

Eksperyment Francka - Hertza

Monika Kubek

*Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń*

Pomiary przeprowadzono dnia 6 XII 2016 roku na II Pracowni Fizycznej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Celem doświadczenia było przeprowadzenie doświadczenia Francka - Hertza i zapoznanie się z kwantowymi efektami zachodzącymi w atomach.

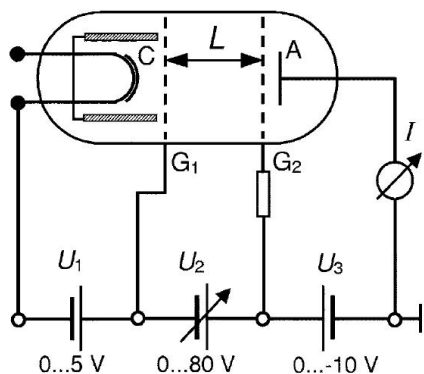
I. WSTĘP TEORETYCZNY

W 1913 roku Niels Bohr przedstawił planetarny model atomu. W modelu tym atom składa się z dodatnio naładowanego jądra wokół którego krążą elektrony rozmieszczone na stacjonarnych orbitach. Bohr postulował także, że istnieją tylko takie orbity, dla których moment pędu elektronu jest całkowitą wielokrotnością stałej Plancka \hbar , czyli wynosi $L = n\hbar$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Elektrony w atomie zajmują zatem pewne dyskretne stany, a przejścia z wyższego na niższy stan są źródłem promieniowania o częstotliwości ustalonej przez różnicę energii tych stanów. Uzasadniony jest zatem i odwrotny wniosek, że zaabsorbowanie przez elektron energii równej różnicy energii między dwoma poziomami spowoduje wzbudzenie elektronu do tego wyższego poziomu.

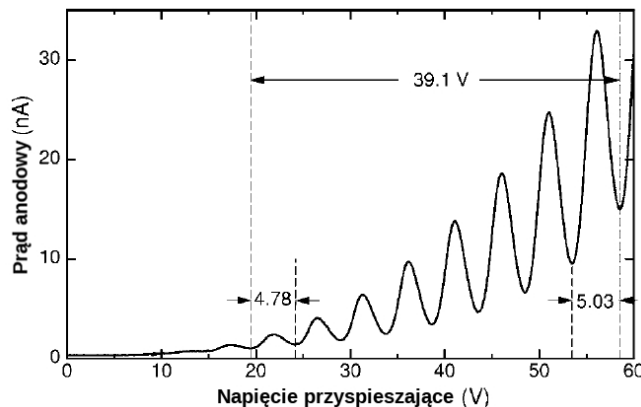
Eksperyment Francka - Hertza w rtęci

W 1914 roku J. Franck i G. Hertz przeprowadzili doświadczenie, które było empirycznym dowodem na istnienie skwantowanych poziomów energetycznych. Użyli oni wiązki przyspieszonych elektronów, aby zmierzyć energię potrzebną do wzbudzenia elektronów ze stanu podstawowego w parach rtęci. Doświadczenie nagrodzono w 1925 roku Nagrodą Nobla za odkrycie praw rządzących zderzeniem elektronu z atomem.

Na rysunku 1 widzimy schemat układu. Napięcie siatki to napięcie przyspieszające, natomiast anodowe to napię-



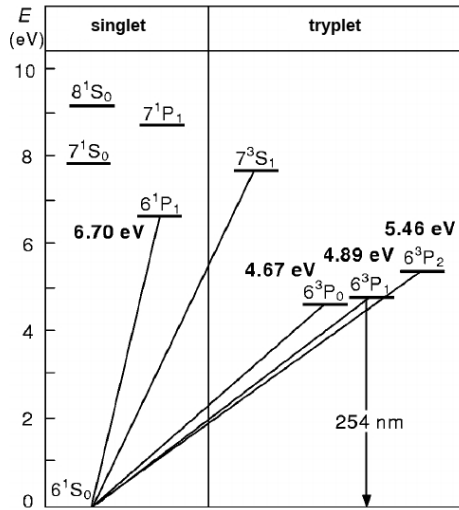
Rysunek 1: Schemat układu pomiarowego w doświadczeniu [3].



Rysunek 2: Wykres zależności prądu anodowego od napięcia przyspieszającego w tubie wypełnionej rtęcią o temperaturze 170°. [3].

cie hamujące. Początkowo elektrony są przyspieszane, następują zderzenia elastyczne z tomami rtęci i jeżeli napięcie przyspieszające jest bardzo małe, to napięcie anodowe hamuje elektrony i prąd nie płynie. Zwiększamy napięcie siatki i w pewnym momencie prąd zaczyna płynąć. Dalsze zwiększanie napięcia powoduje wzrost natężenia prądu i właściwie spodziewamy się efektu, że w miarę wzrostu napięcia cały czas rośnie prędkość elektronów. To co w rzeczywistości obserwujemy przedstawia rysunek 2. Widać wyraźnie, że w okolicach wielokrotności 4,86 V elektrony tracą energię. Strata ta jest spowodowana zderzeniami elektronów z atomami rtęci, które właśnie przy takiej energii można wzbudzić. Elektron porusza się dalej, jest cały czas przyspieszany i jeżeli drugi raz jego energia wyniesie 4,86 eV, znowu ma możliwość wzbudzenia atomu rtęci i ponownie maleje jego prędkość, a tym samym wartość płynącego prądu. Proces ten się powtarza przy każdej wielokrotności 4,86 V i obserwuje się wyraźne skoki natężenia płynącego prądu. Energia 4,86 eV odpowiada linii emisyjnej 253,7 nm.

Wy tłumaczenie tego zjawiska musi być oparte na teorii dyskretnych poziomów energetycznych. Aby atomy wzbudzały się tylko przy określonych energiach, poziomy energetyczne muszą być skwantowane, inaczej odbierałyby energię elektronom w sposób ciągły lub mniej uporządkowany. Na rysunku 3 widać poziomy energetyczne rtęci. Najczęściej występującym przejściem jest $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$, odpowiada mu energia równa 4,86 eV.



Rysunek 3: Najniższe poziomy energetyczne rtęci [3].

Jest to przejście interkombinacyjne ($\Delta S \neq 0$), wzbrońione w sprzężeniu LS. Jednak term 3P_1 nie jest termem czystym, pojawia się domieszka poziomu 1P_1 . Rtęć jest atomem zbyt ciężkim, aby opis za pomocą przybliżenia sprzężenia LS zachowywał wymaganą dokładność. Poziom 3P_0 jest metatrwały, ponieważ przejście z tego poziomu naruszałoby ściśle obowiązującą regułę wyboru $J : 0 \rightarrow 0$.

Eksperyment z neonem

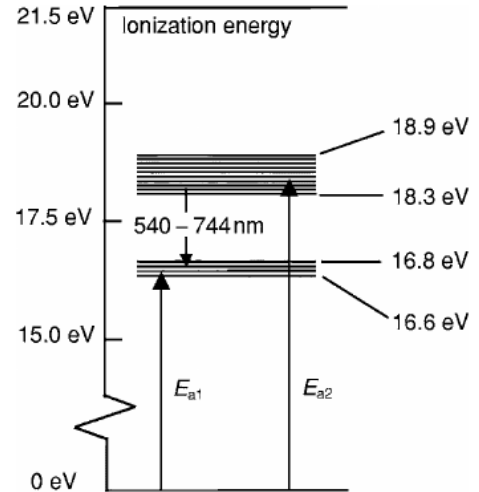
Eksperyment ten można przeprowadzić także z użyciem neonu. Cała procedura i układ pomiarowy wyglądają podobnie. Spójrzmy na rysunek 4. Widzimy, że pierwsze 14 poziomów wzbudzonych można podzielić na dwie grupy, E_{a1} i E_{a2} z przerwą wynoszącą około $\Delta E_p = 1,7 \text{ eV}$. Dowody wzbudzenia do poziomu E_{a2} możemy zobaczyć na własne oczy w trakcie przeprowadzania eksperymentu. W tubie z neonem widać warstwy gazu emitujące światło w zakresie od 540 nm do 744 nm co odpowiada przejściom z E_{a2} do E_{a1} .

Energia

Energia między dwoma kolejnymi minimami n i $n-1$ wynosi

$$\Delta E(n) = E_n - E_{n-1} = \left[1 + \frac{\lambda}{L} (2n-1) \right] E_0, \quad (1)$$

gdzie λ to średnia droga swobodna elektronu, L to długość drogi na jakiej elektron jest przyspieszany, E_0 to minimalna energia potrzebna do wzbudzenia atomu. Z równania 1 widzimy, że odległość między minimami rośnie liniowo wraz z n . Minimalna energia wyliczona z powyż-



Rysunek 4: Wybrane poziomy energetyczne neonu [3].

szego równania wynosi

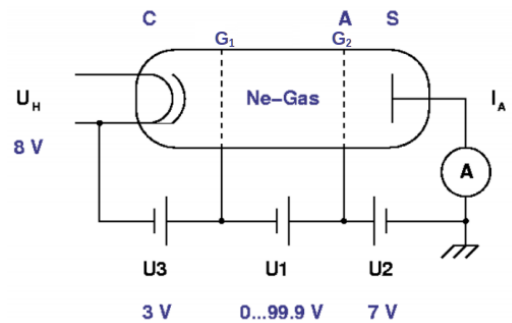
$$E_0 = \Delta E(0, 5), \quad (2)$$

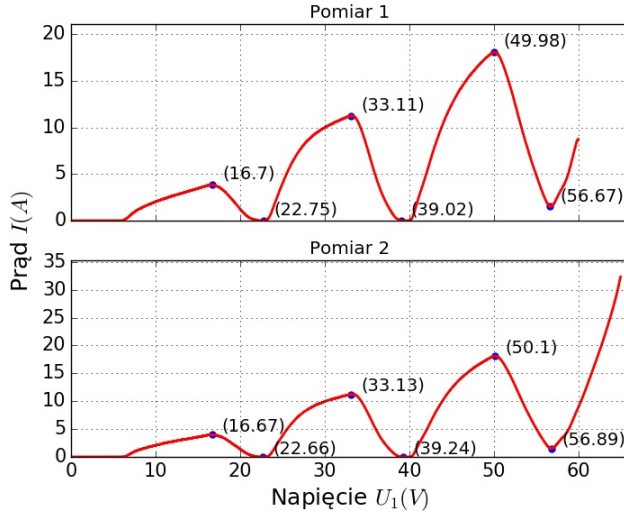
jak widać jej wartość otrzymujemy dla 'połowicznego' minimum. Nie możemy zatem poznać najniższej energii potrzebnej do wzbudzenia atomu bezpośrednio z pomiarów w doświadczeniu Francka - Hertza. Obliczmy także średnią drogę swobodną elektronów

$$\lambda = \frac{L}{2E_0} \frac{d\Delta E(n)}{dn}. \quad (3)$$

II. APARATURA I POMIAR

Do wykonania doświadczenia użyty został zestaw doświadczalny z tubą wypełnioną neonem firmy PHYWE

Rysunek 5: Schemat urządzenia pomiarowego [1]. G_1 i G_2 - siatki, C - katoda, A - anoda, S - elektroda pomocnicza, U_H - napięcie na termokatodzie, U_1 - napięcie przyspieszające, U_2 - napięcie hamujące, I_A - prąd anodowy.



Rysunek 6: Zależność prądu anodowego od napięcia na siatce. Zaznaczona jest także wartość napięcia dla której występuje dane minimum i maksimum.

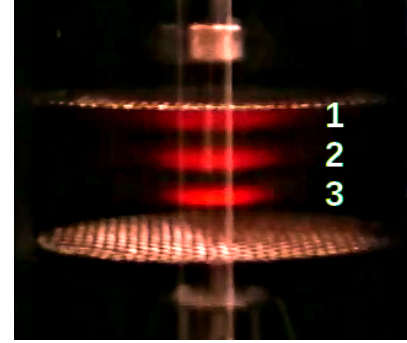
[1]. Schemat urządzenia pomiarowego wraz z ustawieniem przedstawiony jest na rysunku 5. Zmierzona odległość między siatkami wynosi $L = (7,5 \pm 0,1) \text{ mm}$, a odległość siatki od katody to $L_{GC} = (2,2 \pm 0,1) \text{ mm}$. W przeciwieństwie do rtęci eksperyment z neonem mógł odbywać się temperaturze pokojowej. Do przeprowadzenia eksperymentu zostało użyte specjalne oprogramowanie, które pozwalało dobrać odpowiednie parametry na przyrządzie oraz zakresy pomiarowe. Wykonane zostały dwa pomiary ze zmiennym napięciem U_1 , pierwszy w zakresie $0 - 60 \text{ V}$, a drugi w zakresie $0 - 65 \text{ V}$. Przy wyższych napięciach następował zapłon neonu w tubie co uniemożliwiało dalsze mierzenie. Napięcie stopniowo wzrasta. Przy wartości około $16,8 \text{ V}$ energia kinetyczna elektronów jest wystarczająca, aby wzbudzić elektron walencyjny w neonie poprzez zderzenie nieelastyczne. Elektrony nie mają wtedy już wystarczającej energii kinetycznej, aby pokonać napięcie hamujące i dotrzeć do ostatniej elektrody - napięcie drastycznie spada. Podnosimy napięcie dalej i gdy jego wartość wzrośnie do $2 \cdot 16,8 \text{ V}$ energia kinetyczna jest na tyle duża, że jeden elektron może wzbudzić dwa atomy z rzędu, itd. Uzyskane dane pozwalają zaobserwować zależność prądu anodowego od napięcia przyspieszającego. Dodatkowo przeprowadzono obserwacje świecących warstw neonu w tubie. Zjawisko to zostało zarejestrowane za pomocą kamery.

III. WYNIKI

Na rysunku 6 przedstawiony jest wykres zależności $I(U_1)$ dla każdego z pomiarów. Widzimy, że kolejne maksima zgadzają się z podanymi wcześniej wartościami. Po nich następuje spadek napięcia. Wartości ekstremów zostały zestawione w tabeli I.

Tabela I: Wartości napięcia dla kolejnych minimów n .

Numer minimum n	Napięcie przyspieszające U_1 (V)	
	Pomiar 1	Pomiar 2
1	22,75	22,66
2	39,02	39,24
3	56,67	56,89



Rysunek 7: Obserwowane świecące warstwy w neonie.

Klatka z filmu przedstawiająca świecące warstwy w neonie pokazana jest na rysunku 7. Została ona poddana obróbce, aby warstwy były lepiej widoczne. Każda z warstw odpowiada kolejnym maksimum.

IV. ANALIZA WYNIKÓW

Znając wartość napięcia przyspieszającego dla trzeciego minimum można policzyć średnią drogę swobodną elektronów [3] jako

$$\lambda = \frac{\Delta E_p}{eU_1} L \quad (4)$$

co daje nam wynik

$$\lambda = (0,22 \pm 0,03) \text{ mm}. \quad (5)$$

Korzystając ze zmierzonych rzeczywistych odległości oraz z proporcji na rysunku 7 zostały policzone odległości między świecącymi warstwami pierwszą i drugą

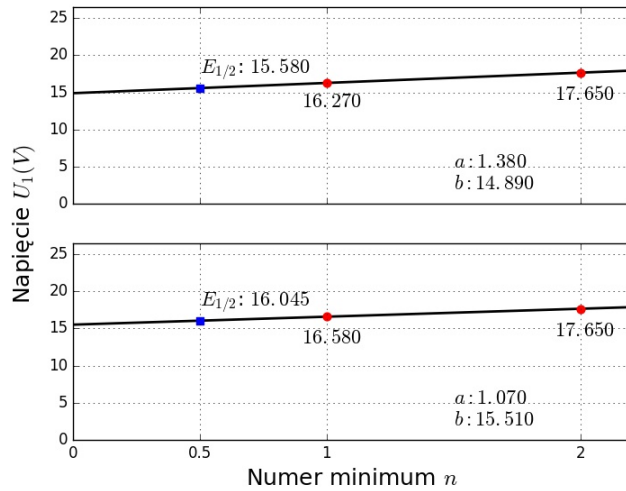
$$\lambda_{12} = 0,225 \text{ mm} \quad (6)$$

oraz drugą i trzecią

$$\lambda_{23} = 0,205 \text{ mm}. \quad (7)$$

Widzimy, że wartości te są zbliżone do policzonej wcześniej średniej drogi swobodnej (5).

Wzór na różnicę energii (1) rozwiążmy jako funkcję liniową $\Delta E(n) = a \cdot n + b$, znając różnice energii oraz



Rysunek 8: Dopasowanie liniowe i energia najniższego wzbudzenia.

numery minimum dla dwóch pomiarów obliczamy współczynniki a i b , a następnie z (2) energię najniższego wzbudzenia dla pierwszego i drugiego pomiaru

$$E_{01} = 15,6 \text{ eV} \quad (8)$$

$$E_{02} = 16,0 \text{ eV}. \quad (9)$$

Błąd pomiaru

Ponieważ dopasowanie liniowe wykonane jest tylko dla dwóch wartości to ciężko jest obliczyć jego konkretny błąd. Trudno jest też stwierdzić z jakim błędem zostały wybrane wartości dla każdego minimum. Ze względu na to zdecydowałam się nie podać żadnej wartości błędu wyznaczonych energii (8) i (9).

Narzędzia

Analiza została wykonana za pomocą języka Python [6], biblioteki SciPy [7]. Wykresy stworzone zostały przy użyciu modułu Matplotlib.

V. PODSUMOWANIE

Podczas pomiaru bardzo szybko następował zapłon neonu przez co zmierzone zostały wartości tylko w trzech minimach. Utrudniło to wyznaczenie błędu pomiaru, gdyż dopasowanie liniowe różnicy energii zostało wykonane dla dwóch wartości. Jak widzimy na rysunku 4, najniższe energie mają wartość $16,6 - 16,8 \text{ eV}$. Wyniki uzyskane z obliczeń są zatem zaniżone, natomiast wartości dla pierwszego maksimum wykresu na rysunku 6 pasują idealnie.

- [1] Franck-Hertz experiment with a Ne-tube, <https://www.phywe.com/en/franck-hertz-experiment-with-a-ne-tube.html> [dostęp: 2016-12-16]
- [2] G. K. Woodgate, Struktura atomu, PWN 1974.
- [3] G. Rapior, K. Sengstock, and V. Baev, New features of the Franck-Hertz experiment, Am. J. Phys. 74, 423 (2006).
- [6] Python Software Foundation. Python Language Refer-

ence, version 3.5.2. Available at <http://www.python.org> [Online; accessed 2016-12-05].

- [7] Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/> [Online; accessed 2016-12-05].