

# FIZYKA WSPÓŁCZESNA

Laboratorium

**Instrukcja do ćwiczenia nr 2**

**Temat: Wyznaczanie stałej Rydberga,  
energii jonizacji wodoru  
i masy zredukowanej elektronu**

## I. Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Teoria Bohra budowy atomu, poziomy energetyczne atomu
2. Stała Rydberga, energia jonizacji atomu wodoru, masa zredukowana
3. Promieniowanie gazów, tworzenie się serii widmowych

## II. Wprowadzenie

Pierwszym, który opisał atom wodoru w sposób dający wyniki zgodne z doświadczeniem, był Niels Bohr. Założył on, że wokół dodatnio naładowanego jądra krąży po orbicie kołowej o promieniu  $r$  ujemnie naładowany elektron o masie  $m_e$ . Oba ładunki  $e$  są równe co do wartości bezwzględnej, a jądro jest dużo cięższe niż elektron.

W takim układzie siła oddziaływań elektrycznych pełni rolę siły dośrodkowej:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \quad F_d = \frac{m_e v^2}{r} \quad (1)$$

Z warunku tożsamości obu powyższych sił otrzymujemy:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = \frac{m_e v^2}{1} \quad (2)$$

Energie elektronu na danej orbicie, potencjalna elektrostatyczna i kinetyczna, wynoszą

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}, \quad E_k = \frac{m_e v^2}{2} \quad (3)$$

Za pomocą równania (2) możemy wygodnie obliczyć energię całkowitą:

$$E = E_p + E_k = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (4)$$

Oznaczając przez  $v$  prędkość liniową elektronu, możemy obliczyć pęd i moment pędu elektronu:

$$p = m_e v, \quad L = pr = m_e v r \quad (5)$$

Żeby otrzymać wyniki zgodne z doświadczeniem, Bohr założył, że **moment pędu elektronu znajdującego się na danej orbicie może przyjmować wartości równe jedynie wielokrotnościom pewnej wartości, zwanej zredukowaną stałą Plancka**, czyli

$$L = m_e v r = n\hbar \quad (6)$$

Zestawiając równania (2) i (6) i rozwiązując powstały układ równań otrzymujemy promień  $n$ -tej orbity elektronu

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} n^2 \quad (7)$$

Inne orbity są niedozwolone. Ciekawe jest, że to proste założenie Bohra o momencie pędu elektronu bardzo dobrze tłumaczy współczesna mechanika kwantowa.

Wstawiając zależność (7) do (4) otrzymujemy energię na  $n$ -tej orbicie ( $n$ -tym poziomie energetycznym)

$$E = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} \quad (8)$$

Energia ta jest ujemna, co jest odbiciem oczywistego faktu, że atom dzięki przyciągającym siłom elektrycznym stanowi układ trwale związany (bez wpływów zewnętrznych). Jednak, co bez uwzględnienia mechaniki kwantowej jest dziwne, energia ta nie jest dowolna w miarę, jak elektron znajdowałby się coraz dalej od jądra, ale jest kwantowana, czyli zależna od  $n$ , zwanego główną liczbą kwantową.

Warto zastanowić się, jaką energię trzeba dostarczyć atomowi wodoru znajdującemu się w stanie podstawowym  $n=1$ , żeby zjonizować atom, czyli trwale oderwać elektron oddalając go na odległość  $r \rightarrow \infty$ , kiedy to zgodnie ze wzorem (7)  $n \rightarrow \infty$ . Energia ta, oznaczona  $E_o$ , jest różnicą energii w stanie zjonizowanym  $n \rightarrow \infty$  i w stanie podstawowym  $n=1$ , czyli zgodnie ze wzorem (8)

$$E_o = E_\infty - E_1 = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \left[ \frac{1}{\infty^2} - \frac{1}{1^2} \right] = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \quad (9)$$

Wykorzystując zależność (9), energię (8) na  $n$ -tym poziomie można wyrazić wzorem

$$E_n = -\frac{E_o}{n^2} \quad (10)$$

Zgodnie z modelem emisji światła przez rozrzedzone gazy, atom znajdujący się początkowo w stanie podstawowym po dostarczeniu mu energii na skutek zderzeń termicznych, lub przepływu prądu przez gaz, albo naświetlania promieniowaniem, zwiększa swoją energię z  $E_1$  do  $E_n$ , co jest tożsame z przeskokiem elektronu z poziomu podstawowego na wyższy poziom energetyczny. Na tym wyższym poziomie (o liczbie kwantowej  $n$ ) elektron pozostaje bardzo krótko, przeskakując na któryś z niższych poziomów (o liczbie kwantowej  $m$ ) i emitując przy tym kwant energii w postaci fotonu, który z kolei jest reprezentowany przez falę elektromagnetyczną o częstotliwości  $\nu$  i długości fali  $\lambda$ . Energia tego fotonu, zgodnie z hipotezą de Broglie'a dana wzorem  $E_f = h\nu$ , gdzie  $h = 2\pi \square$ , jest równa różnicy energii obu poziomów energetycznych

$$E_f = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{E_o}{m^2} - \frac{E_o}{n^2} \quad (11)$$

Stąd długość fali emitowanego fotonu jest równa

$$\lambda = \frac{hc}{E_o} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)^{-1} = \left[ R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

W przypadku obserwowanym optycznie w ćwiczeniu widzialne długości fal powstają przy przeskoku elektronu z wyższych poziomów energetycznych  $n = 3, 4, 5, 6, \dots$  na poziom  $n = 2$ .

Stała występująca w powyższym wzorze nosi nazwę stałej Rydberga

$$R = \frac{E_0}{hc} \quad (13)$$

W przypadku gdy masa jądra nie jest nieskończona, to klasycznie elektron krąży nie wokół jądra, ale wokół wspólnego środka masy. Ponowne przeliczenie powyższych zależności daje podobne wzory z tą tylko różnicą, że zamiast masy  $m_e$  występuje tzw. masa zredukowana

$$\mu = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} \quad (14)$$

Ponieważ  $m_p \gg m_e$ , to masa zredukowana  $\mu$  niewiele różni się od masy elektronu  $m_e$ .

### Spektroskop

Dla spektroskopu użytego w doświadczeniu słuszna jest następująca teoretyczna zależność wiążąca długość fali  $\lambda$  z mierzoną wielkością  $L$

$$\lambda = \frac{1}{(aL + b)^2} \quad (15)$$

zwana formułą dyspersyjną Cauchy'ego-M.  
Formułę tę można przekształcić następująco

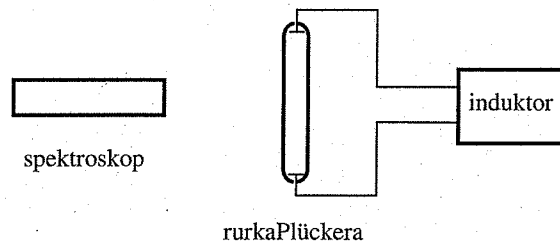
$$\lambda^{-\frac{5}{2}} = aL + b \quad (16)$$

Po przyjęciu  $y = \lambda^{-5/2}$ ,  $x = L$ , można użyć dopasowania metodą najmniejszych kwadratów w celu znalezienia parametrów  $a$  i  $b$ , a tym samym zależności  $\lambda(L)$ .

### III. Wykonanie ćwiczenia

1. Zestawić układ pomiarowy według schematu z rys. 1. Ustawić przed szczeliną spektroskopu rurkę Plückera napełnioną helem tak, by na matówce w okularze lunety spektroskopu oglądać intensywne widmo liniowe.

**Przed uruchomieniem przyrządów zgłosić się do prowadzącego ćwiczenia, aby w jego obecności włączyć induktor wytwarzający wysokie napięcie. Podczas wykonywania ćwiczenia nie dotykać przewodów elektrycznych ani rurki Plückera z gazem. Napięcie zasilające wynosi kilka tysięcy woltów!**



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

- W celu wyskalowania przyrządu, przesuwać pokrętko skali spektroskopu odczytać położenie  $L$  wszystkich linii widmowych helu. Zanotować odpowiadające im długości fal według tabeli.  
Zanotować także dane potrzebne do obliczenia niepewności pomiaru.

$L$	$\lambda$	barwa	natężenie
[ - ]	[ $\mu\text{m}$ ]		
	0.7065	czerwona	słaba
	0.6678	czerwona	silna
	0.5876	żółta	bardzo silna
	0.5048	zielona	słaba
	0.5016	zielona	silna
	0.4922	zielono-niebieska	umiarkowana
	0.4713	niebieska	silna
	0.4471	fioletowa	silna
	0.4388	fioletowa	bardzo słaba

- Wyłączyć zasilanie prądem**, usunąć rurkę Plückera napełnioną helum i przed szczeliną ustawić rurkę z wodorem.
- Widzialna część atomowego widma wodoru składa się z czterech linii widmowych: czerwonej  $H_{\alpha}$ , niebieskiej  $H_{\beta}$  i dwu fioletowych  $H_{\gamma}$  i  $H_{\delta}$ .  
Odczytać położenie  $L_H$  tych linii na skali spektroskopu.

#### IV. Obliczenia

- Narysować wykres  $\lambda(L)$  dla helu oraz wykres  $y(L)$ , gdzie  $y=\lambda^{-2.5}$ .
- Metodą najmniejszych kwadratów dopasować do punktów  $y(L)$  prostą  $y=aL+b$ , znajdując  $a$ ,  $b$ ,  $u(a)$ ,  $u(b)$ .
- Z zależności (15) znaleźć nieznaną długości fal  $\lambda_H$  dla linii widmowych wodoru korzystając ze zmierzonych  $L_H$ .
- Obliczyć niepewność  $u(L_H)$  metodą typu B.
- Obliczyć niepewności  $u(\lambda_H)$  dla każdej linii wodoru metodą przenoszenia niepewności na podstawie  $u(a)$ ,  $u(b)$ ,  $u(L_H)$ .
- Obliczyć stałą Rydberga  $R$  przekształcając wzór (12) dla każdej linii o długości  $\lambda_H$ . Należy przyjąć  $m=2$ ,  $n=3,4,5,6$ .
- Obliczyć  $u(R)$  metodą przenoszenia niepewności bazując na  $u(\lambda_H)$  dla każdej linii  $\lambda_H$ .  
Powyższe wyniki zapisać w tabeli

$L_H$	$u(L_H)$	$\lambda_H$	$u(\lambda_H)$	$R$	$u(R)$
[ - ]	[ - ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ ]	[ ]

- Obliczyć średnią stałą Rydberga  $R_{sr}$  oraz jej niepewność  $u(R_{sr})$  metodą średniej ważonej, ponieważ niepewności  $u(R_i)$  są różne. Należy skorzystać z następujących wzorów na średnią  $X_{sr}$  wielu wielkości  $X_i$  oraz jej niepewność  $u(X_{sr})$

$$X_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^k X_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad W_i = \frac{1}{[u(X_i)]^2}, \quad u(X_{sr}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^k W_i}}$$

9. Obliczyć energię jonizacji  $E_o$  atomu wodoru przekształcając wzór (13).  
Obliczyć niepewność  $u(E_o)$  metodą przenoszenia niepewności na bazie  $u(R)$ .
10. Obliczyć masę zredukowaną  $\mu$  przekształcając wzór (9) i przyjmując  $\mu=m$ .  
Obliczyć niepewność  $u(\mu)$  metodą przenoszenia niepewności na bazie  $u(E_o)$ .
11. We wnioskach zapisać poprawnie wyniki  $R$ ,  $E_o$ ,  $\mu$ . Porównać też (za pomocą niepewności) te wyniki z odpowiednimi wartościami tabelarycznymi.

### Literatura

- J. Massalski, M. Massalska, *Fizyka dla inżynierów*, t.2, WNT, Warszawa 2001  
 R. Resnick, D. Halliday, *Fizyka*, PWN, Warszawa 2010