

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Физтех-школа физики и исследований имени Ландау

Лабораторная работа № 5.2.2-3
Изучение спектров атома водорода и молекулы йода

Полубояринов Иван
Соколов Игорь
Группа Б02-210с

Долгопрудный, 2024 г.

1 Аннотация

Была проведена калибровка монохроматора по спектрам неона и ртути. Изучен спектр водорода. Экспериментально проверена формула Бальмера, найдена постоянная Ридберга. Изучен спектр молекулярного йода, найдены энергии его колебательного кванта, электронного перехода и диссоциации в основном и возбужденном состоянии.

2 Теоретическое описание

2.1 Спектр атома водорода

Объяснение структуры спектра излучения атомов требует решения задачи о движении электрона в эффективном поле атома. Для атома водорода и водородоподобных (одноэлектронных) атомов определение энергетических уровней значительно упрощается, так как квантово-механическая задача об относительном движении электрона (заряд $-e$, масса m_e) и ядра (заряд Z_e , масса M) сводится к задаче о движении частицы с эффективной массой $\mu = m_e M / (m_e + M)$ в кулоновском поле $-Ze^2/n$. Длины волн спектральных линий водородоподобного атома описываются формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

где $m, n \in \mathbb{Z}$, а $R = 109677,6 \text{ см}^{-1}$ – постоянная Ридберга. Эта формула позволяет по энергиям перехода судить о расположении энергетических уровней атома водорода. На рис. 1 изображены энергетические уровни и соответствующие им переходы, определяющие спектр.

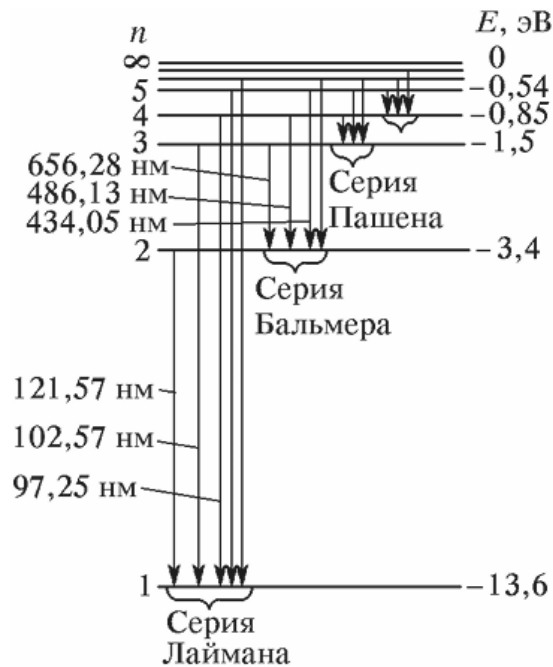


Рис. 1: Энергетические уровни атома водорода и образование спектральных серий

В данной работе изучается серия Бальмера, линии которой лежат в видимой области. Для серии Бальмера $n = 2$. Величина m для первых четырех линий этой серии принимает значение 3, 4, 5, 6. Эти линии обозначаются символами H_α , H_β , H_γ , H_δ .

2.2 Спектр молекулярного йода

Молекулы обладают более богатым спектром возбужденных состояний, чем изолированные атомы. В то время как возбуждения атомов – это переходы их электронов на более высоко расположенные

энергетические уровни, в молекулах могут возбуждаться дополнительные степени свободы: колебания составляющих их атомов друг относительно друга и вращения молекул относительно различных осей. В первом приближении энергия молекулы может быть представлена в виде (приблизительность состоит в том, что каждый отдельный вклад независим от других):

$$E = E_{\text{эл}} + E_{\text{колеб}} + E_{\text{вращ}}.$$

Массы ядер атомов велики по сравнению с массой электрона. Благодаря такой разнице в массах, скорости движения ядер в молекуле малы по сравнению со скоростями электронов. Это даёт возможность рассматривать электронное движение при неподвижных ядрах, расположенных на определенных расстояниях друг от друга. Определяя уровни энергии такой системы, мы найдем электронные термы молекул. Любой атом в молекуле находится в электрическом поле остальных ее атомов. Оно вызывает расщепление электронных уровней атомов в молекуле. Следует отметить, что при соединении атомов в молекулу заполненные оболочки атомов мало меняются. Существенно может измениться распределение электронной плотности в не до конца заполненных оболочках.

Оптические переходы (переходы, связанные с излучением фотонов в видимом диапазоне длин волн, т.е. фотонов с энергией порядка двух электрон-вольт) соответствуют переходам между различными электронными состояниями молекулы. При этом обычно происходят также изменения ее вращательного и колебательного состояний.

На рис. 2 изображены энергетические уровни молекулы без учёта вращательной структуры (так как их масштаб в ≈ 1000 раз меньше колебательного кванта).

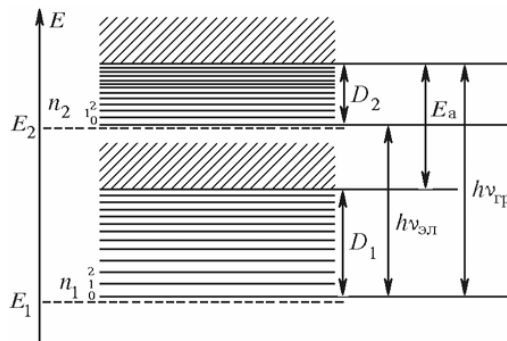


Рис. 2: Электронные и электронно-колебательные энергетические уровни двухатомной молекулы

Штриховыми линиями показаны чисто электронные уровни E_1 и E_2 , а сплошными – колебательные подуровни этих состояний. Наименьшая энергия, которую нужно сообщить молекуле в нижайшем колебательном состоянии ($n = 0$), чтобы она диссоциировала, называется энергией диссоциации. Энергии диссоциации молекулы из состояний $n_1 = 0$ и $n = 0$ обозначим через D_1 и D_2 . На этом рисунке E_a , – энергия возбуждения атома, возникающая при переходе молекулы из состояния 1 в область непрерывного спектра, соответствующего состоянию 2. Энергия чисто электронного перехода $E_2 - E_1 = h\nu_{\text{эл}}$. Границу схождения спектра, т.е. энергию возбуждения, при которой происходит переход молекулы в область непрерывного спектра, обозначим через $h\nu_{\text{гр}}$.

Как видно из рис. 2, энергии диссоциации молекулы из основного и возбуждённого состояний определяются по формулам

$$\begin{cases} D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_a; \\ D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}}. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим теперь структуру электронно-колебательного спектра поглощения молекул йода, который исследуется в данной работе. Все возможные линии поглощения для переходов между колебательными уровнями, налагающимися на два соседних электронных состояния, можно разбить на серии, соответствующие одному и тому же начальному состоянию, как это показано на ???. Такие серии называются сериями Деландра. На рис.??? переходы, показанные стрелками, сгруппированы соответственно в нулевую, первую и вторую серии Деландра. Видимый спектр состоит из 0-й и 1-й серий Деландра; 2-я серия в 10 раз менее интенсивная, чем 0-я, и поэтому ей пренебрегаем.

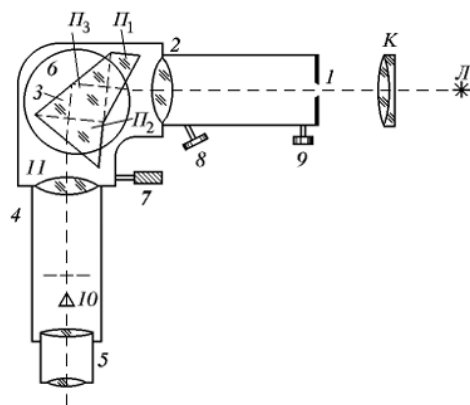


Рис. 4: Экспериментальная установка по наблюдению спектра водорода

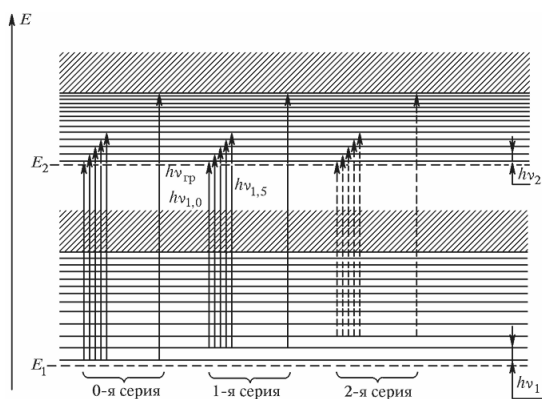


Рис. 3: Структура электронно-колебательного спектра поглощения молекулы йода в видимой области

Энергетическое положение линий поглощения описывается следующим выражением:

$$h\nu_{0n_2} = (E_2 - E_1) + h\nu_2 \left(n_2 + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} h\nu_1. \quad (3)$$

3 Описание установки

3.1 Изучение спектра водорода

Экспериментальная установка для наблюдения спектра водорода изображена на рисунке 4.

Источником света для наблюдения служит водородная трубка Н-образной формы, в состав газа которой добавлены водные пары для увеличения яркости интересующих нас линий. Источник Л помещается на оптическую скамью вместе с конденсером К, так что свет концентрируется на входной щели 1. Далее через коллиматорный объектив 2 свет попадает на сложную спектральную призму, состоящую из призм Π_1 , Π_2 и Π_3 . Первые две призмы обладают большой дисперсией, а промежуточная Π_3 поворачивает лучи – такое устройство позволяет складывать дисперсии Π_1 и Π_2 . После прохождения призмы свет попадает в зрительную трубу 4-5, объектив которой даёт изображение входной щели различных цветов.

3.2 Изучение молекулярного спектра йода

Молекулярный спектр поглощения паров йода можно наблюдать, используя

1. источник сплошного спектра – лампу накаливания;
2. поглощающую среду – кювету с исследуемым веществом;

3. спектральный прибор, регистрирующий спектр поглощения – монохроматор УМ-2.

Схему установки для наблюдения молекулярного спектра йода можно увидеть на рис. 5.

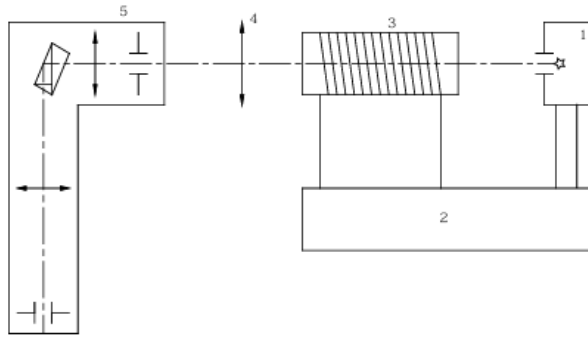


Рис. 5: Схема экспериментальной установки для наблюдения молекулярного спектра йода

В нашей работе спектр поглощения паров йода наблюдается визуально на фоне сплошного спектра лампы накаливания 1, питаемой от блока питания 2. Кювета 3 с кристаллами йода подогревается нихромовой спиралью, подключённой вместе с лампой накаливания к блоку питания. Линза 4 используется как конденсор. В результате подогрева кристаллы йода частично возгоняются, образуя пары с лёгкой фиолетовой окраской. Спектрометр позволяет визуально наблюдать линии поглощения молекул йода на фоне сплошного спектра лампы накаливания видимой области (рис. 6).

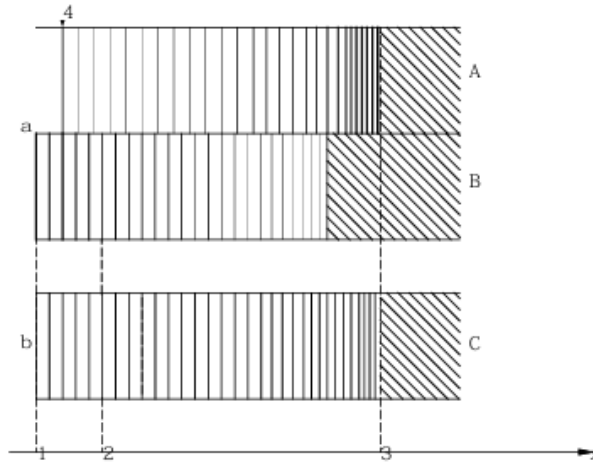


Рис. 6: Спектр поглощения йода

4 Результаты и обсуждение

4.1 Калибровка монохроматора

Выполним градуировку монохроматора. Для этого построим график зависимости длины волны линии λ от параметра барабана θ , считая известным спектр неона и ртути (рис. 7). Профитируем этот график дисперсионной формулой Гартмана:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{C}{\theta - \theta_0}. \quad (4)$$

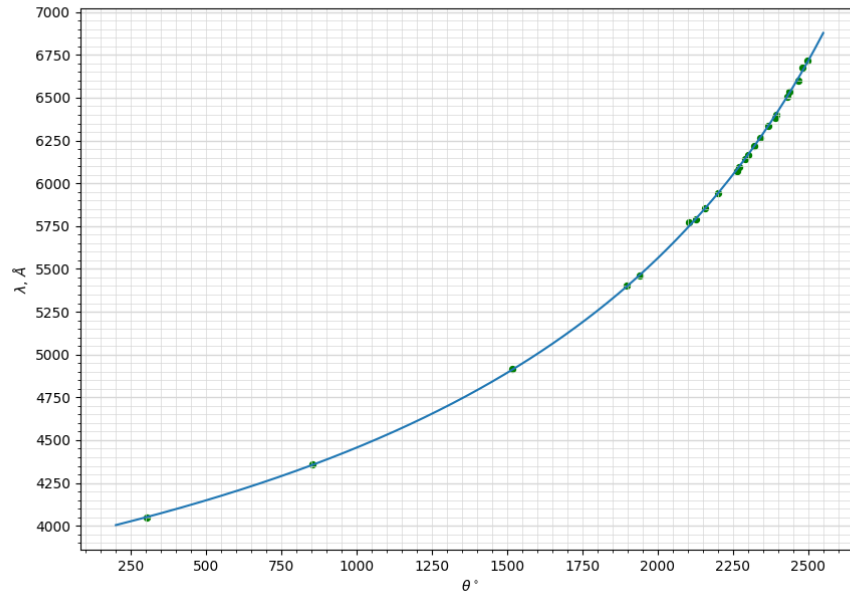


Рис. 7: Градуировка монохроматора

Получим значение констант

$$\lambda_0 = 2373, \text{ Å}, \quad (5)$$

$$C = 6006000, \quad (6)$$

$$\theta_0 = 3883. \quad (7)$$

4.2 Изучение спектра водорода

По полученному графику вычислим длины волн спектра водорода (табл. 1).

Линия	θ°	$\lambda, \text{ Å}$	m
H_α	2446	6552	3
H_β	1466	4857	4
H_γ	822	4335	5
H_δ	396	4095	6

Таблица 1: Линии спектра водорода

Построим график зависимости $\frac{1}{\lambda}$ от $\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}$ (рис. 8).

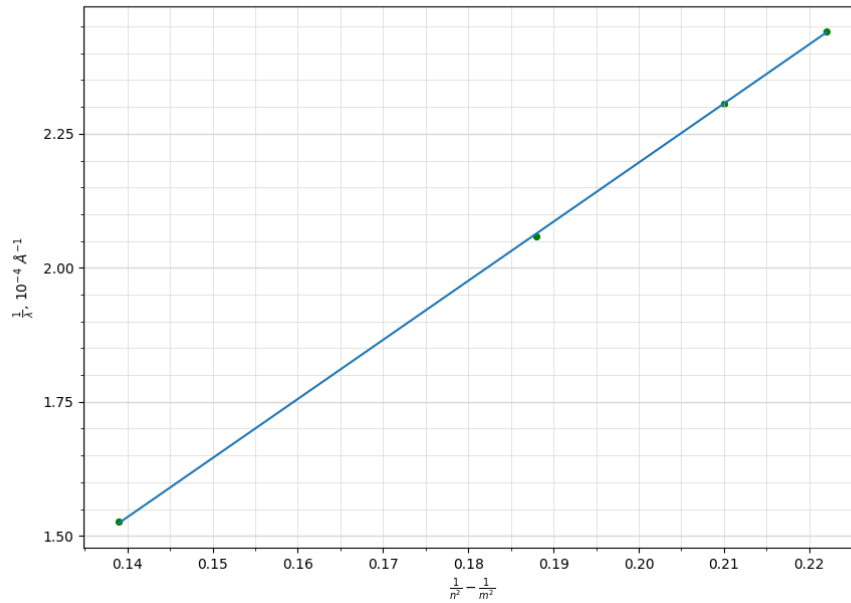


Рис. 8: Проверка формулы Бальмера

Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую, формула Бальмера (1) экспериментально подтверждена. По углу наклона прямой найдем постоянную Ридберга:

$$R \approx 1102 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}, \quad (8)$$

что находится в полном соответствии с табличным значением

$$R_{\text{табл}} \approx 1096 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

4.3 Изучение спектра молекулярного йода

По калибровочному графику 7 определим длины волн, соответствующие длинноволновой линии и линии, отстоящей от нее на 6, а также границу, на которой спектр становится непрерывным. Значения представлены в табл. 2

Номер	θ°	$\lambda, \text{ Å}$	$h\nu, \text{ эВ}$
1,0	2314	6200	2,00
1,5	2234	6015	2,06
гран	1674	5091	2,43

Таблица 2: линии спектра йода

Из полученных значений по формулам (3) и (2) найдём энергию колебательного кванта, электронного перехода и энергию диссоциации из основного и возбужденного состояния (табл. 3)

Параметр	эВ
$h\nu_2$	0,012359888
$h\nu_{\text{эл}}$	2,036040489
D_1	1,497706021
D_2	0,401665532

Таблица 3: Энергетические параметры молекулы йода

5 Выводы

Была проведена калибровка монохроматора по спектрам неона и ртути. Изучен спектр водорода. Экспериментально проверена формула Бальмера, найдена постоянная Ридберга. Полученное значение хорошо согласуется с табличным. Изучен спектр молекулярного йода, найдены энергии его колебательного кванта, электронного перехода и диссоциации в основном и возбужденном состоянии.

Приложение

Экспериментальные данные:

$\lambda, \text{\AA}$	θ°
5400	1898
5852	2156
5944	2200
6143	2292
6096	2272
6164	2300
6074	2264
6217	2320
6266	2342
6334	2368
6383	2390
6402	2395
6507	2430
6533	2438
6599	2466
6678	2482
6717	2497

Таблица 4: Спектр неона

$\lambda, \text{\AA}$	θ°
5791	2126
5770	2104
5461	1940
4916	1518
4358	854
4047	304

Таблица 5: Спектр ртути

Линия	θ°
H_α	2446
H_β	1466
H_γ	822
H_δ	396

Таблица 6: Спектр водорода

Линия	θ°
$\theta_{1,0}$	2314
$\theta_{1,5}$	2234
$\theta_{\text{гр}}$	1674

Таблица 7: Спектр молекулярного йода