

Лабораторна робота №5

Вивчення спектру водню, визначення сталої Рідберга і сталої Планка

Мета: Вивчити спектр водню і за отриманими даними визначити сталу Рідберга і сталу Планка.

Прилади і матеріали: монохроматор УМ-2, прилад СПЕКТР-1 з спектральними трубками водню і гелію.

Теоретичні відомості

На основі експериментальних результатів розсіювання α -частинок на металічній фользі Резерфордом була запропонована ядерна модель атома. Згідно з цією моделлю в ядрі атома зосереджений увесь його позитивний заряд і майже вся маса атома. Навколо ядра в області з розмірами 10^{-10} м рухаються електрони.

Проте застосування класичної електродинаміки до ядерної моделі атома привело до повної суперечності з дослідними фактами.

Згідно з класичною теорією повинні мати місце:

а) неперервна втрата енергії електронами, що обертаються, у вигляді випромінювання електромагнітних хвиль і нестійкість атома;

б) існування тільки суцільного спектру випромінювання; відсутність спектральних ліній.

Насправді атом є стійкою системою і випромінює енергію тільки за певних умов; випромінює лінійчастий спектр; згідно з законом Кірхгофа спектри поглинання газу також мають лінійчасту структуру.

Досліджуючи спектр водню, швейцарський вчитель фізики Бальмер у 1885 р. встановив, що довжини хвиль відомих на той час дев'яти ліній спектра водню

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

де $\lambda_0 = 3646,13$ А; $n = 3, 4, 5, \dots, 11$ — цілі числа.

Цю формулу записують у вигляді серіальної формули Бальмера

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

де ν — хвильове число; $\nu = 1/\lambda$; R — стала Рідберга.

У 1908 р. Рітц встановив, що частоти спектральних ліній випромінювання будь-якого атома можуть бути зображені у вигляді різниці двох термів. Складаючи різні комбінації термів, можна знайти різні можливі частоти спектральних ліній цього атома.

Так, для водню були розраховані, а також експериментально виявлені:

а) у далекій ультрафіолетовій області спектру серія ліній, що дістала назву серії Лаймана, хвильові числа яких задовольняють співвідношенню

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{l^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{де } n=2,3,4, \dots$$

б) в інфрачервоній області спектру водню була виявлена серія ліній Пашена, що задовільняють співвідношенню

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{де } n=4,5,6, \dots$$

в) в далекій інфрачервоній області — серія Брекета

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{де } n=5, 6,7, \dots$$

серія Пфунда:

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{де } n=6,7, 8, \dots$$

серія Хемфрі:

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad \text{де } n=7,8,9, \dots$$

Усі серіальні формули спектру водню можуть бути виражені єдиною формулою;

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$

де k і n — цілі числа (для кожної серії k — постійне, а n — набуває значення $k+1, k+2, \dots$).

Перша спроба побудувати неklasичну теорію атома була зроблена Бором у 1913 р. і відіграла важливу роль у розвитку сучасної фізики.

В основі цієї теорії лежала ідея зв'язати в єдине ціле: емпіричні закономірності лінійчастих спектрів, ядерну модель атома Резерфорда й квантовий характер випромінювання і поглинання світла, що підтверджувались численними експериментальними результатами.

Проте для досягнення цієї мети Бору довелося класичний опис доповнити деякими обмеженнями. Ці обмеження були сформульовані у вигляді постулатів, фізичний зміст яких суперечив класичному руху електронів. Однак такий непослідовний шлях привів до правильних результатів у поясненні спектральних закономірностей атома водню, оскільки у борівській теорії були правильно зазначені деякі властивості атомних систем.

Ці правильні результати отримані в квантовій механіці з більш точних і загальних положень, що не вимагають постулатів.

Теорію Бора можна застосовувати й до воднеподібних систем, які складаються з ядра з зарядом $+Ze$ і одного електрона ($\text{He}^+, \text{Li}^{++}$).

Перший постулат Бора: існують деякі стаціонарні стани атома, перебуваючи в яких він не поглинає і не випромінює енергії.

Другий постулат Бора: в стаціонарному стані атома електрон, рухаючись по круговій орбіті, повинен мати квантоване значення моменту імпульсу, що задовільняє умові

$$L_n = mv_n r_n = n\hbar$$

де m , v , r — маса, швидкість і радіус орбіти електрона. \hbar — стала Планка, $n=1, 2, 3, \dots$

Третій постулат Бора: при переході атома з одного стаціонарного стану в інший випромінюється або поглинається квант енергії. Випромінювання відбувається при переході в стан з меншою енергією (при переході електрона з орбіти більш віддаленої від ядра на орбіту, що знаходиться ближче до ядра.) Поглинання енергії зв'язане з переходом атома в стан з більшою енергією (переходом електрона на більш віддалену орбіту.)

Якщо W_n і W_k — енергії атома в двох стаціонарних станах, то

$$W_n - W_k = \hbar\omega \quad (2)$$

При $W_n > W_k$ відбувається випромінювання кванта енергії $\hbar\omega$, при $W_n < W_k$ — поглинання кванта.

На основі постулатів Бора виведемо серіальну формулу (1). Бор вважав, що рух електрона в атомі відбувається по круговій орбіті радіуса r під дією кулонівської сили притягання електрона до ядра, яка зрівноважується доцентровою силою, тому

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3)$$

Домноживши співвідношення на r^2 , отримаємо

$$mv^2 r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \quad (4)$$

Згідно з другим постулатом Бора.

$$mv_n r_n = n\hbar \quad (5)$$

Розв'язавши рівняння (4) і (5) відносно r , маємо

$$r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Ze^2 m} \quad (6)$$

де $n=1, 2, 3, \dots$ — номер орбіти по якій рухається електрон; r — її радіус. Для водню $Z=1$, тоді для $n=1$

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} = 0.528 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

що є радіусом першої борівської орбіти електрона в атомі водню. З формули (6) випливає, що радіуси дозволених орбіт зростають пропорційно квадрату цілих чисел.

Енергія електрона в воднеподібній системі дорівнює сумі його кінетичної і потенціальної енергій в електричному полі ядра;

$$W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Підставивши в останній вираз mv^2 з (3) і r з (6), одержимо вираз енергії електрона в атомі на n -й орбіті;

$$W_n = \frac{Z^2 m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (7)$$

У квантовій механіці вважають n номером дозволеного енергетичного рівня для електрона. Його називають головним квантовим числом. Головне квантове число дозволяє обчислити енергію стаціонарного стану. Підставивши у вираз (2) значення енергії з формули (7), отримаємо серіальну формулу (1)

$$\hbar\omega = W_n - W_k = \frac{Z^2 m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} - \frac{Z^2 m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 k^2}$$

або

$$\omega = \frac{m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^3} Z^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (8)$$

Так, для водню $Z=1$ і, підставивши у (8)

$$R = \frac{m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^3}$$

одержимо вираз, який повністю збігається з формулою (1).

Усі серії ліній випромінювання зручно зображати на діаграмі енергетичних рівнів стрілками, що зв'язують рівні, між якими відбуваються переходи електронів (рис. 1). Із всього спектру випромінювання атома водню можна спостерігати тільки частину ліній серії Бальмера у видимій області спектру.

Із серіальної формули (8) можна обчислити сталу Планка

$$\hbar^3 = \frac{m e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \omega} Z^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

виражаючи частоту через довжину хвилі

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

отримаємо робочу формулу для розрахунку \hbar :

$$\hbar = \sqrt[3]{\frac{m e^4 \lambda}{64\pi^3 \epsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (9)$$

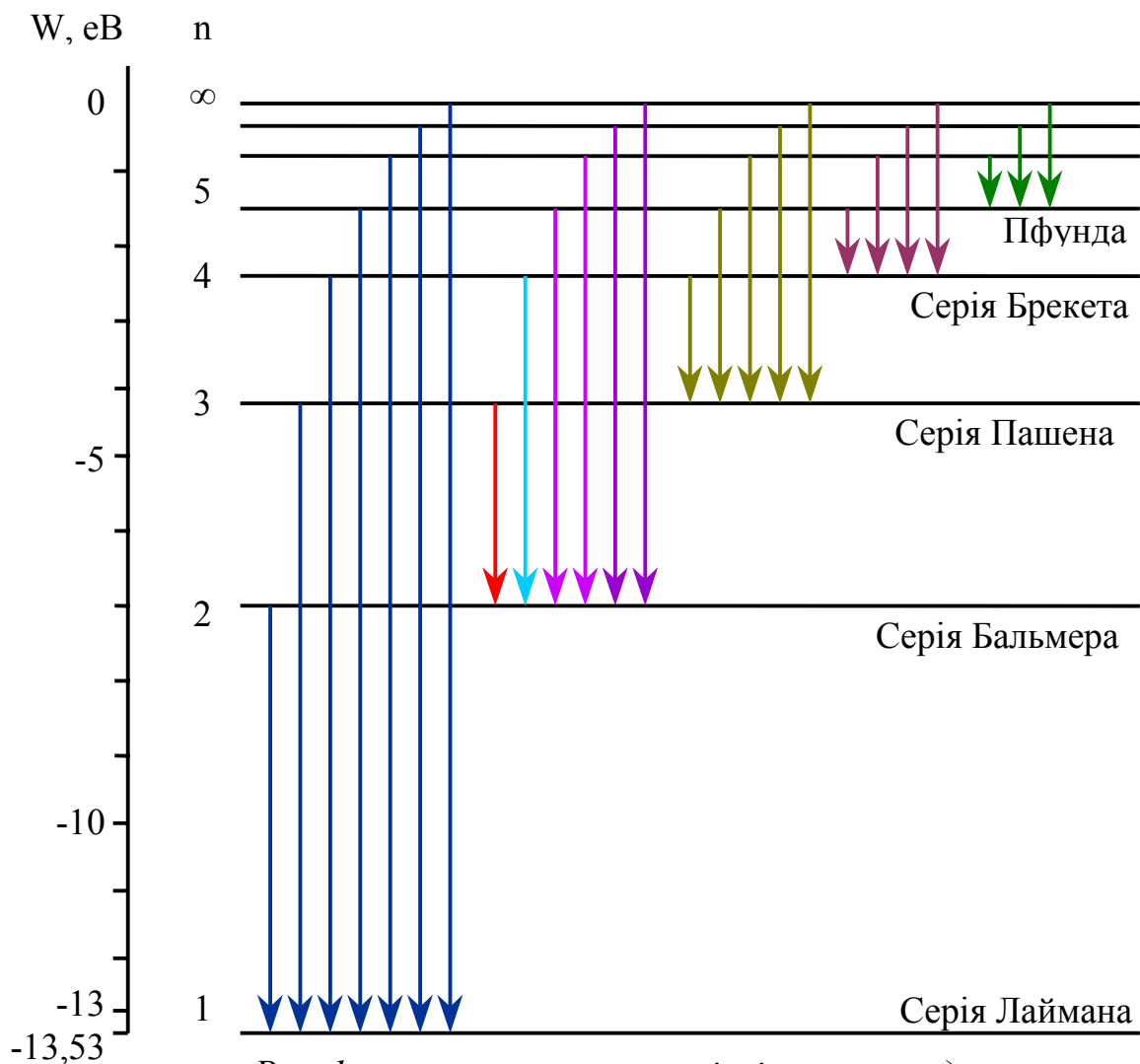


Рис. 1. схема енергетичних рівнів атома водню

Згідно з теорією Бора енергетичний стан, що відповідає головному квантовому числу $n=1$, називається основним (нормальним або незбудженим) станом. Усі стани з $n>1$ збуджені.

Перехід атомів газу з основного стану в збуджений легко здійснити за допомогою електричного розряду в розрідженому газі. Перехід атомів із збудженого стану в основний проходить спонтанно з випромінюванням ліній усіх серій.

Хід роботи

1. Перевірити градування монохроматора, виконане в лабораторній роботі №1.
2. Поставити на оптичну лаву прилад СПЕКТР-1, встановити в нього водневу трубку.
3. Ввімкнути прилад СПЕКТР-1 в сітку 220 В і домогтися яскравого зображення спектральних ліній водню.
4. Дивлячись в окуляр монохроматора, встановити поворотом барабана довжин хвиль кожен спектральну лінію випромінювання водню напроти

візиря в окулярі монохроматора і провести відлік їхніх розміщень за шкалою барабана довжин хвиль.

5. Користуючись кривою градування монохроматора, визначити довжини хвиль кожної лінії.

6. Ознайомитись з лінійчастим спектром гелію.

7. Використовуючи формулу (8), для кожного значення $\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\gamma, \lambda_\delta$ спектра водню визначити сталу Рідберга і знайти її середнє значення,

8. Розрахувати за формулою (9) сталу Планка і обчислити її середнє значення,

Контрольні запитання

1. Чому неперервно-випромінюючий електрон за законами електродинаміки повинен впасти на ядро? Як обходиться це в теорії Бора?

2. Перерахуйте основні досліди, які підтверджують існування в атомів складної структури.

3. Сформулюйте постулати Бора.

4. Поясніть зміст негативного значення енергії електрона.

5. Виведіть вираз для частоти обертання електрона по круговій орбіті.

Література

1. Глауберман А.Ю., Манакін Л.О. Фізика атома та квантова механіка. К., Вища школа, 1972 .
2. Белый М.И., Охрименко Б.А. Атомная физика. К., Высшая школа, 1984.
3. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.М. Практикум по физике. М., Высшая школа, 1965.
4. Лабораторные занятия по физике / Под ред. Гольдина. М., Наука, 1983.