

Лабораторная работа 5.2.2/5.2.3 Изучение спектров атомов водорода и молекул йода

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится исследование спектральных закономерностей в оптических спектрах водорода и йода. По результатам измерений вычисляются постоянная Ридберга для водорода и потенциал ионизации. Кроме того, вычисляется энергия колебательного кванта молекулы йода и энергия ее диссоциации в основном и возбужденном состояниях.

2 Теоретические сведения

Спектр атомов водорода. Объяснение структуры спектра излучения атомов требует решения задачи о движении электрона в эффективном поле атома. Для атома водорода и водородоподобных (одноэлектронных) атомов определение энергетических уровней значительно упрощается, так как квантово-механическая задача об относительном движении электрона (заряд $-e$, масса m_e) и ядра (заряд Ze , масса M) сводится к задаче о движении частицы с эффективной массой $\mu = m_e M / (m_e + M)$ в кулоновском поле $-Ze^2/n$. Длины волн спектральных линий водородоподобного атома описываются формулой

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

где $m, n \in \mathbb{Z}$, а R – постоянная Ридберга. Эта формула позволяет по энергиям перехода судить о расположении энергетических уровней атома водорода. На рис. 1 изображены энергетические уровни и соответствующие им переходы, определяющие спектр.

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 $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$.

Оценим энергии основного и возбужденного состояний водородоподобного атома. Чтобы найти основное состояние квантовой системы, надо минимизировать, с учетом соотношения неопределенностей, полную энергию. Потенциальная энергия электрона равна кулоновской энергии электрона в поле ядра с зарядом Ze . Так как электрон локализован в области размером r , то его импульс $p \simeq \hbar/r$, и полная энергия определяется выражением

$$E = \frac{-Ze^2}{r} + \frac{\hbar^2}{2m_e r^2}. \quad (2)$$

Приняв за нуль производную этого выражения, получим

$$r_B = \frac{\hbar^2}{Zm_e e^2}.$$

Это значение радиуса первой орбиты для электрона в поле ядра с зарядом Z – боровского радиуса. Подставляя в (2) это значение, получим

$$E = -RZ^2, \quad R = \frac{m_e e^4}{2\hbar^2}. \quad (3)$$

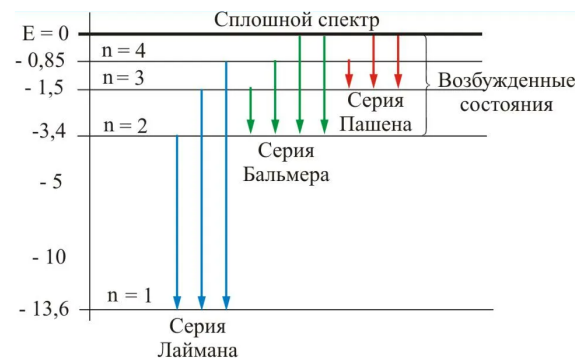


Рис. 1: Энергетические уровни атома водорода

Для возбуждённых состояний значения энергий можно найти аналогично, приняв во внимание, что $p \simeq n\hbar/r$ из условия, что на длине орбиты укладывается целое число волн де Бройля. Отсюда энергия n -го уровня равна

$$E = \frac{-RZ^2}{n^2}.$$

Спектр молекул йода. Массы ядер атомов велики по сравнению с массой электрона. Благодаря такой разнице в массах, скорости движения ядер в молекуле малы по сравнению со скоростями электронов. Это даёт возможность рассматривать электронное движение при неподвижных ядрах, расположенных на определенных расстояниях друг от друга. Определяя уровни энергии такой системы, мы найдем электронные термы молекул. Любой атом в молекуле находится в электрическом поле остальных ее атомов. Оно вызывает расщепление электронных уровней атомов в молекуле. Следует отметить, что при соединении атомов в молекулу заполненные оболочки атомов мало меняются. Существенно может измениться распределение электронной плотности в не до конца заполненных оболочках.

Спектр молекулярного йода представлен на рис. 2. Для расчёта спектра поглощения йода необходимо учесть энергии колебательного и вращательного движения молекул. Видимый спектр состоит из 0-й и 1-й серий Деландра. 2-я серия в 10 раз менее интенсивная, чем 0-я, и поэтому ей пренебрегаем.

Энергетическое положение линий поглощения описывается выражением

$$h\nu_{0n_2} = (E_2 - E_1) + h\nu_2 \left(n_2 + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2} h\nu_1. \quad (4)$$

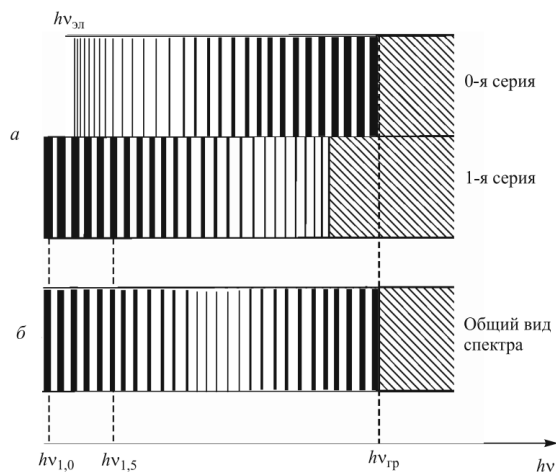


Рис. 2: Спектральная картина йода

3 Оборудование и инструментальные погрешности

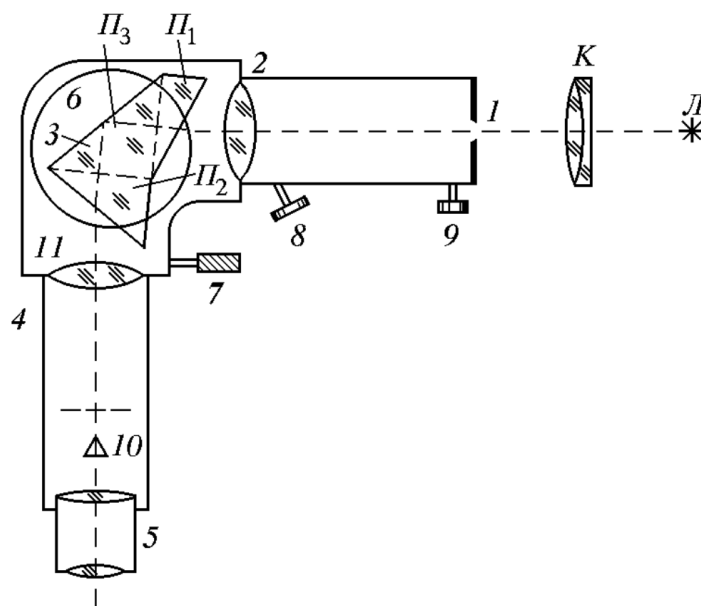


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 3. Используется монохроматор, построенный на системе призм.

В работе используются:

- Монохроматор УМ-2: $\Delta = \pm 2^\circ$
- Коллиматор
- Водородная лампа
- Кювета с кристаллами йода
- Лампа накаливания на штативе
- Неоновая и ртутная лампы

4 Результаты измерений и обработка данных

4.1 Калибровка

Построим калибровочный график по спектрам неона и ртути на рис. 4. Зависимость нелинейная, но аппроксимируется экспоненциальной функцией:

$$\lambda [\text{\AA}] = 234 * \exp\left(\frac{\varphi}{1105}\right) + 3640. \quad (5)$$

Для компактности формулу погрешностей здесь не приводим.

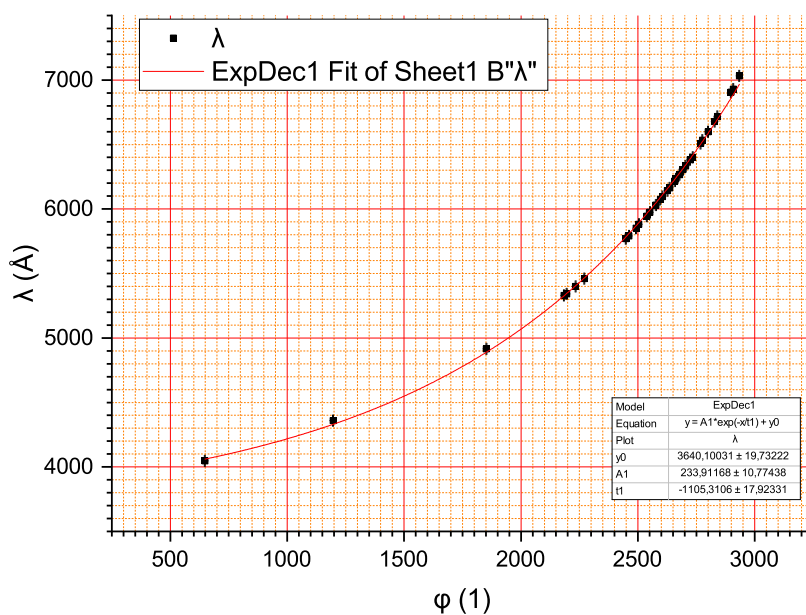


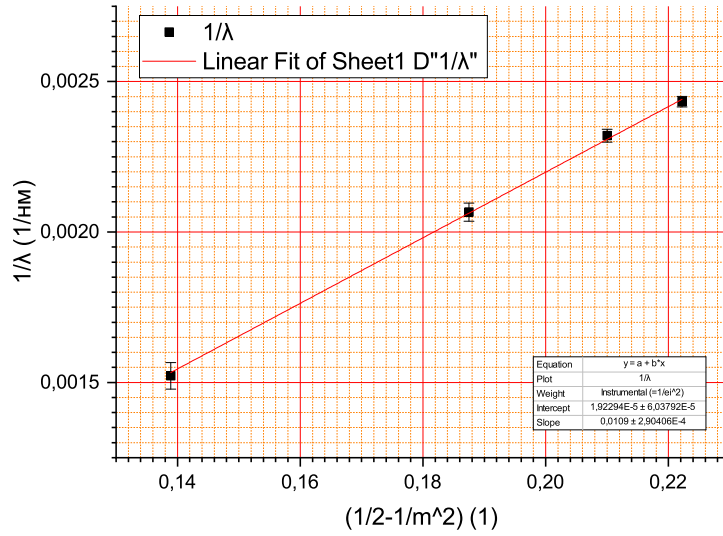
Рис. 4: Калибровочный график по линиям водорода и йода

4.2 Исследование спектров

Определим длины волн H_α , H_β , H_γ , H_δ при помощи полученной калибровочной формулы (5). Результаты в табл. 1: В пределах погрешности полученные значения совпадают с табличными для серии Бальме-

	$\varphi, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$
H_α	2792 ± 2	6570 ± 190
H_β	1804 ± 2	4840 ± 70
H_γ	1167 ± 2	4310 ± 40
H_δ	763 ± 2	4110 ± 30

Таблица 1: Спектральные линии водорода

Рис. 5: Зависимость λ^{-1} от $1/2 - 1/m^2$

ра. Определим постоянную Ридберга. Построим график зависимости λ^{-1} от выражения вида $1/2 - 1/m^2$ на рис. Из графика видно, что $k = (109 \pm 3) \cdot 10^{-4}$. Тогда

$$R = k \cdot 10^9 = (1.09 \pm 0.03) \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}.$$

Это значение совпадает с табличным в пределах погрешности.

Найдём длины волн для йода:

$$\nu_{1,0} = 6096 \pm 15 \text{ Å}$$

$$\nu_{1,5} = 5880 \pm 10 \text{ Å}$$

$$\nu_{\text{гр}} = 5020 \pm 10 \text{ Å}$$

Вычислим в электрон-вольтах энергию колебательного кванта возбуждённого состояния молекулы йода:

$$h\nu_2 = 15 \text{ мэВ}.$$

Найдём параметры диссоциации молекул йода:

$$h\nu_{\text{эл}} = h\nu_{1,0} + \frac{3}{2}h\nu_1 - \frac{1}{2}h\nu_2 = 2.13 \pm 0.03 \text{ эВ}.$$

Эта величина получена из формулы (4). Тогда для энергии диссоциации частиц в основном и возбуждённом состояниях:

$$D_1 = h\nu_{\text{гр}} - E_A = 1.48 \pm 0.02 \text{ эВ},$$

$$D_2 = h\nu_{\text{гр}} - h\nu_{\text{эл}} = 0.28 \pm 0.02 \text{ эВ}.$$

Здесь $E_A = 0,94 \text{ эВ}$ – энергия возбуждения атома.

4.3 Оценка погрешностей

В данной работе оценка погрешностей при калибровке проведена по следующей формуле:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{e^{-\frac{2\varphi}{t}} (a^2 (t^2\sigma_\varphi^2 + \varphi^2\sigma_t^2) + t^4\sigma_a^2)}{t^4} + \sigma_{y0}^2}, \quad (6)$$

которая получена из общей формулы расчета погрешностей при помощи пакета *Wolfram Mathematica*. Все погрешности были рассчитаны по общей формуле:

$$\Delta_{u(x,y,z,\dots)}^2 = f_x'^2 \Delta_x^2 + f_y'^2 \Delta_y^2 + f_z'^2 \Delta_z^2 + \dots, \quad (7)$$

5 Вывод

По результатам работы, получены характеристики спектров йода и водорода, по которым рассчитаны свойства их молекул и атомов соответственно. Получены: постоянная Ридберга для водорода, а также энергия колебательного кванта молекулы йода, а также энергия диссоциации молекулы йода в основном и возбуждённом состояниях.

А Необработанные результаты опытов

Данные, использованные для построения калибровочных графиков, представлены в табл. 2.

$\varphi, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$	$\Delta\varphi, ^\circ$
2934	7032	2
2908	6929	
2840	6717	
2828	6678	
2800	6599	
2776	6533	
2768	6507	
2734	6402	
2723	6383	
2704	6334	
2693	6305	
2678	6267	
2658	6217	
2636	6164	
2626	6143	
2605	6096	
2596	6074	
2577	6030	
2552	5976	
2538	5945	
2504	5882	
2492	5852	
2233	5401	
2195	5341	
2184	5331	
2898	6907	
2662	6234	
2462	5791	
2448	5770	
2271	5461	
1852	4916	
1196	4358	
648	4047	

Таблица 2: Необработанные данные калибровки

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 5*, 1989
- [2] Фаддеев М. А., Чупрунов Е. В. *Лекции по атомной физике*, 2008
- [3] Ципенюк Ю. М. *Квантовая микро- и макрофизика*, 2006
- [4] Игошин Ф. Ф., Самарский Ю. А., Ципенюк Ю. М. *ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ. Квантовая физика: Учеб, пособие для вузов*; Под ред. Ципенюка Ю.М.