

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

---

## Работа 5.2.2/5.2.3

---

Сибгатуллин Булат, ФРКТ

**Цель работы:**

Исследовать спектральные закономерности в оптических спектрах водорода и дейтерия. По результатам измерений вычислить постоянные Ридберга для этих двух изотопов водорода, их потенциалы ионизации, изотопические сдвиги линий.

Исследовать спектр поглощения паров йода в видимой области; по результатам измерения вычислить энергию колебательного кванта молекулы йода и энергия её диссоциации в основном и возбужденном состояниях.

## 1 Теоретическая часть

### 1.1 Спектр водорода

Атом водорода является простейшей квантовой системой, для которой уравнение Шрёдингера может быть решено точно. Это также верно для водородоподобных атомов, то есть атомов с одним электроном на внешней оболочке. Из решения уравнения Шрёдингера следует, что внешний электрон в таких атомах обладает дискретным энергетическим спектром:

$$E_n = -\frac{m_e(Ze^2)^2}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (1)$$

где  $n$  есть номер энергетического уровня,  $Z$  есть зарядовое число ядра рассматриваемого атома, которое в случае атома водорода равно 1.

При переходе электрона с  $n$ -го на  $m$ -й уровень излучается фотон с энергией

$$E_\gamma = E_n - E_m = \frac{m_e e^2}{2\hbar^2} Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (2)$$

Длина волны соответствующего излучения  $\lambda_{n,m}$  связана с номерами уровней следующим соотношением:

$$\lambda_{n,m}^{-1} = \frac{m_e e^2}{4\pi\hbar^3 c} Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \text{Ry} Z^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (3)$$

где  $\text{Ry} = \frac{m_e e^2}{4\pi\hbar^3 c}$  есть постоянная Ридберга.

В данной работе будет исследоваться серия Бальмера атома водорода, в которой электроны совершают переходы с некоторого уровня  $n$  на уровень  $m = 2$ .

### 1.2 Спектр йода

В первом приближении энергия молекулы может быть представлена в виде:

$$E = E_e + E_o + E_r, \quad (4)$$

где  $E_e$  есть энергия электронных уровней,  $E_o$  есть энергия колебательных уровней,  $E_r$  есть энергия вращательных уровней.

В настоящей работе рассматриваются оптические переходы, то есть переходы, связанные с излучением фотонов в видимом диапазоне длин волн. Они соответствуют переходам между различными электронными состояниями. При этом также происходят изменения вращательного и колебательного состояний, однако в реальности ввиду малости характерных энергий вращательные переходы ненаблюдаемы.

Более конкретно, изучаются переходы из колебательного состояния с номером  $n_1$  основного электронного уровня с энергией  $E_1$  в колебательное состояние с номером  $n_2$  на электронный уровень с энергией  $E_2$ . Энергия таких переходов описывается формулой:

$$h\nu_{n_1, n_2} = (E_2 - E_1) + h\nu_2(n_2 + \frac{1}{2}) - h\nu_1(n_1 + \frac{1}{2}), \quad (5)$$

где  $\nu_1$  и  $\nu_2$  суть энергии колебательных квантов на электронных уровнях с энергиями  $E_1$  и  $E_2$ .

При достаточно больших квантовых числах  $n_1$  и  $n_2$  колебательные уровни переходят в непрерывный спектр, что соответствует диссоциации молекулы. Наименьшая энергия, которую нужно сообщить молекуле в нижайшем колебательном состоянии, чтобы она диссоциировала, называется энергией диссоциации.

В данной работе определяются энергии диссоциации на первых двух электронных уровнях.

## 2 Экспериментальная установка

Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется стеклянный-призмный монохроматор-спектрометр УМ-2 (универсальный монохроматор), предназначенный для спектральных исследований в диапазоне от 0,38 до 1,00 мкм. Основные элементы монохроматора представлены на 1а.

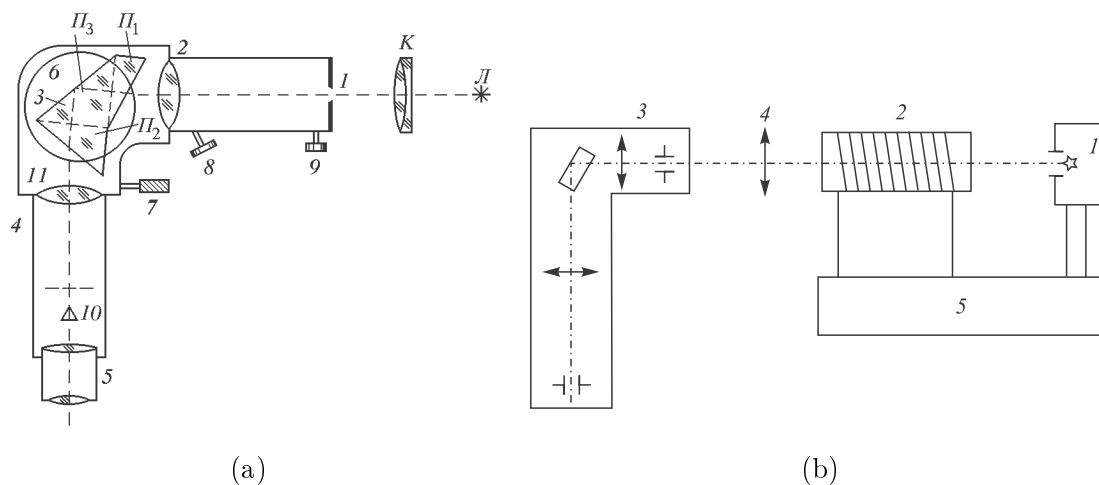


Рис. 1: Экспериментальная установка.

В нашей работе спектр поглощения паров йода наблюдается визуально на фоне сплошного спектра лампы накаливания 1, питаемой от блока питания 2 (рис. 1б).

## 3 Выполнение работы

1. Выполним градуировку монохроматора. Проведем серию измерений для спектра неона и ртути. Данные запишем в таблицу.
2. Построим график по получившимся данным.

Итоговая функция представима в виде:

$\theta$ , дел	2599	2576	2515	2499	2462	2445	2433	2399	2391	2370	2344	2303	2300	2271	2257
$\lambda$ , А	7032	6929	6717	6678	6599	6533	6507	6402	6383	6305	6267	6164	6143	6096	6074
$\theta$ , дел	2219	2208	2183	2154	1892	1855	1848	2568	2328	2129	2120	1929	1520	864	310
$\lambda$ , А	5976	5945	5882	5852	5401	5341	5331	6907	6234	5791	5770	5460	4916	4358	4047

Рис. 2: Данные для градуировки монохроматора

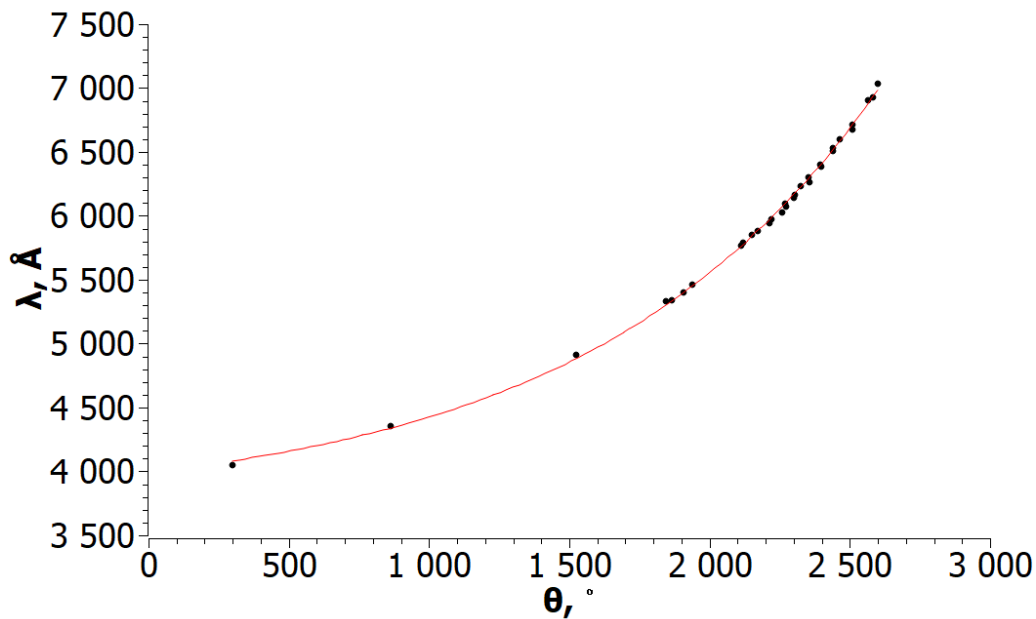


Рис. 3: График градуировки монохроматора

$$y = a + b \cdot \exp^{x/c}$$

Получаем значения для коэффициентов:

	Значение	Погрешность
a	3727	36
b	267	16
c	1039	2

Имеем:

$$y = 3727 + 267 \cdot \exp^{x/1039}$$

3. Проведем измерения для водорода и заодно проверим формулу Бальмера (Таблица 1):
4. Используем МНК, чтобы проверить, является ли зависимость  $\frac{1}{\lambda}(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2})$  линейной (проверить формулу Бальмера).

Получим зависимость вида  $y = ax + b$ :

	Значение	Погрешность
b	0.0170	0.0053
a	10.9567	0.0276

Линия спектра	$\theta, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$	$m$	$\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}$	$\frac{1}{\lambda}, 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$	$\sigma_{\frac{1}{\lambda}}, 10^{-4} \text{\AA}^{-1}$
$H_\alpha$	2452	6554	3	0.139	1.528	0.092
$H_\beta$	1464	4819	4	0.188	2.059	0.124
$H_\gamma$	838	4325	5	0.21	2.3	0.138
$H_\delta$	415	4125	6	0.222	2.436	0.146

Таблица 1: Определение линий спектра водорода

Определим постоянную Ридберга:

$$R = 108453 \pm 6574 \text{см}^{-1}$$

5. Перейдем к измерениям спектра молекулы йода. Найдем  $\theta_{1,0}, \theta_{1,5}, \theta_{\text{гр}}$ :

- $\theta_{1,0} \approx 2386 \Rightarrow \lambda_{1,0} \approx 6380 \text{\AA} \Rightarrow \nu_{1,0} \approx 4,7 \cdot 10^{14} \Rightarrow h\nu_{1,0} \approx 1,95$
- $\theta_{1,5} \approx 2282 \Rightarrow \lambda_{1,5} \approx 6128 \text{\AA} \Rightarrow \nu_{1,5} \approx 4,9 \cdot 10^{14} \Rightarrow h\nu_{1,5} \approx 2,03$
- $\theta \approx 1616 \Rightarrow \lambda \approx 4991 \text{\AA} \Rightarrow \nu \approx 6,0 \cdot 10^{14} \Rightarrow h\nu \approx 2,47$

Отсюда энергия колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода согласно (5)

$$h\nu_2 = \frac{h\nu_{1,5} - h\nu_{1,0}}{5} = 0,0164 \pm 0,0079 \quad (6)$$

Вычислим по формуле (5) разницу  $E_2 - E_1 = h\nu$ , сделав сдвиг серии на 1 (вычтя  $h\nu_1$ ):

$$h\nu = h\nu(1,0) - \frac{1}{2}h\nu_2 + \frac{3}{2}h\nu_1 \approx 1,98 \pm 0,02 \quad (7)$$

Отсюда получаем энергии диссоциации частицы в основном ( $D_1$ ) и возбужденном состоянии, считая  $E_a = 0,94$  эВ:

## 4 Вывод

Мы изучили спектры в оптических спектрах водорода и йода, экспериментально проверили справедливость формулы Бальмера и нашли постоянную Ридберга, которая в пределах погрешность совпадает с табличной ( $R = 109678 \text{см}^{-1}$ ), заметим, что погрешность в большей степени возникает из-за представления зависимости калибровочных данных как функции экспоненты. Этот вклад ( $\approx 6\%$ ) влияет на погрешность на протяжении всех измерений. Оценили энергии квантов возбужденного состояния молекулы, энергию диссоциации частиц и энергию электронного перехода.