

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Физтех-школа биологической и медицинской физики



Лабораторная работа 2.2(2.3)
Изучение спектров атома водорода и молекулы
йода

Авторы:
Ирина Веретененко
Б06-804

Долгопрудный 2020

Введение

Цель работы:

1. Провести калибровку барабана спектрометра по спектрам неона и ртути
2. Определить длины волн нескольких первых спектральных линий серии Бальмера для водорода, рассчитать постоянную Ридберга
3. Определить длины волн нескольких первых спектральных линий нулевой серии Деландера молекулы йода, вычислить энергию колебательного кванта, энергию диссоциации в основном и возбужденном состоянии

В работе используются: Стекло-призменный монохроматор-спектрофотометр УМ-2, водородная лампа, лампа накаливания, кристаллы йода

Теория

А. Изучение спектра атома водорода

Атомный спектр - это спектр, получающийся при испускании/поглощении света свободным атомом.

Обобщенная формула Бальмера (получена экспериментально):

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

где

- λ_{mn} - длина волны, на которой может поглощать/излучать водородоподобный атом
- $R = 109677,6 \text{ см}^{-1}$ - постоянная Ридберга
- Z - заряд ядра атома
- $n, m \in \mathbb{Z}$

Энергетические состояния электрона в атоме водорода (получены из постулатов Бора):

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

В данной работе изучается серия Бальмера ($n = 2$), линии которой лежат в видимой области. Первые 4 линии этой серии обозначаются $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$. Для них $m = 3, 4, 5, 6$ соответственно.

В. Изучение молекулярного спектра йода

Энергия молекулы (считая, что возбуждения независимы):

$$E \approx E_{\text{эл}} + E_{\text{колеб}} + E_{\text{вращ}}$$

1. Электронные уровни молекулы (стационарные состояния) аналогичны уровням энергии изолированных атомов

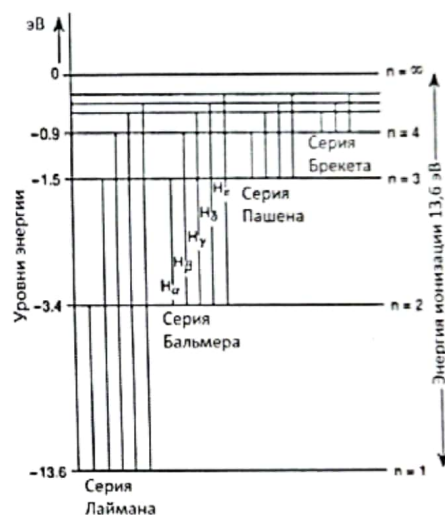


Рис. 1: Уровни энергии атома водорода. Спектральные серии

2. Колебательные возбуждения возникают при смещении атомов в молекуле от равновесных положений. Энергия колебаний атомов молекулы на электронном уровне $E = \hbar\omega_0$:

$$E_{\text{колеб}} = \hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right) - \hbar\omega_0 x_n \left(n + \frac{1}{2}\right)^2$$

Первое слагаемое - энергия гармонического осциллятора с частотой ω_0 (n - колебательное квантовое число), второе - отступление от гармонического закона (x_n - коэффициент агармонизма).

На рис.2 слева показан график потенциальной энергии в зависимости от расстояния между ядрами для 2-атомной молекулы на фиксированном электронном уровне. На малых расстояниях кривая - парабола, нижние уровни энергии близки к уровням гармонического осциллятора, поэтому при малых n вторым слагаемым можно пренебречь. Но при увеличении расстояния агармоничность начинает давать все больший вклад, потенциальная энергия стремится к постоянному значению. В этот момент происходит **диссоциация молекулы**. Энергия диссоциации обозначена D . Выше энергии диссоциации мы видим непрерывный спектр.

3. Вращательные возбуждения - дискретные состояния, соответствующие вращению молекулы как целого вокруг некоторой оси.

Оптические переходы (переходы, связанные с излучением фотонов в видимом диапазоне длин волн) соответствуют переходом между различными электронными состояниями. При этом происходят изменения вращательного и колебательного состояний.

В данной работе будет исследоваться спектр поглощения паров йода (I_2) в видимой области. Можно оценить, что для двухатомной молекулы

$$\omega_{\text{эл}} : \omega_{\text{колеб}} : \omega_{\text{вращ}} = 1 : 10^{-3} : 10^{-6}$$

Так как энергия вращательных движений в 10^6 раз меньше электронной, то в видимой области наблюдаются только электронно-колебательные спектры молекул.

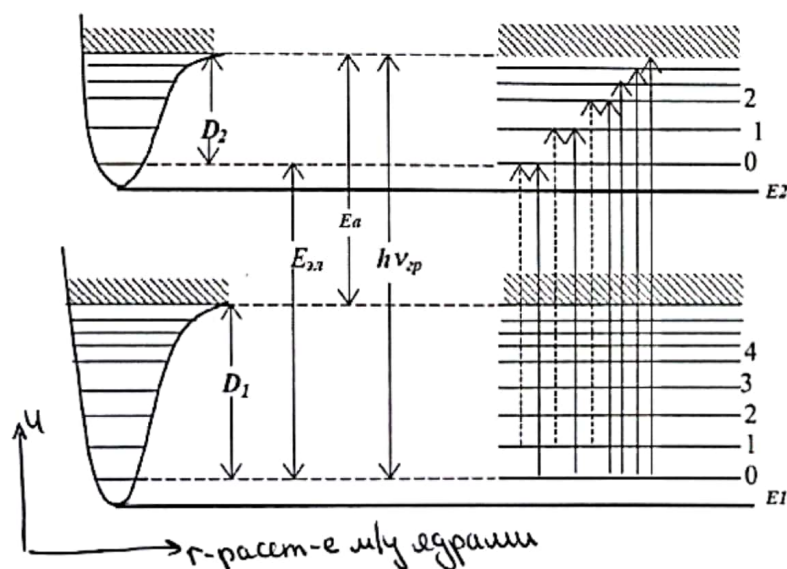


Рис. 2: Структура электронно-колебательного спектра поглощения молекулы йода в видимой области. E_1 - основное состояние, E_2 - возбужденное. Тонкие горизонтальные линии - колебательные уровни энергии для данных состояний. Косые штрихи - области непрерывного спектра

Серии Деландера - это серии переходов между соседними электронными состояниями, соответствующие одному начальному колебательному состоянию. Можно оценить, что самой интенсивной будет 0 серия, а серии больше 3-й наблюдаться практически не будут (т.к. на исходном колебательном уровне не будет достаточного числа электронов)

Экспериментальная установка

А. Изучение спектра атома водорода

Основные элементы спектрометра:

- Входная щель 1
- Колиматорный объектив 2
- Сложная спектральная призма 3, состоящая из склеенных призм Π_1 , Π_2 , Π_3
- Зрительная труба: объектив 4 и окуляр 5
- Поворотный столик 6
- Микрометрические винты 7-9
- Острие указателя 10
- Массивный корпус 11

Источник света - водородная трубка

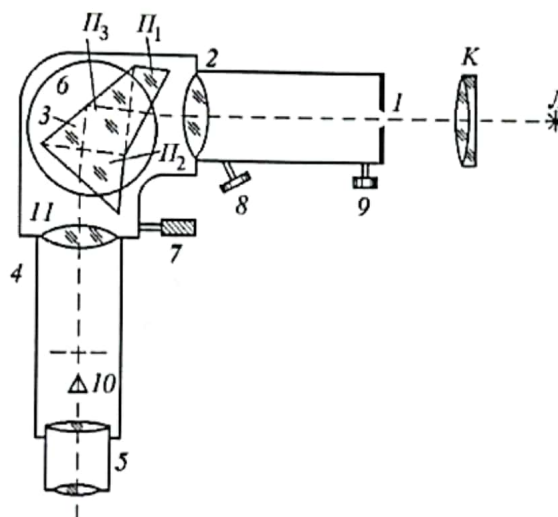


Рис. 3: Стеклопризменный монохроматор-спектрометр УМ-2, диапазон измеряемых длин волн 0.38-1 мкм

В. Изучение молекулярного спектра йода

Основные элементы установки:

- Лампа накаливания 1- источник сплошного спектра
- Блок питания 2
- Кювета с исследуемым веществом 3- поглощающая среда
- Линза 4
- Монохроматор УМ-2 5

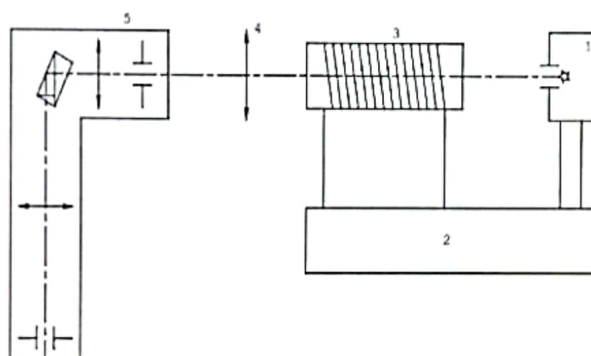


Рис. 4: Установка для измерения спектра поглощения йода

Ход работы и обработка результатов

Калибровка барабана спектрофотометра

Проградуируем спектрофотометр по известным спектрам неона и ртути. По результатам измерений построим калибровочный график, переводящий показания барабана спектрофотометра, настроенного на спектральную линию, в соответствующую этой линии длину волны.

неон		ртуть	
$\lambda, \text{Å}$	x°	$\lambda, \text{Å}$	x°
7032	2944	6907	2910
6929	2914	6234	2672
6717	2848	5791	2478
6678	2836	5770	2468
6599	2808	5461	2290
6533	2788	4916	1862
6507	2776	4358	1198
6402	2744	4047	634
6383	2734		
6334	2714		
6305	2700		
6267	2688		
6217	2666		
6164	2644		
6143	2634		
6096	2616		
6074	2606		
6030	2584		
5976	2562		
5945	2548		
5882	2512		
5852	2502		
5401	2238		
5341	2194		
5331	2190		

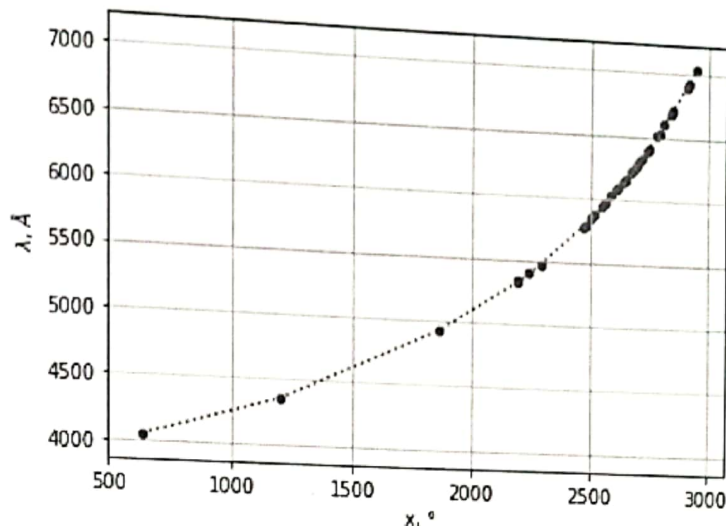


Рис. 5: калибровочный график
Уравнение калибровочной кривой:

$$\lambda, \text{Å} = a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$$

$$a_4 = 1.225 \cdot 10^{-10}, a_3 = -6.545 \cdot 10^{-7}, a_2 = 1.511 \cdot 10^{-3},$$

$$a_1 = -9.335 \cdot 10^{-1}, a_0 = 4.179 \cdot 10^3$$

Спектр атома водорода

- Измерим положение линий спектра атома водорода $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$ (последняя линия H_δ не видна).
- Из уравнения калибровочной кривой найдем соответствующие линиям спектра длины волн.

Формулы для расчета ($\sigma x = 10^\circ$ - цена деления барабана 2 + неточности наведения прибора на нужную длину волны):

$$\lambda, \text{Å} = a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$$

$$\sigma \lambda = (a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x^3) \cdot \sigma x$$

Также рассчитаем для каждой длины волны ее теоретическое значение

$$\lambda = \frac{1}{R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}, R_{\text{теор}} = 109677.6 \text{ см}^{-1}$$

- Для каждой линии рассчитаем постоянную Ридберга и найдем среднее значение. Формулы для расчета ($n = 2, m = 3, 4, 5$, заряд ядра водорода $Z = 1$):

$$R = \frac{1}{\lambda_{nm} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)}, \sigma R = \frac{\sigma \lambda_{nm}}{\lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)}$$

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{3}, \sigma \bar{R} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2} \sum (R_i - \bar{R})^2}$$

	x°	λ, A	$\sigma \lambda, A$	n	m	$R, \text{см}^{-1}$	$\sigma R, \text{см}^{-1}$	$\lambda_{\text{теор}}, A$
H_α	2814	6610	30	2	3	108900	500	6565
H_β	1802	4860	10	2	4	109600	200	4863
H_γ	1162	4331	7	2	5	109900	200	4342

Экспериментальное значение постоянной Ридберга.

$$\bar{R} = (109500 \pm 300) \text{см}^{-1}$$

Полученное значение хорошо согласуется с теоретическим $R_{\text{теор}} = 109677.6 \text{см}^{-1}$

- Проверим, что отношение длин волн соответствует формуле серийной закономерности (в принципе, это видно из того, что каждая из длин волн соответствует своему теоретическому значению в пределах погрешности)

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} \sim \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \Rightarrow \frac{\lambda_{nm_1}}{\lambda_{nm_2}} = \frac{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m_2^2}}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m_1^2}}$$

$$\sigma\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\left(\frac{\sigma \lambda_1}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \lambda_2}{\lambda_2}\right)^2}$$

$$\frac{\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}}{\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}} = 1.35, \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_\beta} = 1.36 \pm 0.01$$

$$\frac{\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}}{\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}} = 1.12, \frac{\lambda_\beta}{\lambda_\gamma} = 1.12 \pm 0.01$$

Спектр паров йода

- На установке получим спектр йода. Примерный вид спектра (рис 6)
- Снимем следующие показания:

- линия $h\nu_{10}$ - одна из самых длинноволновых линий спектра (\Rightarrow одна из самых маленьких частот/энергий)
- линия $h\nu_{15}$ - шестая по счету от $h\nu_{10}$
- линия $h\nu_{\text{гр}}$ - на границе спектра поглощения (самая коротковолновая линия \Rightarrow самая большая частота и энергия)

По полученным значениям длин волн рассчитаем энергии соответствующих переходов по формуле $E = \frac{hc}{\lambda}$, $h = 4.135 \cdot 10^{-15} \text{эВ}$, $E = \frac{hc}{\lambda}$. Так как эксперимент был неточным из-за засветки и слишком маленького расстояния между спектральными линиями (по сравнению с предыдущим опытом), то при расчетах погрешность измерения положения спектральных линий увеличена до $\sigma x = 20^\circ$ для 10 и 15, до $\sigma x = 50^\circ$ для групповой - там было совсем неточно.

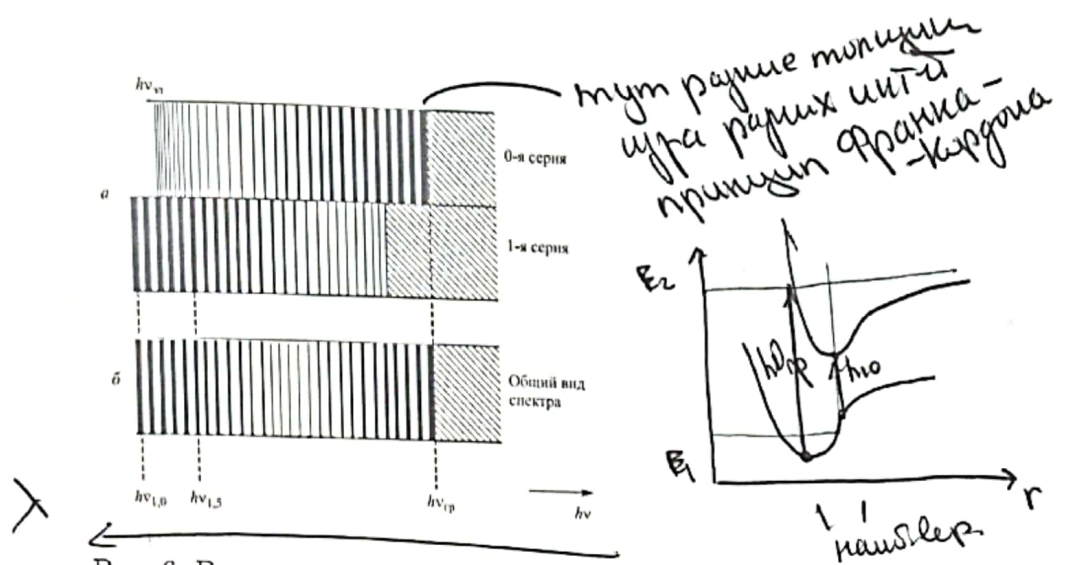


Рис. 6: Вид спектра в глазок установки

	x°	λ, A	$\sigma\lambda, A$	$E, \text{эВ}$	$\sigma E, \text{эВ}$
10	2682	6250	50	1,98	0,02
15	2578	6010	40	2,06	0,02
гр	1192	4352	35	2,85	0,03

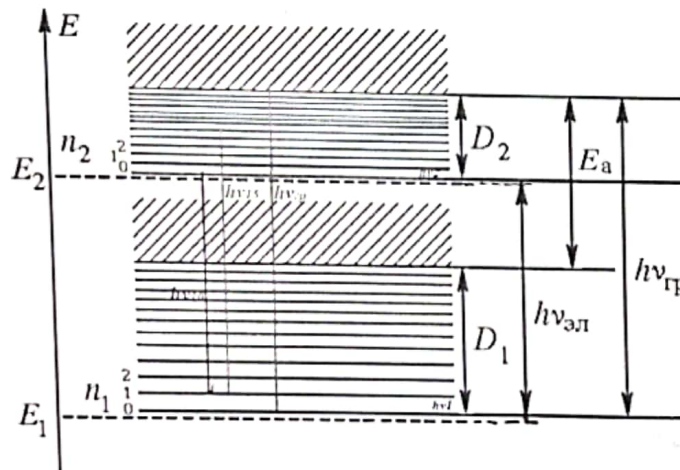


Рис. 7: Уровни энергии молекулы йода. E_1 - основное состояние, E_2 - возбужденное состояние

- Формула для n-го колебательного уровня энергии в электронном состоянии $E_i = h\nu_i$ при условии пренебрежения ангармонизмом (допустимо при малых n):

$$E_{i_n} = E_i + h\nu_i(n + \frac{1}{2})$$

Поэтому для расчета энергии колебательного кванта в возбужденном состоянии (2) можно воспользоваться формулой

$$h\nu_2 = \frac{h\nu_{15} - h\nu_{10}}{5}, \sigma(h\nu_2) = \frac{\sqrt{\sigma^2(h\nu_{15}) + \sigma^2(h\nu_{10})}}{5} \Rightarrow h\nu_2 = (0.016 \pm 0.005) \text{эВ}$$

- Энергия электронного перехода (с учетом $h\nu_1 = 0.027 \text{эВ}$)

$$h\nu_{эл} = h\nu_{10} - h\nu_2(0 + \frac{1}{2}) + h\nu_1(1 + \frac{1}{2}), \sigma(h\nu_{эл}) = \sqrt{\sigma^2(h\nu_{10}) + \frac{\sigma^2(h\nu_2)}{4}} \Rightarrow h\nu_{эл} = (2.01 \pm 0.02) \text{эВ}$$

$\begin{matrix} \nearrow \\ \searrow \end{matrix} \begin{matrix} E_2 - E_1 \\ E_2 - E_1 \end{matrix}$

- Энергия диссоциации молекулы йода в основном состоянии (с учетом энергии возбуждения $E_a = 0.94 \text{ эВ}$)

$$D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_a, \sigma D_1 = \sigma(h\nu_{\text{гр}}) \Rightarrow \boxed{D_1 = (1.91 \pm 0.03) \text{ эВ}}$$

- Энергия диссоциации молекулы йода в возбужденном состоянии

$$D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}}, \sigma D_2 = \sqrt{\sigma^2(h\nu_{\text{гр}}) + \sigma^2(h\nu_{\text{эл}})} \Rightarrow \boxed{D_2 = (0.84 \pm 0.04) \text{ эВ}}$$

- Оценим достоверность полученных результатов. Так как экспериментально полученное $h\nu_{\text{гр}} = 2.85 \text{ эВ}$ выше теоретического значения 2.44 эВ , то рассчитанные энергии диссоциации тоже завышены по сравнению с теоретическими ($D_1 = 1.5425 \text{ эВ}$, $D_2 = 0.69 \text{ эВ}$). Такое расхождение произошло из-за очень нечеткой границы схождения спектра молекулы йода и усталости экспериментатора к концу проведения лабораторной работы.

Выводы

1. В ходе эксперимента по изучению спектра атома водорода проверено выполнение обобщенной формулы Бальмера для трех линий серии Бальмера, лежащих в видимой области. Экспериментально получена постоянная Ридберга $\tilde{R} = (109500 \pm 300) \text{ см}^{-1}$, совпадающая с теоретическим значением в пределах погрешности.
2. В ходе эксперимента по изучению спектра молекулы йода были рассчитаны энергии диссоциации молекулы в основном и возбужденном состоянии. Полученные значения близки к теоретическим, однако несколько завышены предположительно из-за ошибки экспериментатора и неточности методики эксперимента.