

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 5.2.2

**Изучение спектров атома водорода
и молекулы йода**

выполнил студент 3 курса
группы Б04-006
Белостоцкий Артемий

Долгопрудный, 2022 г.

Аннотация

В данной работе будет вычислена постоянная Ридберга, путем исследования оптического спектра водорода. Также будет представлен анализ спектра поглощение паров йода в видимой области.

Теоретические сведения

Спектр атома водорода

Атом водорода является простейшей атомной системой, для которой уравнение Шредингера (1) может быть решено точно.

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi - \frac{e^2}{r}\psi = E\psi \quad (1)$$

Именно поэтому спектр атома водорода является предметом тщательного экспериментального исследования. Длины волн спектральных линий атома водорода описываются формулой:

$$\frac{hc}{\lambda_{nm}} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (2)$$

где R – константа, называемая постоянной Ридберга, а m, n – целые числа.

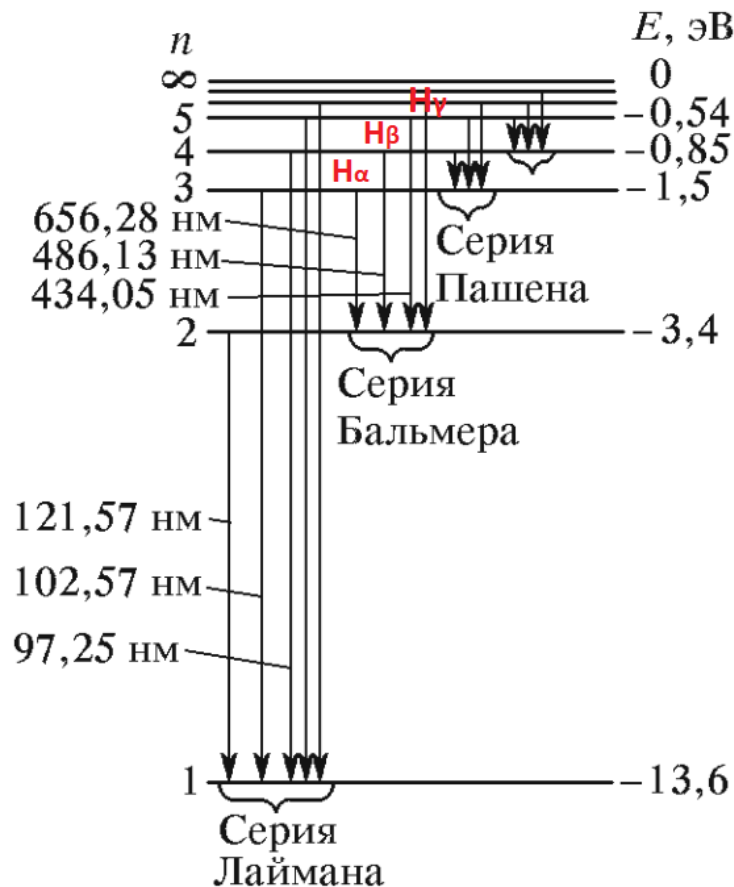


Рис. 1: Спектр атомарного водорода

В данной работе будут наблюдаться 3 линии из серии Бальмера ($n = 2$), а именно – $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$

Спектр молекулы йода

Молекулы обладают более богатым спектром возбужденных состояний, чем изолированные атомы, в молекулах могут возбуждаться дополнительные степени свободы: колебания составляющих их атомов друг относительно друга и вращения молекул относительно различных осей. Энергии вращательных и колебательных уровней задаются выражениями:

$$E_{\text{вращ}} = \frac{\hbar^2}{2J} l(l+1),$$

где J – момент инерции молекулы относительно оси вращения, $l = 0, 1, 2, \dots$

$$E_{\text{колеб}} = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right),$$

где ω_0 – собственная частота осциллятора, $n = 0, 1, 2, \dots$

Также приведем отношение характерных энергий вращательного и колебательного возбуждения:

$$\frac{E_{\text{колеб}}}{E_{\text{вращ}}} \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{m_e}{M_{\text{яд}}}}} \approx 10^3$$

Именно поэтому вращательные степени свободы в данной лабораторной работе видны не будут.

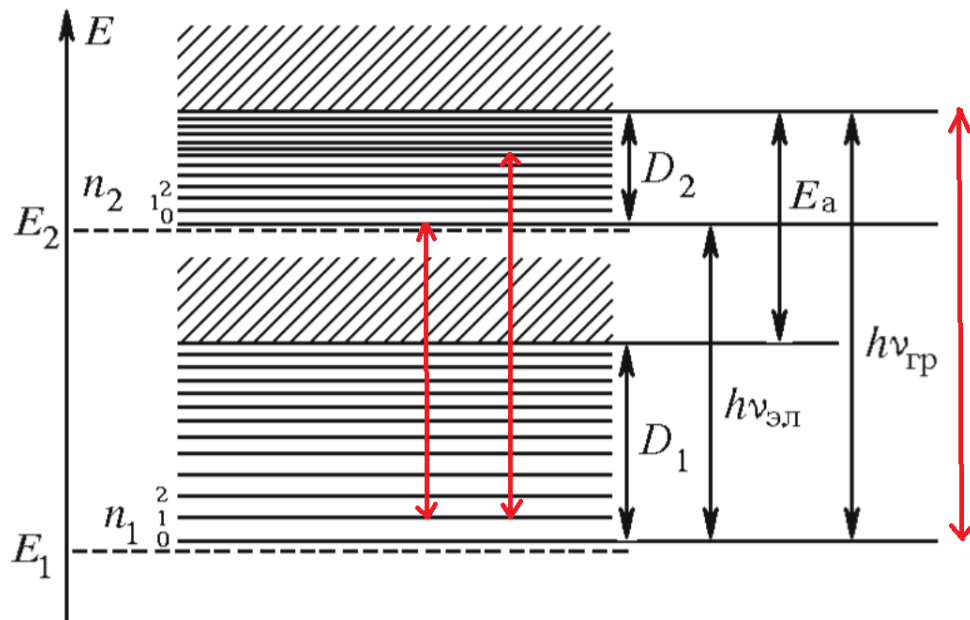


Рис. 2: Электронные и электронно-колебательные энергетические уровни молекулы йода. Красным отмечены переходы, которые наблюдались в работе (взято из описания лабораторной работы)

Экспериментальная установка

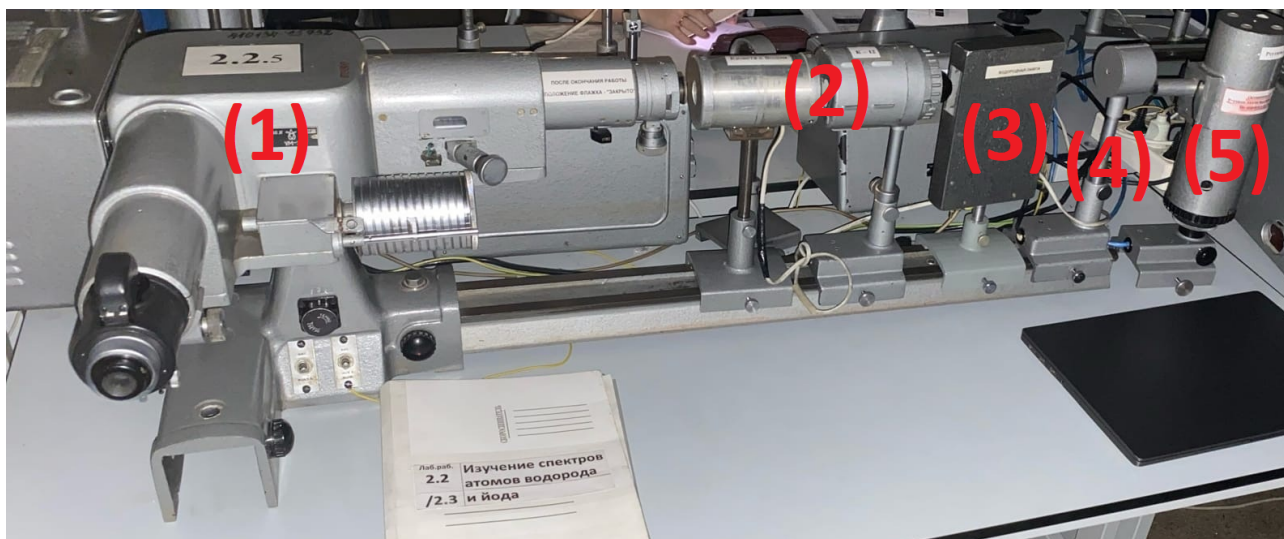


Рис. 3: Экспериментальная установка. (1) – монохроматор, (2) – кювета с йодом и лампа накаливания, (3) – водородная лампа, (4) – неоновая лампа, (5) – ртутная лампа

Ход работы

Используя окуляр и неоновую лампу, проградуируем барабан монохроматора, зная спектр неоновой лампы.

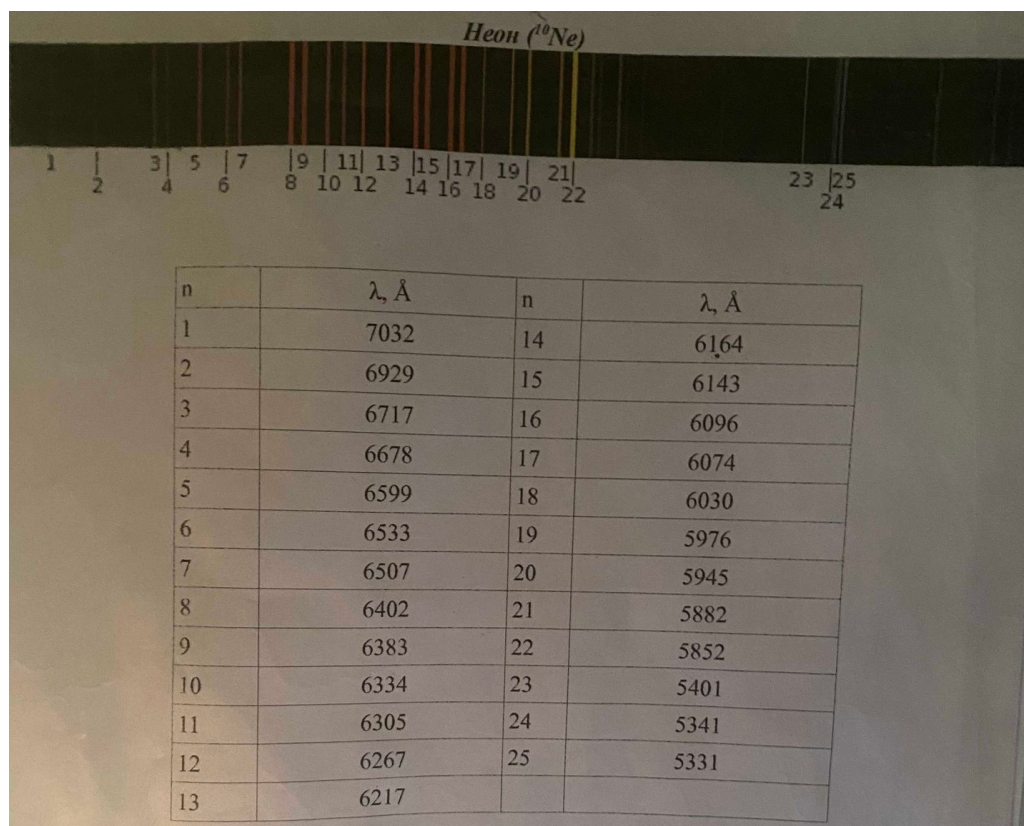


Рис. 4: Спектральные линии неона и соответствующие им длины волн



Рис. 5: Спектральные линии неона, полученные экспериментально

Аналогично проградуируем спектрометр по спектру ртути.

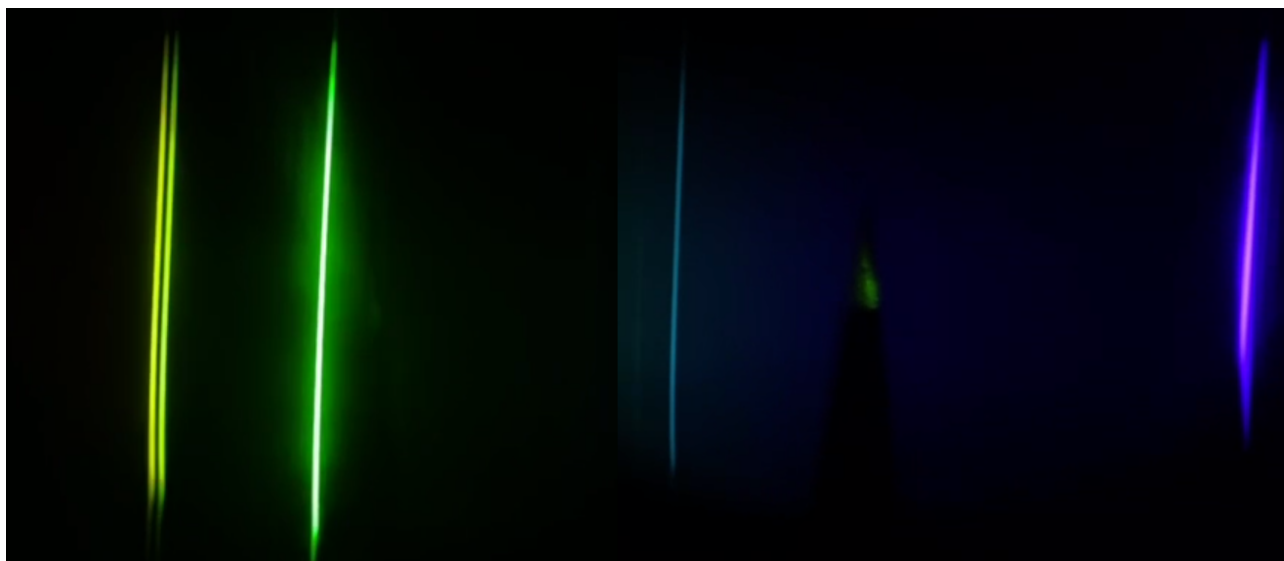


Рис. 6: Экспериментальный спектр линий паров ртути

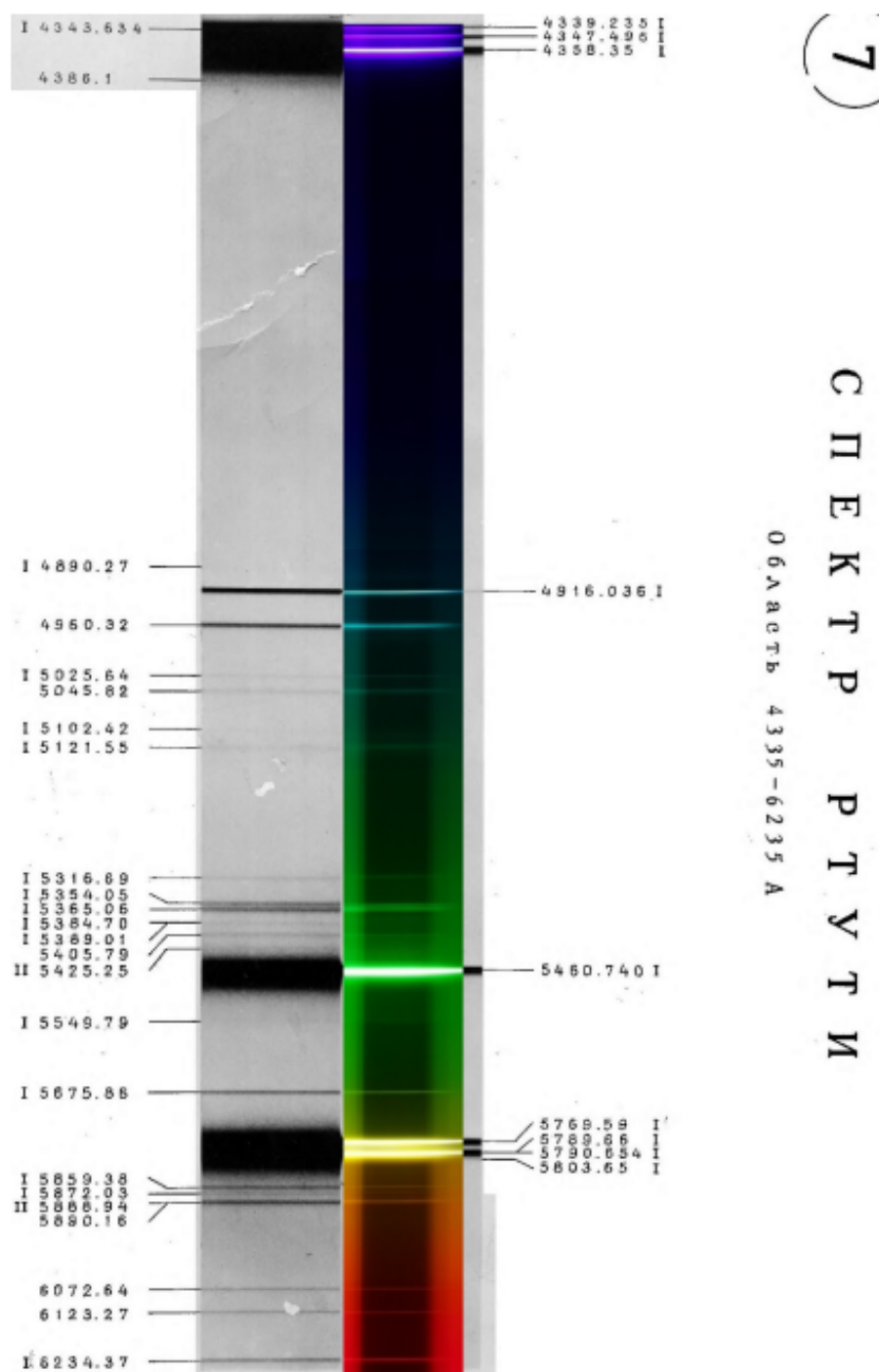


Рис. 7: Спектр линий паров ртути в видимом диапазоне. (взято из описания лабораторной работы)

По полученным данным построим график зависимости угла, указываемого на барабане, от длины волны спектральных линий Ne и Hg

Аппроксимируем калибровочную кривую полиномом степени n , учитывая что мы хотим получить минимум погрешности коэффициентов и не большое количество самих коэффициентов (т.к. погрешности будут складываться). Анализируя разные n (графики представлены в Приложении), остановим свой выбор на $n = 3$

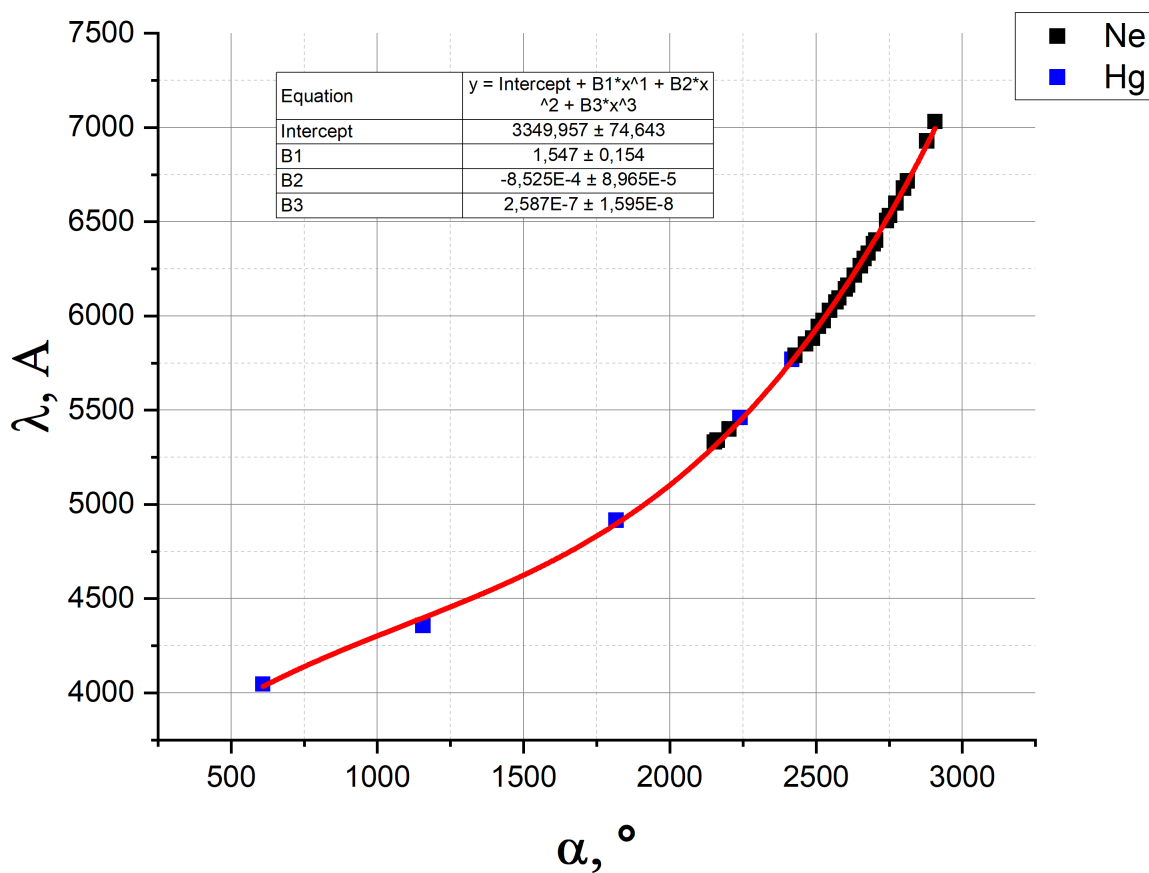


Рис. 8: Калибровочный график зависимости угла, указанного на барабане монохроматора от длины волны спектральной линии Ne и Hg

Спектр водорода

Снимем спектр водорода. Измерим положение линий $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$. Полученные данные занесем в Таблицу 1

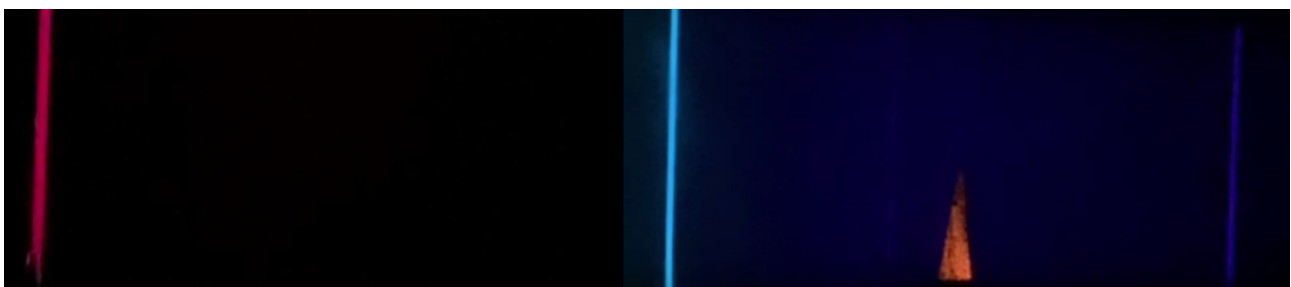


Рис. 9: Экспериментальный спектр водорода

Таблица 1: Полученные длины волн спектра водорода

Линия	$\alpha, ^\circ$	$\lambda, \text{нм}$
H_α	1132	438,6
H_β	1768	485,4
H_γ	2762	657,5

С помощью калибровочного графика определим длины волн линий $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma$. Построим график зависимости $\frac{1}{\lambda}$ от $\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right)$, по наклону графика определим константу Ридберга.

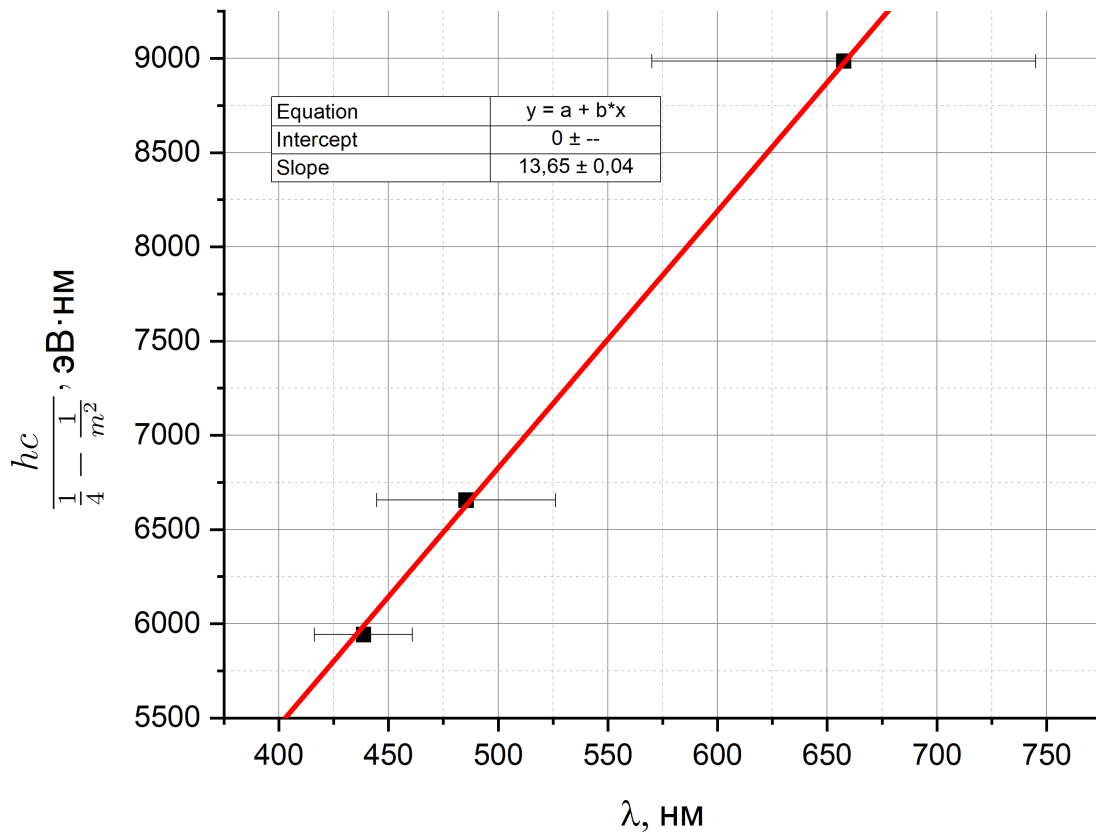


Рис. 10: График зависимости $\lambda = f\left(\frac{hc}{\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}}\right)$

Из графика получаем:

$$R \approx 13,65 \pm 0,04 \text{ эВ}$$

Спектр йода

Получим спектр поглощения йода.

Измерим положения 3 полос поглощения: самой левой, шестой по счету от крайней левой и крайнюю правую. Полученные данные занесем в Таблицу 2

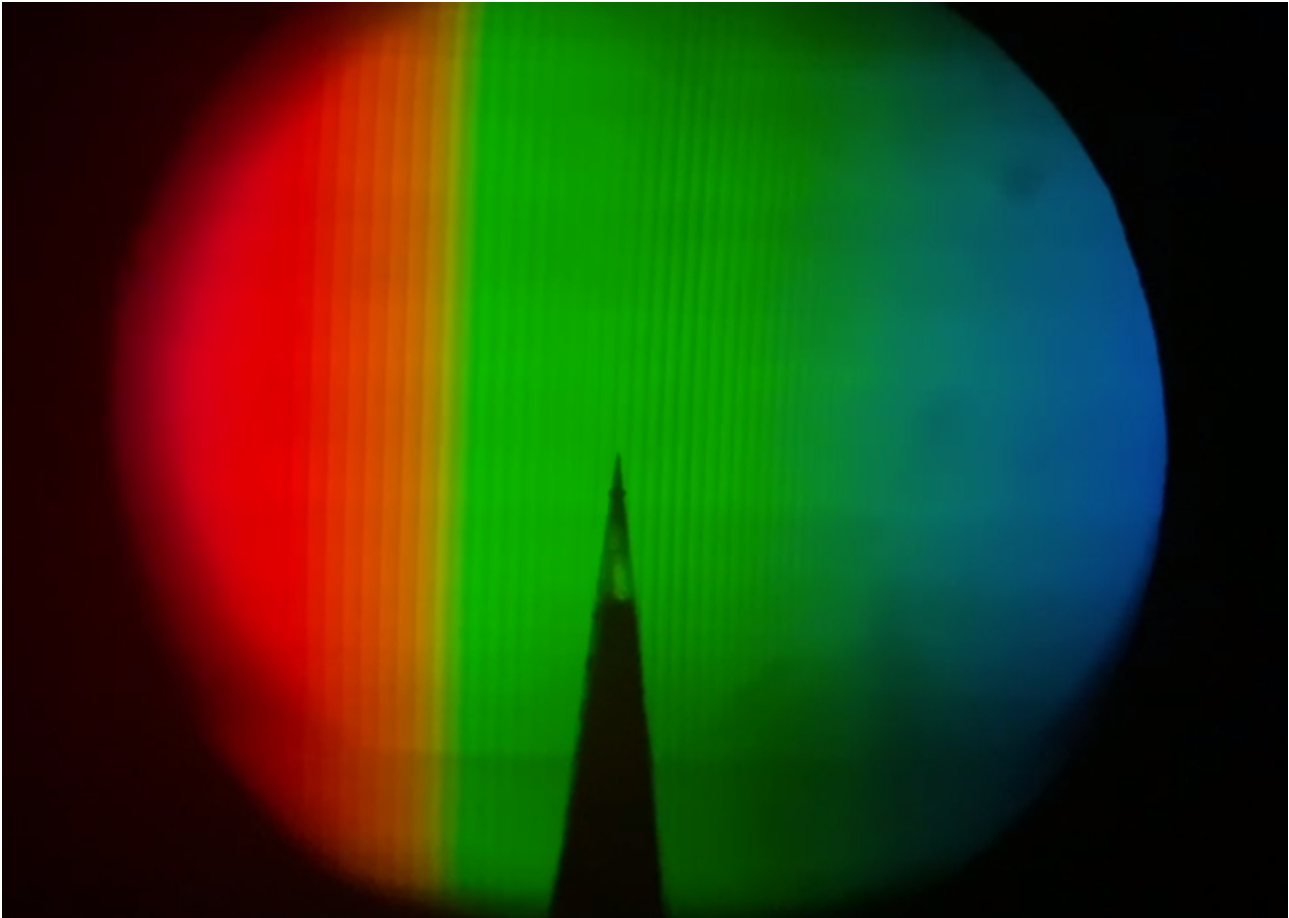


Рис. 11: Экспериментальный спектр поглощения йода (темные полосы)

Таблица 2: Полученные длины волн для спектра поглощения йода

Линия	α, \circ	$\lambda, \text{нм}$
Крайняя левая	2624	621,8
Шестая от крайней левой	2516	597
Крайняя правая	2038	515,6

Вычислим энергию колебательного кванта возбужденного состояния молекулы йода:

$$h\nu_2 = (h\nu_{1,5} - h\nu_{1,0})/5 \approx 17 \text{ мэВ}$$

Оценим энергию электронного перехода $h\nu_{\text{эл}}$ (см. Рис.2), зная что энергия нулевых колебаний основного состояния равна $h\nu_1 = 0,027 \text{ эВ}$.

$$h\nu_{\text{эл}} = h\nu_{1,0} + h\nu_1 \approx 2,03 \text{ эВ}$$

Оценим энергию диссоциации молекулы в основном состоянии D_1 (см. Рис.2), измерив величину $h\nu_{\text{гр}}$ и зная E_a :

$$D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_a = (2,41 - 0,94)\text{эВ} = 1,47 \text{ эВ}$$

Оценим энергию диссоциации молекулы в возбужденном состоянии:

$$D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}} = (2,41 - 2,03)\text{эВ} = 0,38\text{эВ}$$

Обсуждение результатов

Сравнение кванта колебательной энергии и температуры

При средней комнатной температуре $T = 298\text{ К}$, $kT \approx 0,026\text{ эВ}$, расстояние между колебательными уровнями энергии основного состояния $\Delta E = 0,027\text{ эВ} \sim kT$, а энергия электронного перехода $h\nu_{\text{эл}} \gg kT$.

Таким образом, можем предположить, что колебательные уровни основного состояния заселены, а колебательные уровни возбужденного состояния почти не заселены.

Оценим вклад колебательных степеней в теплоемкость молекулы йода. Из курса термодинамики (а именно, из задач домашнего задания) мы знаем, что, используя статистические методы, возможно рассчитать теплоемкость, которую «создают» только колебательные степени свободы:

$$c_v = \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial T} \cdot N_A = \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}}}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^2} \approx 0.91R$$

Тогда, учитывая что молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные, полная теплоемкость паров йода:

$$c_V = \frac{5}{2}R + 0.91R = 3.41R = 28,3 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

Выводы

- В ходе работы была вычислена постоянная Ридберга $R = 13,65 \pm 0,04\text{ эВ}$, что, в пределах погрешности, совпадает с табличным результатом $R = 13,61\text{ эВ}$
- Были оценены энергии диссоциации молекулы йода в основном $D_1 = 1,47\text{ эВ}$ и возбужденном состоянии $D_2 = 0,38\text{ эВ}$
- Также была оценена теплоемкость паров йода $c_V \approx 20,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$