника и распределение энергии излучения по этим длинам волн. Оптические спектры разделяют на спектры испускания и спектры поглощения, а также спектры рассеяния и отражения.

Получаются оптические спектры путем разложения света по длинам волн с помощью *спектральных приборов*. Наиболее распространенными приборами являются те, в которых происходит пространственное разделение излучения с разными длинами волн, или, как говорят, разделение длин волн. К ним относятся, например, дифракционная решетка, интерферометр, призма.

Спектры химических элементов строго индивидуальны, поэтому спектральный анализ позволяет сделать выводы о свойствах источника излучения, в частности, определить атомный и молекулярный состав вещества источника, методами спектроскопии можно определить структуру вещества, выявить механизмы взаимодействия света с веществом и т.д.

Спектральными методами в излучении Солнца в 19 веке (Г.Р. Кирхгоф) был обнаружен ряд известных элементов, что послужило началом астрофизике, потом были открыты новые элементы, в частности, дейтерий, рубидий, цезий. Современная спектроскопия, например, кристаллов дает информацию не только о системе энергетических уровней, о квантовых переходах, но и механизмах взаимодействия света с веществом, что позволяет использовать эти данные для применения кристаллов в квантовой электронике.

Закономерности же спектров, т.е. закономерности излучений, обусловлены строением атомов и молекул, условиями возбуждения этих излучений, их объясняет квантовая теория строения атома и излучения.

1. Теория атома водорода по Бору. Постулаты Бора.

Основные закономерности спектра излучения простейшего атома – атома водорода – можно объяснить на основе модели атома водорода, предложенной Нильсом Бором (1913). В основу своей теории Бор положил три постулата [1].

Первый постулат - постулат *стационарных орбит*: электрон в атоме водорода движется, не излучая, только по определенным орбитам, которым можно приписать номера $n=1, 2, 3, \dots$. Такому движению по каждой орбите соответствует свое *стационарное состояние* атома, которое характеризуется неизменной полной энергией E_n .

Второй постулат - *условие квантования*: из всех возможных орбит *разрешенными* стационарными *орбитами* являются только те, для которых момент импульса электрона в атоме водорода равен целому кратному значению постоянной Планка \hbar :

$$m_e v r = n \hbar, \quad n=1, 2, 3, \dots, \quad (\text{условие квантования при движении по круговой орбите}).$$

Третий постулат - *постулат частот*: испускание или поглощение кванта света (фотона) происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. При этом частота ν фотона определяется разностью энергий атома в двух стационарных состояниях:

$$h\nu = E_k - E_n.$$

2. Энергия стационарных состояний атома водорода по Бору.

Рассмотрим движение электрона по круговой орбите в поле неподвижного ядра атома водорода, т.е. движение электрона вокруг протона под действием кулоновской силы притяжения между ними. Уравнение движения – второй закон Ньютона - имеет вид

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (1)$$

Полная внутренняя энергия электрона складывается из кинетической энергии и энергии взаимодействия электрона с ядром

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}, \quad (\text{с учетом (1)}) \quad (2)$$

Полная энергия электрона – отрицательная, это означает, что электрон находится в *связанном состоянии* в поле ядра.

Далее, учитывая условие квантования электронных орбит

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

для разрешенных значений внутренней энергии электрона в атоме водорода получим следующее выражение

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right) = -13,6 \left(\frac{1}{n^2}\right) \text{ эВ}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

n – целое положительное число, называемое *главным квантовым числом*,

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл- заряд электрона, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (\hbar -аш штрих), $1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Дж. Состояние с минимальным значением энергии $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ при $n=1$ называется *основным состоянием*, все другие состояния с $n>1$ называются *возбужденными состояниями*.

Схема энергетических уровней атома водорода (по Бору) в соответствии с формулой (4) приведена на рис.1

Из (1) и (3) можно найти *радиусы орбит для стационарных состояний*, которые оказываются также квантованными:

$$r_n = r_0 n^2 = r_0; 4r_0; 9r_0; \dots, \quad \text{где } r_0 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} = r_1 \text{ и называется боровским радиусом.}$$

При переходе атома водорода из исходного состояния с главным квантовым числом k в состояние с меньшей энергией и с главным квантовым числом n излучается фотон с энергией

$$\hbar\omega = \Delta E = E_k - E_n = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right).$$

В спектроскопии принято определять длину волны λ излучения, для которой можно получить следующее соотношение

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c} = \frac{m_e e^4}{64\pi^3 \hbar^3 \varepsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right), \quad (5)$$

где R – *постоянная Ридберга*, в спектроскопии $\frac{1}{\lambda}$ называется *волновым числом*.

Спектральная серия – группа спектральных линий в спектрах атомов, подчиняющихся определенным закономерностям.

Группа спектральных линий, получающиеся в результате переходов атома из любого возбужденного состояния в основное состояние ($k \rightarrow n=1$), называется спектральной серией Лаймана в спектре водорода (рис.1), которая называется также ультрафиолетовой серией, т.к. все линии этой серии лежат в ультрафиолетовой области. Если переход происходит из любого возбужденного состояния в первое возбужденное ($k \rightarrow n=2$), то имеем серию Бальмера, пять линий которой лежат в видимой области. *Линии каждой данной серии возникают при всех разрешенных квантовых переходах с различных начальных верхних энергетических уровней атома на один и тот же конечный нижний уровень.* Другие серии спектра водорода отмечены на рисунке 1.

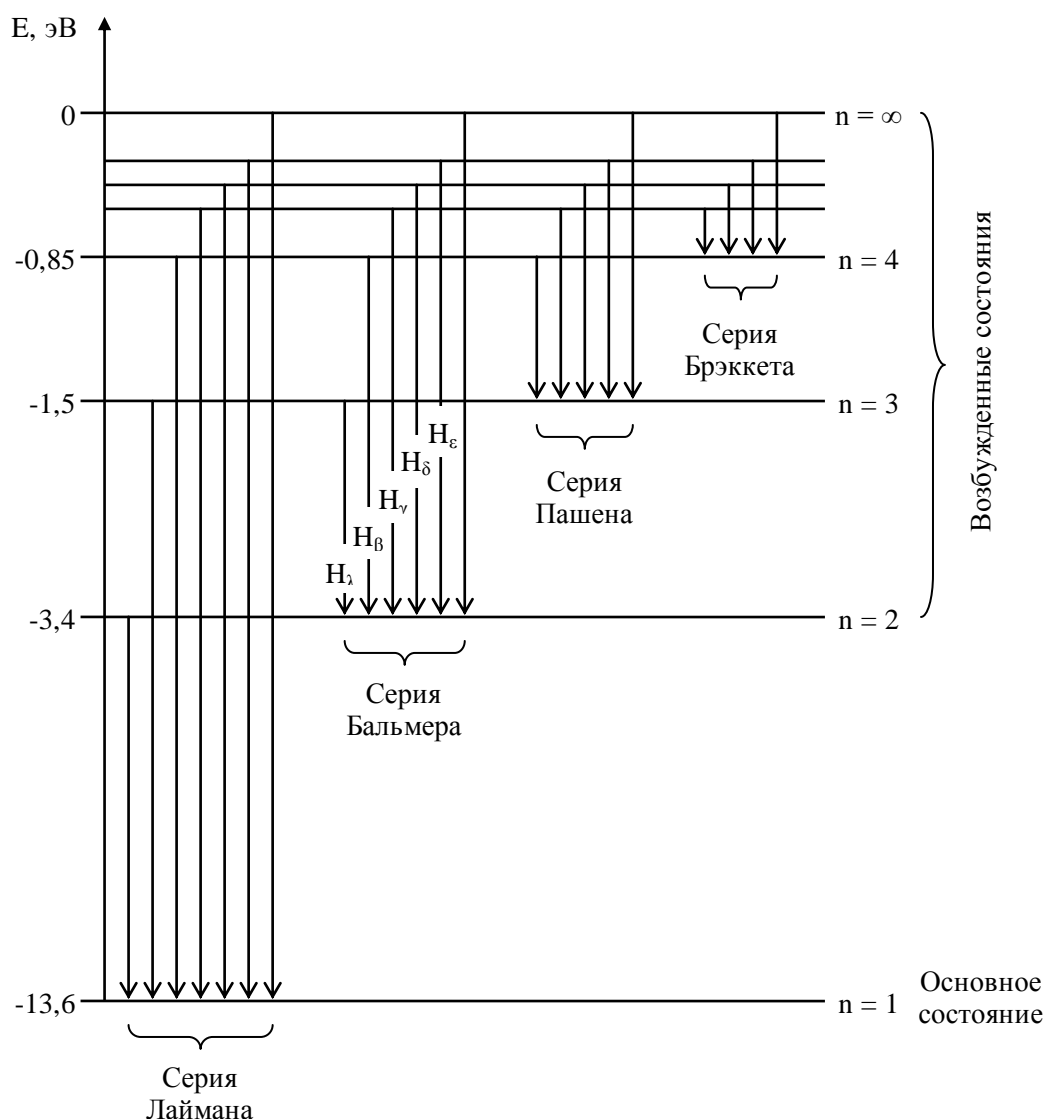


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней атома водорода

2. Процессы возбуждения и излучения атомов в газоразрядной трубке.

В качестве источников оптического излучения в работе используются газоразрядные лампы сверхвысокого давления - ртутная и водородная, которые имеют большую яркость в ультрафиолетовой и видимой областях.

Быстрые электроны, необходимые для возникновения разряда, вырываются с поверхности электродов лампы электрическим полем очень большой напряженности (вблизи поверхности - до 10^8 В/м) (явление холодной эмиссии). Быстрые электроны сталкиваются с атомами и молекулами газа. При этом возможны ионизация и возбуждение атомов и молекул. Ионизация приводит к появлению дополнительных носителей тока – электронов и ионов, вследствие чего в газе возникает электрический разряд. Возбуждение атомов (и молекул) происходит только при тех соударениях, когда энергия быстрого электрона (или другого атома, иона) равна разности энергии основного состояния ($n=1$) атома и энергии какого-либо другого состояния. В этом случае атом поглощает энергию (неупругое соударение) и переходит в возбужденное состояние. Возбужденное состояние неустойчиво, атом пребывает в нем в течение $\sim 10^{-8}$ с, после чего переходит в основное состояние с минимумом энергии, излучив избыток энергии в виде одного или нескольких квантов света - фотонов. Суммарная энергия испущенных фотонов равна энергии возбуждения.

Изначально в одной из спектральных трубок находится двухатомный газ водород. В результате ударной ионизации молекулярный водород частично превращается в водород атомарный, поэтому в дифракционной картине можно одновременно наблюдать как линейчатые атомарные спектры, так и полосатые молекулярные спектры.

Ртутная лампа заполнена парами ртути. Спектр ртути с заданными длинами волн в видимой области используется для определения постоянной дифракционной решетки.

3. Дифракционная решетка.

В качестве спектрального прибора, позволяющего пространственно разделить излучения с разными длинами волн, в лабораторном опыте используется одномерная дифракционная решетка.

При нормальном падении света на дифракционную решетку условие главных максимумов имеет вид

$$d \sin \varphi_m = m\lambda, \quad (6)$$

где d – постоянная (период) дифракционной решетки, φ_m – угол дифракции, m – порядок дифракционного максимума, λ – длина световой волны.

Из рисунка 2 следует, что $\sin \varphi_m = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}}$, тогда условие главных максимумов будет иметь вид

$$d \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}} = m\lambda \quad (7)$$

где l – расстояние от центрального максимума ($m=0$) до линии с длиной волны λ в спектре порядка m , L – расстояние между измерительной линейкой и решеткой.

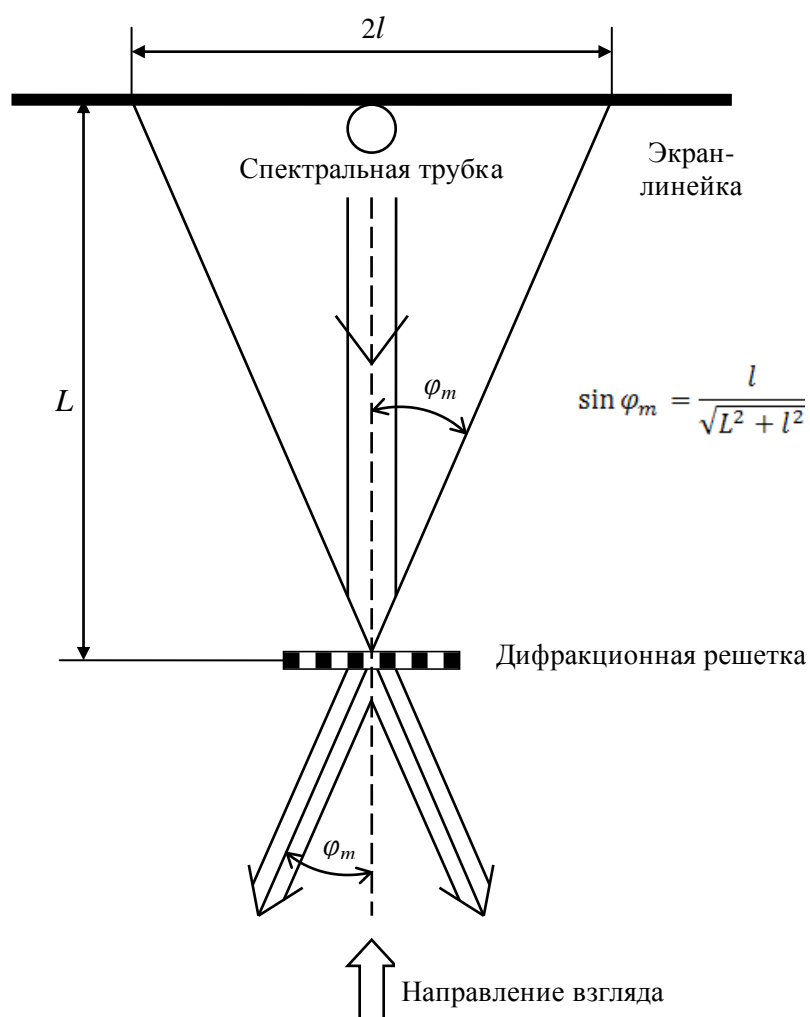


Рис.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

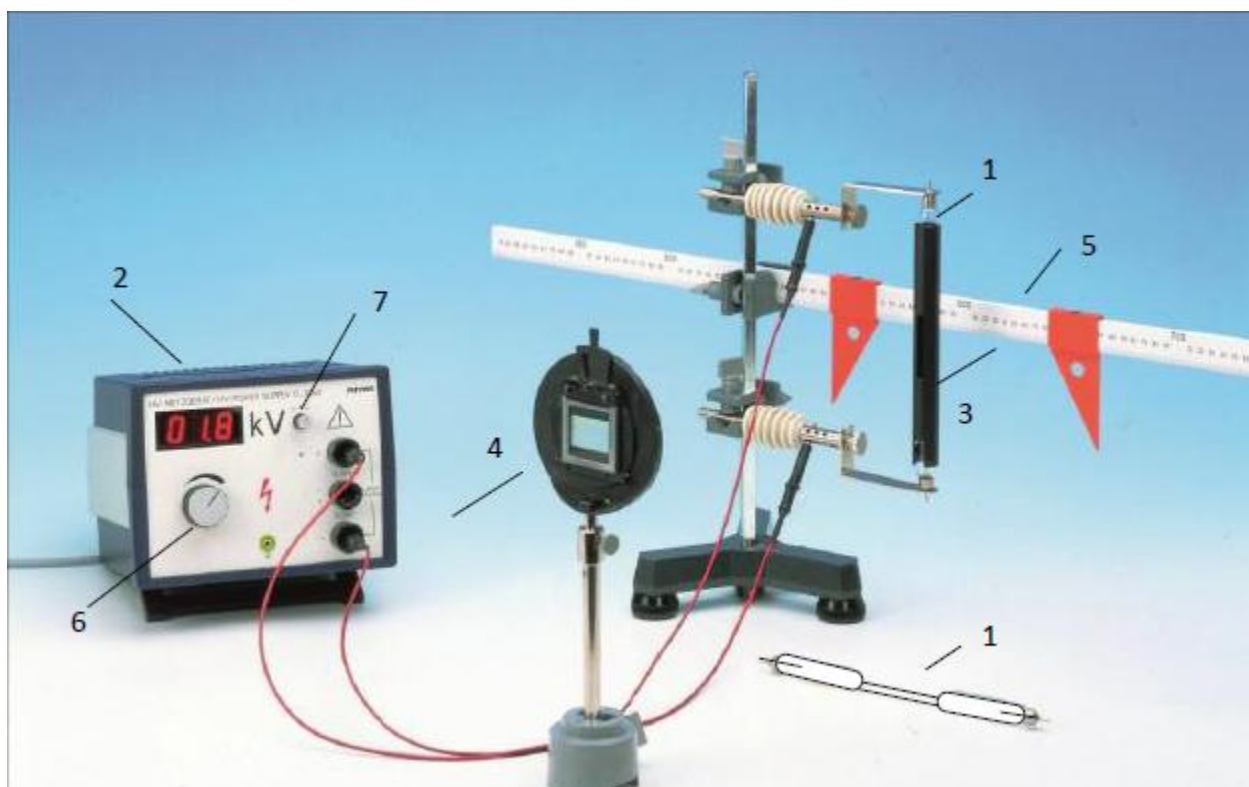


Рис.3

В экспериментальную установку, как показано на рис.3, входят: источники излучения - водородная и ртутная спектральные (газоразрядные) лампы 1, соединенные с источником высокого напряжения 2, цилиндрический защитный экран для ламп 3, спектральный прибор – дифракционная решетка 4, измерительная линейка 5 с двумя оранжевыми курсорами. Измерительная линейка 5 устанавливается непосредственно за спектральной трубкой, чтобы минимизировать ошибку от параллакса. Дифракционная решетка должна быть установлена на расстоянии $d \approx 50$ см от линейки и на той же высоте, что и узкая щель (отверстие) в защитном экране спектральной лампы, а плоскость решетки должна быть параллельна линейке.

При наблюдении через дифракционную решетку света, исходящего из щели (см. рис.2), можно увидеть дифракционную картину: яркий центральный максимум (дифракционное изображение светящейся щели), а справа и слева от него - спектры первого, второго и т.д. порядков, состоящие каждый из нескольких цветных линий.

Порядок выполнения эксперимента.

Задание 1. Подготовка к выполнению работы.

Одна из спектральных трубок с защитным экраном должна быть укреплена на стойке до начала выполнения работы.

Укрепление трубки на стойке и подсоединение ее к источнику высокого напряжения (5кВ) выполняет инженер лаборатории.

1. Расположить дифракционную решетку и линейку относительно щели спектральной лампы так, как описано выше и показано на рисунках 2 и 3.
2. Установить *регулятор 6* выходного напряжения на источнике питания ламп в крайнее левое положение (на минимум напряжения). С помощью сетевого шнура подключить источник питания *2* к сети (220В), затем кнопкой на задней стенке источника включить его.
3. *Переключателем 7* выходного напряжения источника установить одно из трех предельных значений, равное 5 кВ (соответствует левому или правому положению переключателя). Об установленном пределе говорят сигнальные лампочки.
4. Постепенно увеличивать регулятором *6* выходное напряжение до тех пор, пока в щели лампы не появится свечение, после чего добавить еще 0,1 - 0,2кВ.
5. Глядя на излучение через дифракционную решетку, убедиться в том, что слева и справа от центрального максимума видны, по крайней мере, по одному спектру – спектру первого порядка. Приступить к измерениям.

Задание 2. Определение постоянной дифракционной решетки d .

Для определения постоянной решетки используется спектральная лампа, наполненная *парами ртути*. В спектре ртути отчетливо видны три линии: голубая, зеленая и желтая, *длины волн которых заданы*.

- 1) Постоянная дифракционной решетки d определяется из условия главных максимумов (7):

$$d \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}} = m\lambda$$

где λ - длина волны света,

m - порядок спектра,

d - постоянная дифракционной решетки,

l - расстояние от центрального максимума ($m = 0$) до линии с длиной волны λ в спектре порядка m ,

L - расстояние между измерительной линейкой и решеткой.

2) Измерить расстояние L и результат занести в таблицу 1.

3) Для измерения расстояния $2l$ между спектральными линиями одного и того же цвета в левом и правом первом порядках необходимо располагать глаз относительно решетки так, чтобы обе линии были видны одновременно не поворачивая головы.

Установить курсоры на линейке так, чтобы они совпадали, например, с желтыми линиями слева и справа, записать соответствующие координаты положения курсоров. Найти l по формуле $l = (x_2 - x_1)/2$, результат занести в таблицу 1.

Будьте внимательны и осторожны при установлении курсоров на линейке: не касайтесь руками электродов, подводящих высокое напряжение к газоразрядной лампе.

4) Измерения провести для каждой длины волны (для линий каждого цвета).

5) Выключение установки: регулятором напряжения уменьшить напряжение до нуля, выключить источник высокого напряжения кнопкой на его задней стороне.

Спектральные лампы включаются только при полной готовности к измерениям.

Спектральные лампы выключаются сразу после выполнения измерений, т.к. срок службы ламп ограничен, а также возможно гашение ламп в процессе разряда.

6) Используя формулу (7), для каждой длины волны рассчитать постоянную решетки, найти ее среднее значение.

7) Рассчитать полуширину доверительного интервала Δd для доверительной вероятности $P=0,68$ по формуле распределения Стьюдента:

$$\Delta d = t_{P,n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \langle d \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{P,n-1}$ - коэффициент распределения Стьюдента для n измерений и доверительной вероятности $P=0,68$.

8) Ответ записать в виде:

«По результатам измерений постоянная дифракционной решетки равна

$d = \langle d \rangle \pm \Delta d = \dots\dots\dots$ с доверительной вероятностью $P=0,68$ и относительной погрешностью $\varepsilon = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} = \dots\dots\dots$ »

Таблица 1.

$L = \dots\dots\dots \text{см}$

Цвет линии	λ , нм	X_1 , см	X_2 , см	l , см	d , мкм
желтая	578.0				
зеленая	546.1				
голубая	434.8				

Задание 3. Исследование спектра атома водорода: определение длин волн видимых линий серии Бальмера. Определение постоянной Ридберга.

1) Вместо ртутной лампы должна быть установлена водородная лампа.

Смену ламп выполняет инженер лаборатории или студенты переходят на другую установку с соответствующей лампой.

2) Провести подготовку к выполнению работы в точном соответствии с пунктами Задания 1.

3) Длина волны видимых линий в спектре водорода определяется из условия главных максимумов в дифракционной картине (7):

$$d \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}} = m\lambda$$

где

λ - длина волны света,

m - порядок спектра,

d - постоянная дифракционной решетки, определенная в задании 2.

l - расстояние от центрального максимума ($m = 0$) до линии с длиной волны λ в спектре порядка m ,

L - расстояние между измерительной линейкой и решеткой.

4) Измерить расстояние L , результат занести в таблицу 2.

5) Для измерения расстояния $2l$ между спектральными линиями одного и того же цвета в левом и правом первом порядках необходимо располагать глаз относительно решетки так, чтобы обе линии были видны одновременно не поворачивая головы.

Установить курсоры на линейке так, чтобы они совпадали, например, с желтыми линиями слева и справа, записать соответствующие координаты положения курсоров. Найти l по формуле $l = (x_2 - x_1)/2$, результат занести в таблицу 2.

6) Измерения провести для каждой длины волны (для линий каждого цвета).

7) Выключение установки: регулятором напряжения уменьшить напряжение до нуля, выключить источник высокого напряжения кнопкой на его задней стороне.

Спектральные лампы *включаются* только при полной готовности к измерениям.

Спектральные лампы *выключаются* сразу после выполнения измерений, т.к. срок службы ламп ограничен, а также возможно гашение ламп в процессе разряда.

8) Рассчитать длину волны каждой линии, используя формулу (7), результат занести в таблицу 2.

9) По диаграмме энергетических уровней атома водорода (рис.1) определить главные квантовые числа n и m , т.е. номера стационарных энергетических уровней, между которыми произошел переход.

10) Используя формулу (5), рассчитать постоянную Ридберга R для каждой длины волны, затем найти среднее значение этой постоянной $\langle R \rangle$.

11) Рассчитать энергию фотонов (в электронвольтах), излучаемых при каждом из рассмотренных переходов.

12) Рассчитать полуширину доверительного интервала ΔR для доверительной вероятности $P=0,68$ по формуле распределения Стьюдента:

$$\Delta R = t_{P,n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \langle R \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{P,n-1}$ - коэффициент распределения Стьюдента для n измерений и доверительной вероятности $P=0,68$.

13) Ответ записать в виде:

«По результатам измерений постоянная Ридберга равна

$R = \langle R \rangle \pm \Delta R = \dots\dots\dots$ с доверительной вероятностью $P=0,68$ и относительной погрешностью $\varepsilon = \frac{\Delta R}{\langle R \rangle} = \dots\dots\dots$ »

Таблица 2.

$L = \dots\dots\dots \text{см}, \quad d = \dots\dots\dots \text{мкм}$							
Линия	$X_1, \text{см}$	$X_2, \text{см}$	$l, \text{см}$	$\lambda, \text{нм}$	n, m	$R, \text{м}^{-1}$	$E_{\text{фотона}}, \text{эВ}$
H_{α} (красная)					$n =$		

					$m=$		
H_{β} (бирюзовая)					$n=$ $m=$		
H_{γ} (синяя)					$n=$ $m=$		
H_{δ} (фиолетовая)					$n=$ $m=$		

Задание 4. Расчет характеристик строения и излучения атома водорода.

- 1) Расчет энергий возбуждения видимых линий в спектре водорода,

Энергия возбуждения – это энергия, которую необходимо сообщить атому водорода, чтобы перевести его из основного состояния с $n=1$ в состояние с номером m , при обратном переходе из которого произойдет излучение данной линии:

$$E_{\text{возб}} = \Delta E_{mn} = E_m - E_1 = Rch \left(1 - \frac{1}{m^2} \right) \quad (8)$$

Возбуждение атома водорода происходит при соударениях между атомами газа при его нагревании, при соударениях атома с быстрыми электронами при электрическом разряде в газе, при поглощении атомами квантов света (фотонов) и т.д.

- начертить схему энергетических уровней атома водорода;
- стрелками обозначить на схеме переходы, соответствующие *излучению* линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} , H_{δ} в серии Бальмера;
- стрелками обозначить на схеме переходы, соответствующие *возбуждению* линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} , H_{δ} в серии Бальмера;
- рассчитать энергию возбуждения этих линий H_{α} , H_{β} , H_{γ} , H_{δ} в электронвольтах по формуле (8);

- 2) *Энергия ионизации* – это минимальная энергия, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся в основном состоянии, чтобы электрон покинул атом.

Рассчитать энергию ионизации атома водорода.

- 3) *Энергия связи для данного состояния* – это энергия, необходимая для удаления электрона, находящегося в данном (основном или возбужденном) состоянии, из атома.

- а) рассчитать энергию связи электрона в атоме водорода, находящегося в основном состоянии;
- б) рассчитать энергию связи электрона в атоме водорода, находящегося во втором возбужденном состоянии;
- 4) Рассчитать боровский радиус, равный радиусу первой боровской орбиты.
- 5) Отчет *по Заданию 4* представить в виде схемы энергетических уровней атома водорода, указав на ней с помощью стрелок необходимые по заданию переходы, а также все числовые значения величин, рассчитанных в этом задании (кроме п.4)).

Контрольные вопросы и задания.

1. Сформулируйте постулаты теории атома водорода Бора.
2. Получите расчетную формулу для постоянной дифракционной решетки.
3. Получите расчетную формулу для длин волн видимых линий излучения водорода.
4. Получите расчетную формулу для постоянной Ридберга.
5. Сколько линий можно увидеть в спектре водорода, если электрон перейдет с основного уровня на 3-ий возбужденный уровень?

Литература

1. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2010.
2. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
3. Акоста В., Кован К., Грэм Б. Основы современной физики. Пер. с англ. В.В. Толмачева, В.Ф. Трифонова; Под ред. А.Н. Матвеева. - М.: Просвещение, 1981.

Нильс Бор (1885-1962) – родился в Копенгагене. За заслуги в изучении строения атома в 1922 году Бору была присуждена Нобелевская премия.

Ридберг Ю.Р. (1854-1919) – шведский физик-спектроскопист.

Бальмер И. – швейцарский физик, обнаруживший *серию Бальмера* в 1885 году.