

Лабораторная работа 5.04

Определение постоянной Ридберга для атомного водорода

Содержание

Введение	2
Экспериментальная установка	10
Техника безопасности	13
Проведение измерений	14
Обработка результатов	17
Контрольные вопросы	18
Приложение	19

Цели работы

1. Получение численного значения постоянной Ридберга для атомного водорода из экспериментальных данных
2. Оценка экспериментального значения постоянной Ридберга и её сравнение с теоретическим значением

Задачи

1. Водородная газоразрядная трубка, ртутная лампа.
2. Монохроматор УМ-2.
3. Источник питания ртутной лампы и водородной лампы РНУВЕ.
4. Источник питания подсветки монохроматора ЗПС-III.

Введение

Спектральные линии атома водорода в своей последовательности обнаруживают простые закономерности. В 1885г. Бальмер показал на примере спектра испускания атомного водорода (рис.1), что длины волн четырёх линий, лежащих в видимой части и обозначаемых символами H_α , H_β , H_γ , H_σ , можно точно представить эмпирической формулой

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (1)$$

где вместо пследует подставить числа 3, 4, 5, и 6; –эмпирическая константа 364,61 нм. Подставив в формулу Бальмера целые числа $n = 7, 8, \dots$, можно получить также и длины волн линий в ультрафиолетовой области спектра. Закономерность, выраженная формулой Бальмера, становится особенно наглядной, если представить эту формулу в том виде, в каком ею пользуются в настоящее время. Для этого следует преобразовать ее так, чтобы она позволяла вы-

числать не длин волн, а частоты или волновые числа.

Известно, что частота $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$, c^{-1} – число колебаний в 1 сек., где c – скорость света в вакууме; λ_0 – длина волны в вакууме

Волновое число — это число длин волн, укладывающихся в 1 м:

$$\tilde{\nu}_0 = \frac{1}{\lambda_0}.$$

В спектроскопии чаще пользуются волновыми числами, так как длины волн в настоящее время определяются с большой точностью, следовательно, с той же точностью известны и волновые числа, тогда как скорость света, а значит и частота, определены со значительно меньшей точностью.

Из формулы (1) можно получить

$$\tilde{\nu}_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{B} \cdot \frac{n^2 - 4}{n^2} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2)$$

обозначив $\frac{4}{B}$ через R , перепишем формулу (2):

$$\tilde{\nu}_0 = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

где $n=3, 4, 5, \dots$

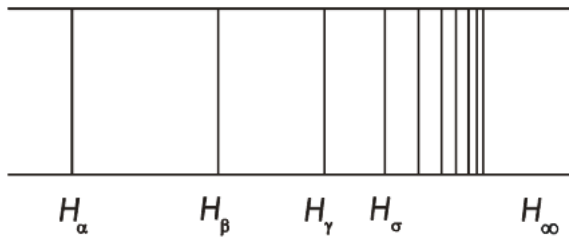


Рис. 1

Уравнение (3) представляет собой формулу Бальмера в обычном виде. Выражение (3) показывает, что по мере увеличения n разность между волновыми числами соседних линий уменьшается и при $n \rightarrow \infty$ мы получаем постоянное значение $\tilde{\nu}_0 = \frac{R}{2^2}$. Таким образом, линии должны постепенно сближаться, стремясь к предельному положению. На рис.1 теоретическое положение предела этой совокупности спектральных линий обозначено символом H_∞ , а сближение линий при движении к нему явно имеет место.

Наблюдение показывает, что с увеличением числа линии n закономерно уменьшается ее интенсивность. Так, если схематически представить расположение спектральных линий, описываемых формулой (3), вдоль оси абсцисс и условно изобразить длиной линий их интенсивность, то получится картина, показанная на рис.2. Совокупность спектральных линий, обнаруживающих в своей последовательности и в распределении интенсивности закономерность, схематически представленную на рис.2, называется спектральной серией.

Предельное волновое число, около которого сгущаются линии при $n \rightarrow \infty$, называется границей серии. Для серии Бальмера это волновое число $\tilde{\nu} = 2742000 \text{ м}^{-1}$, и ему соответствует значение длины волны $\lambda = 364,61 \text{ нм}$. Наряду с серией Бальмера в спектре атомного водорода был обнаружен ряд других серий. Все эти серии могут быть представлены общей формулой

$$\tilde{\nu} = R \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (4)$$

где n_1 имеет для каждой серии постоянное значение $n_1 = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$; для серии Бальмера $n_1 = 2$; n_2 – ряд целых чисел от $(n_1 + 1)$ до ∞ . Формула (4) называется обобщенной формулой Бальмера. Она выражает собой один из главных законов физики – закон, кото-

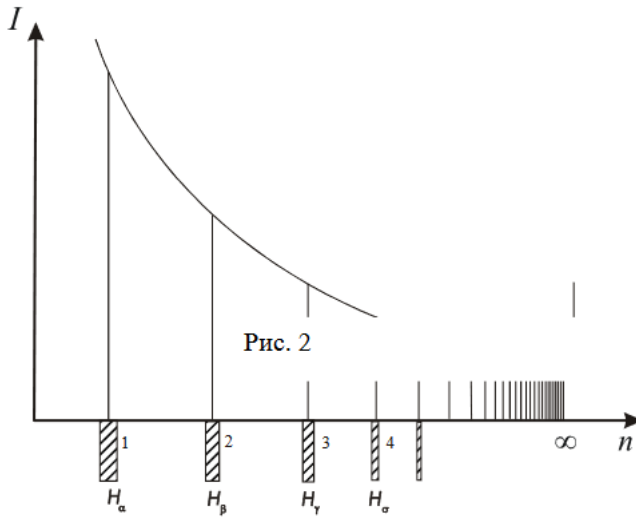


Рис. 2

рому подчиняется процесс изучения атома. Теория атома водорода и водородоподобных ионов создана Нильсом Бором. В основе теории лежат постулаты Бора, которым подчиняются любые атомные системы. Согласно первому квантовому закону (первому постулату Бора), атомная система является устойчивой лишь в определенных стационарных состояниях, соответствующих некоторой дискретной последовательности значений энергии E_i системы, любое изменение этой энергии связано со скачкообразным переходом системы из одного стационарного состояния в другое. В соответствии с законом сохранения энергии переходы атомной системы из одного состояния в другое связаны с получением или отдачей энергии системой. Это могут быть либо переходы с излучением (оптические переходы), когда атомная система испускает или поглощает электромагнитное излучение, либо переходы без излучения (безызлучательные, или неоптические), когда происходит непосредственный обмен энергией

между рассматриваемой атомной системой и окружающими системами, с которыми она взаимодействует. Второй квантовый закон относится к переходам с излучением. Согласно этому закону электромагнитное излучение, связанное с переходом атомной системы из стационарного состояния с энергией E_j в стационарное состояние с энергией $E_l < E_j$, является монохроматическим, и его частота определяется соотношением.

$$h\nu = E_j - E_l, \quad (5)$$

где h – постоянная Планка.

Стационарные состояния E_i в спектроскопии характеризуют уровни энергии, а об излучении говорят как о переходах между этими уровнями энергии. Каждому возможному переходу между дискретными уровнями энергии соответствует определенная спектральная линия, характеризуемая в спектре значением частоты (или волнового числа) монохроматического излучения.

Дискретные уровни энергии атома водорода определяются известной формулой Бора

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m e^4}{h} \cdot \frac{1}{n^2} = -hcR \frac{1}{n^2}, \quad (6)$$

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} \text{ (СГС)} \text{ или } R = \frac{m e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2} \text{ (СИ)}. \quad (7)$$

где n – главное квантовое число; m – масса электрона (точнее, приведенная масса протона и электрона). Для волновых чисел спектральных линий согласно условию частот (5) получается общая формула

$$\tilde{\nu} = \frac{En_2}{hc} - \frac{En_1}{hc} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (8)$$

где $n_1 \leq n_2$, а R определяется формулой (7). При переходе между определенным нижним уровнем (n_1 фиксировано) и последовательными верхними уровнями (n_2 изменяется от $(n_1 + 1)$ до ∞) получаются спектральные линии атома водорода. В спектре водорода известны следующие серии: серия Лаймана ($n_1 = 1, n_2 \geq 2$); серия Бальмера ($n_1 = 2; n_2 \geq 3$); серия Пашена ($n_1 = 3, n_2 \geq 4$); серия Брекета ($n_1 = 4, n_2 \geq 5$); серия Пфунта ($n_1 = 5, n_2 \geq 6$); серия Хамфри ($n_1 = 6, n_2 \geq 7$).

Схема уровней энергии атома водорода приведена на рис. 3. Как

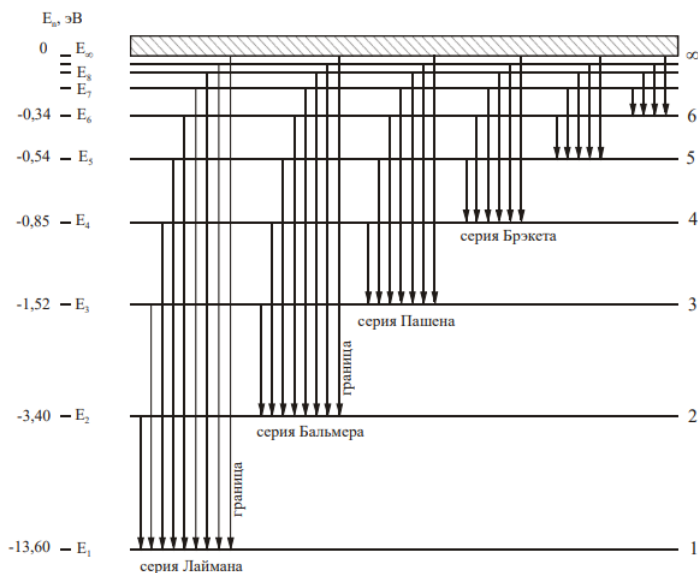


Рис. 3

видим, формула (8) совпадает с формулой (4), полученной эмпирически, если R – постоянная Ридберга, связанная с универсальными константами формулой (7).

Нам известно, что серия Бальмера дается уравнением

$$\tilde{\nu}_0 = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

иначе,

$$\tilde{\nu} = \left(\frac{R}{4} - \frac{R}{n^2} \right), \quad (9)$$

Из уравнения (9), отложив по вертикальной оси значения волновых чисел линий серии Бальмера, а по горизонтальной – соответственно значения $1/n^2$, получаем прямую, угловой коэффициент (тангенс угла наклона) которой дает постоянную R , а точка пересечения прямой с осью ординат дает значение $R/4$ (рис. 4).

Для определения постоянной Ридберга нужно знать квантовые числа линий серии Бальмера атомного водорода. Длины волн (волновые числа) линий водорода определяются с помощью монохроматора (спектрометра). Изучаемый спектр сравнивается с линейчатым спектром, длины волн которого известны. По спектру известного газа (в данном случае по спектру паров ртути, изображенному на рис.

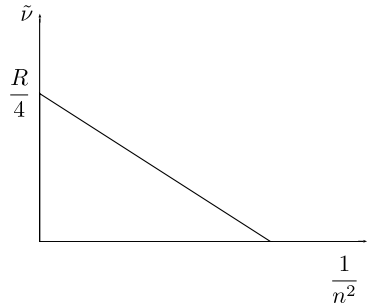


Рис. 4

7), можно построить градуировочную кривую монохроматора, по которой затем определить длины волн излучения атомного водорода.

Экспериментальная установка

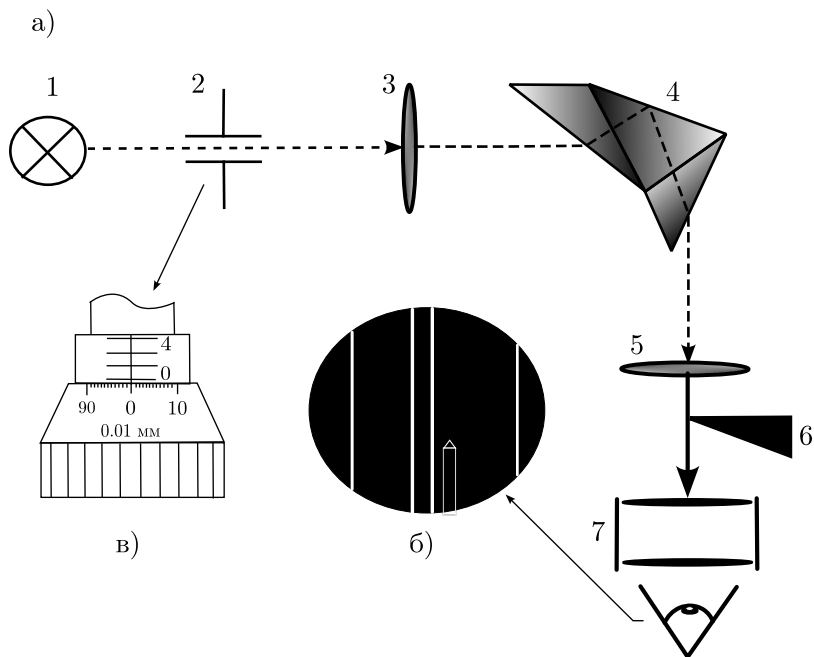


Рис. 5. Схема монохроматора УМ-2

Оптическая схема УМ-2 приведена на рис.5,а. Свет от источника 1 проходит через входную щель 2, установленную в фокусе ахроматического объектива коллиматора 3 и далее параллельным пучком падает на диспергирующий элемент – призму Аббе 4.

Призма Аббе является не только диспергирующим элементом, но также отклоняет любой луч, идущий через нее под углом наименьшего отклонения, на 90° . Призма делается из трех склеенных призм, одна из которых является поворотной. От объектива коллиматора на призму падает параллельный пучок немонахроматиче-

ского света. На входной грани призмы в силу дисперсии лучи различных длин волн преломляются по-разному. Один из лучей пойдет под углом наименьшего отклонения, т.е. параллельно основанию 1-й призмы (первая на пути луча) и под углом 45° отразится от гипотенузной грани поворотной призмы полного внутреннего отражения и пройдет параллельно основанию последней призмы на пути луча. Далее этот луч попадает на границу стекло-воздух, снова преломляется и выходит из призмы вдоль оптической оси приёмной части прибора. Крайние призмы фактически выполняют роль диспергирующей призмы. Лучи других длин волн отклоняются призмой на иные углы и выходят из нее параллельными пучками, не совпадающими с оптической осью.

Столик, на котором установлена призма, делается поворотным и вращается барабаном с отсчётами длин волн. Это позволяет вывести на оптическую ось прибора параллельный пучок лучей определенной длины. При этом угол 90° между входящим в призму и выходящим пучками данной сохраняется. Ахроматический объектив камеры 5 собирает все параллельные лучи различных длин волн в своей фокальной плоскости. Окуляр 7 служит для визуального отсчета положений спектральных линий. Выходная щель устанавливается на пересечении оптической оси прибора и фокальной плоскости объектива камеры. За щелью ставят фотоприемник и регистрирующий прибор. Поворачивая барабан длин волн (и призму) и фиксируя показания прибора, можно снять спектр, подобный изображенному на рисунке 5,б.

В данной работе используется визуальный метод наблюдения с помощью окуляра, который устанавливается вместо щели. В поле зрения окуляра оказывается не одна линия (как за выходной щелью), а несколько (рис. 5,б). Для индикации луча, идущего вдоль

оптической оси прибора, в фокальной плоскости объектива камеры устанавливается игла 6, силуэт которой виден через окуляр вместе с изображениями спектральных линий (рис. 5,6). Та из линий, которая совпадает с острием иглы, выведена на оптическую ось прибора. Ее положение фиксируется на барабане длин волн против риски указателя делений. Для удобства наблюдения спектральных линий цвет подсветки иглы 6 можно изменять.

Общий вид и устройство монохроматора УМ-2 представлен в рисунке 6.

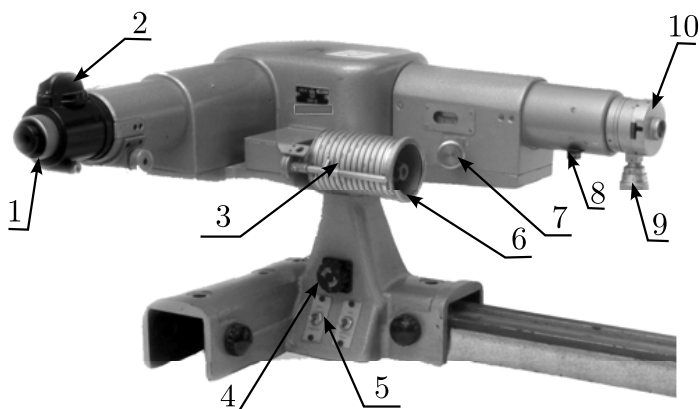


Рис. 6. Внешний вид монохроматора УМ-2: 1 – окуляр, 2 – подсветка иглы и фильтр, 3 – указатель делений барабана, 4 – регулировка яркости подсветки иглы, 5 – вкл./выкл. подсветки, 6 – барабан, 7 – маховичок фокусировки объектива коллиматора и шкала фокусировки, 8 – затвор коллиматора, 9 – барабан установки ширины входной щели, 10 – входная щель

Техника безопасности

1. В работе производятся манипуляции с ртутной лампой. Смену источников необходимо производить с особой осторожностью.
2. Если лампа все-таки разбилась, то необходимо незамедлительно сообщить об этом преподавателю или лаборанту.
3. В работе используется высоковольтный источник питания ламп. Все манипуляции с подключением и отключением ламп необходимо производить при выключенном источнике.
4. Регулятор напряжения в момент выключения и включения источника питания должен быть выставлен в крайнее левое положение

Проведение измерений

1. Ознакомьтесь с техникой безопасности и монохроматором УМ-2.
2. Зажечь ртутную лампу установив контакты в источник питания РНУВЕ в два соседних разъема ($5kV$) и включив источник РНУВЕ с обратной стороны переключателем. Увеличивать напряжение до тех пор, пока лампа не загорится. Включите тумблер «сеть» и тумблер «лампа ДРШ» на источнике питания монохроматора УМ-2.

Убедиться, что лампа хорошо освещает входную щель монохроматора. Установить ширину входной щели (рис.6,9) так, чтобы были различимы 2 желтые линии ртути. Размер входной щели устанавливается с помощью микрометрического винта, расположенного подвходной щелью. Цена деления вертикальной шкалы равна 1 мм, цена деления на микрометрическом винте равна 0,01 мм (приведенные значения могут не совпадать).

3. В окуляр должны быть видны спектральные линии ртути. Для начала лучше поставить в поле зрения желтые и зеленые линии. Включить подсветку указателя и вращением окуляра (впереди монохроматора светлое кольцо с насечкой) добиться резкого изображения указателя. Цвет указателя подбирается по желанию изменением светофильтра, поворотом темного кольца с насечкой над окуляром. Если указатель виден резко, а спектральные линии размыты, то чтобы получить их резкое изображение нужно передвинуть объектив коллиматора (за барабаном длин волн имеется винт и шкала в окошечке). Резкое изображение получается в пределах от 5 до 15 делений по шкале.

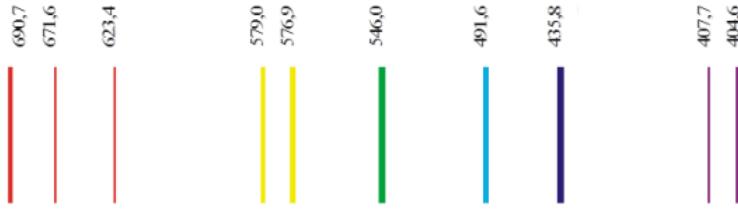


Рис. 7

- Просмотреть весь спектр ртути, сравнив его с рисунком 7.
- Снять градуировочную кривую монохроматора по спектру ртути:

Отградуировать барабан длин волн монохроматора по известному спектру ртути. Для этого, начиная с красных линий, совмещать последовательно все линии ртути с указателем и отмечать их положение по барабану длин волн и заносить значения в таблицу 1. (Из пяти красных линий, линия с длиной волны 671,6 нм самая слабая). Градуировочная кривая монохроматора – зависимость угла поворота α призмы монохроматора от длины волны λ спектральной линии. После проведения измерений выкрутите регулятор напряжения и выключите источник питания лампы тумблером на обратной стороне.

- Поставить перед монохроматором водородную лампу. Нужно поставить ртутную лампу вплотную ко входной щели. Включить источник питания водородной лампы. Для этого аккуратно вытащить контакты ртутной лампы из источника и заменить их контактами водородной лампы (используйте те же разъёмы). Ручкой плавной регулировки установить максимальное значение напряжения (если лампа ещё не включается, вывернуть ручку плавной регулировки на максимум). Обозначив длины волн линий водорода λ_1 , λ_2 и λ_3 ,

снять отсчет их положения α' по барабану длин волн. У водорода в видимой области спектра четыре линии: красная (яркая), голубая (менее яркая), две слабые фиолетовые (последняя фиолетовая почти не видна, поэтому в данной лабораторной работе не снимается). Запишите значения в таблицу 2

Водородная лампа включается лишь на время измерений, так как при длительной работе она быстро выходит из строя.

Внимание! По окончании измерений необходимо выключить установку и лампу. Вернуть лампы в исходное положение.

Обработка результатов

1. По результатам таблицы 1 построить градуировочную кривую.
2. По построенной градуировочной кривой определить длины волн линий спектра водорода и их погрешности. Сравнить значения с теоретическими по формуле Бальмера.
3. Рассчитать волновые числа для полученных длин волн спектра водорода, построить график зависимости $\tilde{\nu}$ от $1/n^2$, где n – соответствующее главное квантовое число.
4. Найти постоянную Ридберга: а) по угловому коэффициенту кривой; б) из графика по значению $R/4$. Сравнить с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (7).
5. Определить (на основе обобщенной формулы Бальмера) энергию ионизации атома водорода, находящегося в основном состоянии.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать постулаты Бора для атомных систем. Как с их помощью объясняется линейчатый характер спектра атома водорода?
2. Сравнить модель атома водорода, предложенную Бором с квантовомеханической моделью.
3. Каков физический смысл чисел n_1 и n_2 в обобщенной формуле Бальмера?
4. Какие состояния атома называют стационарными? Что понимают под основным и возбужденным состоянием?
5. Что называется спектральной серией? По какому принципу спектральные линии объединяются в серию?
6. Что такое граница серии? Каков физический смысл постоянной Ридберга?
7. Что такое квантовые числа, их физический смысл и применение для описания состояния водорода и водородоподобных атомов?
8. Нарисовать схему энергетических состояний атомного водорода и объяснить возникновение серии излучения.
9. Какие источники дают линейчатые, полосатые и сплошные спектры и почему?
10. Что представляет собой оптическая схема монохроматора?
11. Что называют градуировочной кривой? Зачем ее строят?

Приложение

Таблица 1: Градуировка монохроматора УМ-2 по спектру ртути

Цвет линии в спектре ртути	λ , нм	α , делений
Красный	690,7	
Красный	671,1	
Оранжевый	623,4	
Желтый	579,0	
Желтый	576,9	
Зеленый	546,0	
Голубой	491,6	
Сине-фиолетовый	435,8	
Фиолетовый	407,8	
Фиолетовый	404,7	

Таблица 2

Цвет линии в спектре водорода	λ , нм	α' , делений
λ_1 (Красная)		
λ_2 (Голубая)		
λ_3 (Фиолетовая)		