



ĆWICZENIE

16a

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Doświadczenie Francka-Hertza z lampą rtęciową

1. Cel ćwiczenia

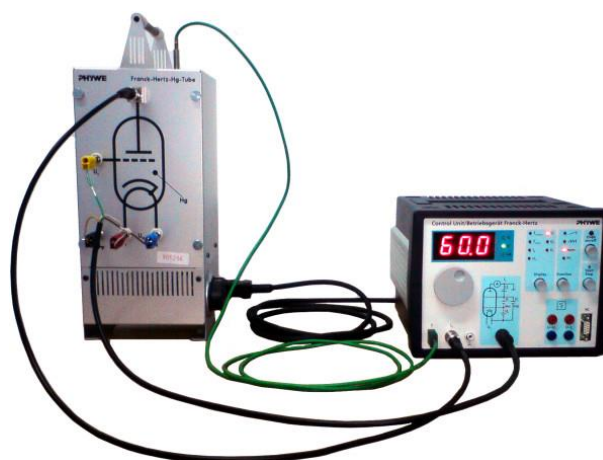
Celem ćwiczenia jest potwierdzenie istnienia dyskretnych poziomów wzbudzenia atomów rtęci i zmierzenie wartości jednego z tych poziomów.

2. Układ doświadczalny

W skład układu eksperymentalnego (rys. 1) wchodzi:

- bańka szklana z wtopionymi elektrodami wypełniona rtęcią,
- obudowa z grzałką i termostatem,
- urządzenie kontrolujące temperaturę, napięcia przyłożone do elektrod bańki oraz mierzące płynący przez nią prąd elektryczny.

Schemat ideowy działania aparatury przedstawia rys. 3.



Rys. 1. Zdjęcie układu pomiarowego.

3. Wstęp teoretyczny

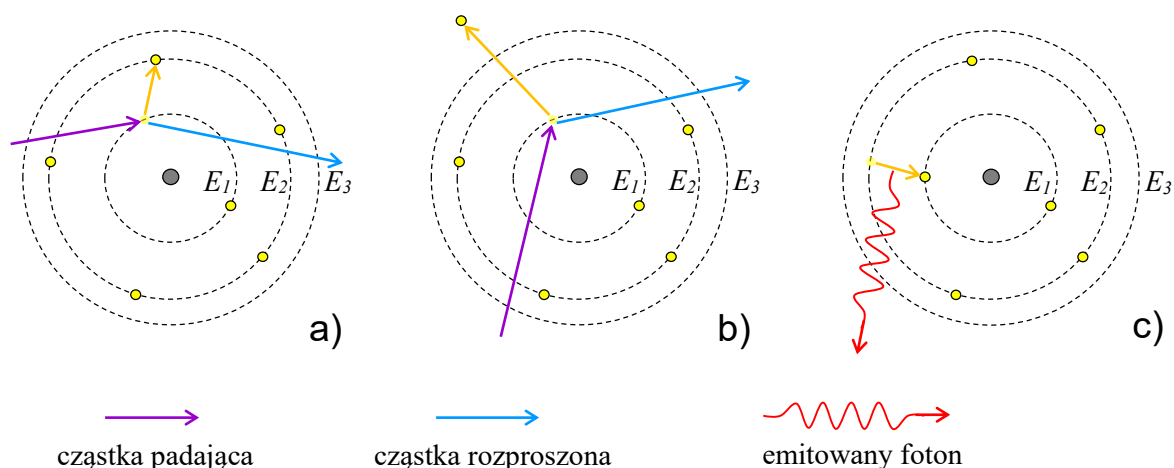
1. Model budowy atomu

Wedle obecnych modeli budowy atomu składa się on z małego jądra atomowego (ok. 100 000 razy mniejszego niż sam atom), w którym skupiony jest ładunek dodatni związany z protonami. Jądro otoczone jest chmurą jeszcze mniejszych (prawie punktowych) elektronów o ładunku ujemnym. Elektrony poruszają się tworząc wokół jądra *orbitale* opisywane *liczbami kwantowymi*. Orbitale można pogrupować w *powłoki*, a każdą powłokę opisuje wartość energii potencjalnej względem jądra, jaką posiadają elektrony na danej powłoce. Im mniejsza ta energia, tym więcej trzeba dostarczyć energii elektronowi, by wybić go z atomu.

Energia potencjalna elektronów na powłokach zmienia się w sposób dyskretny, czyli może przyjmować tylko ściśle określone wartości. Zmiany energii mogą następować podczas:

- jonizacji, w której elektron jest wybijany z atomu przez padającą na atom cząstkę (rys. 2a),
- wzbudzenia, w którym elektron uderzony przez padającą cząstkę przeskakuje z powłoki o mniejszej energii na powłokę o większej energii (rys. 2b),
- deekscytacji, w której elektron spada z powłoki o większej energii na powłokę o mniejszej energii, a zjawisku temu często towarzyszy emisja fotonu (rys. 2c).

Podczas jonizacji i wzbudzenia elektron zyskuje energię kosztem energii kinetycznej padającej cząstki, natomiast podczas deekscytacji traci energię, którą zabiera wylatujący foton. Energia zyskana lub stracona jest równa różnicy energii powłok, pomiędzy którymi przeskakuje elektron.

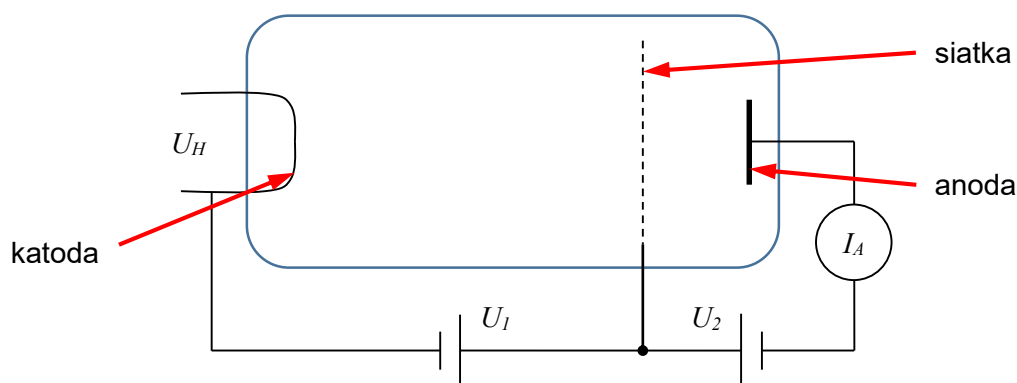


Rys. 2. Model powłok elektronowych w atomie z zaznaczonym schematem a) wzbudzenia, b) jonizacji, c) deekscytacji z emisją fotonu.

2. Doświadczenie Francka-Hertza

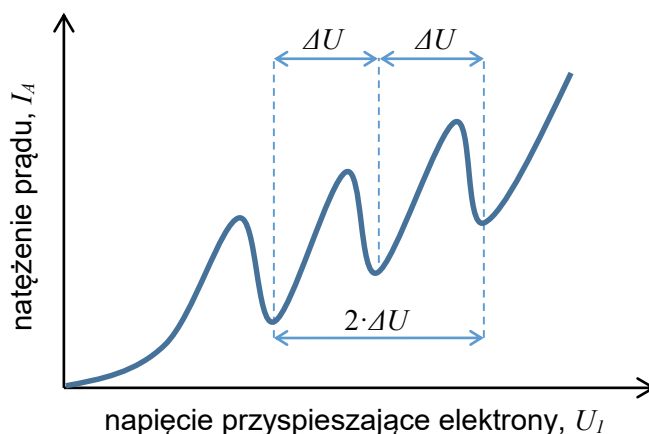
W 1914 roku James Franck (1882-1964) i Gustaw Hertz (1887-1970) przeprowadzili eksperyment, w którym przepuszczali prąd elektryczny przez opary rtęci zamknięte w bańce pod niskim ciśnieniem. Spodziewali się oni, że swobodne elektrony prądu elektrycznego przelatujące przez bańkę będą zderzały się z elektronami w atomach rtęci powodując ich jonizację. Aby było to możliwe, elektrony musiały posiadać odpowiednio dużą energię kinetyczną, co uzyskiwano rozpędzając elektrony w polu elektrycznym wytworzonym pomiędzy metalowymi siatkami zatopionymi w bańce.

Uogólniony schemat aparatury pomiarowej przedstawia rys. 3. W tym układzie elektrony emitowane przez grzaną napięciem U_H katodę i przyspieszane są napięciem U_1 o wartości kilku do kilkudziesięciu woltów przyłożonym do siatek. Swobodna regulacja napięcia U_1 pozwala dobrać energię kinetyczną elektronów, które ulegają zderzeniom z atomami substancji wypełniającej bańkę. Za siatką znajduje się anoda z przyłożonym dodatkowym niskim napięciem U_2 hamującym elektrony. Jeśli energia kinetyczna elektronów przelatujących przez oka w siatce jest wystarczająco duża, by pokonać napięcie U_2 , przez anodę płynie niewielki, acz mierzalny prąd I_A rzędu nanoamperów. Można spodziewać się, że energia elektronów podczas ich ruchu od katody do anody może być tracona podczas zderzeń niesprężystych z atomami i zużyta na ich wzbudzenie. Może to spowodować spadek natężenia prądu elektronowego, gdyż elektrony pozbawione energii kinetycznej po prostu zatrzymują się i nie docierają do anody.



Rys. 3. Schemat ideowy układu pomiarowego

Gdyby atomy nie miały dyskretnej wartości energii, które pochłaniają podczas zderzeń niesprężystych, tylko pobierały tę energię w dowolnych porcjach, to można się spodziewać, że prąd płynący w obwodzie byłby proporcjonalny do napięcia. Jeśli zaś istnieją takie dyskretne wartości energii, poniżej której elektrony odbijają się od atomów zawsze sprężysto, to wykres ten powinien mieć szereg wyraźnych minimów, a odległości pomiędzy nimi powinny odpowiadać energii traconej przy zderzeniu niesprężystym. Minimów może być kilka, ponieważ przy odpowiednio wysokiej wartości napięcia przyłożonego między siatkami elektrony, które wyhamowały podczas zderzenia, mogą znów nabrać prędkości i osiągnąć podobną energię. Zjawisko utraty energii przy zderzeniach elektronów z atomami mogłoby zatem następować wielokrotnie, bowiem elektrony byłyby przyspieszane do odpowiedniej energii kinetycznej nie tylko raz, ale kilka razy podczas swej wędrówki pomiędzy siatkami. Stąd przewidywany wykres natężenia prądu w zależności od napięcia miałby przebieg zbliżony do pokazanego na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres zależności natężenia prądu od napięcia przyspieszającego elektrony

Wprawdzie Franck i Hertz otrzymali wyniki potwierdzające przewidywania co do kształtu krzywej, ale opierając się na złych przesłankach błędnie zinterpretowali je jako efekt jonizacji rtęci. Wyznaczona przez nich wartość energii traconej podczas zderzenia niesprężystego w rzeczywistości odpowiada wartości potrzebnej do przeskoku elektronu atomowego z poziomu podstawowego na poziom wzbudzony, a nie całkowitego oderwania od atomu. Badacze mylili się zatem co do istoty zjawiska, ale przeprowadzone przez nich doświadczenie miało wpływ na rozwój teorii kwantowych, bowiem potwierdzili istnienie dyskretnej wartości energii wiązania elektronów w atomach.

3. Hipoteza

Analizując zależność prądu anodowego I_A od napięcia U_1 można wyznaczyć energię traconą podczas pobudzeń mierząc różnice napięć ΔU pomiędzy kolejnymi minimami. Odpowiada ona wartości $E = e \cdot \Delta U$, gdzie e to wartość ładunku elektronu. Jest tak z tego powodu, że minimum odpowiada sytuacji, kiedy elektrony po zderzeniu niesprężystym tracą całą swoją energię, a więc zatrzymują się. Nadwyżka przyłożonego napięcia pozwala im na ponowne nabranie prędkości do chwili, aż znowu stracą energię w następnym zderzeniu niesprężystym. Różnica napięć pomiędzy minimami odpowiada zatem energii, jaką nabiera elektron od zera (czyli całkowitego zatrzymania) do wartości traconej na wzbudzeniu atomu.

Należy tu zwrócić uwagę, że początek krzywej dla napięcia $U_1 = 0$ nie odpowiada sytuacji, kiedy elektrony spoczywają z zerową energią kinetyczną, ponieważ już w wyniku emisji termicznej z katody mają one pewną energię początkową, zmienianą dodatkowo przez przyłożone napięcie U_3 . Dodatkowe rozmycie położeń minimów na wykresie wynika z różnych innych czynników takich jak termiczne ruchy atomów, konkurencyjne sposoby pobudzeń itp.

Ponieważ wzbudzone atomy ulegają deekscytacji z emisją fotonów, można spodziewać się również, że w szklanej bańce pomiędzy katodą a anodą będą miejsca, w których pobudzony gaz będzie emitował światło. Oczywiście nie zawsze będą to fotony leżące w spektrum światła widzialnego, ale część z nich może być widoczna gołym okiem, ponieważ deekscytacja może zachodzić za pośrednictwem różnym innych poziomów energetycznych. Można zatem naocznie przekonać się, że omawiane zjawisko rzeczywiście zachodzi, a analizując położenie świecących obszarów potwierdzić, że są to miejsca, w których przyspieszane elektrony zderzają się z atomami.

4. Przebieg doświadczenia

A) Włączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.

B) Ustawić uzgodnioną z obsługą laboratorium wartość temperatury T , do jakiej ogrzana ma być bańka wypełniona rtęcią, uruchomić grzanie i poczekać, aż temperatura się ustabilizuje.

Uwaga: powierzchnia obudowy lampy również osiąga wysokie temperatury! Należy uważać, by nie ulec oparzeniu oraz by żadne przedmioty ani kable nie dotykały obudowy, bowiem mogłyby ulec uszkodzeniu!

C) Ustawić napięcia U_H i U_2 na wartości uzgodnione z obsługą laboratorium.

D) Ustawić napięcie U_1 na wartość uzgodnioną z obsługą laboratorium. Zapisać ustawioną wartość.

E) Uruchomić pomiar natężenia prądu anodowego I_A i obserwować wskazania amperomierza. Zapisać uśrednioną wartość tego prądu wraz z niepewnościami pomiarowymi wynikającymi z możliwości przyrządu oraz zaobserwowanych fluktuacji statystycznych.

F) Wyłączyć pomiar natężenia prądu I_A , zmienić napięcie U_1 i uruchomić następny pomiar prądu.

G) Pomiar prądu anodowego należy wykonać dla całego zakresu napięć przewidzianych do eksperymentu, za każdym razem zapisując wartości U_1 i I_A . Zakres oraz skok napięcia ustalić z obsługą laboratorium.

H) Wykonać wykres zależności I_A od U_1 . Na wykresie zlokalizować minima lokalne i zapisać, dla jakich napięć U_1 one występują. Oszacować niepewności tych napięć.

I) Na podstawie zapisanych wartości napięć odpowiadających kolejnym parom minimów obliczyć różnicę napięć ΔU . Obliczenia przeprowadzić zarówno dla minimów sąsiadujących ze sobą na wykresie, jak i dla minimów bardziej odległych, dzieląc wynik odejmowania przez odpowiednią liczbę całkowitą odpowiadającą liczbie maksimów pomiędzy minimami.

J) Oszacować niepewności pomiarowe otrzymanych wartości ΔU .

K) Uśrednić otrzymane wartości ΔU , możliwie uwzględniając różnice w niepewnościach poprzez użycie średniej ważonej.

L) Na podstawie uśrednionej wartości ΔU obliczyć wartość energii E wzbudzenia atomów rtęci i porównać ją z wartością tablicową. Czy wynik zgadza się?

M) Oszacować niepewność pomiarową obliczonej wartości energii E . Czy znajomość tych niepewności wpływa na wyciągnięte wnioski?

N) Po zakończeniu pomiarów wyłączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.