

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 5.2.2/5.2.3  
**Изучение спектров атома водорода;  
Изучение молекулярного спектра йода.**

Серебренников Даниил  
Группа Б02-826м

Долгопрудный, 2020 г.

### 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 энергию 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 [1a](#).

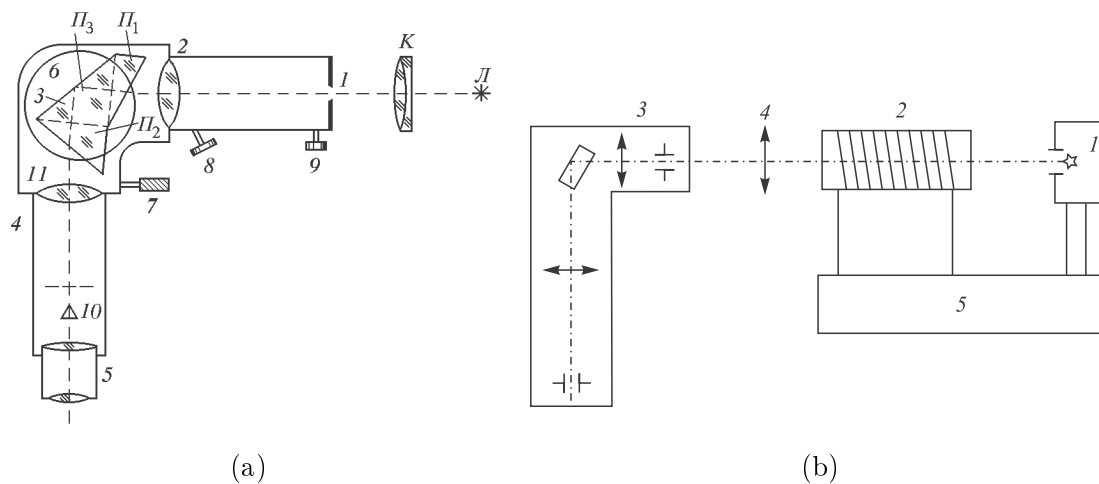


Рис. 1: Экспериментальная установка.

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

### 3 Экспериментальные данные

Таблица 1: Калибровка спектрометра.

$\theta$ , дел.	$\sigma_\theta$ , дел.	$\lambda$ , нм
6717	1	2558
6678		2542
6599		2516
6533		2494
6507		2482
6402		2450
6383		2438
6334		2422
6305		2410
6267		2396
6234		2374
6217		2372
6164		2350
6143		2340
6096		2322
6074		2310
6030		2290
5976		2266
5945		2246
5882		2222
5852		2204
5791		2176
5770		2164
5461		1986
5401		1944
4916		1558
4358		896
4047		340

## 4 Обработка результатов

Проградуируем спектрометр, для чего используем спектры неоновой и ртутной лампы, длины волн спектральных линий которых известны. Результаты измерений представлены в таблице 1.

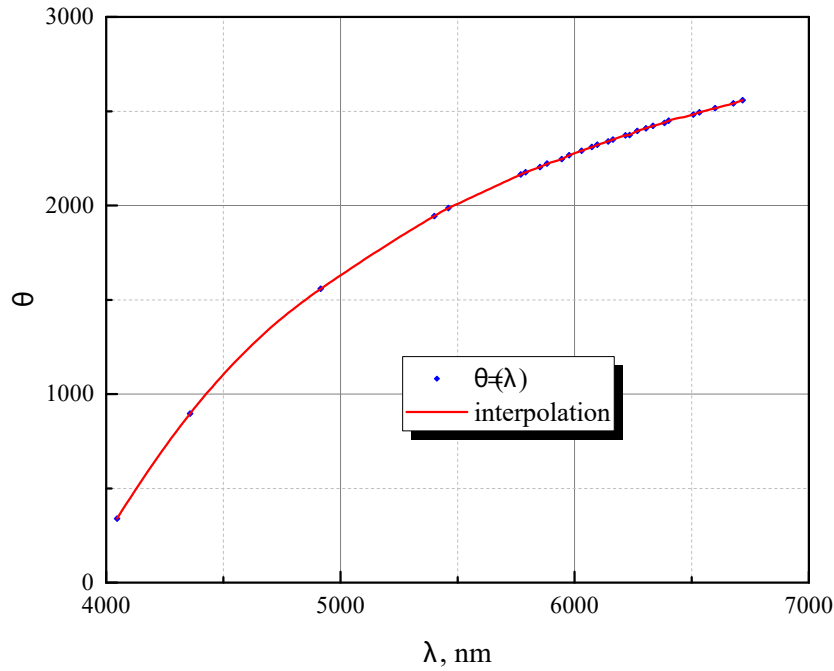


Рис. 2: Калибровка спектрометра.

Для интерполяции графика (2) на все промежуточные значения используем формулу Гартмана:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{C_0}{\theta - \theta_0},$$

где  $\lambda_0, C_0, \theta_0$  суть параметры, определяемые по трём ближайшим точкам графика.

Измерим положения трёх линий водорода из серии Бальмера —  $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$ . Линию  $H_\delta$  пронаблюдать не удалось ввиду её слабой интенсивности. Получили соответствующие показания спектрометра:

$$H_\alpha : 2500 \pm 1, H_\beta : 1508 \pm 1, H_\gamma : 874 \pm 1.$$

С учётом градуировки спектрометра получаем следующие длины волн:

$$H_\alpha = 656 \pm 2 \text{ нм}, H_\beta = 487 \pm 2 \text{ нм}, H_\gamma = 434 \pm 2 \text{ нм}.$$

Для каждой линии определим константу Ридберга по формуле (3), учитывая, что  $m = 2, Z = 1$ , а также, что для линии  $H_\alpha$  —  $n = 3$ , для линии  $H_\beta$  —  $n = 4$ , для линии  $H_\gamma$  —  $n = 5$ . Получаем следующие значения константы Ридберга:

$$R_{y_\alpha} = (0.0110 \pm 0.0001) \text{ нм}^{-1}, R_{y_\beta} = (0.0109 \pm 0.0001) \text{ нм}^{-1}, R_{y_\gamma} = (0.0109 \pm 0.0001) \text{ нм}^{-1}.$$

По МНК определяем наилучшее значение константы Ридберга, а также его погрешность:

$$R_{y_E} = (0.0109 \pm 0.0002) \text{ нм}^{-1}$$

Полученное значение в пределах погрешности совпадает с табличным значением:

$$R_y = 0.01097 \text{ нм}^{-1}.$$

Запишем показания спектрометра для следующих переходов в молекуле йода:  $\theta_{1,0}$  – переход из первого колебательного уровня основного состояния в нулевой колебательный уровень возбуждённого состояния,  $\theta_{1,5}$  – переход из первого колебательного уровня основного состояния в пятый колебательный уровень возбуждённого состояния,  $\theta_g$  – переход из нулевого колебательного уровня основного состояния в область непрерывного спектра возбуждённого состояния. Получаем следующие данные:

$$\theta_{1,0} = 2344 \pm 1, \quad \theta_{1,5} = 2242 \pm 1, \quad \theta_g = 1850 \pm 1,$$

откуда находим соответствующие длины волн:

$$\lambda_{1,0} = (615 \pm 2) \text{ нм}, \quad \lambda_{1,5} = (594 \pm 2) \text{ нм}, \quad \lambda_g = (522 \pm 2) \text{ нм}.$$

Определим энергию колебательного кванта возбуждённого состояния молекулы по формуле:

$$h\nu_2 = \frac{h\nu_{1,5} - h\nu_{0,5}}{5}.$$

Итого:

$$h\nu_2 = (0.014 \pm 0.002) \text{ эВ}$$

Вычислим энергию электронного перехода  $\Delta E = E_2 - E_1$ , энергию диссоциации  $D_1$  в основном состоянии и энергию диссоциации  $D_2$  в возбуждённом состоянии, если известно, что энергия колебательного кванта основного состояния есть  $h\nu_1 = 0,027 \text{ эВ}$ , а энергия возбуждения, то есть энергия перехода атома из области непрерывного спектра основного состояния в область непрерывного спектра возбуждённого состояния, равна  $E_A = 0.94 \text{ эВ}$ .

Имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} D_1 + E_A = h\nu_g, \\ h\nu_g = D_2 + \Delta E, \\ h\nu_{1,0} = \Delta E + h\nu_2 - \frac{3}{2}h\nu_1, \\ h\nu_{1,5} = \Delta E + \frac{11}{2}h\nu_2 - \frac{3}{2}h\nu_1. \end{cases}$$

Из неё находим все необходимые величины:

$$\Delta E = (2.050 \pm 0.002) \text{ эВ}, \quad D_1 = (1.436 \pm 0.002) \text{ эВ}, \quad D_2 = (0.326 \pm 0.002) \text{ эВ}.$$

## 5 Обсуждение результатов и выводы

В работе исследовались сериальные закономерности в оптическом спектре водорода и спектр поглощения паров йода в видимой области.

С помощью информации о спектральных линиях неона и ртути проградуирован спектрометр. Построен соответствующий график.

Получены длины волн линий  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  серии Бальмера, вычислена постоянная Ридберга. В рамках погрешности данные совпали с табличными.

Получены длины волн, соответствующие некоторым электронно-колебательным переходам из основного состояния в возбуждённое. Вычислены энергия колебательного кванта возбуждённого состояния молекулы, энергия электронного перехода, энергии диссоциации молекулы в основном и в возбуждённом состояниях.