

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА ДЛЯ АТОМНОГО ВОДОРОДА

Цель работы: получение численного значения постоянной Ридберга для атомного водорода из экспериментальных данных и его сравнение с рассчитанной теоретически.

Основные закономерности в изучении атома водорода.

Спектральные линии атома водорода в своей последовательности обнаруживают простые закономерности.

В 1885 г. Бальмер показал на примере спектра испускания атомного водорода (рис. 1), что длины волн четырёх линий, лежащих в видимой части и обозначаемых символами $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\sigma$, можно точно представить эмпирической формулой

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

где вместо n следует подставить числа 3, 4, 5, и 6; B – 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 вычислять не длины 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, укладываемых в 1 м:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda_0}, \text{ м}^{-1}.$$

В спектроскопии чаще пользуются волновыми числами, так как длины волн в настоящее время определяются с большей 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

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

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

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

где $n = 3, 4, 5, \dots$

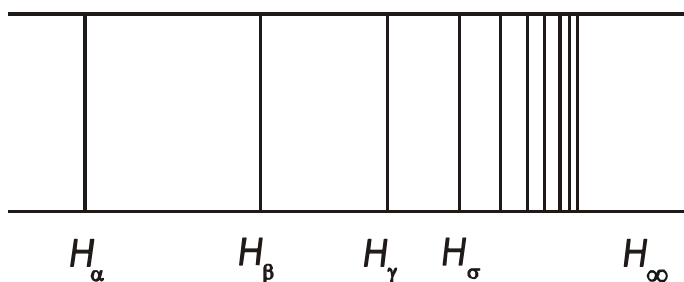


Рис. 1

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 $\tilde{\nu} = \frac{R}{2^2}$. Таким образом, линии должны постепенно сближаться, стремясь к

предельному положению $\tilde{\nu} = \frac{R}{4}$. 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.

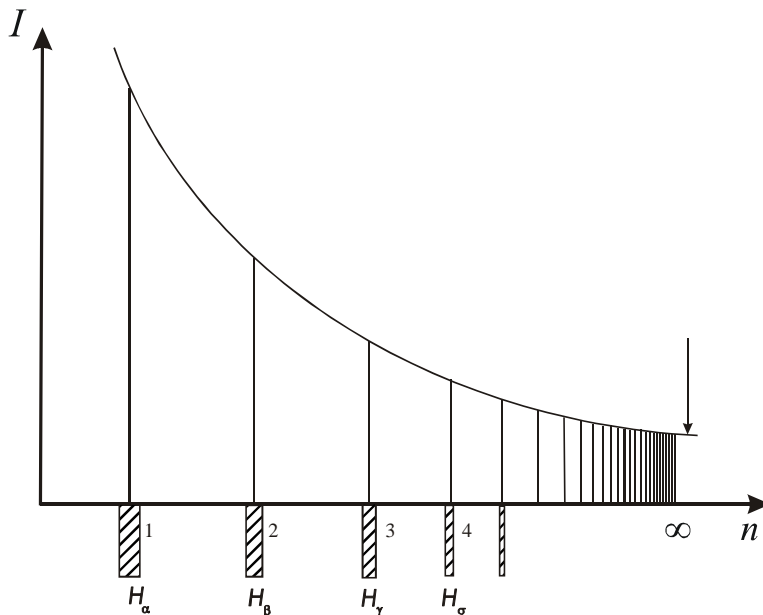


Рис. 2

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 $\lambda_0 = 364,61 \text{ нм}$.

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, которому 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

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

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

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

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3} \text{ (СГС)} \quad \text{или} \quad R = \frac{me^4}{8ch^3 \varepsilon_0^2} \text{ (СИ)}, \quad (7)$$

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

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

где $n_1 < n_2$, 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.

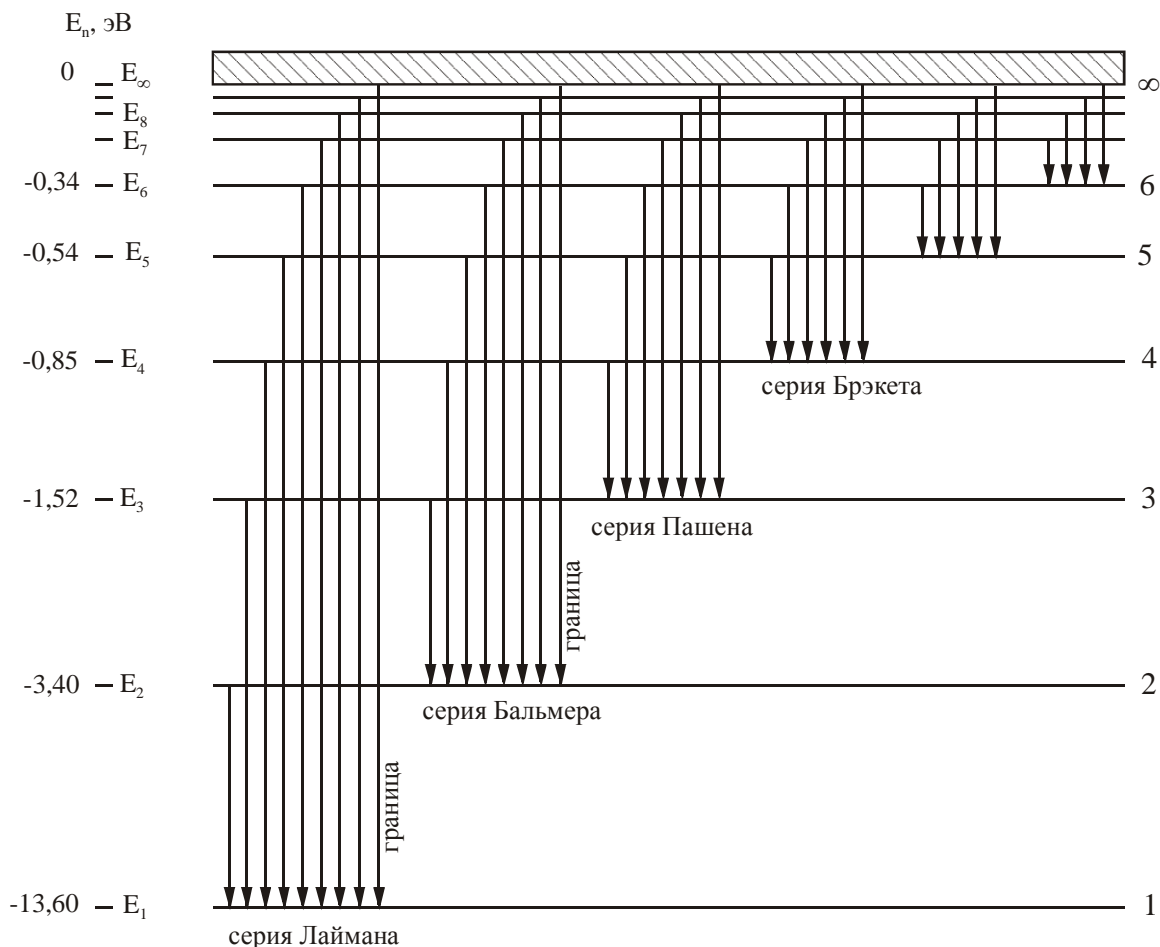


Рис. 3

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

Описание работы.

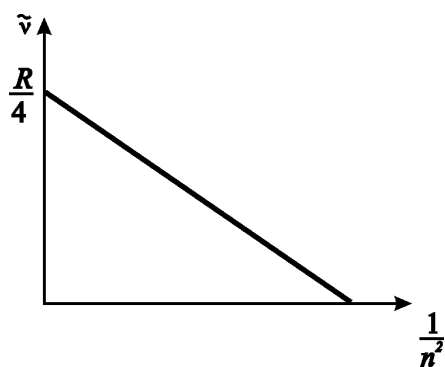
Нам известно, что серия Бальмера дается уравнением

$$\tilde{\nu} = R \cdot \left(\frac{1}{2_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

иначе,

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

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).

Исследуемый спектр сравнивается с линейчатым спектром, длины волн которого известны. По спектру известного газа (в данном случае по спектру паров ртути, изображенному на рис. 5), можно построить градуировочную кривую монохроматора, по которой затем определить длины волн излучения атомного водорода.

Приборы и оборудование.

Источник света: водородная газоразрядная трубка, ртутная лампа ДРШ-2; приборы: монохроматор УМ-2, источник питания ртутной лампы ЭПС-III, источник питания водородной лампы РНУВЕ.

Порядок выполнения работы.

1. Зажечь ртутную лампу ДРШ. Для этого включить тумблер «сеть» на источнике питания ЭПС-III, включить тумблер «лампа ДРШ», нажать кнопку «пуск» и удерживать её нажатой 2-3 секунды.

Убедиться, что лампа хорошо освещает входную щель монохроматора. Установить ширину входной щели примерно 0,1 мм. Размер входной щели устанавливается с помощью микрометрического винта, расположенного под входной щелью. Цена деления вертикальной шкалы равна 1 мм, цена деления на микрометрическом винте равна 0,01 мм. Для улучшения видности спектра можно использовать собирающую линзу, которая сконцентрирует пучок света от лампы на входную щель монохроматора. Для этого установить на оптическую скамью линзу, закрепленную на рейтере, между монохроматором и лампой, перемещая линзу вдоль скамьи, добиться наилучшей концентрации светового пятна на входном отверстии монохроматора.

2. 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.

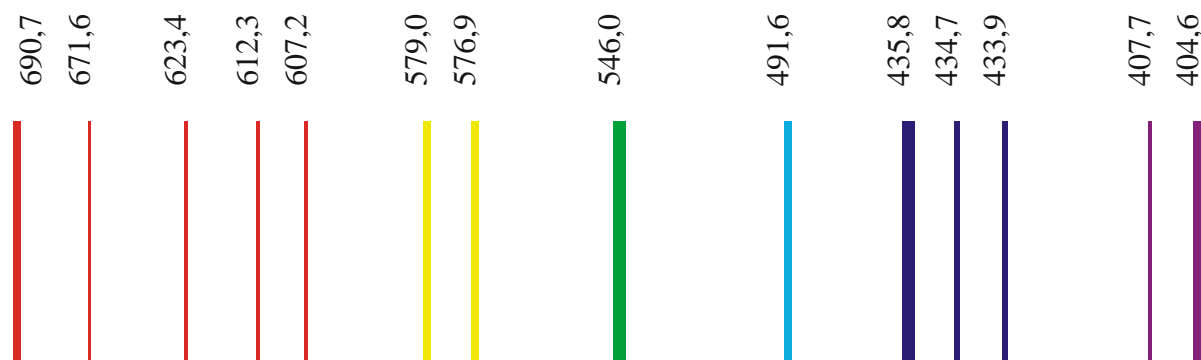


Рис. 5. Спектр ртути

3. Просмотреть весь спектр ртути, сравнив его с рисунком (Рис. 5).

4. 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. (Из пяти красных линий, линия с длиной волны 671,6 нм самая слабая). Измеренные значения

Измерить угол на шкале барабана для всех линий, указанных в табл. 1. Измерение углов $\alpha_{пр}$ провести сначала в прямом направлении, начиная вращать барабан от красной линии, а затем в обратном направлении $\alpha_{обр}$, вращая барабан от фиолетовой линии. Поскольку барабан имеет люфт, вращать его следует строго в одном направлении. Начинать измерения в прямом и обратном направлениях следует смещаясь за крайние линии (красная и фиолетовая соответственно) не менее, чем на 20 градусов. Измеренные значения записать в табл. 1.

Таблица 1

Градуировка барабана монохроматора

Номер линии	Цвет линии	Длина волны λ , нм	I	в прямом направлении $\alpha_{пр}$, град	в обратном направлении $\alpha_{обр}$, град	Среднее значение α , град
1	красный	690,75	250			
2	красный	671,64	16			
3	красный	623,44	24			
4	красный	612,3	20			
5	красный	607,27	20			
6	желтый	578,97	100			
7	желтый	576,96	100			
8	зеленый	546,07	320			
9	голубой	491,61	100			
10	синий	435,83	400			
11	синий	434,75	40			
12	синий	433,92	25			
13	фиолетовый	407,78	100			
14	фиолетовый	404,66	180			

Градуировочная кривая монохроматора – зависимость угла поворота α призмы монохроматора от длины волны λ спектральной линии

5. Поставить перед монохроматором водородную лампу, открыть входную щель примерно до 0,4 мм. Здесь также возможно использование собирающей линзы для усиления концентрации света на входной щели, или же без линзы: нужно поставить ртутную лампу вплотную ко входной щели. Включить источник питания водородной лампы. Ручкой плавной регулировки установить значение напряжения около 2,4-2,8 кВ (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).

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

Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Определение длин волн спектра излучения атома водорода

№ п/п	Отсчет по барабану (α)		Среднее значение α , град	Длина волны λ , нм	Волновое число $\tilde{\nu}$, m^{-1}	Квантовое число n	$\frac{1}{n^2}$
	в прямом направлении $\alpha_{пр}$, град	в обратном направлении $\alpha_{обр}$, град					

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 вычислить среднее значение угла барабана $\alpha = \frac{\alpha_{пр} + \alpha_{обр}}{2}$.

2. На миллиметровой бумаге размером не менее формата А4 построить график зависимости длины волны от угла поворота барабана $\lambda = f(\alpha)$.

Градуировочный график должен иметь вид плавной кривой без перегибов. Все 14 точек должны лежать на этой кривой.

3. По построенной градуировочной кривой определить длины волн линий спектра водорода. Записать в табл. 2.

4. Рассчитать волновые числа для полученных длин волн спектра водорода. Записать в табл. 2.

5. Построить график зависимости $\tilde{\nu}$, m^{-1} от $1/n^2$, где n – соответствующее главное квантовое число (см. рис.4).

6. Найти постоянную Ридберга двумя способами:

а) по угловому коэффициенту линии графика;

б) по точке пересечения линии графика с осью ординат.

Сравнить с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (7). Для этого найти абсолютное и относительное отклонение полученных Вами значений от теоретических.

8. Используя полученное Вами значение постоянной Ридберга, рассчитать (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?