



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt „Plan rozwoju Politechniki Częstochowskiej”  
współfinansowany ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO  
Numer Projektu: POKL.04.01.01-00-59/08

***INSTYTUT FIZYKI***  
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA



***LABORATORIUM Z FIZYKI TECHNICZNEJ***

**ĆWICZENIE NR 10**

**DOŚWIADCZENIE FRANCKA - HERTZA**



Politechnika Częstochowska, Centrum Promocji i Zastosowań Nauk Ścisłych  
ul. Dąbrowskiego 73 pok. 178, 42-200 Częstochowa  
tel./ fax. +343250324, e-mail: [imi@imi.pcz.pl](mailto:imi@imi.pcz.pl), <http://www.cns.pcz.pl>

### **I. Zagadnienia do przestudiowania:**

- Model Bohra atomu wodoru;
- Postulaty Bohra;
- Liczby kwantowe;
- Powstawanie widm emisyjnych i absorpcyjnych pierwiastków;
- Zderzenia sprężyste i niesprężyste;
- Doświadczenie Francka – Hertza;

### **II. Cel ćwiczenia:**

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie energii wzbudzenia odpowiadającej przejściu elektronów walencyjnych w atomie rtęci z poziomu podstawowego na pierwszy poziom wzbudzony oraz obliczenie długości fali emitowanego promieniowania w rezultacie powrotu do stanu podstawowego. Wyniki doświadczalne potwierdzają kwantową teorię budowy atomu i umożliwiają wyznaczenie stanów stacjonarnych w atomie rtęci.

### **III. Wprowadzenie teoretyczne:**

Niels Henryk Bohr w 1913r. opracował teorię budowy atomu, według której elektrony krążą wokół jądra po ściśle określonych orbitach stacjonarnych. Według niego elektron poruszający się po konkretnej, dozwolonej orbicie ma określoną energię, której wartość nazywamy poziomem energetycznym. Zgodnie z modelem Bohra atomu wodoru, aby elektron w atomie przeszedł ze stanu podstawowego (tzn. ze stanu o najniższym poziomie energetycznym, który posiada na orbicie możliwie najbliższej jądra) o energii  $E_1$  na najbliższy poziom wzbudzony o energii  $E_2$  musi zostać mu dostarczona energia równa dokładnie:

$$\Delta E = E_2 - E_1. \quad (1)$$

Energia ta może zostać dostarczona na wiele sposobów, np. w postaci kwantu światła o częstotliwości  $\nu$  spełniającej zależność:

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (2)$$

Innym sposobem jest ogrzanie gazu do wysokiej temperatury. Energia cieplna podczas zderzeń będzie zamieniana na energię wzbudzenia. Ten sposób wymaga jednak bardzo wysokich temperatur. Znacznie prostszym sposobem jest przyspieszenie wiązki elektronów w polu elektrycznym i spowodowanie ich zderzeń z atomami gazu. Jeśli energia elektronów w wiązce będzie mniejsza od energii potrzebnej do wzbudzenia walencyjnych elektronów atomów gazu na poziom wzbudzony, wtedy podczas zderzeń przyspieszonych elektronów z atomami gazu elektrony te praktycznie nie zmieniają

### *Ćwiczenie 11: Doświadczenie Francka-Hertza*

energii kinetycznej. Dzieje się tak z powodu znacznej dysproporcji mas elektronu i atomów gazu. Zderzenie wygląda podobnie jak zderzenie ze ścianą po którym elektrony mogą zmienić kierunek ale ich energia kinetyczna pozostaje niezmienną. Mówimy wtedy o sprężystych zderzeniach elektronów z atomem. Kiedy jednak energia elektronu w wiązce jest równa albo większa od energii potrzebnej do wzbudzenia, tj. gdy  $E_{\text{kin}} \geq E_2 - E_1$ , to rozpędzony elektron może podczas zderzenia przekazać elektronowi walencyjnemu energię dokładnie równą różnicy energii między poziomem podstawowym a wzbudzonym. Jeśli energia elektronu w wiązce jest większa od energii wzbudzenia wtedy elektronowi po zderzeniu pozostaje część jego energii podstawowej. W tym przypadku mówimy o niesprężystym zderzeniu elektronu z atomem gazu. Elektron atomu, który przeszedł na poziom wzbudzony po krótkim czasie (rzędu  $10^{-8}$  sekundy), powróci na swój stan podstawowy emitując kwant światła (niekoniecznie widzialnego) zgodnie ze wzorem (2).

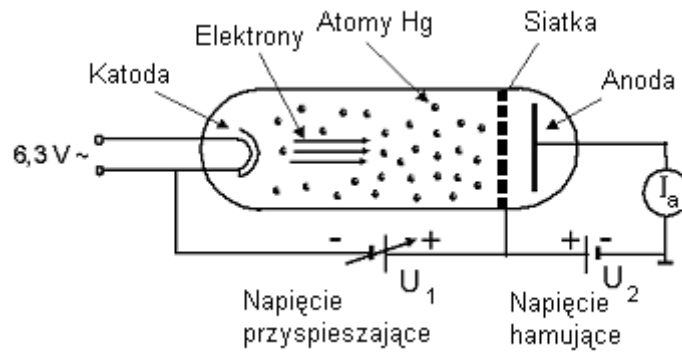
James Franck i Gustaw Hertz wykorzystali wiązkę elektronów przyspieszoną w polu elektrycznym w celu wzbudzania atomu i wyznaczenia energii potrzebnej do przejścia elektronów walencyjnych ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego w gazie złożonym z atomów rtęci. Potwierdzili oni w ten sposób słuszność modelu Bohra.

#### **IV. Metoda pomiaru:**

Doświadczenie Francka - Hertza przeprowadza się przy pomocy specjalnie skonstruowanego układu. Jego najważniejszym elementem jest lampa szklana zawierająca niewielką ilość rtęci, która po podgrzaniu zamienia się w parę. Lampa przedzielona siatką dzieli się na dwie części. W jednym końcu lampy znajduje się katoda, która emituje elektrony na skutek termoemisji, a w drugim anoda. Elektrony wychodzące z katody są przyspieszane w skutek różnicy potencjałów między katodą a siatką, a po przejściu przez siatkę są nieznacznie hamowane na skutek odwrotnie przyłożonej różnicy potencjałów między siatką i anodą. Odległości katoda-siatka oraz siatka-anoda są tak dobrane, aby odległość katoda-siatka była znacznie większa zaś odległość siatka-anoda znacznie mniejsza od średniej drogi swobodnej elektronów. Dzięki temu jest praktycznie niemożliwe aby elektron wyemitowany z katody dotarł do siatki bez zderzenia z atomami gazu (w rzeczywistości zderza się wielokrotnie) i jest mało prawdopodobne by elektrony zderzały się z atomami gazu pomiędzy siatką a anodą. Atom rtęci ma 80 elektronów, ale tylko dwa z nich (walencyjne) można stosunkowo łatwo wzbudzić na wyższy poziom energetyczny. Wyobraźmy sobie, że pomiędzy katodą i siatką przyłożono niewielkie napięcie przyspieszające takie, że energia jaką zyskują w tym polu elektrony  $eU_1$  jest mniejsza od energii wzbudzenia atomów rtęci:

Ćwiczenie 11: Doświadczenie Francka-Hertza

$$eU_1 < E_2 - E_1. \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat ideowy układu doświadczenia Francka-Hertza.

W taki przypadku zderzenia elektronów z atomami rtęci są sprężyste. Podczas każdego zderzenia elektrony zmieniają tylko kierunek ruchu i w końcu przelatują przez siatkę, przebywają obszar napięcia hamującego i docierają do anody. Miernik rejestruje prąd płynący w obwodzie anody. Prąd ten zwiększa się wraz ze zwiększaniem się napięcia przyspieszającego. Kiedy napięcie przyspieszające osiąga wartość taką, że energia przyspieszanych elektronów jest równa albo nieznacznie większa od energii wzbudzenia wtedy zderzenia z atomami stają się niesprężyste. Elektron oddaje energię równą energii wzbudzenia elektronowi walencyjnemu atomu i ten przechodzi na poziom wzbudzony.

Elektron, który spowodował przejście ma teraz znikomą energię kinetyczną niewystarczającą do pokonania hamującego napięcia między siatką a anodą. Obserwujemy gwałtowny spadek prądu anodowego. Gdy nadal zwiększamy napięcie przyspieszające wtedy elektron, który oddał część swojej energii atomowi rtęci ma jeszcze szansę na ponowne przyspieszenie przed dotarciem do anody i uzyskanie energii potrzebnej do pokonania napięcia hamującego. Natężenie prądu anodowego znowu rośnie. Kiedy napięcie przyspieszające staje się na tyle duże, że

$$eU_1 = 2 ( E_2 - E_1 ), \quad (4)$$

wtedy elektron po pierwszym zderzeniu niesprężystym i oddaniu energii atomowi rtęci ma szansę ponownie przyspieszyć tak, że jego energia kinetyczna będzie wystarczająca do wzbudzenia kolejnego atomu na swojej drodze. Po drugim zderzeniu niesprężystym jego energia będzie niewystarczająca jednak aby przebyć napięcie hamujące i ponownie obserwujemy spadek prądu anodowego. Podobny spadek będziemy obserwować dla każdego napięcia przyspieszającego spełniającego zależność

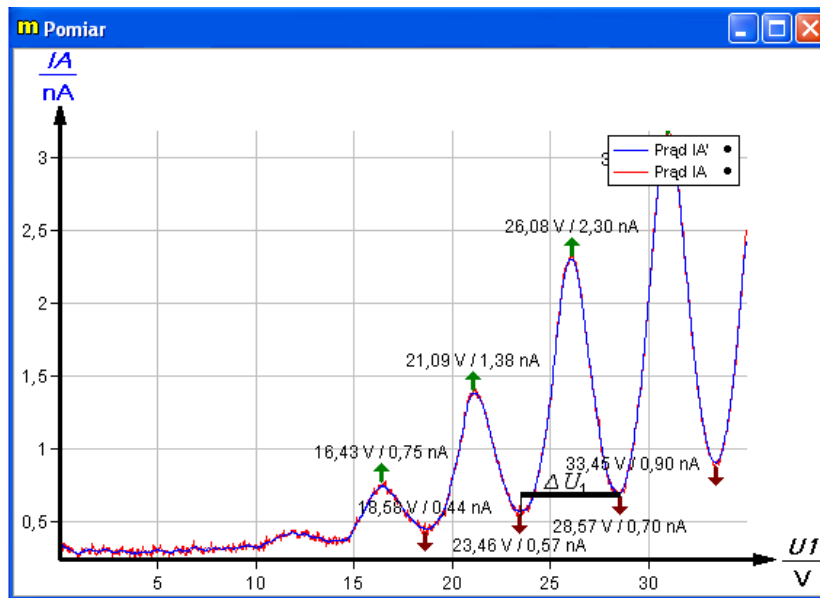
$$eU_1 = n ( E_2 - E_1 ) \quad \text{gdzie } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Zależność prądu anodowego od napięcia przyspieszającego ma kształt przedstawiony na rysunku 2. Odległość między kolejnymi minimami określa energię wzbudzenia

$$E_2 - E_1 = e\Delta U_1 \quad (6)$$

### Ćwiczenie 11: Doświadczenie Francka-Hertza

Warto zwrócić uwagę, że w rzeczywistym eksperymencie położenie pierwszego minimum przypada dla większego napięcia przyspieszającego niż wynosi odległość pomiędzy minimami.



Rys. 2. Natężenie prądu anodowego w funkcji napięcia przyspieszającego.

### V. Przebieg ćwiczenia:

1. Sprawdzić czy zestawienie układu pomiarowego jest zgodne z poniższym rysunkiem i zidentyfikować wszystkie elementy.

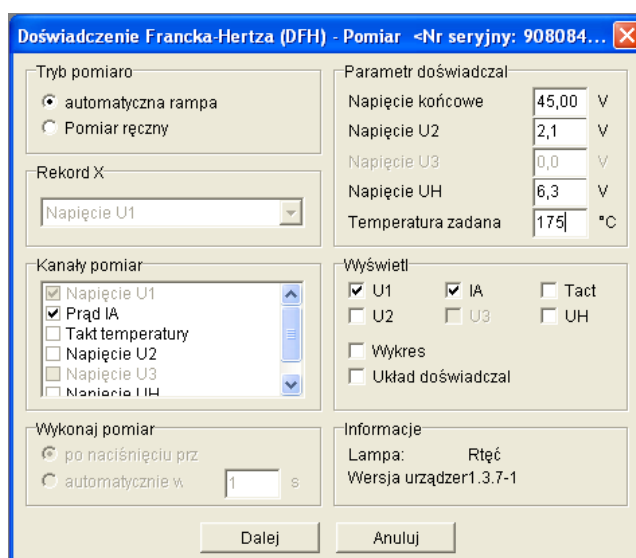


Rys. 3. Zestaw do ćwiczenia doświadczenia Francka-Hertza.

### Ćwiczenie 11: Doświadczenie Francka-Hertza

**Uwaga!** Nie wolno niczego rozłączać ani nie łączyć samodzielnie. Na dalsze czynności trzeba bezwzględnie uzyskać zezwolenie od prowadzącego.

2. Włączyć komputer i uruchomić program „MEASURE”.
3. Włączyć urządzenie kontrolne (Control Unit/ Betriebsgerat Franck-Hertz) wyłącznikiem na tylnej ścianie przyrządu.
4. Przełącznikiem „Function” ustawić tryb pracy „PC”.
5. Sprawdzić, czy czujnik pomiaru temperatury (zielony przewód) znajduje się w gnieździe na górnej ścianie obudowy komory Francka- Hertza.
6. W menu programu Phywe measure 4 wybrać „Plik/Nowy Pomiar” (lub kliknąć na ikonkę w kształcie brązowego kółka).
7. Wprowadzić parametry startowe do Pomiaru I (Patrz rysunek poniżej).



W tym celu:

a) w sekcji „Parametry doświadczalne” ustawić:

- „Napięcie końcowe” - 45V (maksymalne napięcie przyspieszające  $U_1$ )

- „Napięcie  $U_2$ ” - 2,1 V (napięcie hamujące  $U_2$ )

- „Napięcie  $U_H$ ” - 6,3V (napięcie żarzenia  $U_H$ )

- „Temperatura zadana” - 175°C

b) w sekcji „Wyświetl” zaznaczyć tylko  $U_1$  oraz  $IA$

c) w sekcji „Tryb pomiarowy” zaznaczyć „automatyczna rampa”

d) w sekcji „Kanały pomiarowe” zaznaczyć „Prąd  $IA$ ”

8. Włączyć komorę Francka- Hertza ustawiając pokrętkiem z prawej strony szybkość grzania na 5-8 jednostek.

**Uwaga!** Komora będzie nagrzewała się do wysokiej temperatury, z tego względu należy zachować szczególną ostrożność! Nie dotykać!

*Ćwiczenie 11: Doświadczenie Francka-Hertza*

9. Kliknij „Dalej” i odczekać kilka minut. Pojawi się ikonka „Regulacja temperatury”, na której wyświetlana jest aktualna temperatura. Nie klikać na „Ignoruj”, gdyż program sam przejdzie do następnego etapu po osiągnięciu żądanej temperatury tj. 175°C.
10. Gdy na ekranie pojawi się okienko „Doświadczenie Francka-Hertza - pomiar” należy odczekać chwilę i kliknąć na „Rozpocznij pomiar” w celu pomiaru  $I_A=f(U_1)$ , a następnie poczekać do jego zakończenia.
11. W przypadku nieciągłych zmian prądu anody (wykres na ekranie kończy się nagłym spadkiem prądu do zera) odczekać dodatkowo kilka minut celem ustabilizowania się temperatury i ciśnienia wewnątrz komory i powtórzyć pomiar powtarzając czynności opisane w punktach 6-9.
12. Po poprawnym wykonaniu pomiaru należy wyłączyć grzanie piecyka lampy Francka-Hertza (pokrętko z prawej strony przyrządu ustawić na zero) w przeciwnym przypadku temperatura lampy będzie nam dalej wzrastać! Wciskając przycisk „Function” możemy obserwować spadek temperatury.
13. Aby odczytać z wykresu wartości napięć  $U_1$  odpowiadające minimom prądu anodowego  $I_A$  należy wybrać z menu „Analiza pomiaru/Analiza krzywych”, a następnie zaznaczyć opcję „Rysuj rezultaty” oraz kliknąć na „Oblicz”. Dane z tabelki przepisać do tabeli sprawozdania.
14. **(Jeśli będzie drukarka!)** Wybrać z menu „Plik/Zapisz jako...” i zapisz swój pomiar. Po wydruk proszę zgłosić się po zakończeniu wszystkich pomiarów do prowadzącego.
15. Powtórzyć pomiary opisane w punktach 6-13 dla innych parametrów startowych (gdy temperatura spadnie poniżej żądanej wartości T) tj:  
Pomiar II:  $U_1=40\text{ V}$ ,  $U_2=2,1\text{ V}$ ,  $T=175^\circ\text{C}$ ;  
Pomiar III:  $U_1=35\text{ V}$ ,  $U_2=2,1\text{ V}$ ,  $T=175^\circ\text{C}$ ;  
Pomiar IV:  $U_1=35\text{ V}$ ,  $U_2=1,1\text{ V}$ ,  $T=175^\circ\text{C}$ ;  
Pomiar V:  $U_1=35\text{ V}$ ,  $U_2=1,5\text{ V}$ ,  $T=175^\circ\text{C}$ ;  
Pomiar VI:  $U_1=45\text{ V}$ ,  $U_2=2,1\text{ V}$ ,  $T=180^\circ\text{C}$ ;
16. Po zakończeniu pomiarów wyłączyć piecyk lampy Francka-Hertza (pokrętko z prawej strony przyrządu ustawić na zero), wyłączyć urządzenie kontrolne (wyłącznikiem na tylnej ścianie), zamknąć program (Plik/Zakończ) i wyłączyć komputer (Start/Zamknij system).

**VI. Tabela pomiarowa:**

|          | Pomiar I           |                     | Pomiar II          |                     | Pomiar III         |                     | Pomiar IV          |                     | Pomiar V           |                     | Pomiar VI          |                     |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| Rodzaj   | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] | U <sub>1</sub> [V] | I <sub>a</sub> [nA] |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Minimum  |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Minimum  |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Minimum  |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Minimum  |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Minimum  |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
| Maksimum |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |

**VII. Opracowanie wyników:**

1. Z wykresów uzyskanych podczas doświadczenia (patrz rys. 1.) odczytane zostały napięcia odpowiadające minimom prądu anodowego i zestawione w tabeli pomiarowej.
2. Obliczyć energie wzbudzenia (wyrażone w [eV]) dla każdej z par sąsiadujących minimów ze wzoru:  $E_{wzb} = e \cdot \Delta U_1$ , gdzie:  $e = 1,626 \cdot 10^{-19} C$ ,  $\Delta U$  - potencjał wzbudzenia atomów rtęci (odczytany z wykresu i zapisany w tabeli pomiarowej) – jest to różnica wartości napięcia pomiędzy kolejnymi pikami.

3. Obliczyć wartości średnie energii wzbudzenia dla poszczególnych napięć przyspieszających:  $E_{wzb, sr} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_{wzb, i}$ .

5. Wyliczyć długość fali świetlnej odpowiadającej przejściu na poziom wzbudzony.

Porównując stronami równania:  $E_{wzb} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  oraz  $E_{wzb} = e \cdot \Delta U$  otrzymujemy wzór z

którego korzystamy, aby obliczyć interesującą na długość fali:  $\lambda = \frac{hc}{e \cdot \Delta U}$ ,

gdzie:  $c = 2,898 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{J}{s}$ ,  $e = 1,626 \cdot 10^{-19} C$ ,  $\Delta U$  - potencjał

wzbudzenia atomów rtęci (odczytana z wykresu i zapisana w tabeli pomiarowej) – jest to różnica wartości napięcia pomiędzy kolejnymi pikami.



### VIII. *Rachunek błędu i dyskusja wyników:*

1. Przeprowadzić analizę niepewności pomiarowej wyznaczonych wartości energii wzbudzenia.

Aby obliczyć niepewność energii wzbudzenia należy najpierw policzyć  $\sigma_{\Delta U}$ , która jest niepewnością wielkości  $\Delta U$ . Jest to jedyna wielkość mierzona bezpośrednio wpływająca na niepewność energii wzbudzenia zgodnie z zależnością  $\Delta E_{\text{wzb,śr}} = e \sigma_{\Delta U}$

Ponieważ wykonujemy serię  $n$  jednakowo dokładnych pomiarów bezpośrednich wielkości fizycznej  $\Delta U$  wobec tego liczymy ich średnią arytmetyczną tj.  $\Delta \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_i$ , a

niepewność tej wielkości liczymy ze wzoru na odchylenie standardowe średniej:

$$\sigma_{\Delta U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta U_i - \Delta \bar{U}_i)^2}{n(n-1)}}.$$

2. Przeprowadzić analizę niepewności pomiarowej wyznaczonej długości fali.

Aby obliczyć niepewność długości fali należy zróżniczkować wzór:  $\lambda = \frac{hc}{e \cdot \Delta U}$ .

Po zróżniczkowaniu otrzymujemy:  $|\Delta \lambda| = \left| -\frac{hc}{e \cdot (\Delta U)^2} \right| \sigma_{\Delta U}$ .

3. Przedyskutować otrzymane wyniki i przebieg eksperymentu.

### IX. *Literatura:*

- [1] V. Acosta, C. L. Cowan, B. J. Graham „Podstawy fizyki współczesnej”; PWN W-wa 1980
- [2] R. Resnick, D. Halliday „Podstawy fizyki”, t.V; PWN W-wa 2003
- [3] B. Jaworski, A. Dietlaf „Kurs fizyki”, t. III; PWN W-wa 1978
- [4] I. W. Sawieliew „Wykłady z fizyki”, t. III; PWN W-wa 1978
- [5] T. Rewaj „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki w politechnice”. PWN W-wa 1978