

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

Лабораторная работа № 5.2.2(2.3) по курсу
Квантовая физика

«Изучение спектров атомов водорода и молекулы йода»

Выполнили:
студентки 3 курса 103 группы
Фитэль Алена
Флоренская Лидия

Москва, 02.10.23 г

Введение

В работе исследуются : 1) сериальные закономерности в оптическом спектре водорода; 2) спектр поглощения паров йода в видимой области

Спектральные линии водорода

Атом водорода является простейшей атомной системой; для него уравнение Шредингера может быть решено точно. Поэтому спектр водорода является предметом тщательного экспериментального и теоретического исследования.

Длины волн спектральных линий водородоподобного атома описываются найденной эмпирически формулой Бальмера

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

где R - константа, называемая постоянной Ридберга, а m и n - целые числа.

Эта формула достаточно правильно описывает экспериментальные значения линий водорода при $R = 109677 \text{ см}^{-1}$.

Использование постулатов Нильса Бора с учетом кулоновского взаимодействия между ядром и электроном позволяет легко определить возможные энергетические состояния водородоподобного атома. Если считать ядро неподвижным, то эти энергетические состояния определяются выражением

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m_e e^4 Z^2}{h^2} \frac{1}{n^2} \quad (2)$$

Это позволяет нам определить возможные частоты излучения атома и объяснить спектральные закономерности (см. Рис. 1).

Из Рис. 1 видно, что линии в спектре водорода можно разложить по сериям. В данной работе изучается серия Бальмера, линии которой лежат в видимой области. Для нее $n = 2$. Величина m для первых четырех линий принимает значение 3,4,5,6. Эти линии обозначаются символами H_α , H_β , H_γ , H_δ .

Оптические переходы в молекулах

Оптические переходы, связанные с излучением фотонов в видимом диапазоне длин волн, соответствуют переходам между различными электронными состояниями молекулы.

В спектре излучения просходит наложение колебательного спектра на электронный, и проявляется это в том, что каждой линии электронного перехода соответствует ряд колебательных линий, образующих полосу.

На Рис. 2 схематически показаны энергетические уровни молекулы без учета вращательной структуры.

Штриховыми линиями показаны чисто электронные уровни E_1 и E_2 , а сплошными - колебательные подуровни этих состояний. Следует подчеркнуть, что минимальное значение колебательной энергии при $n = 0$ отлично от нуля и равно $h\nu/2$.

Минимальная 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 $n_2 = 0$ обозначим через D_1 и D_2 (Рис. 2). E_a - энергия возбуждения атома, возникающая при переходе молекула из состояния 1 в область непрерывного спектра, соответствующего состоянию 2. Энергия чисто электронного перехода $E_2 - E_1 = h\nu_{эл}$



Рис. 1: Уровни энергии атома водорода и обращение спектральных серий

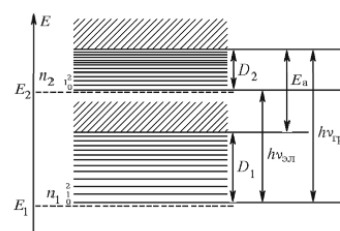


Рис. 2: Электронные и электронно-колебательные энергетические уровни двухатомной молекулы

В работе мы будем исследовать структуру электронно-колебательного спектра поглощения молекул йода. 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. Такие серии называются сериями Деландра.

Энергетическое положение линий поглощения описывается выражением

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

Общий вид спектра поглощения йода

Из рассмотренного ясно, что спектр поглощения паров йода в видимой области при комнатной температуре практически состоит из двух серий Деландра (1-й и 0-й), накладывающихся друг на друга. На Рис. 3а для наглядности обе серии изображены отдельно. Учтено также распределение интенсивности поглощения между линиями в пределах серии: на рисунке интенсивность условно отражена толщиной линии. Качественно общий вид спектра показан на Рис. 3б.

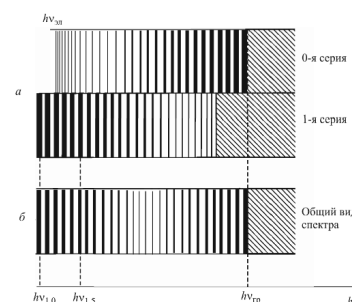


Рис. 3: Спектр поглощения паров йода

1 Изучение спектра атома водорода

Экспериментальная установка

Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется стеклянно-призмный монохроматор-спектрометр УМ-2 (Рис. 4), предназначенный для спектральных исследований в диапазоне от 380 до 1000 нм.

В состав прибора УМ-2 входят следующие основные части:

1. Входная щель 1, снабженная микрометрическим винтом 9
2. Коллиаторный объектив 2, снабженный микрометрическим винтом 8, позволяющим смещать объектив относительно щели 1
3. Сложная спектральная призма 3, состоящая из трех склеенных призм Π_1 , Π_2 , Π_3
4. Поворотный столик 6б вращающийся вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта 7 с отсчетным барабаном. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями
5. Объектив 4 и окуляр 5, составляющие зрительную трубу. Указатель 10 в фокальной плоскости окуляра 5
6. Массивный корпус 11
7. Оптическая скамья, по которой могут перемещаться рейтеры с источником света \mathcal{L} и конденсором K .

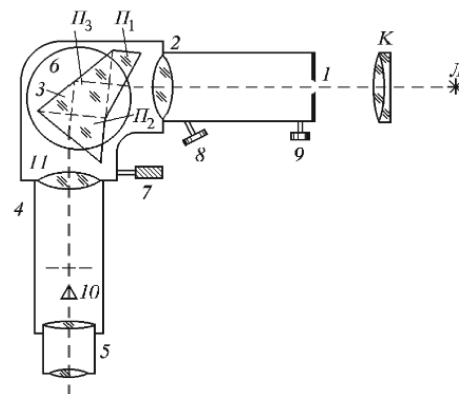


Рис. 4: Устройство монохроматора УМ-2

Спектрометр УМ-2 нуждается в предварительной градуировке. Для градуировки в коротковолновой части спектра удобно применять ртутную лампу ПРК-4, а в длинноволновой и средней части спектра — неоновую лампу.

Водородная лампа. В опытах по измерению длин волн бальмеровской серии источником служит водородная трубка Н-образной формы, питаемая от катушки Румкорфа.

Для увеличения яркости интересующих нас линий атомарного водорода в состав газа, которым заполняют трубку при ее изготовлении, добавляют пары воды. Молекулы воды в электрическом разряде разлагаются, образуя атомарный водород.

2 Изучение молекулярного спектра йода

1. Источник сплошного спектра - лампу накаливания 1, питаемую от блока питания 5
2. Поглощающую среду - кювету 2 с кристаллами йода, которая подогревается резистором, подключенным вместе с лампой накаливания к блоку питания 5
3. Монохроматор УМ-2 3 (Рис. 4)
4. Линзу 4, формирующая пучок света, проходящий через кювету 2 и сфокусированный на входной щели монохроматора 3

3

3 Выполнение задания

3.1 Градуировка спектрометра

Проградуируем спектрометр по спектрам неона и ртути и построим градуировочную кривую, где по оси X отложены градусные деления барабана, а по оси Y - длины волн соответствующих линий:

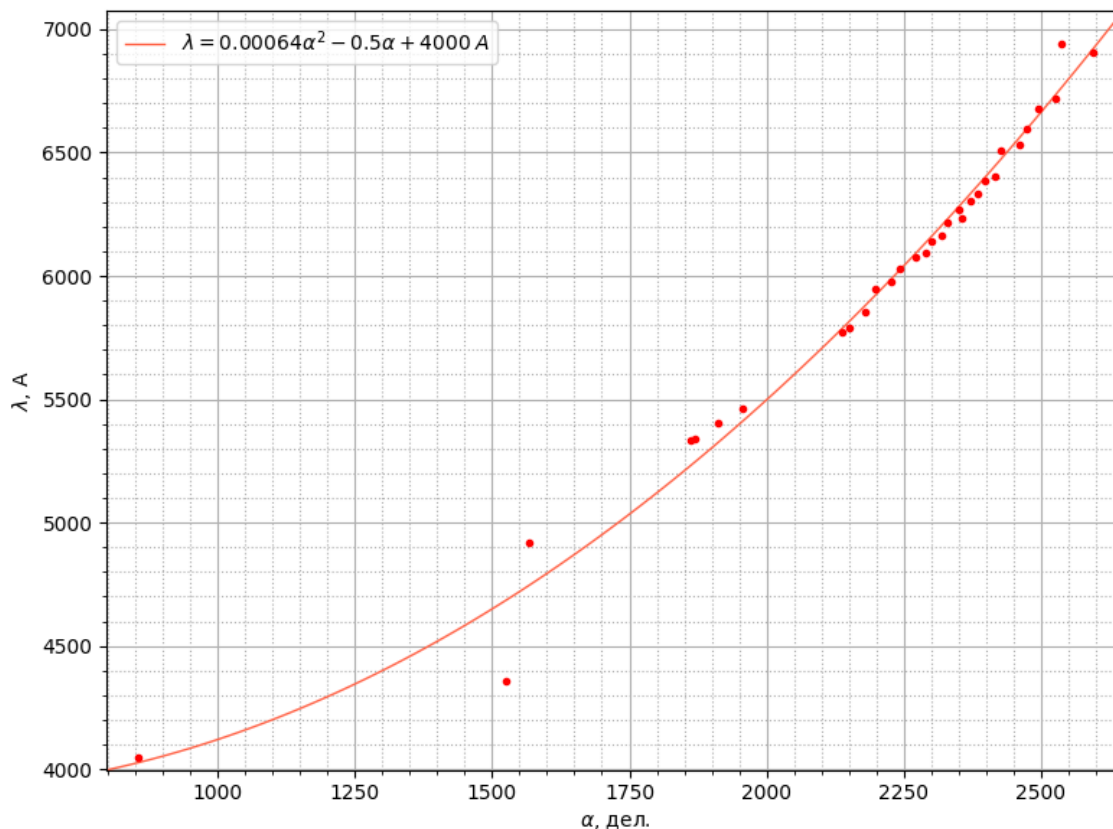


Рис. 6: Градуировочная кривая для барабана монохроматора

Коэффициенты в уравнении аппроксимирующей параболы :

$$a = (73 \pm 8) \cdot 10^{-5}, \quad b = (-53 \pm 29) \cdot 10^{-2}, \quad c = (40 \pm 2) \cdot 10^2$$

3.2 Спектр водорода

Установим на скамью водородную лампу и включим ее в сеть. Измерим положение линий H_α , H_β , H_γ и определим с помощью калибровочного графика соответствующие им длины волн, занесем это в [Таблицу 1](#)

	дел, °	λ , Å	$\delta\lambda$, Å	$\lambda_{\text{теор}}$, Å	R , см^{-1}	δR , см^{-1}
H_α	2489	6634	935	6563	108 531,8	15 296,5
H_β	1474	4614	545	4861	115 590,2	13 653,4
H_γ	821	4008	369	4341	118 810,0	10 938,3

Таблица 1: Положение линий H_α , H_β , H_γ

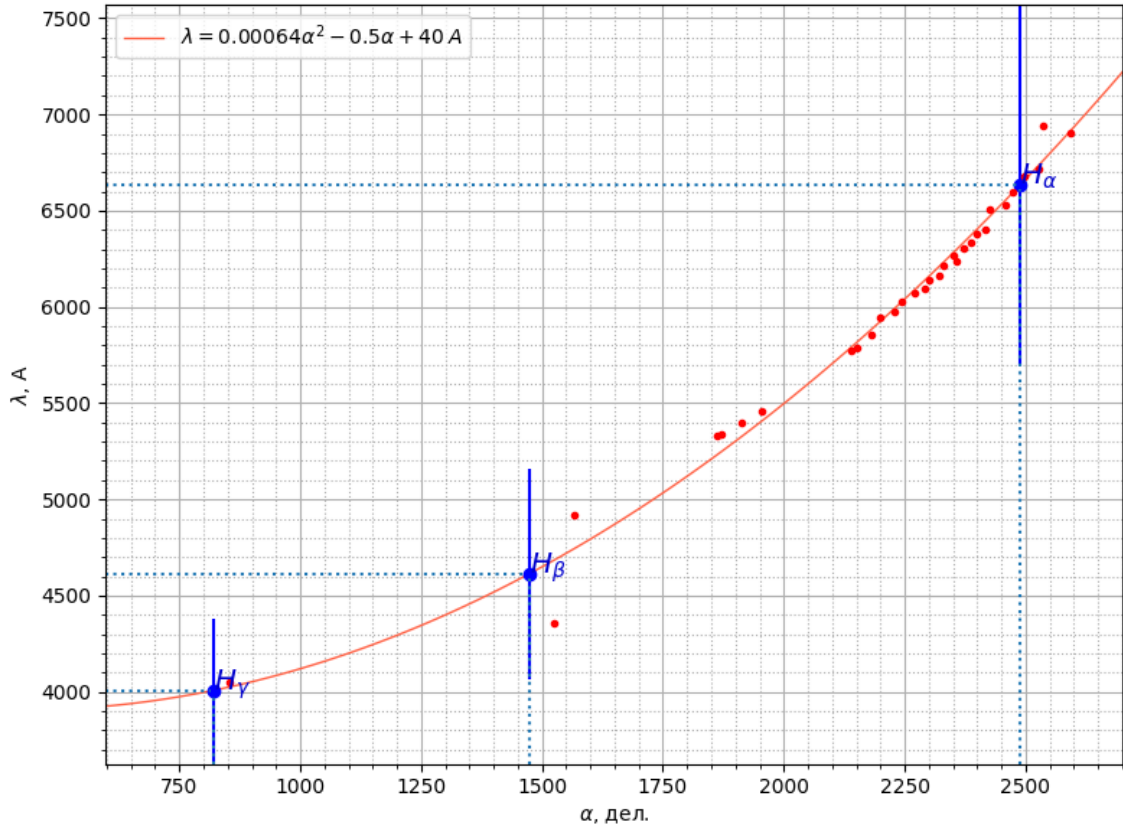


Рис. 7: Положение линий H_α , H_β , H_γ

Проверим, что отношение длин волн водородных линий соответствуют [Формуле \(1\)](#) серийной закономерности и для каждой из линий вычислим значение постоянной Ридберга, занесем результаты в [Таблицу 1](#).

Из [Формулы \(1\)](#) следует, что

$$0.69 = \frac{\lambda_\beta}{\lambda_\alpha} = \frac{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)}{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)} = 0.74$$

$$0.56 = \frac{\lambda_\gamma}{\lambda_\beta} = \frac{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)}{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right)} = 0.89$$

Среднее значение вычисленной постоянной Ридберга :

$$R = (114\,310,7 \pm 23\,238,9) \text{ см}^{-1} \quad (4)$$

Эмперическое же значение:

$$R = 109\,677,6 \text{ см}^{-1}$$

3.3 Спектр йода

Установим на скамью кювету с йодом и лампу накаливания. Качественно сопоставим наблюдаемый спектр со спектром поглощения, изображенным на Рис. 3

Определим и запишем в Таблицу 2 деления барабана монохроматора n , соответствующие:

1. линии $h\nu_{1,0}$ - одной из самых длинноволновых хорошо видимых линий поглощения ($n_{1,0}$)
2. линии $h\nu_{1,5}$ - шестой по счету от выбранной длинноволновой линии ($n_{1,5}$)
3. $h\nu_{гр}$ - границе схождения спектра, т.е. началу сплошного спектра ($n_{гр}$)

Протрем это дважды для понимания точности измерения...

По градуировочной кривой монохроматора определим длины волн линий поглощения йода, соответствующие делениям барабана монохроматора $n_{1,0}$, $n_{1,5}$, $n_{гр}$, запишем результаты в Таблицу 2

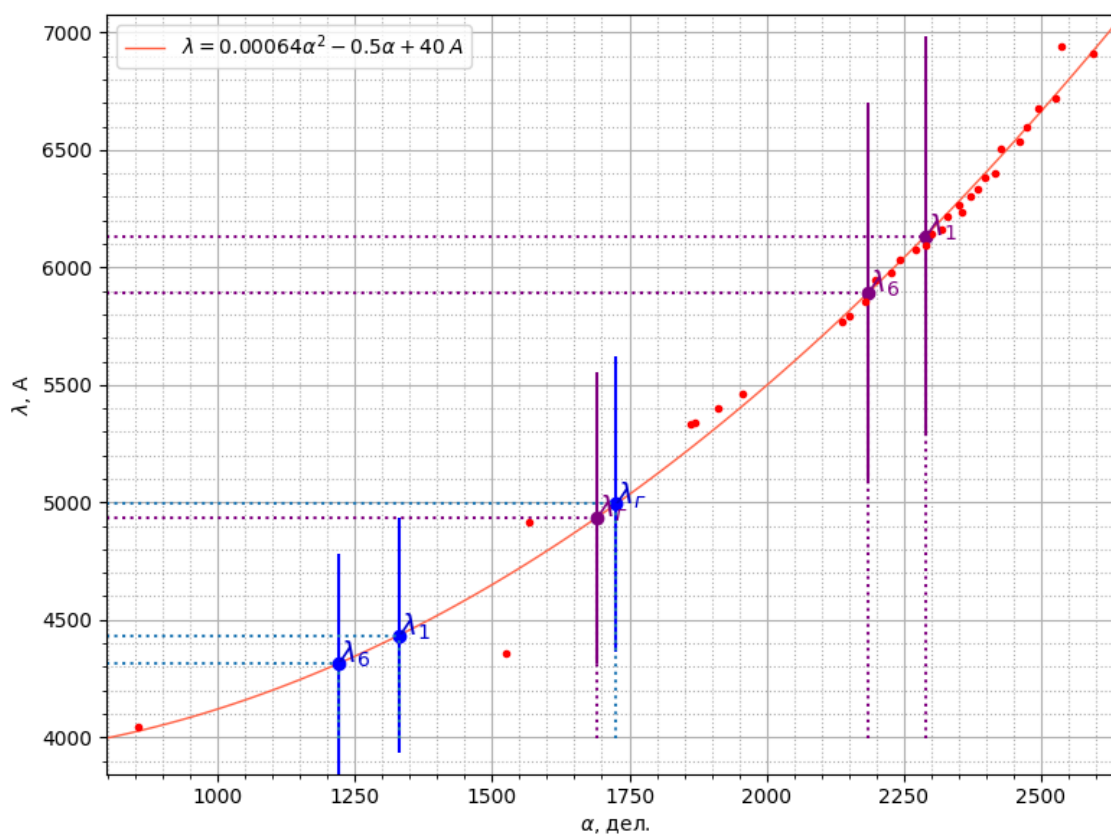


Рис. 8: Положение линий $n_{1,0}$, $n_{1,5}$, $n_{гр}$

1 измерение					
	дел, °	λ , Å	$\delta\lambda$, Å	ν , $10^{15} \cdot c^{-1}$	$\delta\nu$, $10^{15} \cdot c^{-1}$
$n_{1,0}$	1330	4400	502	0,68	0,08
$n_{1,5}$	1220	4314	470	0,70	0,08
$n_{гр}$	1726	4993	631	0,60	0,08
2 измерение					
	дел, °	λ , Å	$\delta\lambda$, Å	ν , $10^{15} \cdot c^{-1}$	$\delta\nu$, $10^{15} \cdot c^{-1}$
$n_{1,0}$	2289	6132	849	0,49	0,06
$n_{1,5}$	2186	5894	806	0,51	0,06
$n_{гр}$	1690	4934	618	0,60	0,08

Таблица 2: Положение линий $n_{1,0}$, $n_{1,5}$, $n_{гр}$

Вычислим энергию колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода:

$$h\nu_2 = \frac{h\nu_{1,5} - h\nu_{1,0}}{5} = 4,3 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{(0,70 - 0,68) \cdot 10^{15}}{5} = (0,097 \pm 0,13) \text{ эВ} \quad (5)$$

Используя полученные в работе результаты, а также данные о том, что энергия колебательного кванта основного состояния $h\nu_1 = 0,027 \text{ эВ}$, а энергия возбуждения атома $E_a = 0,94 \text{ эВ}$, вычислим:

1. Энергию электронного перехода

$$\begin{aligned} h\nu_{эл} = E_2 - E_1 &\stackrel{\text{Формула(3)}}{=} h\nu_{0,n_2} - \left(n_2 + \frac{1}{2}\right) h\nu_2 + \frac{1}{2} h\nu_1 = h\nu_{1,n_2} - \left(n_2 + \frac{1}{2}\right) h\nu_2 + \frac{3}{2} h\nu_1 = \\ &= h\nu_{1,0} - \left(\frac{1}{2}\right) h\nu_2 + \frac{3}{2} h\nu_1 = (2,3 \pm 0,4) \text{ эВ} \end{aligned}$$

2. Энергию диссоциации молекулы в основном состоянии $D1$

$$D1 \stackrel{\text{Рис.2}}{=} h\nu_{гр} - E_a = 1,64 \pm 0,34 \text{ эВ} \quad (6)$$

3. Энергию диссоциации молекулы в возбужденном состоянии $D2$

$$D2 \stackrel{\text{Рис.2}}{=} h\nu_{гр} - h\nu_{эл} = 0,28 \pm 0,41 \text{ эВ} \quad (7)$$

4 Итоги

В данной работе мы

1. Прокалибровали барабан спектрометра по спектрам неона и ртути (см. [Рис. 6](#))
2. Определили координаты линий бальмеровской серии атомарного водорода (см. [Рис. 7](#) и [Таблицу 1](#)) и по результатам измерений определили постоянную Ридберга R ([4](#))
3. Определили координаты нескольких линий молекулярного спектра йода (см. [Рис. 8](#) и [Таблицу 2](#)); по результатам вычислили энергию колебательного кванта молекулы йода и энергию ее диссоциации в основном и возбужденном состояниях $h\nu_2$ ([5](#)), $D1$ ([6](#)), $D2$ ([7](#))