
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

§1. Виды спектров испускания.

Наиболее простую структуру имеют спектры разряженных паров и газов, т.к. они испускаются изолированными атомами и молекулами. Электроны таких атомов и молекул находятся под действием внутренних сил данного атома или молекулы и не подвержены возмущающему действию со стороны других атомов и молекул вследствие их большой удаленности друг от друга.

При свечении паров и газов испускаются два типа спектров: линейчатые и полосатые.

Линейчатые спектры состоят из отдельных тонких линий, разделенных иногда значительными промежутками, и испускаются атомами.

Полосатые спектры состоят из ряда более или менее широких полос и испускаются молекулами. С помощью спектральных аппаратов большой разрешающей силы можно показать, что каждая полоса является совокупностью близких тонких линий.

Таким образом, характерной особенностью спектров, испускаемых свободными атомами и молекулами, является то: что они состоят из отдельных тонких линий, т. е. излучение свободных атомов и молекул представляет собой набор вполне определенных частот.

Следует отметить, что в спектрах испускания могут наблюдаться сплошные полосы. Наличие таких полос свидетельствует о процессах распада или воссоединения, происходящих с излучающими атомами или молекулами, например, процессов ионизации, рекомбинации, диссоциации. совокупность определенных частот спектральных линий составляет характерный для данного вещества линейчатый спектр.

Однако, в зависимости от условий возбуждения различные виды спектра могут иметь различные интенсивности (относительные), поэтому вид спектра зависит от условия возбуждения.

§2. Спектральные закономерности

Спектр водорода.

Несмотря на кажущуюся беспорядочность в расположении линий атомного спектра, можно установить в нем некоторую закономерность - все линии данного спектра можно разбить на группы, каждая из которых подчиняется определенным закономерностям и носит название спектральной серии. Каждая спектральная серия состоит из последовательности линий, сгущающихся в сторону коротких волн (см. рис.1).

Каждая серия имеет свое начало, так называемую головную линию и конец - границу серии. Интенсивность линий спектральной серии убывает от начала



Рис. 1

к концу. наибольшую яркость имеет головная линия; вблизи границы интенсивность линий ничтожно мала. простейшим по своей структуре является спектр атома водорода. Исследование этого спектра и привело к открытию спектральных закономерностей.

Математическая закономерность между длинами волн водородного спектра была сформулирована впервые Бальмером в 1885 г. Бальмер показал, что длины волн известных тогда девяти линий водорода могут быть выражены с помощью простой формулы:

$$\lambda = \frac{m^2}{m^2 - 4} \cdot b \quad (1)$$

где $b = 3645,7 \text{ \AA}$, m - ряд последовательных чисел (целых) 3, 4, 5, 6...

Ридберг придал “серийной формуле” (1) общепринятый в настоящее время вид:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R^* \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (2)$$

где $R^* = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$ (частота Ридберга).

В практической спектроскопии вместо частоты ν часто пользуются, так называемыми, волновыми числами $k = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$. Однако, более распространено сейчас обозначение ν для $\frac{1}{\lambda}$ и для $\frac{c}{\lambda}$, хотя это и неудобно.

Деля обе части уравнения (2) на скорость света, имеем:

$$k = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2a)$$

где $R = \frac{R^*}{c} = 109677,581 \text{ см}^{-1}$ носит название постоянной Ридберга.

Впоследствии были найдены в спектре атомного водорода линии, волновые числа которых не укладываются в формулу (2a). Если мы формулу (2a) напишем в виде

$$k = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3)$$

и, придавая числу m различные целочисленные значения 1, 2, 3, 4 и т. д., а числу n значения $m+1, m+2, \dots$ получим ряд сериальных формул, среди которых окажется и формула Ридберга ($m=2$).

Оказывается, что частоты всех известных линий водорода могут быть выражены с помощью той или иной сериальной формулы вида (3).

В настоящее время известно пять серий спектральных линий атомного водорода, размещающихся по значению m .

Серия Лаймана (1906)	$m=1$	$n=2,3,4\dots$
Бальмера (1885)	$m=2$	$n=3,4,5\dots$
Ритца-Пашена (1908)	$m=3$	$n=4,5,6\dots$
Брекетта (1922)	$m=4$	$n=5,6,7\dots$
Пфунда (1924)	$m=5$	$n=6,7,8\dots$

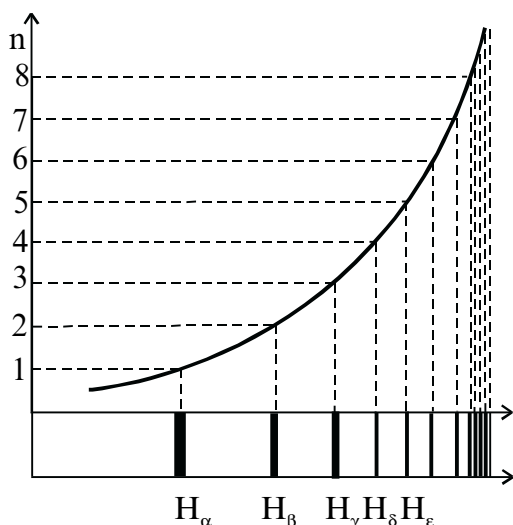
Обозначив $\frac{R}{m^2} = A = \text{const}$, имеем

$$n = A - \frac{R}{n^2} \quad (4)$$

Отсюда видно, что при увеличении n , линии располагаются все теснее и теснее, сбегаюсь к некоторому пределу - границе серии, так что при $n \rightarrow \infty$

$$v \rightarrow A - \frac{R}{m^2} \quad (5)$$

Для серии Бальмера этому значению v соответствует $\lambda_0 = 3646,13 \text{ \AA}$.



Экспериментально определенные значения длин волн совпадают в пределах ошибок измерений с длинами волн, вычисленными по формуле (3).

Ввиду того, что точность измерений частот в оптике является необычайно высокой (ошибки содержатся лишь в пятом-шестом знаке), такое совпадение является весьма поразительным.

Все спектральные закономерности и сериальные формулы были установлены чисто эмпирическим путем, их глубокий физический смысл открылся только после

Лабораторная работа №11

того, как были сформулированы квантовые постулаты Бора. Бор показал, что соотношение Ридберга (2) выражает собою один из главнейших законов физики - закон, которому подчиняется процесс лучеиспускания. Теория Бора позволяет также определить значение постоянной Ридберга через другие универсальные

постоянные:
$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} [\text{см}^{-1}], \quad m - \text{масса электрона} \quad (6)$$

Значение постоянной Ридберга, вычисленное по значениям универсальных постоянных, прекрасно согласуется с ее экспериментальным значением.

§3. Экспериментальная часть

Серия Бальмера дается уравнением:
$$k = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Иначе это уравнение можно записать в виде:

$$k = \left(\frac{R_H}{4} - \frac{R_H}{n^2} \right) \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что если откладывать по оси ординат значения волновых чисел линий Бальмеровской серии, и по оси абсцисс соответствующие значения $\frac{1}{n^2}$, получим прямую, тангенс наклона которой есть R_H , а точка ее пересечения с осью ординат дает значение $\frac{R_H}{4}$.

Задача настоящей работы заключается в экспериментальном определении волновых чисел линий Бальмеровской серии водорода и определении по ним значений постоянной Ридберга.

Измерение длин волн (волновых чисел).

Волновые числа линий водорода определяются при помощи спектрометра (гониометра с призмой).

Для измерения длин волн (или волновых чисел) какого-нибудь линейчатого спектра пользуются линиями другого линейчатого спектра, длины волн которого хорошо известны. Эти линии называются реперами.

Если производятся очень точные измерения, то не всякая линия может служить репером. В этом случае пользуются так называемыми нормальными, т.е. линиями, длины волн которых весьма устойчивы при изменениях режима источника и которые определены с большой точностью.

Проще всего длины волн определяются методом линейчатой интерполяции.

Длины волн искомой линии определяются по формуле:

$$\lambda_x = \lambda_2 + \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{n_1 - n_2} (n_x - n_2) \quad (8)$$

где λ_x - искомая длина волны, n_x - соответствующий ей отсчет по гониометру, λ_1, λ_2 - длины волн линий-реперов, n_1, n_2 - соответствующие им отсчеты по гониометру.

Совершенно такая же формула может быть использована для определения волновых чисел.

$$v_x = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{n_2 - n_1} (n_x - n_1) \quad (9)$$

Формула (8) введена в предположении того, что $\lambda_1 > \lambda_2$; она дает точные результаты тогда, когда расстояния между линиями пропорциональны разностям длин волн, что имеет место только для спектров, полученных с помощью дифракционных решеток. В спектре, полученном с помощью призмы, не существует линейчатой зависимости между разностями длин волн линий и расстояниями между ними, поэтому в случае призматического спектра вычислять по формулам (8) и (9) можно только тогда, когда разность длин волн между реперами мала (несколько ангстрем).

Для спектра, полученного с помощью стеклянной призмы, хорошие результаты дает интерполяционная формула Гартмана, выражающая зависимость длины волн от координаты в форме:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{A}{n - n_0} \quad (10)$$

где λ_0, n_0, A - постоянные, определяемые по трем линиям (нормалям).

Так как для дальнейшего анализа нас интересуют не длины волн, а волновые числа v , формулу (10) удобнее преобразовать к вычислению волновых чисел.

Заменяя λ на $\frac{1}{v}$, после простых алгебраических преобразований получим зависимость того же вида

$$\tilde{v} = \tilde{v}_0 + \frac{c}{x - x_0} \quad (11)$$

тогда v_0, x_0, c - новые постоянные.

Для нахождения v_0, x_0, c , входящих в формулу (11), необходимо подставить в нее значения волновых чисел и координаты трех нормалей. Если обозначить их волновые числа v_1, v_2, v_3 , а координаты x_1, x_2, x_3 , то мы получим систему трех уравнений первой степени, решая которую найдем

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_1 + \frac{(v_3 - v_2)(x_2 - x_1)(x_3 - x_1)}{(v_3 - v_1)(x_2 - x_1) - (v_2 - v_1)(x_3 - x_1)} \\ c &= -\frac{(v_2 - v_1)(x_1 - x_0)(x_2 - x_0)}{(x_2 - x_1)} \\ v_0 &= v_1 + \frac{c}{x_1 - x_0} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Если за начало отсчета координаты x примем положение одной из нормалей, например, v_1 , то $x_1 = 0$ и уравнения 12 несколько упростятся:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{(v_3 - v_2)x_3x_2}{(v_3 - v_1)x_2 - (v_2 - v_1)x_3} \\ c &= -\frac{(v_2 - v_1)(x_2 - x_0)x_0}{x_2} \\ v_0 &= v_1 + \frac{c}{x_0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подставив полученные значения v_0 , x_0 и c в формулу (11), можно определить по ней волновые числа всех линий, лежащих в промежутке от v_1 , до v_3 .

При вычислении длин волн по формуле (10) для постоянных получаются аналогичные (12) и (13) формулы, только в них надо заменить x_0 , c и v_0 на n_0 , Λ и λ_0 и все v_i заменить на λ_i .

Формула Гартмана дает хорошие результаты только в том случае, когда разность длин волн между крайними реперами не слишком велика (т.е. не превышает 1000 \AA). Поэтому нельзя пользоваться одними и теми же реперами для вычисления волновых чисел всех четырех линий водорода.

В нашей работе в качестве реперов используются линии спектра ртути.

Перед щелью установлена призма полного внутреннего отражения, это дает возможность одновременно наблюдать спектр ртути и спектр водорода. (Обычно призма устанавливается так, что закрывает половину высоты щели).

Применение призмы полного внутреннего отражения заметно сократит время измерений и даст возможность правильно выбрать интерполяционные формулы для определения волновых чисел каждой из линий водорода.

Порядок работы и практические указания

Перед выполнением настоящей работы необходимо изучить устройство гониометра, на котором выполняется работа (описание гониометра выдается в лаборатории) и вспомнить как производится установка гониометра (см.

описание для 2-го курса “Гониометр”).

1. Прежде всего необходимо установить гониометр с помощью плоско-параллельной пластинки.

2. Затем зажигают ртутную и водородные лампы и, широко открыв щель коллиматора, убеждается, что оба источника хорошо освещают щель (одну верхнюю, и другую нижнюю ее половины).

Сузив щель устанавливают коллиматор на бесконечность, добиваясь резкого видения щели в установленную уже на бесконечность зрительную трубу.

3. После этого ставят на столик гониометра призму и устанавливают ее рабочие грани (две любые грани) перпендикулярно оптической оси трубки.

Следует помнить, что при определении длин волн, с помощью спектрометра очень большую роль играет хорошая установка гониометра и самой призмы. От этого зависит качество изображения спектральных линий и точность отсчетов.

4. В призмных спектральных аппаратах призма ставится обычно в положение наименьшего отклонения для исследуемой части спектра. При таком положении призмы лучи света проходят через нее симметрично и дают наиболее резкое изображение спектральных линий.

Установить призму в положение наименьшего отклонения можно лишь для какой-нибудь одной спектральной линии. В нашей работе измерению подлежит вся видимая область спектра, поэтому призма устанавливается в положение наименьшего отклонения для той линии, которая измеряется (т.е. четыре раза для красной, голубой, синей и фиолетовой линий водорода).

Положение наименьшего отклонения для какой-нибудь линии спектра устанавливается следующим образом. Осветив щель соответствующим источником света, начинают вращать столик с призмой и наблюдать за спектром (сначала без трубы). Найдя положение, когда при неизменном направлении вращения столика спектр пойдет в обратную сторону, останавливают столик и наводят на спектр зрительную трубу. Наблюдая за нужной линией в зрительную трубу, повторяют ту же операцию в меньшем интервале углов. Призма находится в положении наименьшего отклонения в тот момент, когда, при неизменном направлении вращения столика, линия начинает двигаться в обратную сторону.

5. Производят отсчет углов отклонения для нужных линий ртути и линий водорода. Заметим, что в стеклянных приборах, предназначенных для работы во всей видимой части спектра, нужно фокусировать зрительную трубу на каждую измеряемую линию (т.к. нельзя сделать объектив, исправленный на хроматическую aberrацию для всей видимой области спектра; изменение фокусировки особенно заметно на красном и фиолетовом концах спектра). Хорошая фокусировка проверяется по отсутствию параллакса, т.е. если вертикальная нить окуляра наведена на линию, то при перемещении глаза

Лабораторная работа №11

вправо и влево относительно окуляра, нить не должна перемещаться относительно линии.

Все измерения углов делаются не менее трех раз.

Ширину щели коллиматора следует подбирать так, чтобы линии были возможно более узкими, но не потеряли яркости (т.е. чтобы ширина щели была больше нормальной). Однако слабые линии не удастся измерить при узкой щели, т.е. при этом невидна визирной нити. Положение слабых линий следует определять при более широкой щели, наводя нить на середину линии (естественно, что здесь нужно измерять более трех раз).

Обычно в водородной трубке, одновременно с линиями атомарного водорода, наблюдаются линии кислорода и иногда линии молекулярных полос водорода. Однако это не мешает измерениям, т.к. линии кислорода гораздо слабее линий водорода, а линии атомарного водорода совпадают с границами молекулярных полос и ярко выделяются на их фоне.

6. Определение волновых чисел водорода производится по интерполяционным формулам, приведенным выше.

7. По найденным значениям волновых чисел $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$, линий, нужно определить значение постоянной Ридберга для водорода R_H .

За окончательный результат взять их среднее значение.

8. Сравнить полученное значение R_H с теоретическим, вычисленным через универсальные постоянные.

Отчет должен содержать

1. Оптическую схему спектрометра с призмой и поворотной призмой.
2. Таблицу измерений углов отклонения линий-реперов ртути и линий водорода и их средние значения.
3. Значения найденных частот линий водорода и интерполяционные формулы, по которым производились расчеты.
4. Полученное значение постоянной Ридберга и ее значение, вычисленное по универсальным постоянным.

Литература

С.Э. ФРИШ - "Атомные спектры".

Э.В. ШПОЛЬСКИЙ - "Атомная физика", т. 1.