

Doświadczenie Francka i Hertza: 85 lat później

Wacław Świątkowski

Institut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Wrocławski

The Franck and Hertz experiment: 85 years after

Abstract: In many books, where the known Franck and Hertz experiment is presented, one can find numerous mistakes. This problem is discussed using some drastic examples.

W bieżącym roku mija dokładnie 85 lat od ogłoszenia przez Nielsa Bohra postulatów dotyczących kwantowania energii atomu wodoru. Również 85 lat temu James Franck i Gustav Hertz przeprowadzili doświadczenie (opis i wyniki zostały opublikowane w następnym roku [1]), które przeszło do historii nauki pod nazwą doświadczenia Francka i Hertza. Zazwyczaj spotykamy się z sytuacją, że we współczesnych podręcznikach, gdy są omawiane postulaty Bohra, to w sąsiedztwie jest nawiązanie do tego doświadczenia, często ilustrowane kopią rysunku wziętego z pracy [1] (por. rys. 2).

Po przejrzaniu sporej liczby podręczników, w których to zachodzi, stwierdziłem, że mamy tam do czynienia z licznymi potknięciami, i to potknięciami o charakterze merytorycznym. Odniosłem wrażenie, że często sposób przedstawienia wydaje się wskazywać (czasem jest to jednoznaczne), iż autor (autorzy) chce przekonać czytelnika, że:

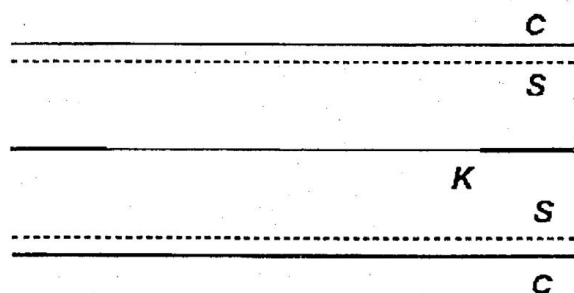
1. impulsem do przeprowadzenia przez Francka i Hertza ich doświadczenia było pojawienie się teorii Bohra;
2. Franck i Hertz chcieli w zderzeniach elektronów z atomami (bez udziału światła) stwierdzić istnienie skwantowanych stanów energetycznych atomów;

3. odległości (wzdłuż osi napięcia) pomiędzy kolejnymi maksimami na uzyskanej przez Francka i Hertza charakterystyce prądowo-napięciowej (rys. 2) są po pomnożeniu przez ładunek elementarny równe różnicy energii między pierwszym stanem wzbudzonym i stanem podstawowym w atomie rtęci.

Ponieważ jednak żadne z tych trzech stwierdzeń nie jest prawdziwe, a autorzy podręczników nie zawsze sobie to uświadamiają (najczęściej dotyczy to ostatniego stwierdzenia), pojawiają się kłopoty.

Zacznijmy jednak od początku. W 1913 r., gdy została ogłoszona koncepcja kwantowania energii atomu, doświadczenie Francka i Hertza było pewnie już przeprowadzone, albo właśnie kończono pomiary, stąd – choćby ze względów kalendarzowych – jakkolwiek związek przyczynowo-skutkowy z koncepcją Bohra nie był możliwy. Również Franck i Hertz nie mieli własnej koncepcji kwantowej, a ich zamiarem było wyznaczenie energii jonizacji atomu rtęci, i wspomniane już odległości sąsiednich maksimów na uzyskanej charakterystyce prądowo-napięciowej (rys. 2) zinterpretowali – jak dziś wiemy, błędnie – jako potencjał jonizacyjny rtęci (więcej szczegółów w tym względzie można znaleźć w książce Trigga [2]).

Idea doświadczenia Francka i Hertza była następująca. W lampie wypełnionej parami rtęci (rys. 1) elektrony emitowane z umieszczonej centralnie katody K mogły być przyspieszane dodatnim, regulowanym napięciem U_{SK} przyłożonym między siatką S i katodą. Na zewnątrz siatki była elektroda-kolektor C o nieco niższym potencjale niż potencjał siatki. Napięcie hamujące między siatką i kolektorem (o wartości $U_h \approx 0,5$ V) pozwalało docierać do kolektora tylko tym elektronom, których energia kinetyczna przy przekraczaniu siatki była nie mniejsza niż eU_h . Dalej, Franck i Hertz założyli, że te elektrony, których ener-

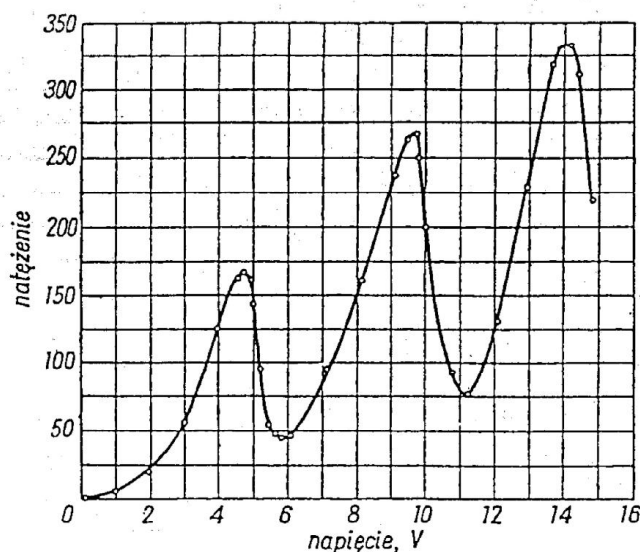


Rys. 1. Schemat rozmieszczenia elektrod w doświadczeniu Francka i Hertza z 1913 r., które miało na celu pomiar energii jonizacji atomów rtęci: K – katoda, S – siatka, C – anoda (kolektor).

gia kinetyczna jest mniejsza niż energia jonizacji atomu rtęci, mogą doznawać z tymi atomami tylko zderzeń sprężystych (przewodzących jedynie do rozproszeń elektronów, praktycznie bez zmiany ich energii). Jeżeli natomiast wartości energii kinetycznej elektronów stawały się większe od energii jonizacji atomu rtęci, mogły one z dużą efektywnością doznawać zderzeń niesprężystych, prowadzących do jonizacji atomów rtęci. Dla układu z rys. 1 oznaczało to, że dopóki napięcie U_{SK} było mniejsze niż $\Delta U = E_j/e$, gdzie E_j oznacza energię jonizacji, należało się liczyć jedynie ze zderzeniami sprężystymi elektronów, a zaraz po przekroczeniu tej wartości powinna bardzo efektywnie zachodzić jonizacja i w wyniku każdego jednostkowego aktu jonizacji zamiast jednego elektronu o energii bliskiej E_j w lampie powinny być dwa elektrony o wartościach energii kinetycznej bliskich zeru, przy czym żaden z tych elektronów nie mógłby dotrzeć do kolektora – prąd kolektora powinien gwałtownie zmaleć. Również i te elektrony – dopóki ewentualnie nie byłyby dodatkowo przyspieszane do energii równej E_j , co można byłoby osiągnąć zwiększając bardziej napięcie U_{SK}

– mogłyby doznawać jedynie zderzeń sprężystych itd. W wyniku należało oczekiwać, że jeżeli ta koncepcja jest prawdziwa, to zależność natężenia prądu kolektora od napięcia U_{SK} powinna mieć kształt w przybliżeniu piłokształtny z odległościami „zębów” równą ΔU .

Jak widać z rys. 2, uzyskany przez Francka i Hertza wynik spełniał te oczekiwania, a odległości „zębów” równe 4,9 eV pozwalały przyjąć, że energia jonizacji atomów rtęci E_j jest równa 4,9 eV.



Rys. 2. Zależność natężenia prądu kolektora (jednostki względne) od napięcia U_{SK} , uzyskana w doświadczeniu Francka i Hertza z 1913 r. [1]; wersja rysunku z opisem w języku polskim według książki [5]. Uwaga: położenie zera na osi napięć jest skorygowane m.in. ze względu na napięcia kontaktowe.

Dzisiaj wiemy, że w rzeczywistości energia jonizacji atomów rtęci jest znacznie większa (10,4 eV) i rys. 2 należy interpretować inaczej. Jeśli założyć, że w zderzeniach elektronów z atomami są możliwe jedynie zderzenia sprężyste, dopóki wartości energii kinetycznej elektronów nie przekraczają energii wzbudzenia pierwszego stanu wzbudzonego ΔE_1 (umówmy się przyjmować energię stanu podstawowego za zero), a po przekroczeniu przez nie wartości ΔE_1 są możliwe efektywne zderzenia niesprężyste, w wyniku których elektrony tracą swoją energię (ściślej zmniejsza się ona o ΔE_1), to powinniśmy oczekiwać wyniku jak na rys. 2, ale odległości „zębów” należałoby wiązać nie z energią jonizacji, a z energią przejścia ze stanu podstawowego do pierwszego stanu wzbudzonego ($\Delta U = \Delta E_1/e$). Jed-

nakże w przypadku atomów rtęci takie założenie też nie jest spełnione. Pierwszy stan wzbudzony atomu rtęci (6^3P_0) jest oddalony od stanu podstawowego (6^1S_0) o 4,68 eV, z tym, że przejście promieniste z tego stanu do stanu podstawowego jest wzbronione. Jest to więc stan charakteryzujący się długim czasem życia, czyli małym rozmiem energetycznym, co objawia się między innymi małym przekrojem czynnym na wzbudzenie atomu do tego stanu przy zderzeniach z elektronami. W warunkach doświadczenia Francka i Hertza nie tylko nie byłoby słuszne założenie o dużej efektywności zderzeń niesprężystych zaraz po przekroczeniu przez elektrony energii ΔE_1 , ale wręcz zderzenia takie są praktycznie niemożliwe. Dopiero przekroczenie przez energię elektronów energii drugiego stanu wzbudzonego (rezonansowego stanu 6^3P_1) $\Delta E_2 = 4,88$ eV mogło wywoływać dużą efektywność zderzeń niesprężystych. Stąd obserwowane na rys. 2 odległości „zębów” równe ok. 4,9 V należy interpretować jako odpowiadające energii ΔE_2 . Późniejsze eksperymenty, w zmienionych w stosunku do doświadczenia Francka i Hertza układach, pozwoliły na charakterystykach analogicznych do tej z rys. 2 ujawnić także zjawiska związane z niesprężystymi zderzeniami elektronów z atomami rtęci, prowadzącymi do strat energii elektronów różnych od 4,88 eV, w tym również 4,68 eV (por. rys. 3). Warto tu jeszcze dodać, że względu na późniejsze komentarze, że energii $\Delta E_2 = 4,88$ eV odpowiada długość fali linii rezonansowej w widmie rtęci $\lambda = 2537$ Å.

Ponieważ zasadniczym celem tego artykułu nie jest opis doświadczenia Francka i Hertza oraz innych doświadczeń będących jego kontynuacją, a zwrócenie uwagi na spotykane potknięcia przy jego omawianiu, dalsza część artykułu zostanie poświęcona przedstawieniu kilku przykładów błędów popełnionych przez autorów podręczników.

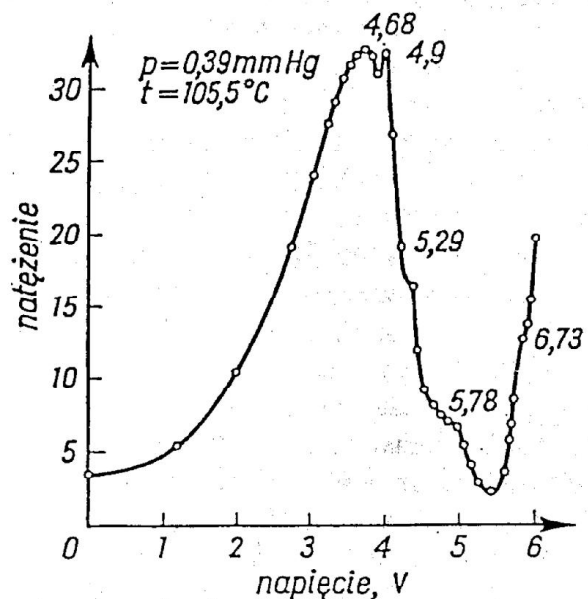
Przykład 1.

Autor znanej książki zatytułowanej *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego* [3] Jerzy Ginter w innej swojej książce, *Fizyka fal* [4], przedstawia w paragrafie 15.10 rysunek identyczny z rys. 2 z tego artykułu. Jednakże J. Ginter wie, że energia pierwszego stanu wzbudzonego atomu rtęci to ok. 4,7 eV, a nie ok. 4,9 eV. Konsekwencją tego jest, że chociaż Franck i Hertz

(a również wielu innych) widzieli na tym rysunku charakterystyczną sekwencję napięć: 4,9 V; $2 \times 4,9 = 9,8$ V; $3 \times 4,9 = 14,7$ V, J. Ginter widzi sekwencję: 4,7 V; $2 \times 4,7 = 9,4$ V; $3 \times 4,7 = 14,1$ V, odpowiadającą jego pomysłowi na interpretację rys. 2. Nie można się więc dziwić, że i nawiązanie w tym samym paragrafie przez J. Gintera do doświadczenia znanego pod nazwą doświadczenia Lejpunskiego i Łatyszewa (omówionego np. w [5]), w którym obserwowano przejmowanie przez elektrony energii od atomów rtęci będących w pierwszym stanie wzbudzonym, nie jest przejrzyste.

Przykład 2.

S. Szczeniowski komentując doświadczenie Francka i Hertza w swojej *Fizyce atomowej* [5] pisze, że „Atom nie może natomiast pobrać od elektronu energii mniejszej od 4,9 eV; poziom nasz jest więc pierwszym (podkreślenie – W.Ś.) wzbudzonym poziomem rtęci”, a nieco dalej, że „Zgodnie z II postulatem Bohra atomy rtęci muszą pochłaniać promieniowanie o długości fali $\lambda = 2537$ Å, przechodząc przy tym na pierwszy (podkreślenie – W.Ś.) z poziomów wzbudzonych”.



Rys. 3. Zależność natężenia prądu (jednostki względne) od napięcia przyspieszającego elektrony w doświadczeniu Francka, Knippinga i Einsporna, będącym udoskonalonym wariantem doświadczenia Francka i Hertza; wersja rysunku z opisem w języku polskim według książki [5].

Nie prostuje on też tego omawiając doświadczenie Francka, Knippinga i Einsporna (por. rys. 3), pisząc, że chodziło tam o ujawnienie

wyższych poziomów wzbudzonych i zaznacza, że oprócz energii 4,9 eV znaleziono jeszcze energie 4,68 eV, 5,29 eV i wyższe. Wyraźnie brak komentarza, że 4,68 eV to jednak mniej niż 4,9 eV.

Przykład 3.

Z podobną sytuacją spotykamy się także w *Fizyce atomowej* Szpolskiego [6]. W pierwszym tomie przy omawianiu wyników doświadczenia można przeczytać, że: „Jeśli E_1 jest zapasem energii »nie wzbudzonego« atomu rtęci, to następną możliwą (podkreślenie – W.Ś.) wartością energii atomu będzie $E_1 + 4,9$ eV”. Nie przeszkadza to napisać w II tomie przy omawianiu doświadczenia Lejpuskiego i Łatyszewa, że wzbudzone atomy rtęci oddające energię elektronom (w tzw. zderzeniach niesprężystych drugiego rodzaju) znajdowały się w stanach o energii wzbudzenia 4,7 eV.

W przykładach 2 i 3 autorzy nie naginają faktów do swoich koncepcji interpretacji doświadczenia Francka i Hertza, ale też nie wyciągają wniosków z przytaczanych wyników obserwacji.

Przykład 4.

W książce V. Acosty i in. *Podstawy fizyki współczesnej* [7] na s. 173 możemy przeczytać: „Bezpośrednią i pomysłową demonstracją istnienia dyskretnych stanów stacjonarnych postulowanych w teorii Bohra, było doświadczenie zaprojektowane przez Jamesa Francka i Gustava Hertza”. Tu już całkiem jednoznacznie Autorzy sugerują, że doświadczenie było odpowiedzią na postulaty Bohra (byłoby to spójne z błędną informacją na s. 167 – w życiorysie Hertza – że zostało ono wykonane w 1931 r.).

Przykład 5.

W książce Zofii Lesiowej *Wstęp do spektroskopii atomowej* [8] na s. 46-47 też można się dowiedzieć, że 4,9 eV jest energią wzbudzenia atomu rtęci do pierwszego stanu wzbudzonego, i że linia widmowa o długości fali $\lambda = 2537$ Å odpowiada przejściu atomu rtęci z pierwszego stanu wzbudzonego do stanu podstawowego; a przecież na s. 325 jest schemat poziomów energetycznych rtęci wskazujący, że poziom, z którego emitowana jest linia $\lambda = 2537$ Å, nie jest pierwszym poziomem wzbudzonym.

Przykład 6.

Tu ustosunkuję się łącznie do książki *Podstawy fizyki* Jaworskiego i Pińskiego [9] oraz książki *Modern Physics* R. Sproulla [10]. W pierwszej z nich, podobnie jak w poprzednim przykładzie, Autorzy piszą, że teoria Bohra została zweryfikowana doświadczalnie w 1914 r. przez Francka i Hertza. Wspólnym novum w stosunku do innych autorów jest zauważenie na rys. 2 sekwencji: 4,86 V; $2 \times 4,86 = 9,72$ V; $3 \times 4,86 = 14,58$ V, przy czym wyraźnie jest zaznaczone, że wynikająca stąd energia 4,86 eV jest odległością pierwszego stanu wzbudzonego atomu rtęci od stanu podstawowego. Trudno dociec, skąd Autorzy wzięli tę wartość 4,86 eV, ale może się ona kojarzyć (wzrokowo) z faktyczną wartością energii pierwszego stanu wzbudzonego (4,68 eV). Warto też zwrócić uwagę, że w obu książkach podjęto próbę obliczenia długości fali odpowiadającej energii fotonu równej 4,86 eV. W książce Jaworskiego i Pińskiego jako wynik obliczeń podano $\lambda = 2537$ Å, entuzjasmując się zgodnością tego wyniku z długością fali linii obserwowanej w widmie rtęci (też mamy $\lambda = 2537$ Å). Dokładnie te same obliczenia przytaczane w książce Sproulla dały $\lambda = 2551$ Å, i tu też podkreśla się zgodność z $\lambda = 2537$ Å.

Przykład 7.

Wreszcie w książce L. Coopera *Istota i struktura fizyki* [11] na s. 613 możemy przeczytać, że w 1914 r. Franck i Hertz strzelali elektronami w zimną parę miedzi (sic! – red.), i że energia 4,9 eV odpowiada różnicy między stanem podstawowym i pierwszym stanem wzbudzonym atomu miedzi.

Jak widać z przytoczonych przykładów, piękne i istotne dla rozwoju fizyki doświadczenie Francka i Hertza nie jest przedstawiane rzetelnie. Wprawdzie idea przyświecająca autorom, aby poinformować czytelników, że stany wzbudzone atomów mogą być ujawnione poprzez zderzenia niesprężyste z elektronami, zostaje przekazana, ale szkoda, że popełniane są przy tym błędy. Przecież prawda jest tu bardzo ciekawa. Tak jak Kolumb chciał dopłynąć do Indii, a po drodze napotkał nowy, nie znany wówczas ląd, tak i Franck oraz Hertz, którzy chcieli dotrzeć z energią elektronów do energii jonizacji atomu rtęci, natrafili na swej

drodze na stan wzbudzony tego atomu. I tak jak Kolumb uznał napotkanych ludzi za mieszkańców Indii (stąd nazwa Indianie), oni uznali napotkaną energię za energię jonizacji. Jest też trochę różnic. Kolumb zmarł nie wiedząc, że odkrył nowy ląd, a Franck i Hertz szybko zrozumieli istotę swego wyniku i kontynuowali badania z jej świadomością. Jak wiemy, zostało to uhonorowane przyznaniem im w roku 1925 Nagrody Nobla.

Literatura

- [1] J. Franck, G. Hertz, *Verhandl. Deut. phys. Ges.* 16, 457 (1914).
- [2] G.L. Trigg, *Crucial Experiments in Modern Physics* (Van Nostrand, New York 1971).
- [3] J. Ginter, *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego* (PWN, Warszawa 1986).
- [4] J. Ginter, *Fizyka fal* (PWN, Warszawa 1993).
- [5] S. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna – cz. V: Fizyka atomowa* (PWN, Warszawa 1967).
- [6] E. Szpolski, *Fizyka atomowa* (PWN, Warszawa 1953).
- [7] V. Acosta, C.L. Cowan, B.J. Graham, *Podstawy fizyki współczesnej* (PWN, Warszawa 1987).
- [8] Z. Leś, *Wstęp do spektroskopii atomowej* (PWN, Warszawa 1970).
- [9] B.M. Jaworski, A.A. Piński, *Podstawy fizyki*, t. 2 (PWN, Warszawa 1976).
- [10] R. Sproull, *Modern Physics. The Quantum Physics of Atoms, Solids and Nuclei*, wyd. 2 (John Wiley, New York 1963).
- [11] L.N. Cooper, *Istota i struktura fizyki* (PWN, Warszawa 1975).