

Лабораторная работа №5.2.2(2.3)
Изучение спектров атомарного водорода и йода

Рожков А. В.

9 декабря 2025 г.

Цель работы: исследовать спектральные закономерности в оптических спектрах водорода; по результатам измерений вычислить постоянные Ридберга для водорода; 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.

В работе используются: стеклянно-призменный монохроматор УМ-2, неоновая лампа, ртутная лампа ПРК-4, водородная лампа, кювета с кристаллами йода с лампой накаливания.

1 Теоретические сведения

Изучение спектра 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. Если считать ядро неподвижным, то эти энергетические уровни определяются выражением

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

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

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

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

Длина волны соответствующего излучения λ_{mn} связана с номерами уровней следующим соотношением:

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

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

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

Спектр поглощения йода

В первом приближении энергия молекулы может быть представлена в виде:

$$E = E_{\text{эл}} + E_{\text{колеб}} + E_{\text{вращ}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{эл}}$ есть энергия электронных уровней, $E_{\text{колеб}}$ есть энергия колебательных уровней, $E_{\text{вращ}}$ 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 ненаблюдаются.

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 $h\nu_1$ и $h\nu_2$ 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.

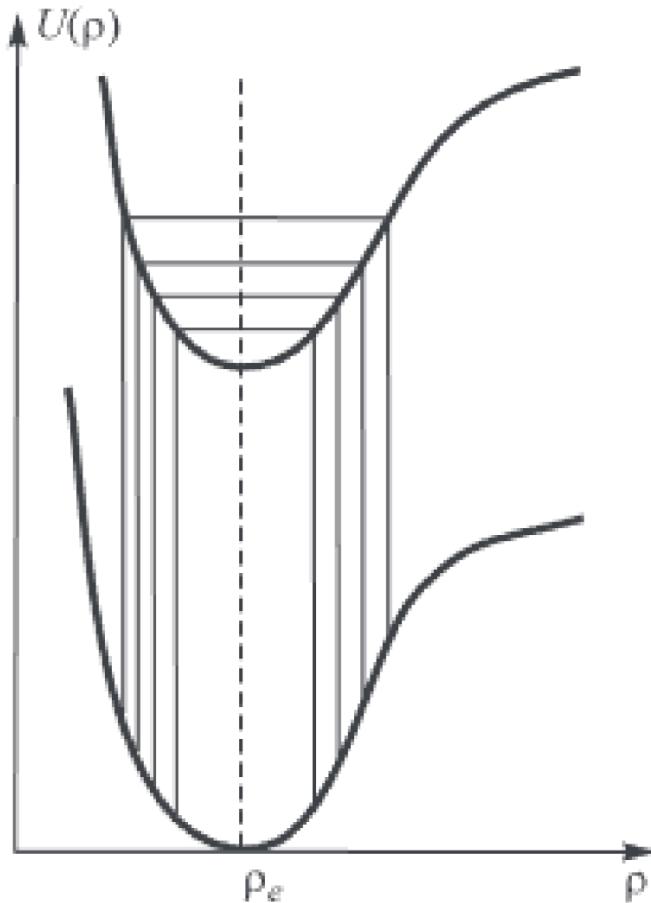


Рис. 1: Потенциальные кривые и характерные электронно-колебательные переходы

Серии Деландра в спектре йода

В данной работе изучается электронно-колебательный спектр поглощения паров йода I_2 в видимой области при температуре $T \approx 300$ К. Основной вклад дают переходы между колебательными подуровнями двух соседних электронных состояний:

$$(1, n_1) \rightarrow (2, n_2),$$

где индекс «1» обозначает основное электронное состояние, «2» — возбуждённое.

Все возможные линии поглощения удобно разбить на *серии Деландра*, каждая из которых соответствует фиксированному начальному колебательному уровню (например, $n_1 = 0$ или $n_1 = 1$), а конечный уровень $n_2 = 0, 1, 2, \dots$ меняется:

- 0-я серия: переходы из $n_1 = 0$ в $n_2 = 0, 1, 2, \dots$;
- 1-я серия: переходы из $n_1 = 1$ в $n_2 = 0, 1, 2, \dots$

При температуре около комнатной относительные заселённости колебательных уровней подчиняются распределению Больцмана:

$$N_n \propto e^{-E_n/kT}.$$

Расчёт показывает, что при $T \approx 300$ К выполняется примерно

$$N_0 : N_1 : N_2 \approx 1 : \frac{1}{3} : \frac{1}{10},$$

поэтому наибольший вклад дают 0-я и 1-я серии Деландра.

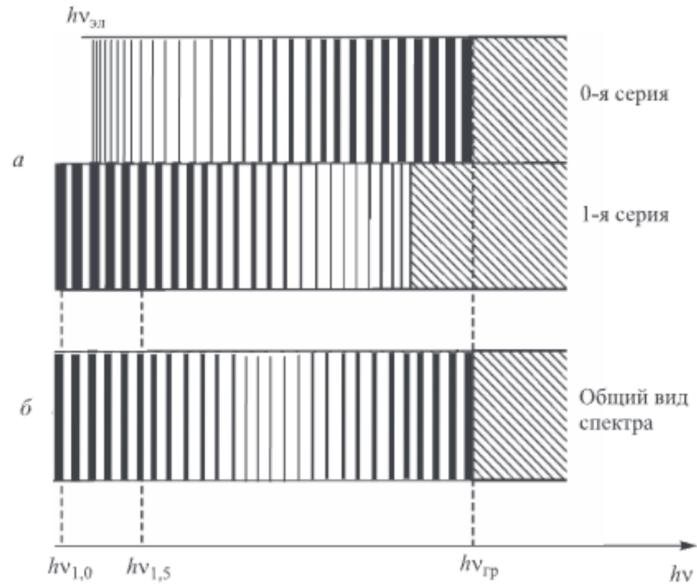


Рис. 2: Спектр поглощения паров йода

2 Экспериментальная установка

2.1 Измерение серии Бальмера

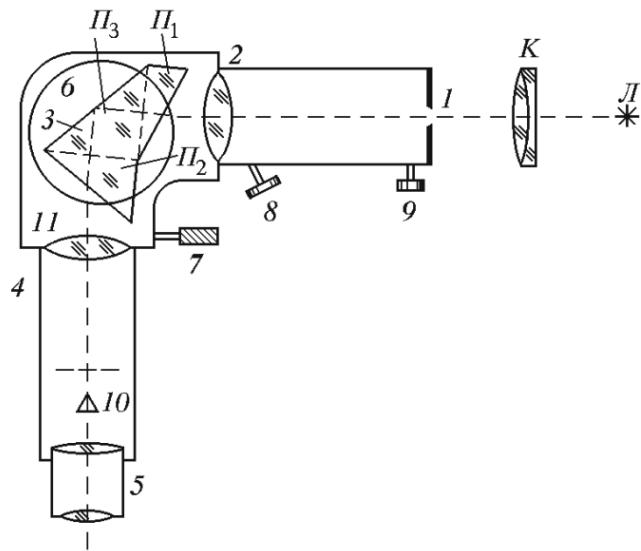


Рис. 3: Устройство монохроматора УМ-2

Для измерения длин волн спектральных линий используется монохроматор УМ-2, предназначенный для спектральных исследований в диапазоне от 0,38 до 1,00 мкм. Его устройство приведено на рис. 3.

В качестве источника используется водородная лампа в виде Н-образной трубки, питаемая от катушки Румкорфа

2.2 Измерение спектр поглощения паров йода

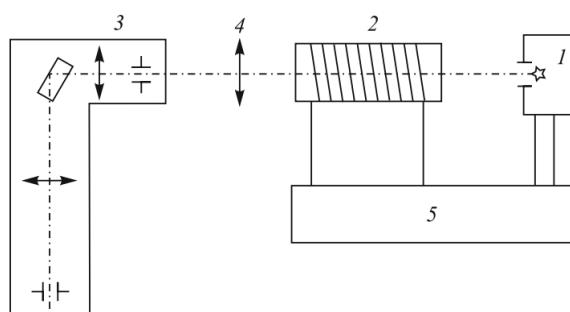


Рис. 4: Схема экспериментальной установки для получения спектра поглощения

Для получения спектра поглощения необходимы: 1) источник сплошного спектра - лампа накаливания; 2) поглощающая среда - кювета с исследуемым веществом; 3) спектральный прибор, регистрирующий спектр поглощения - монохроматор УМ-2.

3 Ход работы

3.1 Калибровка спектрометра

Откалибуем спектрометр УМ-3. Для этого установим неоновую лампу и отцентрируем и отъюстируем систему, таким образом, что изображение щели (спектр) и стрелка находилась в одной плоскости, при этом стрелка и спектр должны смещаться вместе при смещении точки наблюдения по горизонтали.

Рассмотрим 25 спектральных линий неона и поставим им в соответствие значение на барабане. Точность измерений угла поворота барабана $\sigma_d = 1^\circ$.

θ	$\lambda, \text{\AA}$
2918 \pm 2	7032
2892 \pm 2	6929
2824 \pm 2	6717
2812 \pm 2	6678
2786 \pm 2	6599
2764 \pm 2	6533
2754 \pm 2	6507
2712 \pm 2	6402
2704 \pm 2	6383
2688 \pm 2	6334
2676 \pm 2	6305
2662 \pm 2	6267
2642 \pm 2	6217
2620 \pm 2	6164
2610 \pm 2	6143
2592 \pm 2	6096
2582 \pm 2	6074
2562 \pm 2	6030
2538 \pm 2	5976
2524 \pm 2	5945
2492 \pm 2	5882
2478 \pm 2	5852
2214 \pm 2	5401

Таблица 1: Спектр неона

Аналогично поступаем для ртутной лампы.

θ	$\lambda, \text{\AA}$
2882 \pm 2	6907
2648 \pm 2	6234
2446 \pm 2	5791
2436 \pm 2	5770
2256 \pm 2	5461
1834 \pm 2	4916
1216 \pm 2	4358
614 \pm 2	4047

Таблица 2: Спектр ртути

Построим градуировочный график по полученным значениям спектральных линий неона и ртути. Искать зависимость $\lambda = f(\theta)$ будем в виде (дисперсионная формула Гартмана): $\lambda = a + \frac{b}{\theta - c}$

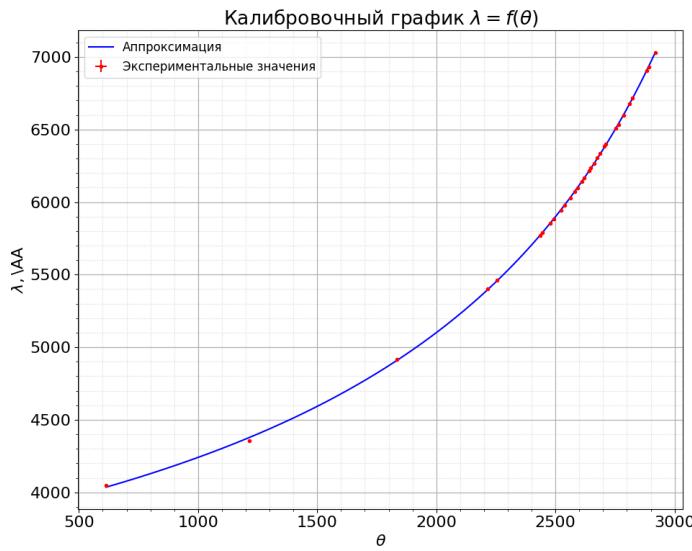


Рис. 5: Градуировочный график спектрометра УМ-2

Коэффициенты аппроксимации:

$$a = (2310 \pm 20) \text{ Å}$$

$$b = (-627 \pm 7) \cdot 10^4 \text{ Å}$$

$$c = (4248 \pm 11)$$

Погрешность по формуле $\sigma_\lambda = \sigma_\theta \frac{d\lambda}{d\theta}$

3.2 Спектральные линии водорода

Измерим положение линий водорода H_α , H_β , H_γ , H_δ и с помощью градуировочного графика определим длины волн.

	H_α	H_β	H_γ	H_δ
θ	2772 ± 2	1780 ± 2	1138 ± 2	710 ± 2
$\lambda, \text{Å}$	6561 ± 6	4852 ± 2	4327 ± 1	4082 ± 1
$\lambda_0, \text{Å}$	6563	4861	4341	4102
$R, \text{см}^{-1}$	109740 ± 10	109929 ± 9	110061 ± 7	110227 ± 6

Таблица 3: Результаты измерения для водорода

Полученные значения для спектральных линий водорода серии Бальмера совпадают с табличными значениями λ_0 .

Для серии Бальмера $n = 2$ величина m для первых четырех линий этой серии принимает значения 3, 4, 5, 6.

Для водорода

$$R = \frac{1}{\lambda_{mn}} \cdot \frac{m^2 n^2}{m^2 - n^2}$$

Среднее значение постоянной Ридберга для водорода $R_{\text{ср}} = (109990 \pm 100) \text{ см}^{-1}$.

Табличное значение постоянной Ридберга для водорода $R = 109677 \text{ см}^{-1}$.

3.3 Спектр поглощения йода

Теперь рассмотрим спектр поглощения йода. Измерим положение самой длинноволновой из наблюдавшихся линий поглощения $h\nu_{1,0}$, шестой по счёту от длинноволнового края $h\nu_{1,5}$ и границу схождения спектра $h\nu_{\text{тр}}$. Из градуировочного графика определяем соответствующие длины волн.

$$\lambda_{1,0} = (6236 \pm 5) \text{ \AA}$$

$$\lambda_{1,5} = (6036 \pm 4) \text{ \AA}$$

$$\lambda_{\text{тр}} = (5133 \pm 3) \text{ \AA}$$

Определим энергию колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода:

$$h\nu_2 = \frac{h\nu_{1,5} - h\nu_{1,0}}{5} = (0.0132 \pm 0.0004) \text{ эВ}$$

Энергия колебательного кванта основного состояния равно $h\nu_1 = 0.027$ эВ, энергия возбуждения атома равна $E_a = 0.94$ эВ. Вычислим энергию электронного перехода $h\nu_{\text{эл}}$, энергию диссоциации молекулы в основном состоянии D_1 и в возбужденном состоянии D_2 .

$$h\nu_{1,0} = h\nu_{\text{эл}} + \frac{1}{2}h\nu_2 - \frac{3}{2}h\nu_1 \Rightarrow h\nu_{\text{эл}} = (2.022 \pm 0.002) \text{ эВ}$$

$$D_1 + E_a = h\nu_{\text{тр}} \Rightarrow D_1 = (1.4755 \pm 0.0012) \text{ эВ}$$

$$D_2 + h\nu_{\text{эл}} = h\nu_{\text{тр}} \Rightarrow D_2 = (0.393 \pm 0.002) \text{ эВ}$$

Полученные результаты совпадают с табличными в пределах погрешности.

4 Вывод

В данной работе исследовались спектральные закономерности в оптическом спектре водорода и спектре поглощения йода в видимой области.

С помощью табличных данных о спектрах неона и ртути был проградуирован монохроматор УМ-2.

Получены длины волн серии Бальмера для водорода и вычислена постоянная Ридберга.

Вычислены энергия колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода, энергии электронного перехода, энергии диссоциации молекулы в основном и возбужденном состояниях.