

Лабораторна робота № 7

Вивчення тонкої структури спектрів лужних металів

Мета: Вивчити тонку структуру енергетичних рівнів атома натрію на прикладі жовтого дублету, визначити експериментально сталу внутрішнього екранування a_1

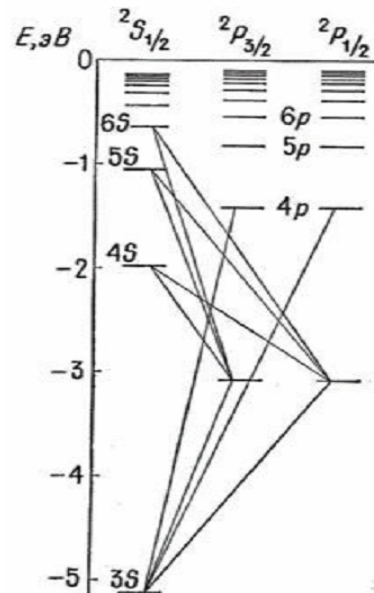
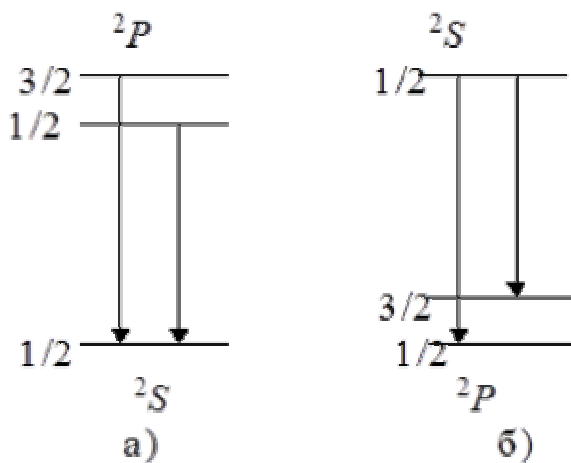
Прилади і матеріали: Монохроматор УМ-2, неонова лампа, натрієва лампа

Теоретичні відомості,

Тонка структура спектрів

У атомах лужних металів, як і в атомі водню, врахування спіну електрона приводить до появи тонкої структури рівнів і спектральних ліній, тобто до їх розщеплення на декілька близько розташованих компонент. Через спін-орбітальну взаємодію маємо, $j = l + s$, звідки $j = l \pm 1/2$. В результаті кожен рівень з $l \neq 0$ розщеплюється на два (дублетне розщеплення). Для s -рівня $j = l + s = 1/2$, і розщеплення немає.

Лінії головної і різкої серій розщеплюються на два компоненти (дублети). Дублетне розщеплення ліній головної серії визначається тонкою структурою верхніх рівнів ${}^2P_{1/2,3/2}$, оскільки нижній рівень не розщеплюється (рис. 1а). Розщеплення ліній різкої серії, навпаки, повністю визначаються тонкою структурою нижнього рівня ${}^3P_{1/2,3/2}$ (рис. 1б), тому всі лінії різкої серії мають в шкалі частот чи хвильових чисел однакове дублетне розщеплення. На рис. 2 подана схема утворення дублетних ліній головної і різкої серій.



Лінії дифузної і фундаментальної серій розщеплюються на три компоненти (триплети). Відстань між компонентами ${}^2P_{1/2} - {}^2D_{3/2}$ и ${}^2P_{3/2} - {}^2D_{3/2}$ триплету определяется расщеплением нижнего уровня и одинакова для всіх ліній серії. Відстань між компонентами ${}^2P_{3/2} - {}^2D_{3/2}$ и ${}^2P_{3/2} - {}^2D_{5/2}$ того ж триплету, що визначається

розщепленням верхнього рівня, значно менша по величині і швидко спадає для вищих членів серії. При невеликій роздільній здатності спектрального приладу ці компоненти не розділяються, тому лінії дифузної серії мають вигляд розмитих дублетів. Схема розщеплених на три компоненти ліній дифузної серії показана на рис.3

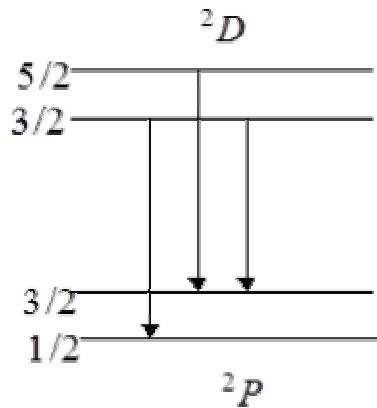


Рис.3

Аналогічним чином можна проаналізувати тонку структуру ліній фундаментальної серії.

Узагальнена структура розщеплення p, d, f рівнів представлена на рис. 4.

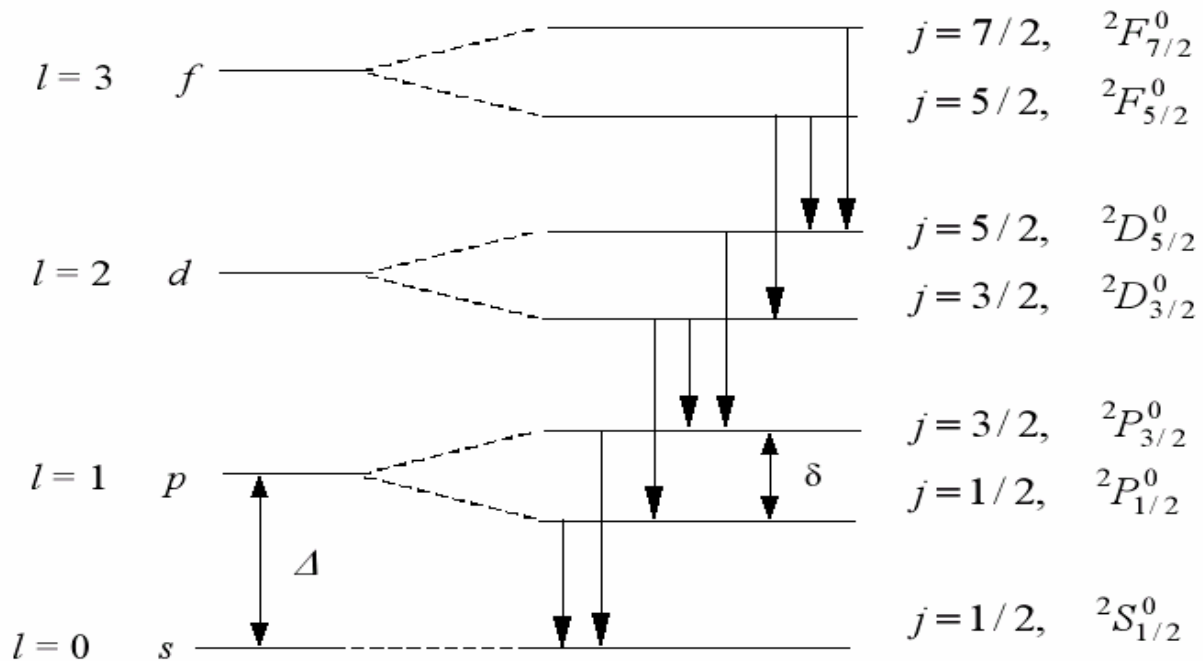


Рис. 4. Дублетне розщеплення термів атомів лужних металів (масштаб умовний, насправді $\delta \ll \Delta$)

Саме для атомів лужних металів вплив спіну проявляється найвиразніше. Це відбувається тому, що рівні з різними значеннями l при заданому значенні n знаходяться далеко один від одного. Так, у Na відстань між рівнями $3s$ і $3p$ становить 2,1 еВ.

Величина дублетного розщеплення рівня (різниця енергій між підрівнями $j_1 = l + \frac{1}{2}$ і $j_2 = l - \frac{1}{2}$. одного і того ж рівня n, l) дорівнює:

$$\Delta E_{j_1, j_2} = \frac{Rhc}{n^2} \cdot \frac{\alpha^2(Z - a_1)^4}{n} \cdot \frac{l}{l(l+1)} = \frac{\alpha^2 R_y (Z - a_1)^4}{n^3 l(l+1)} = \frac{\alpha^2 R_y}{n^3 l(l+1)} Z_{ef}^4,$$

де $\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} \approx \frac{1}{137}$, – постійна тонкої структури; $Z_{ef} = (Z - a_1)$, a – стала екранування, a_1 – стала внутрішнього екранування, визначає енергію спин-орбітальної взаємодії. (див. додаток)

Ширина дублетного розщеплення змінюється від елемента до елемента. Наприклад, для Li величина тонкого розщеплення ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$ становить $\Delta \tilde{\nu} = 0,34 \text{ см}^{-1}$, а у Cs – $554,1 \text{ см}^{-1}$. $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ т.з. спектроскопічне хвильове число. Дублетне розщеплення ліній в шкалі хвильових чисел дорівнює

$$\Delta \tilde{\nu} = R \frac{\alpha^2 Z_{ef}^4}{n^3 l(l+1)}$$

Практично для тонкого розщеплення зручно користуватися формулою:

$$\Delta \tilde{\nu} = 5,82 \frac{Z_{ef}^4}{n^3 l(l+1)} \text{ см}^{-1}.$$

Величина розщеплення дублету $3p - 3p; (3 {}^2P_{1/2} - 3 {}^2P_{3/2})$ становить $17,0 \text{ см}^{-1}$. Квантовий дефект для s -станів дорівнює $3s - 1,37; 4s - 1,36; 5s - 1,35$ і т.д.

Опис установки

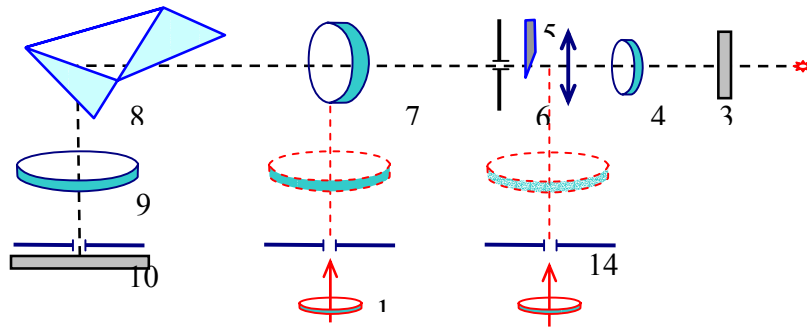
1. Призначення

Монохроматор УМ-2 призначений для різних спектральних досліджень і розв'язку ряду аналітичних задач. Із змінними насадками прилад може служити як спектроскоп. Набір кювет з тримачами і конденсорами призначений для абсорбційного аналізу. Фотоелектричний пристрій, який представляє собою фотоелемент з гальванометром, призначений для виміру інтенсивності спектральних ліній.

Монохроматор УМ-2 виділяє монохроматичні ділянки спектру в видимій і близькій інфрачервоній областях в діапазоні хвиль від 3800 до 10000 А.

2. Оптична схема і принцип дії приладу

Світло через вхідну щілину падає на об'єктив коліматора і паралельним пучком проходить диспергуючу призму. Під кутом 90° до падаючого пучка світла розміщується вихідна труба монохроматора.



- | | |
|-----------------------------|--|
| 1 — джерело світла; | 2 — захисне скло кожуха лампи; |
| 3 — конденсор; | 4 — лінза; |
| 5 — призма порівняння; | 6 — вхідна щілина; |
| 7 — об'єктив коліматора; | 8 — диспергуюча призма; |
| 9 — об'єктив зорової труби; | 10 — вихідна щілина; |
| 11 — захисне скло; | 12 — окуляр 5^x ; |
| 13 — окуляр 10^x ; | 14 — покажчик в фокальній площині зорової труби. |

Повертаючи призмий стовпик на різні кути відносно падаючого пучка світла, отримують в вихідній щілині світло різної довжини хвилі, яке проходить через призму в мінімумі відхилення.

Натрієва лампа.

Джерелом досліджуваного спектру служить натрієва лампа ДНаС-18, що є скляною трубкою, в якій розряд відбувається в парах натрію. Електрони, прискорені електричним полем розряду, при непружних зіткненнях з атомами натрію передають їм свою енергію. При цьому внутрішня енергія атома зростає - його оптичний електрон переходить з основного стану в збуджений (тобто на будь-який вищерозташований енергетичний рівень). У збудженому стані атом знаходиться певний час. Потім оптичний електрон з верхнього рівня переходить або безпосередньо в основний стан (якщо це не заборонено правилами відбору), або на який-небудь розташований нижче рівень, а вже з нього в основний стан. При цих переходах електрона різниця його енергій на різних рівнях випромінюватиметься у вигляді фотонів тієї або іншої довжини хвилі. Так виникає емісійний лінійчатий спектр натрію.

Натрієва лампа поміщена в захисний металевий кожух і за допомогою тримача встановлюється на оптичній лаві перед вхідною щілиною УМ-2. Лампу вмикають в коло змінного струму за стандартною схемою поспідовно із дроселем.

Запобіжні заходи

Натрієва лампа знаходиться в металевому корпусі з невеликим віконцем. Віконце корпусу лампи закрито склом, що затримує ультрафіолетове випромінювання. Знімати корпус лампи і скло забороняється! Під час роботи необхідно стежити, щоб пряме проміння від джерела випромінювання не потрапляло в очі. Після ви-

ключення лампи повторне запалення електричного розряду в ній стає можливим тільки після її охолодження не менше ніж через 10 - 15 хвилин.

Хід роботи

Завдання

1. До початку роботи розрахувати рівні енергії атома натрію, а також довжини хвиль, що виникають при переходах (див. додаток):

$$\begin{aligned} \text{різкої серії} & \quad 3p - 5s \\ & \quad 3p - 6s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{дифузної серії} & \quad 3p - 4d \\ & \quad 3p - 5d \end{aligned}$$

$$\text{головної серії} \quad 3s - 3p$$

2. Записати позначення переходів для дублетів головної і різкої серій.

3. Встановити на оптичну лаву неонову лампу, підключити її і одержати спектр *Ne*. Визначити кутове положення жовтої лінії *Ne* і звірити її положення з кривою градування. (при потребі відкоригувати положення барабана)

4. Поставити на оптичну лаву натрієву лампу, підключити її і одержати жовтий дублет *Na*. Визначити кутове положення ліній.

5. Визначити довжини хвиль ліній за допомогою кривої градування.

6. Обчислити розщеплення в *нм*, см^{-1} , *eV* і занести в табл.

жовта лінія	кут ϕ відн.од.	λ , нм	$\tilde{\nu}$, см^{-1}	ϵ , eV	перехід
лінія випромінювання 1					
лінія випромінювання 2					
лінія поглинання 1					
лінія поглинання 2					
величина розщеплення					

8. Вивести робочу формулу і обчислити поправку внутрішнього екранування a_1

9. Залишити зорову трубу в положенні, наведеному на жовту лінію. Збільшити напругу, що подається на лампу. Спостерігати за зміною спектру з часом. У міру наростання дугового розряду ширина жовтої лінії випромінювання збільшується. Потім відбувається так зване явище обернення лінії *Na*. У центрі широкої жовтої лінії виникає чорний дублет поглинання. Атоми натрію що знаходяться в основному стані оддалік області дугового розряду, поблизу стінок, розрядної трубки резонансно поглинають випромінювання атомів натрію, що йде з області розряду. Це доводить, що дублет належить головній серії.

Контрольні запитання

1. В чому суть спин-орбітальної взаємодії?
2. Фізична причина дублетної структури рівнів енергії.
3. Від чого залежить дублетне розщеплення?
4. Внесок в розщеплення спіну і релятивістських поправок.
5. Що таке $Z_{\text{эф}}$?
5. Тонка структура спектру атома *Na*.
6. Яка тонка структура ліній в різних серіях?

Література

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. -М.: Наука, 1983, т.ІІ.
2. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику. -М.: Наука, 1988, гл. VI.
3. Матвеев А.Н. Атомная физика. -М.: Высшая школа, 1989.
4. Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966.
5. Одинцова Г. А., Стриганов А. Р. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
6. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия: 3-е изд., М.: КомКнига, 2006.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика, М.: Наука, 1989.

Додаток до лабораторної роботи № 7

Енергії станів nl виражаються формулою

$$E_{nl} = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{(n - \Delta_l)^2} = -\frac{Rhc}{(n - \Delta_l)^2} = -\frac{R_y}{(n - \Delta_l)^2}, \quad n = 3, 4, \dots, \quad (1)$$

де $R = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3 c}$, а $R_y = \frac{me^4}{2\hbar^2}$ – ридберг (13,6 еВ) ($Rhc = A = R_y$ (Ридберг)) $1R_y = 13,6$ еВ – енергія іонізації атома водню (із основного стану)

Відмінність від атома водню полягає у тому, що $n - \Delta_l$ вже не ціле число, як у випадку водню, а відрізняється від відповідного головного квантового числа n на величину Δ , ($\Delta > 0$), яку називають квантовим дефектом.

n	l			
	0	1	2	3
	s	p	d	f
3	1,373	0,883	0,013	–
4	1,358	0,867	0,011	0
5	1,353	0,862	0,011	0
6	1,341	0,862	0,011	0

Таблиця 1. Значення квантового дефекту для атома натрію

Довжини хвиль ліній атома лужного металу визначаються із загальної формули:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{(n_1 - \Delta_i)^2} - \frac{1}{(n_2 - \Delta_k)^2} \right) \quad (2)$$

(Індекси i, k означають залежність квантового дефекту від орбітального квантового числа $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$.)

для різкої серії формула приймає вигляд:

$$\frac{1}{\lambda_{n,s}} = R \left(\frac{1}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta_s)^2} \right), \quad n = 4, 5, \dots, \quad (3)$$

а для дифузної серії -

$$\frac{1}{\lambda_{n,d}} = R \left(\frac{1}{(3 - \Delta_p)^2} - \frac{1}{(n - \Delta_d)^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots \quad (4)$$

У формулах R – стала Рідберга, \hbar – стала Планка, m – маса спокою електрона, e – його заряд, n_1, n_2 – головні квантові числа,

Z	елемент	a	a_1
3	Li	1,98	2,02
11	Na	9,58	7,45
19	K	17,24	13,03
37	Rb	34,82	26,95
55	Cs	52,45	40,8

Таблиця 2. Значення сталих a і a_1 для лужних елементів

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c} \text{ стала Ридберга } R = 10\,967\,758 \text{ м}^{-1}$$

спектральне хвильове число $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$