

Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Работа 5.2.2/5.2.3

Балдин Виктор, 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 ν_1 и ν_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.

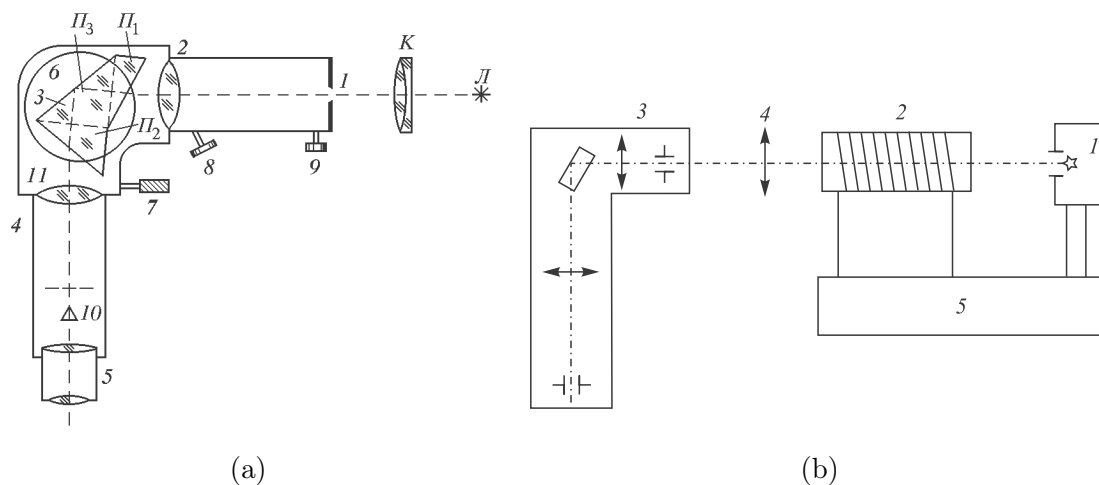


Рис. 1: Экспериментальная установка.

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:

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

Рис. 2: Данные для градуировки монохроматора

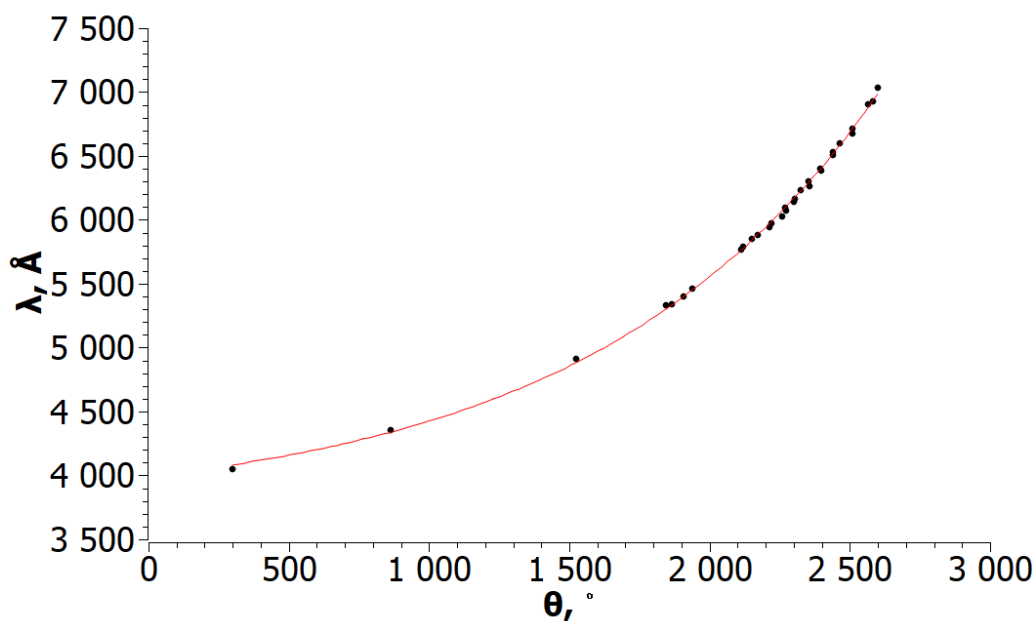


Рис. 3: График градуировки монохроматора

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

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 $\frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ 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_α | 2452 | 6554 | 3 | 0.139 | 1.528 | 0.092 |
| H_β | 1464 | 4819 | 4 | 0.188 | 2.059 | 0.124 |
| H_γ | 838 | 4325 | 5 | 0.21 | 2.3 | 0.138 |
| H_δ | 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 $E_a = 0,94 \text{ эВ}$:

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.