

Работа 5.(2.2 - 2.3)

Излучение атома водорода и молекулы йода

Богданов Александр
Б05-003

1 декабря 2022 г.

Цель работы: исследовать спектральные закономерности в оптическом спектре водорода; вычислить постоянную Ридберга; исследовать спектр поглощения паров йода в видимой области; вычислить энергию колебательного кванта молекулы йода и энергию ее диссоциации в основном и возбужденном состояниях.

В работе используются: стеклянно-призмный монохроматор-спектрометр УМ-2; ртутная лампа ПРК-4; неоновая лампа; водородная лампа.

Теоретические положения:

Спектр атома водорода

Длины волн спектральных линий водородоподобного атома описываются формулой:

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

где R – константа (постоянной Ридберга), Z – порядковый номер атома, а m и n – целые числа.

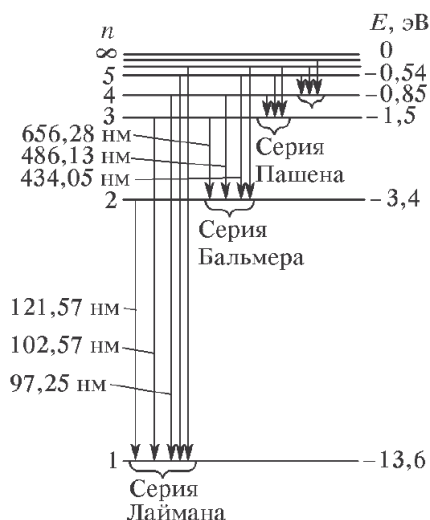


Рис. 1: Уровни энергии атома водорода и образование спектральных серий

Если считать ядро неподвижным, то возможные энергетические состояния водородоподобного атома определяются выражением:

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

Из схемы видно, что линии в спектре водорода можно расположить по сериям; для всех линий серии значение n остается постоянным, а m может принимать любые значения от $n + 1$ до ∞ .

В данной работе изучается серия Бальмера, линии которой лежат в видимой области. Для серии Бальмера $n = 2$. Величина m для первых четырех линий этой серии принимает значение 3, 4, 5, 6. Эти линии обозначаются символами $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$.

Спектр молекулы йода

В первом приближении энергия молекулы может быть представлена в виде:

$$E = E_{\text{эл}} + E_{\text{колеб}} + E_{\text{вращ}},$$

где $E_{\text{эл}}$, $E_{\text{колеб}}$ и $E_{\text{вращ}}$ – электронная, колебательная и вращательная энергии молекулы соответственно.

Оптические переходы (переходы, связанные с излучением фотонов в видимом диапазоне длин волн) соответствуют переходам между различными электронными состояниями молекулы. При этом обычно происходят также изменения ее вращательного и колебательного состояний, однако наблюдение первых оптическими спектрометрами невозможно в силу малости их энергии.

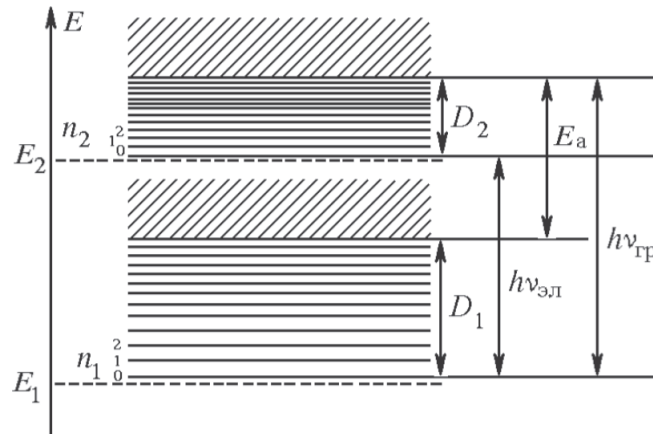


Рис. 2: Электронные и электронно-колебательные энергетические уровни двухатомной молекулы

На схеме изображены энергетические уровни молекулы без учета вращательной структуры. Штриховыми линиями показаны чисто электронные уровни E_1 и E_2 , а сплошными – колебательные подуровни этих состояний. Следует подчеркнуть, что минимальное значение колебательной энергии при $n = 0$ отлично от нуля и равно $h\nu/2$.

Наименьшая энергия, которую нужно сообщить молекуле в нижайшем колебательном состоянии, чтобы она диссоциировала, называется энергией диссоциации. На схеме E_a – энергия возбуждения атома, возникающая при переходе молекулы из состояния 1 в область непрерывного спектра, соответствующего состоянию 2. Энергия чисто электронного перехода $E_2 - E_1 = h\nu_{\text{эл}}$. Границу схождения спектра, т.е. энергию возбуждения, при которой происходит переход молекулы в область непрерывного спектра, обозначим через $h\nu_{\text{тр}}$.

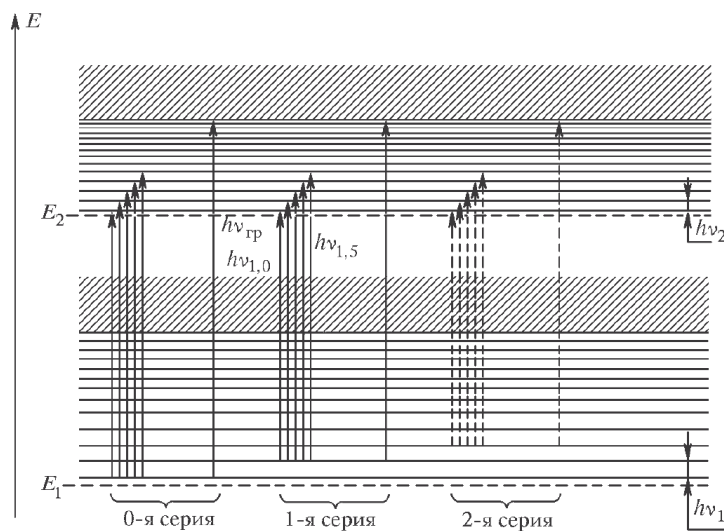


Рис. 3: Структура электронно-колебательного спектра поглощения молекулы йода в видимой области

На схеме показана структура электронно-колебательного спектра поглощения молекул йода, который исследуется в данной работе. Серии, указанные на схеме, называются сериями Деландра. Энергетические расстояния между линиями в начале серии приблизительно равны:

$$h\nu_{0,n_2} - h\nu_{0,(n_2-1)} \approx h\nu_2,$$

т.е. они равны колебательному кванту в возбужденном электронном состоянии.

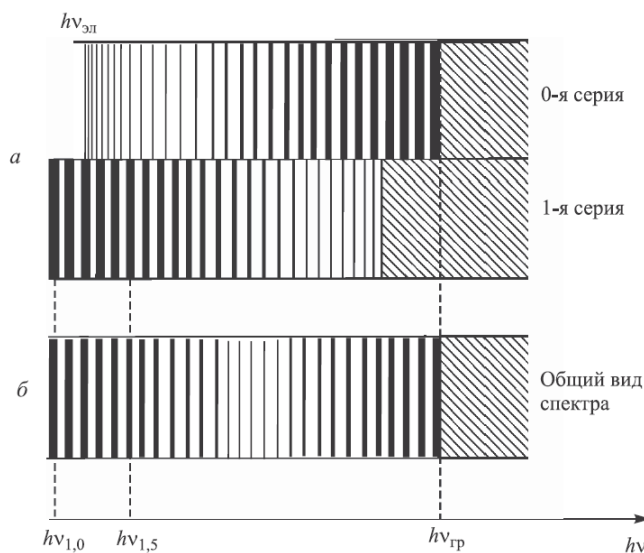


Рис. 4: Спектр поглощения паров йода

Общий вид спектра показан на схеме. Из рассмотренного ясно, что спектр поглощения паров йода в видимой области при температуре $T \approx 300$ К практически состоит из двух серий Деландра (1-й и 0-й), накладывающихся друг на друга.

Экспериментальная установка:

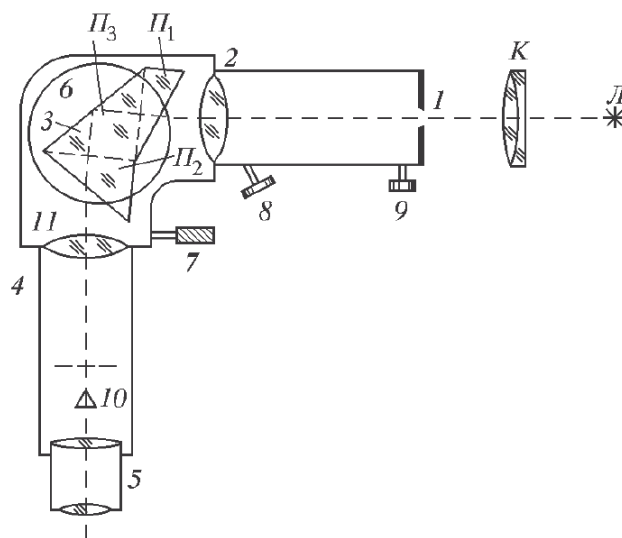


Рис. 5: Устройство монохроматора УМ-2

Для измерения длин волн спектральных линий в работе используется стеклянно-призменный монохроматор-спектрометр УМ-2. Основные элементы монохроматора представлены на схеме.

Спектрометр УМ-2 нуждается в предварительной градуировке. Для градуировки в коротковолновой части спектра удобно применять ртутную лампу ПРК-4, а в длинноволновой и средней части спектра – неоновую лампу. Таблицы спектральных линий ртути и неона с визуальной оценкой их относительной интенсивности приведены на установке:

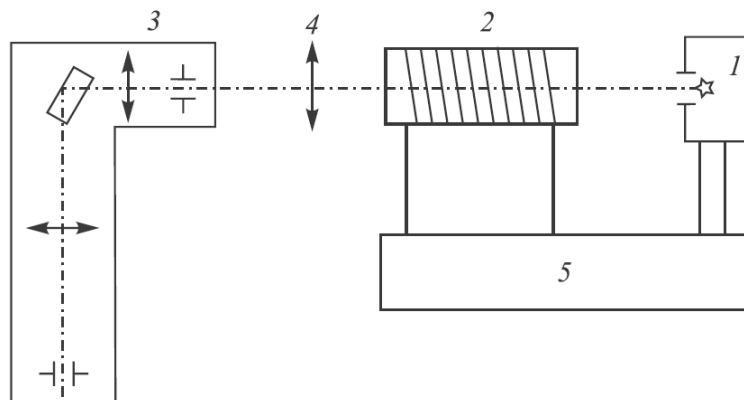


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

В нашей работе спектр поглощения паров йода наблюдается визуально на фоне сплошного спектра лампы накаливания 1 , питаемой от блока питания 2 . Кювета 3 с кристаллами йода подогревается нихромовой спиралью, подключенной вместе с лампой накаливания к блоку питания. Линза 4 используется как конденсор.

Ход работы:

1. Настроим установку.
2. Произведём градуировку монохроматора. Для этого проведём измерения линий спектра неона и ртути, сняв зависимость длины волны наблюдаемого света λ от параметра θ барабана монохроматора:

№	$\theta, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$
1	2592	7032
2	2558	6929
1	2556	6907
3	2508	6717
4	2482	6678
5	2456	6599
6	2434	6533
7	2424	6507
8	2388	6402
9	2380	6383
10	2358	6334
11	2350	6305
12	2332	6267
2	2324	6234
13	2314	6217
14	2292	6164
15	2284	6143
16	2264	6096
17	2254	6074
18	2232	6030
19	2210	5976
20	2194	5945
21	2164	5882
22	2152	5852
3	2120	5791
4	2108	5770
5	1930	5461
23	1890	5401
24	1856	5341
25	1844	5331
6	1508	4916
7	846	4358
8	294	4047

Рис. 7: Голубой – неон, серый – йод

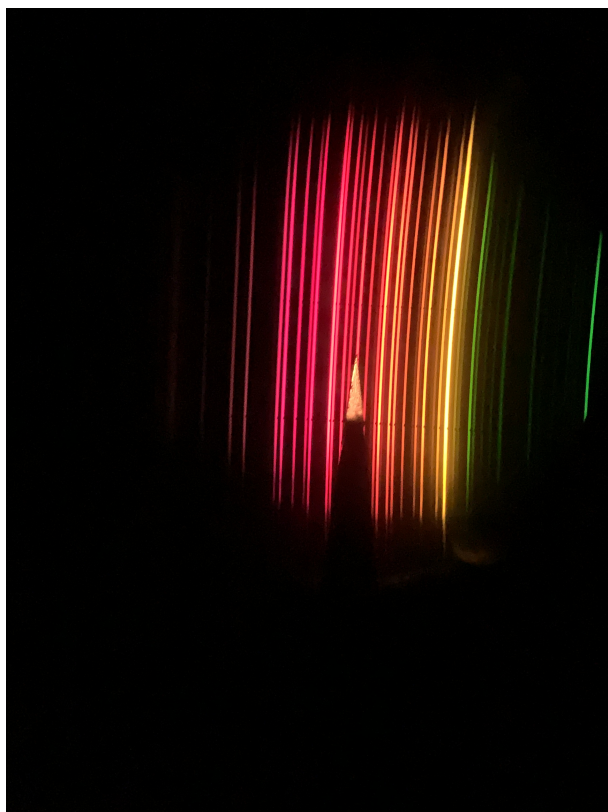


Рис. 8: Спектр неона

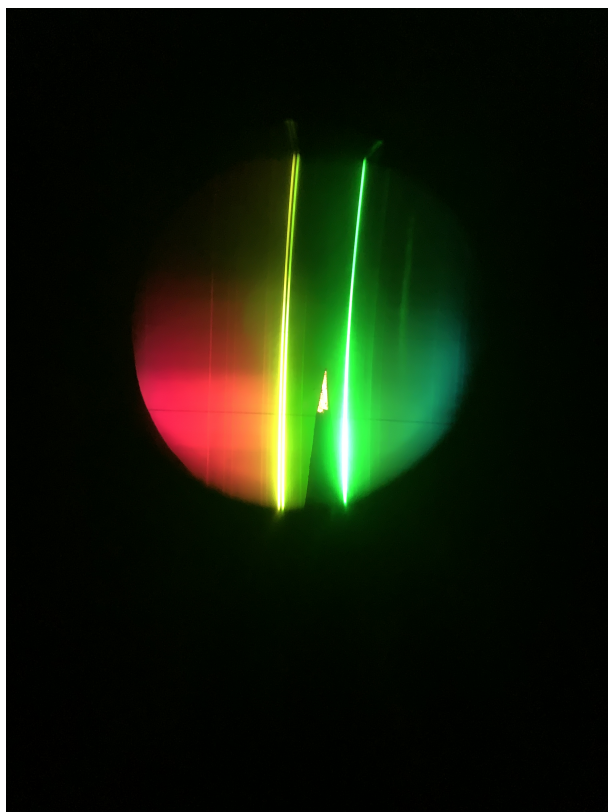
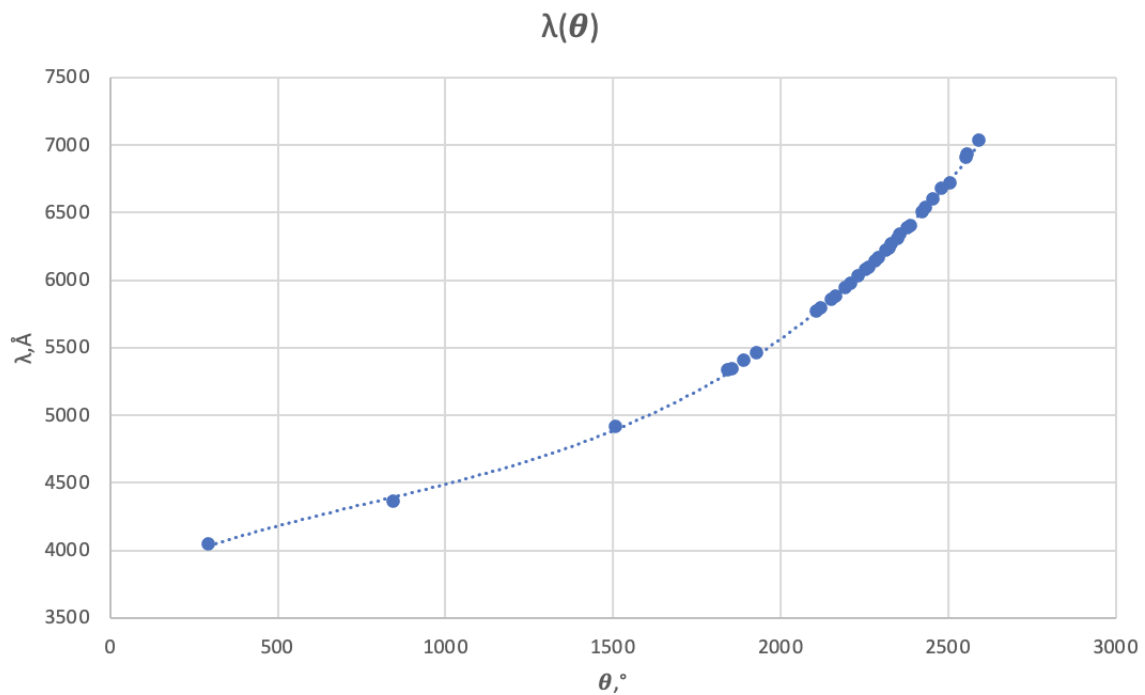


Рис. 9: Спектр йода

По таблице построим калибровочный график:

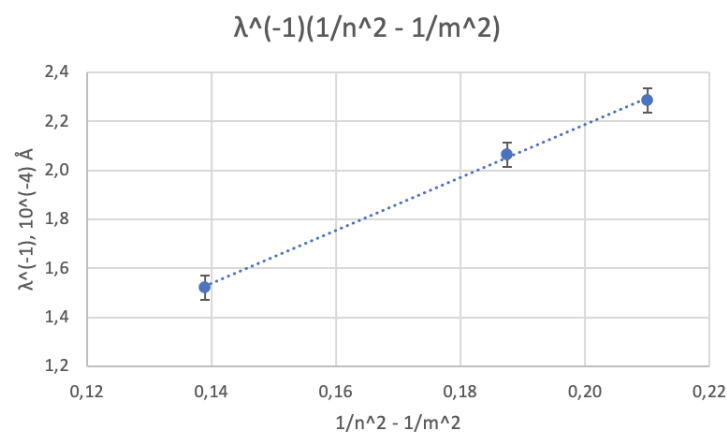


3. Измерим положение линий H_α , H_β , H_γ , H_δ , затем с помощью калибровочного графика определим длины волн линий:

Линия спектра	$\theta, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$	m	n
H_alpha	2448	6575	3	2
H_beta	1460	4847	4	2
H_gamma	816	4377	5	2

Линию H_δ наблюдать не удалось из-за слабой интенсивности.

Для проверки формулы серийной закономерности построим график зависимости $1/\lambda$ от $1/n^2 - 1/m^2$:



Для каждой из наблюдаемых линий водорода вычислим значение постоянной Ридберга, а затем определим ее среднее значение:

$$R_H^{(m)} = \left(\lambda_{m,n} Z^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \right)^{-1}$$

$$R_H^\alpha = (109502, 3 \pm 163, 1) \text{ см}^{-1}$$

$$R_H^\beta = (110034, 2 \pm 215, 2) \text{ см}^{-1}$$

$$R_H^\gamma = (108794, 5 \pm 207, 1) \text{ см}^{-1}$$

$$R_H = (109443, 7 \pm 195, 3) \text{ см}^{-1}$$

Теоретическая формула:

$$R_H^{\text{теор}} = \frac{m_e e^4}{4\pi c \hbar^3} = 109726 \text{ см}^{-1}$$

4. Сопоставим наблюдаемый спектр йода со спектром поглощения. Определим деления барабана монохроматора θ , соответствующие:

- (а) линии $h\nu_{1,0}$ – одной из самых длинноволновых хорошо видимых линий поглощения:

$$\theta_{1,0} = (2230 \pm 2)^\circ$$

- (б) линии $h\nu_{1,5}$ – шестой по счету от выбранной длинноволновой линии:

$$\theta_{1,5} = (2132 \pm 2)^\circ$$

- (с) линии $h\nu_{\text{гр}}$ – началу сплошного спектра поглощения:

$$\theta_{1,0} = (1770 \pm 2)^\circ$$

При помощи градуировочной кривой монохроматора определим длины волн линий поглощения йода и соответствующие энергии:

$$\lambda_{1,0} = (6495 \pm 9) \text{ Å} \quad h\nu_{1,0} = (1,921 \pm 0,03) \text{ эВ}$$

$$\lambda_{1,5} = (6227 \pm 9) \text{ Å} \quad h\nu_{1,5} = (2,012 \pm 0,03) \text{ эВ}$$

$$\lambda_{\text{гр}} = (5443 \pm 9) \text{ Å} \quad h\nu_{\text{гр}} = (2,301 \pm 0,03) \text{ эВ}$$

Вычислим энергию колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода:

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

$$h\nu_2 = (0,018 \pm 0,002) \text{ эВ}$$

Используя то, что энергия колебательного кванта основного состояния $h\nu_1 = 0,027 \text{ эВ}$, а энергия возбуждения атома $E_a = 0,94 \text{ эВ}$, вычислим:

(а) Энергию электронного перехода $h\nu_{эл}$:

$$h\nu_{n_1, n_2} = h\nu_{эл} + h\nu_2 \left(n_2 + \frac{1}{2} \right) - h\nu_1 \left(n_1 + \frac{1}{2} \right)$$

$$h\nu_{эл} = h\nu_{1,0} + \frac{3}{2}h\nu_1 - \frac{1}{2}h\nu_2$$

$$h\nu_{эл} = (1,952 \pm 0,005) \text{ эВ}$$

(б) Энергию диссоциации молекулы в основном состоянии D_1 :

$$D_1 = h\nu_{гр} - E_a$$

$$D_1 = (1,361 \pm 0,006) \text{ эВ}$$

(с) Энергию диссоциации молекулы в возбужденном состоянии D_2 :

$$D_2 = h\nu_{гр} - h\nu_{эл}$$

$$D_2 = (0,349 \pm 0,009) \text{ эВ}$$

Вывод:

В результате выполнения лабораторной работы:

1. Проверена справедливость формулы серийной закономерности.
2. При исследовании спектра водорода наблюдались линии, соответствующие серии Бальмера. Последнюю линию H_δ не удалось увидеть в силу ее слабой интенсивности, однако значения оставшихся достаточно точно совпадают с табличными:

$$\lambda_\alpha = (657,5 \pm 1,5) \text{ нм} \quad \lambda_\alpha^{\text{теор}} = 656,3 \text{ нм}$$

$$\lambda_\beta = (484,7 \pm 1,5) \text{ нм} \quad \lambda_\beta^{\text{теор}} = 486,1 \text{ нм}$$

$$\lambda_\gamma = (437,7 \pm 1,5) \text{ нм} \quad \lambda_\gamma^{\text{теор}} = 434,1 \text{ нм}$$

3. Вычислена постоянная Ридберга, которая достаточно точно совпадает с табличным:

$$R_H = (109443,7 \pm 195,3) \text{ см}^{-1} \quad R_H^{\text{теор}} = 109726 \text{ см}^{-1}$$

4. Для молекулы йода были вычислены:

(a) Энергия электронного перехода:

$$h\nu_{\text{эл}} = (1,952 \pm 0,005) \text{ эВ}$$

(b) Энергия диссоциации молекулы в основном состоянии:

$$D_1 = (1,361 \pm 0,006) \text{ эВ}$$

(c) Энергию диссоциации молекулы в возбужденном состоянии:

$$D_2 = (0,349 \pm 0,009) \text{ эВ}$$