

Lange, Bogdan

Z badań nad doświadczalnym potwierdzeniem idei fal materii

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 28/1, 105-120

1983

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Bogdan Lange
(Gdańsk)

Z BADAŃ NAD DOŚWIADCZALNYM POTWIERDZENIEM IDEI FAL MATERII

W XVII w. Ch. Huygens wysunął pogląd, że światło jest zjawiskiem o naturze falowej, lecz nie podał wytłumaczenia faktu, że rozchodzi się ono prostoliniowo¹. Natomiast korpuskularna teoria światła, podana na początku XVII w. przez I. Newtona, tłumaczyła wszystkie zjawiska optyki geometrycznej². W myśl tej teorii światło składa się z posiadających masę korpuskuł świetlnych, które rozchodzą się w próżni prostoliniowo i ulegają oddziaływaniom ze strony materii. Wyniki badań nad optyką geometryczną, przeprowadzonych w XVII i XVIII w. dawały się całkowicie wytłumaczyć na gruncie korpuskularnej teorii, dlatego też falowa teoria Huygensa nie znalazła w tym czasie większego uznania.

Dopiero XIX w. przyniósł ulepszenie metod doświadczalnych, a nowe badania umożliwiły odkrycie zjawiska interferencji, nie dającego się wytłumaczyć na gruncie teorii korpuskularnej. Równocześnie na początku XIX w. A. Fresnel podał oryginalne ujęcie falowej teorii światła, wyjaśniając nowe zjawiska, w tym te, które tłumaczono na gruncie teorii korpuskularnej. Był to okres, w którym uznawano jeszcze obie teorie, czego wyrazem były do pewnego stopnia koncepcje W. R. Hamiltona.

Wśród fizyków XIX w. ugruntowało się jednak w końcu przekonanie o słuszności falowej teorii światła. Zasadniczy wpływ miały na to — obok prac Fresnela — wyniki badań przeprowadzonych przez T. Younga. Światło potraktowano jako drgania pewnego ośrodka sprężystego, zwanego eterem kosmicznym. Drganiom tym przypisano podobieństwo

¹ Ch. Huygens: *Traité de la lumière*. Leiden 1690. Por. też B. I. Spasskij: *Istoriya fiziki*. Moskwa 1977 s. 125.

² I. Newton: *Optics*. London 1704. Por. też M. Laue: *Historia fizyki*. Warszawa 1960 s. 56—63.

do drgań poprzecznych w ciałach stałych. Jednakże, przy takim rozumieniu natury drgań świetlnych, wystąpiły pewne problemy związane z zagadnieniami odbicia i załamania, a także poprzecznego charakteru fali w eterze. W tej sytuacji ważną rolę odegrały podstawowe prace J. C. Maxwella, które wprowadziły elektromagnetyczną teorię światła przy zachowaniu falowej natury zjawisk świetlnych.

Dopiero powstanie teorii kwantów przyniosło rewizję podstawowych wyobrażeń o naturze drgań świetlnych, co w konsekwencji przyczyniło się w pewnej mierze do zachwiania falowej teorii. Ogłoszone w 1900 r. teoretyczne założenia M. Plancka o nieciągłym sposobie wysyłania i pochłaniania światła przez układy drgające, wprowadzone jako wzór na rozkład energii w widmie promieniowania ciała doskonale czarnego, a także hipoteza kwantów świetlnych wprowadzona w 1905 r. przez A. Einsteina dla wytłumaczenia zjawiska fotoelektrycznego, nie dały się w żaden sposób pogodzić z falową teorią światła i pozostawały w jej ramach niezrozumiałymi.

Badania doświadczalne widma promieniowania ciągłego rentgenowskiego, prowadzone metodą Bragga, wykazały ścisłą ograniczoność widma od strony fal krótkich, co przemawiało za hipotezą fotonów. Kolejnym etapem było uzyskanie przez Einsteina w 1917 r. znanego wzoru Plancka, przy zastosowaniu hipotezy fotonów. Wnioski wyprowadzone przez Einsteina, a dotyczące pędu fotonu, potwierdziły się całkowicie w badaniach prowadzonych przez A. H. Comptona w 1923 r. Pomimo, że zjawisko fotoelektryczne i zjawisko Comptona przemawiały za hipotezą fotonów, czyli w konsekwencji stanowiły argumenty na poparcie korpuskularnej teorii światła, to jednak na jej gruncie nie można było wyjaśnić interferencji światła, będącej wyrazem jego falowej natury. Doprowadziło to do skomplikowanej sytuacji, w której interferencję światła tłumaczono za pomocą teorii falowej, a zjawisko fotoelektryczne i zjawisko Comptona za pomocą teorii korpuskularnej, przy czym nie posiadano możliwości logicznego uzgodnienia tych teorii.

Ta dwoistość zachowania się światła była powodem zasadniczych trudności do czasu, gdy w 1923 r. L. V. de Broglie podobnego rodzaju dualizm przypisał materii korpuskularnej. Równocześnie rozwój badań nad promieniowaniem przyniósł w latach 1923—1930 szereg wyników, które stanowiły podstawę dla głębszego zrozumienia natury światła i materii korpuskularnej.

Promieniowanie posiada charakter nieciągły, tworzą je fotony o energii $W = hv$ i pędzie $p = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$, gdzie h = stała Plancka, λ = długość fali, v = częstość drgań, c = prędkość światła w próżni. Z fotonami związane jest w sposób konieczny zjawisko falowe o naturze fali elektromagnetycznej. Nierozróżnialność i brak określonych rozmiarów, a także niemożliwość określenia położenia fotonów w przestrzeni, oraz koniecz-

ne występowanie efektów falowych stanowi o ich dualistycznym charakterze. Dualizm przejawia się tu w tym, że można zasadniczo przyjąć występowanie fotonów i falową naturę światła jako dwa aspekty tego samego zjawiska, które rozpatrujemy z różnych punktów widzenia.

Jako pierwszy zwrócił na to uwagę L. V. de Broglie w pracy w 1923 r.³ Podstawą dla rozwinięcia własnej koncepcji przez de Broglie'a były wyniki uzyskane przez W. R. Hamiltona w 1840 r. Hamilton prowadząc rozważania nad prawami mechaniki klasycznej i optyki geometrycznej zauważył między nimi podobieństwo natury formalnej, czego wynikiem było oryginalne określenie praw pierwszej z nich⁴. Chcąc przedstawić bliżej analogie znalezione przez Hamiltona, należy nawiązać do wprowadzonego przez P. L. Maupertuis'a w XVIII w. sposobu określenia praw mechaniki klasycznej⁵. Maupertuis sprowadzał prawa optyki geometrycznej do praw mechaniki zgodnie z teorią Newtona, czyli zasadę minimalnej drogi promienia świetlnego do zasady najmniejszego działania. Hamilton, w odróżnieniu od niego, zwrócił uwagę na aspekt falowy obu zasad, dochodząc do wniosku, że zasada Maupertuisa może być uważana równocześnie za pewien wyraz zasady Fermata w zastosowaniu do postulowanego przez siebie zjawiska falowego. W konsekwencji doprowadziło to Hamiltona do stwierdzenia, że analiza ruchu cząstki na podstawie praw dynamiki jest analogiczna do analizy szczególnego zjawiska falowego w abstrakcyjnym ośrodku o określonych właściwościach.

Punktem wyjścia rozważań de Broglie'a była tu analogia pomiędzy promieniowaniem i materią, przy założeniu iż z cząstką materialną o pędzie P i energii W związane jest w sposób konieczny pewne zjawisko falowe. Założenie de Broglie'a o analogii między promieniowaniem i materią, czyli założenie o istnieniu podobnych zależności charakteryzujących fotony i cząstki, prowadziło do przyjęcia wniosku, iż wielkości przypisane fotonom i cząstkom powinny być podobne do wielkości opisujących towarzyszące cząstce zjawisko falowe. W ten sposób określona

³ L. V. de Broglie: *Ondes et quanta*. „Comptes Rendus” 1923 s. 507—510; Tenze: *A Tentative Theory of Light Quanta*. „Philosophical Magazine” 1924 s. 446—458; Tenze: *Recherches sur la théorie des quanta*. „Annales de Physique” 1925 s. 22—128.

⁴ Rozwój optyki falowej w końcu XIX w. był powodem wykorzystania przez fizyków nowej postaci praw mechaniki klasycznej, przy równoczesnym braku zainteresowania koncepcją i sposobem rozważań Hamiltona, a tym samym znalezionym przez niego podobieństwem.

⁵ Maupertuis przyjął, że droga ruchu punktu materialnego jest taka, iż tzw. działanie wzdłuż niej jest minimalne, czego konsekwencją są prawa mechaniki klasycznej Newtona. Analogicznie w dziedzinie optyki geometrycznej podstawowe jej prawa wyprowadza się z zasady Fermata stwierdzającej, że droga promienia świetlnego między dwoma punktami jest taka, aby światło pokonało ją w możliwie najkrótszym czasie.

została częstość drgań i długość fali współwystępującego zjawiska falowego towarzyszącego cząstce materialnej. Wynoszą one odpowiednio:

$$W = hv \text{ oraz } p = \frac{h}{\lambda}.$$

Jednakże wykorzystując znane zależności, określające pęd i energię całkowitą cząstki o masie m , otrzymuje się $hv = mc^2$ oraz $mv = \frac{h}{\lambda}$, stąd $\lambda = \frac{h}{mv}$. Wielkość ta określa możliwość uzyskania wartości długości fali związanej z cząstką materialną⁶. Analiza wzoru na długość fali związanej z cząstką materialną wykazuje, że długość fali de Broglie'a jest większa dla cząstek o małej masie i prędkości. Była to wskazówka dla ewentualnych doświadczalnych poszukiwań fal materii⁷. Podobnie, jak dla promieniowania, założone dla cząstek materialnych analogie mają zasadniczo ograniczony charakter, dotyczą bowiem jedynie pewnych aspektów omawianego zjawiska. Miały one jednak zasadnicze znaczenie dla dalszych poszukiwań doświadczalnych i teoretycznych, stanowiąc dla nich nowy punkt wyjścia, zgodnie z którym obrazy falowy i korpuskularny wyrażają dwa aspekty jednego i tego samego zjawiska. Okazało się mianowicie, że nie można w sposób logicznie spójny określić tej nowej sytuacji za pomocą zwykłych terminów, co stało się z kolei zapowiedzią poważnych trudności w zakresie interpretacji danych doświadczalnych, a także uzgodnienia ze sobą poszczególnych teorii w ramach których one występowały.

Jak wykazano wyżej, de Broglie założył, że z cząstką materialną związane jest w sposób nierozdzielny drganie harmoniczne, którego częstość drgań i długość fali można wyrazić w następujący sposób:

$$v = \frac{E}{h}$$

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

⁶ Zachodzi równość $eV = \frac{1}{2}mv^2$, gdzie e — oznacza ładunek elektronu, m — masę elektronu, h — stałą Plancka. Dla uzyskania prędkości v elektrony powinny przybyć różnicę potencjałów V , stąd $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$, a po podstawieniu do wzoru na długość fali $\lambda = \frac{h}{mv}$ otrzymujemy $\lambda = \frac{12.22}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$

⁷ W przypadku elektronów (ze względu na ich małą masę) powinny wystąpić fale o największej długości. Oszacowania liczbowe przeprowadzone na podstawie zależności $\lambda = \frac{12.22}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$ wskazują, że dla poszukiwań fal materii należy stosować metody podobne jak dla promieni rentgenowskich (ugięcie na siatce krystalicznej).

gdzie E — oznacza energię całkowitą cząstki, p — pęd cząstki.

L. de Broglie przyjął zgodnie z teorią względności, że energia całkowita cząstki i jej pęd w zależności od prędkości wynoszą:

$$E = mc^2$$

$$p = mv,$$

przy czym m — zależy od prędkości v w następujący sposób:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

gdzie m_0 — masa spoczynkowa cząstki, c — prędkość światła w próżni.

Uwzględniając teorię względności oraz analogie zachodzące między zasadą Fermata i zasadą najmniejszego działania otrzymuje się następujące zależności:

$$v = \frac{mc^2}{h} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2)$$

Oznacza to, że kwant energii zjawiska falowego równa się energii, jaką według teorii względności posiada cząstka o masie m . Wyrażenie (1) jest analogiczne do wzoru Einsteina $E = hv$, wyrażającego energię fotonu, ponieważ wielkość mc^2 określa energię związaną z wielkością m , czyli masą cząstki.

Równocześnie zachodzi ogólny związek dla zjawisk falowych $u = \lambda v$, określający prędkość fazową fal materii; jest ona większa od prędkości światła. Fale de Broglie'a wykazują silną dyspersję, co oznacza różnicę między prędkością grupową a fazową tych fal, przy czym prędkość grupowa tych fal jest równa prędkości v , jaką posiada cząstka związana z tą falą. Podobnie jak wszelkie ruchy falowe, powinny one wykazywać typowe własności, a w szczególności ulegać ugięciu i interferencji. W dalszych badaniach i poszukiwaniach oparto się na analogii fal materii w stosunku do fal rentgenowskich, które przechodząc przez kryształ ulegają ugięciu. Wielkość u można wyrazić w następujący sposób:

$$u = \lambda v = \frac{h}{p} \cdot \frac{mc^2}{h} = \frac{mc^2}{p} = \frac{W}{\sqrt{m(W-V)}}$$

Warunek powyższy spełniony jest dla cząstek w takim zakresie, w jakim stosuje się do nich mechanika newtonowska, zaś V zawiera energię potencjalną cząstki, wobec czego $(W - V)$ określa jej energię kinetyczną. Wyrażenie to jest podobne do zależności wyprowadzonej przez

Hamiltona, który określając wartość E nie uwzględniał energii spoczynkowej cząstki. Doniosłość koncepcji Broglie'a polega na tym, że przyjmując analogię z fotonami określił częstość drgań i długość fali w stosunku do postulowanych przez siebie fal materii, czego nie mógł dokonać Hamilton⁸.

Zastosowanie koncepcji de Broglie'a do teorii atomu N. Bohra prowadziło do bardziej uzasadnionej interpretacji pierwszego postulatu kwantowego, przy zachowaniu jego postaci⁹. Koncepcja de Broglie'a wyjaśniała wprawdzie ów postulat, ale nie znosiła trudności w uzgodnieniu jego konsekwencji formalnych z wynikami doświadczalnymi. Doprowadziło to w dalszej konsekwencji do pokonania zasadniczych trudności wynikających z przyjęcia modelu atomu Bohra, czyli do pośredniego uznania słuszności samej idei fal materii.

Jednakże wstępna reakcja fizyków na koncepcje de Broglie'a była negatywna, ze względu na ich paradoksalność¹⁰. Mięły trzy lata, zanim jego idee zostały uznane i zastosowane. Chodzi o to, że dopiero w 1926 r. E. Schrödinger opublikował podstawowe prace, w których nawiązał do wcześniejszych prac Hamiltona oraz przyjął i rozwinął idee samego de Broglie'a, stwarzając tym samym podstawę pod współczesną mechanikę falową¹¹. W przeciwieństwie do Hamiltona, który sądził, iż mechanika klasyczna jest dokładnym odpowiednikiem optyki geometrycznej, Schrödinger przyjął, że optyka geometryczna jest jedynie przybliżeniem optyki falowej. Według Schrödingera przybliżenie to jest tym pełniejsze, im krótsze są fale, dla których się go dokonuje. Wynikał stąd wniosek, że jeżeli przyjmie się idee de Broglie'a, to należy uznać, iż mechanika klasyczna jest jedynie przybliżeniem mechaniki falowej. Przy czym tak, jak podstawą dla optyki falowej jest równanie falowe, tak dla mechaniki falowej punkt wyjścia stanowi równanie fal de Broglie'a.

Lata 1927—1930 przyniosły badania, w których wykazano doświadczalnie istnienie falowych cech materii korpuskularnej, co stanowiło bezpośrednie uzasadnienie słuszności idei fal materii.

⁸ Hamilton przypisywał jedynie formalne znaczenie wprowadzonym przez siebie falom, w przeciwieństwie do de Broglie'a, który postulując istnienie fal materii nadał im znaczenie fizyczne, przy czym wyrazem toru cząstek materialnych są promienie rozchodzenia fal materii. Koncepcja de Broglie'a zachowała jednak charakter klasyczny przez fakt przyjęcia drogi cząstki materialnej w znaczeniu mechaniki klasycznej, co jest konsekwencją równoważności optyki geometrycznej i mechaniki klasycznej, wprowadzonej przez Hamiltona.

⁹ Przyjęcie idei de Broglie'a w odniesieniu do elektronu krążącego po orbicie zgodnie z warunkiem kwantowym prowadziło do ujęcia go w ramach koncepcji falowej jako stacjonarnego układu fal.

¹⁰ M. J a m m e r: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York 1966 s. 246—250.

¹¹ E. S c h r ö d i n g e r: *Quantisierung als Eigenwertproblem*, „Annalen der Physik 1926, Heft 79 s. 361, 489; Heft 80 s. 437; Heft 81 s. 109.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że już w 1925 r. Einstein pierwszy wskazał na możliwość doświadczalnego wykrycia fal materii, przyjmując, że powinny one ulegać rozpraszaniu i uginaniu na atomach i cząsteczkach. W przypadku gazu, dla niskich temperatur powinny wystąpić wyraźne efekty uginania fal. Ponadto idee fal de Broglie'a zostały wykorzystane przez W. Elsassera dla wyjaśnienia zjawiska Ramsauera, niezrozumiałego z punktu widzenia ówczesnej fizyki¹². Należało bowiem wyjaśnić anormalność swobodnej drogi elektronów w gazach szlachetnych.

Przyjęcie idei fal de Broglie'a implikowało wystąpienie efektów ugięcia tych fal podczas przechodzenia wiązki elektronów przez gaz szlachetny. Poszukiwania doświadczalne tych efektów stanowiły cel prac E. Dymonda, który badał rozpraszanie wiązki powolnych elektronów przechodzących przez hel¹³. Okazało się, że zgodnie z koncepcją de Broglie'a wystąpiły maksima liczby elektronów rozproszonych, które ze wzrostem potencjału dążą w kierunku padającej wiązki elektronów. Potwierdzało to przewidywany przez koncepcję de Broglie'a efekt słabszego ugięcia fal dłuższych, związanych z powolniejszymi elektronami. Prace Dymonda stanowiły pierwszą przesłankę doświadczalną dla idei fal materii w powiązaniu z efektami falowymi związanymi z elektronami.

Z drugiej strony idea fal materii otrzymała pośrednie poparcie w postaci falowej mechaniki Schrödingera. Jednakże sytuacja nie była zadowalająca i należało znaleźć wyraźne, bezpośrednie dowody występowania falowych cech materii. Pierwsze doświadczenie, w którym bezpośrednio potwierdzono hipotezę de Broglie'a, przeprowadzili C. J. Davisson i L. H. Germer w 1927 r.¹⁴. Schemat doświadczenia oparli oni na znanej z badań dotyczących promieni rentgenowskich metodzie Lauego. Doświadczenie wykonane przez Davissona i Germera polegało na skierowaniu wiązki elektronów prostopadle do płaszczyzny siatkowej kryształu, będącej równocześnie jego powierzchnią. Jako źródła elektronów użyto rozżarzonego wolframu, natomiast powierzchnia padania była powierzchnią kryształu niklu. Stosując potencjał przyspieszający w zakresie od 30 V do 400 V uzyskali oni wychodzące z powierzchni bardzo wyraźnie ugięte wiązki elektronowe. Kierunki ugięcia tych wią-

¹² M. J a m m e r, dz. cyt. s. 250—251.

¹³ E. G. D y m o n d: *Scattering of Electrons in Helium*. „Nature” 1926 s. 336.

¹⁴ C. J. D a v i s s o n, L. H. G e r m e r: *Diffraction of Electrons by a Crystals of Nickel*. „Physical Review” 1927 s. 705—740; „Nature” 1927 s. 558. Szersze omówienie wcześniejszych prac C. J. Davissona i C. H. Kunsmana, a także okoliczności jakie doprowadziły Davissona i Germera do przeprowadzenia doświadczenia wskazującego istnienie fal materii, zawierają m. in. prace: W. M. E l s a s s e r: *Memoirs of a Physicist in the Atomic Age*. New York 1978, s. 60—62; F. H u n d: *The History of Quantum Theory*. London 1974, s. 146; E. H. W i c h m a n n: *Fizyka kwantowa*. Warszawa 1973 s. 207—208; M. J a m m e r, dz. cyt. s. 249—252.

zek były analogiczne jak w badaniach promieni rentgenowskich, przy czym określone wiązki odpowiadały określonym długościom fal de Broglie'a, zawartym w przedziale od $2,2 \text{ \AA}$ do $0,6 \text{ \AA}$ ¹⁵.

Analogie do promieni rentgenowskich mogły być przeprowadzone w ograniczonym zakresie, ponieważ uzyskane na drodze teoretycznej kierunki wiązek ugiętych nie odpowiadały w zupełności ugiętym wiązkom elektronowym. Wyniki przedstawiały się w ten sposób, że teoretyczne wartości długości fal były mniejsze od uzyskanych doświadczalnie¹⁶. Budziło to zastrzeżenie co do sposobu, w jaki uzależniono dane teoretyczne dotyczące wiązek od wyników doświadczalnych, co w konsekwencji skłoniło Davissona i Germera do przyjęcia wniosku, iż zachodzi tu ściśnięcie siatki krystalicznej. Zachodziło ono według nich przy rozpraszaniu wiązek elektronowych na powierzchniowych warstwach siatki krystalicznej, zmniejszając odległości między kolejnymi płaszczyznami siatkowymi w porównaniu do warstw głębszych. Zmniejszone odległości między powierzchniowymi płaszczyznami siatkowymi szacowali oni na 0,7 do 0,9 w stosunku do odległości normalnej. Założenie to pozwalało uzgodnić wyniki uzyskane doświadczalnie z oczekiwanymi wartościami długości fali, przy równoczesnym uwzględnieniu powierzchniowej adsorpcji gazów, zniekształcającej wiązki elektronowe ugięte. W taki sposób uzyskali oni wyniki długości fal zgodne z obliczonymi teoretycznie.

Przyjęcie przez Davissona i Germera znacznego odkształcenia warstw powierzchniowych nie miało oparcia w innych eksperymentach i dlatego budziło wątpliwości, stając się jednocześnie przedmiotem analizy i dyskusji. Poszukiwano innego wytłumaczenia występujących odchyłań

¹⁵ Interesująca uwaga dotycząca badań Davissona i Germera zawarta jest w pracy: Sz. Szczeniowski, S. Ziemecki: *Promieniowanie i materia*. Warszawa 1932 s. 140. Otóż, podczas badań nad rozpraszaniem przestrzennym elektronów na powierzchni niklu aparatura okazała się nieszczelna i do wnętrza dostało się powietrze, tworząc na powierzchni drobnokrystalicznej metalu warstwę jonów adsorbowanych. Davisson i Germer w wyniku przeprowadzonego oczyszczania powierzchni kryształu uzyskali rekrytalizację i otrzymali duże kryształy, zamiast wielkiej ilości drobnych kryształów. Elektrony rozproszone na dużej ilości drobnych kryształów dawały równomierny rozkład przestrzenny, w przeciwieństwie do rozpraszania na dużych kryształach przybierającego wyróżniony charakter kierunkowy.

¹⁶ Długości fal de Broglie'a, obliczone z danych pomiaru, znacznie odbiegały od teoretycznie uzyskanych wartości z powodu różnicy kierunków ugięcia wiązek elektronowych i wiązek rentgenowskich odpowiedniej długości. Odpowiednie uzgodnienia ugiętych wiązek elektronowych z ugiętymi wiązkami rentgenowskimi mogło być przeprowadzone w różny sposób. Jednakże Davisson i Germer przyjęli, że długości teoretyczne są prawdziwe, a odchylenia wynikają z zachodzenia zjawiska w warstwach powierzchniowych kryształu, gdzie odległości kolejnych płaszczyzn krystalicznych są mniejsze niż dla płaszczyzn wewnętrznych, istotnych dla ugięcia promieni rentgenowskich.

kierunków ugiętych wiązek elektronowych i rentgenowskich odpowiedniej długości.

Badania nad uginaniem wiązek elektronów prowadził także fizyk angielski G. P. Thomson, który w odróżnieniu do wymienionych autorów, zastosował do badania ugięcia wiązek elektronowych znaną z badań promieni rentgenowskich metodę Debye'a—Scherrera¹⁷. Doświadczenie Thomsona polegało na uzyskaniu ugięcia wiązek elektronowych przy przejściu przez zbiór przypadkowo ustawionych drobnych kryształów¹⁸. Wyniki, jakie uzyskał Thomson w oparciu o warunki doświadczenia — czyli wyniki uzyskane z wymiarów pierścieni, stałych siatki oraz z wielkości aparaturowych — były zasadniczo zgodne z wartościami teoretycznymi, odpowiadały więc wynikom uzyskanym dla promieni rentgenowskich. Wiązki promieni katodowych szybkich (uzyskanych przy napięciach od 17 000 V do 60 000 V) zastosowane w doświadczeniu Thomsona, przenikały w głębsze warstwy, nie dając sugerowanego przez Davissona i Germera efektu odkształcenia warstw powierzchniowych. Okazało się, iż w tym przypadku sugerowany przez autorów amerykańskich efekt ściśnięcia warstw powierzchniowych kryształu nie uwidocznił się jako wpływ na wartości długości fal obliczone doświadczalnie.

Jak widać z porównania wyników uzyskanych przez Davissona i Germera za pomocą metody analogicznej do metody Lauego i przez G. P. Thomsona, który sięgnął do metody Debye'a—Scherrera, zachodziła między nimi sprzeczność. Toteż w dalszym ciągu istniały zasadnicze trudności w interpretacji sposobu przyporządkowania wynikom doświadczalnym określonych wartości postulowanych teoretycznie.

Wspomniane sprzeczności skłoniły polskiego fizyka, dra Sz. Szczeniowskiego do podjęcia badań w celu ich wyjaśnienia i usunięcia. Posłużył się on w swoim doświadczeniu stosowaną powszechnie w badaniach promieni rentgenowskich metodą Bragga, dokonał jednak jej modyfikacji¹⁹.

¹⁷ G. P. Thomson: *Experiments on the Diffraction of Cathode Rays*. „Proceedings of the Royal Society” 1928 fol. 117A s. 600—609; Tenże: *The Diffraction of Cathode Rays by thin Films of Platinum*. „Nature” 1927 s. 802.

¹⁸ Jeżeli monochromatyczna wiązka przechodzi przez zbiór przypadkowo ustawionych drobnych kryształów, otrzymuje się stożki promieni ugiętych, dające na płycie fotograficznej pierścienie, właściwe dla określonych płaszczyzn krystalicznych. Średnice otrzymanych pierścieni były wprost proporcjonalne do długości fali de Broglie'a ze względu na odwrotną proporcjonalność w stosunku do przyłożonego napięcia. Wartość stałej siatki określił Thomson, na podstawie sposobu Debye'a — Scherrera, w oparciu o średnicę pierścieni i odległość płaszczyzny ugięcia od ekranu. Szczegółowe omówienie doświadczenia Thomsona dostarcza m.in. praca L. de Broglie: *Einführung in die Wellenmechanik*. Leipzig 1929 s. 82—87. Por. też. Sz. Szczeniowski, S. Ziemecki, dz. cyt. s. 142.

¹⁹ Sz. Szczeniowski: *O selektywnym odbiciu elektronów od kryształów*. „Sprawozdania i Prace Polskiego Towarzystwa Fizycznego”, 1928 s. 405—421; Tenże:

Aby zrozumieć zasadę przeprowadzonego eksperymentu, zauważmy najpierw, że metoda Bragga odpowiada bardziej dokładnym pomiarom długości fali wiązek ugiętych przez siatki krystaliczne, niż badaniom dotyczącym analizy struktury siatki krystalicznej. Szczeniowski zwraca na to uwagę stwierdzając: „...zastosowałem do badania ugięcia wiązek elektronowych metodę, nie nasuwającą wątpliwości przy interpretacji znaczenia otrzymanych wiązek ugiętych oraz pozwalającą osiągnąć większą dokładność w pomiarze długości fali”²⁰.

Metoda Bragga polega na selektywnym odbiciu przez płaszczyzny siatkowe padającej fali promieniowania rentgenowskiego, przy czym długość fali odbitej związana jest z dopełnieniem kąta selektywnego odbicia θ w sposób następujący:

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

gdzie d — oznacza odległość dwóch kolejnych płaszczyzn siatkowych równoległych do powierzchni kryształu.

Długość fali otrzymuje się przy znanej stałej siatki poprzez wyznaczenie wartości kątów selektywnego odbicia. W przypadku występowania jedynie efektów rozpraszania, rozkład wyrażający się liniami krzywymi, uzyskanymi z wartości pomiarów, powinien mieć prawidłowy charakter. Ponadto, jeżeli dodatkowo występuje selektywne odbicie nakładające się na efekty rozproszeniowe, to według Szczeniowskiego, otrzymujemy wówczas dla odpowiednich kątów silniejsze prądy elektronowe niż dla kątów sąsiednich, co odbija się w postaci wygięć na krzywej doświadczalnej.

W doświadczeniu Szczeniowskiego elektrony wychodzące z taśmy wolframowej, będącej ich źródłem, padały na układ szczelin, przechodząc określoną różnicę potencjałów w celu osiągnięcia odpowiedniej energii kinetycznej. Po przejściu tych szczelin tworzyły one ograniczoną wiązkę padającą na powierzchnię kryształu bizmutu. Elektrony odbite lub rozproszone padały na szczelinę puszki Faradaya, połączonej z elektrometrem. W czasie pomiaru kryształ i puszkę Faradaya obracano tak, aby wchodziły do niej elektrony odbite regularnie od powierzchni kryształu. Odbicie promieniowania rentgenowskiego zachodziło dla kąta padania spełniającego warunek Bragga: $2d \cos V = K\lambda$. Stosując promienie rentgenowskie o znanej długości fali, zmierzono przy

Sur la réflexion des électrons. „Extrait des Comptes Rendus de Séances de l'Académie des Sciences”, t. 187, p. 106 (séance du 9 juillet 1928). Praca ta wykonana została w Zakładzie Fizycznym Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. St. Pieńkowskiego. Z przeprowadzonych z prof. Sz. Szczeniowskim w maju 1978 r. szeregu konsultacji na temat interpretacji podstaw fizyki kwantowej, wiadomo autorowi artykułu, że trudności techniczne w Zakładzie Fizycznym UW opóźniły nieco przeprowadzenie omawianego eksperymentu.

²⁰ Sz. Szczeniowski: *O selektywnym odbiciu...*, s. 412.

pomocy spektrografu Bragga odległości płaszczyzn odbijających kryształu bizmutu. Dla każdego kąta padania zachodziło częściowo regularne odbicie elektronów, lecz dla określonych kątów występowały wyraźne maksima ilości elektronów odbitych, które spełniały w granicach dokładności doświadczenia zależność:

$$\cos V_1 : \cos V_2 : \cos V_3 \dots = 1 : 2 : 3.$$

Było to dla Szczeniowskiego podstawą do uznania ich za analogiczne względem kolejnych rzędów odbić Bragga²¹. Podczas zwiększania napięcia następowało zbliżenie kolejnych maksimów, co było zgodne z konsekwencjami wynikającymi z teorii de Broglie'a.

Tak przeprowadzone przyporządkowanie nie budziło wątpliwości i można było przypisać uzyskane maksima wiązkom ugiętym. Znając odległość płaszczyzn odbijających kryształu i wartości kątów padania, odpowiadające maksimom prądu elektronowego, obliczył Szczeniowski długości ugiętych fal elektronowych. Przeprowadzone przez niego porównanie wartości długości fal elektronowych ugiętych, zmierzonych na podstawie danych doświadczenia i wartości teoretycznych uzyskanych ze

wzoru $\lambda = \frac{12,22}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$, wskazywało zgodność tych wartości w granicach dokładności pomiarów. Uzyskane przez Szczeniowskiego wartości długości fal elektronowych ugiętych, wyznaczone doświadczalnie, były mniejsze od odpowiednich wartości teoretycznych.

Szczeniowski wyciągnął z otrzymanych wyników następujące wnioski: „...zgodność wartości zmierzonych z obliczonymi jest zupełnie zadowalająca, gdyż odchylenia między dwiema wartościami pozostają w granicach błędu doświadczalnego; jedynie różnica wartości, odnoszących się do potencjału 62 V, nasuwa pod tym względem wątpliwości. W każdym razie wyniki pomiarów przemawiają za istnieniem fal de Broglie'a, oraz nie potwierdzają przypuszczenia Davissona i Germera co do zniekształcenia siatki w pobliżu powierzchni kryształu. Zgadniają się one natomiast zupełnie dobrze z wynikami Thomsona”²².

Badania nad tymi zagadnieniami trwały. W czasie publikacji wyników uzyskanych przez Szczeniowskiego ukazał się artykuł niemieckiego fizyka E. Ruppa²³. Uczony ten przeprowadził kolejne doświadczenie stosując metodę analogiczną do zastosowanej przez Thomsona. Jednakże, w przeciwieństwie do doświadczenia Thomsona, elektrony w doświadczeniu Ruppa były poddane różnicy potencjałów jedynie od 120 V do 320 V. Wiązka elektronów przechodziła przez jednorodne pole magne-

²¹ Sz. Szczeniowski: *Fotony i elektrony*. „Wszechświat” 1928 s. 245.

²² Sz. Szczeniowski: *O selektywnym odbiciu...*, s. 416—417.

²³ E. Rupp: *Über die Winkelverteilung langsamer Elektronen beim Durchgang durch Metallhäute*. „Annalen der Physik” 1928 Hf. 85 s. 981—1012.

tyczne w ten sposób, że linie sił tego pola były prostopadłe do kierunku wiązki. Wzdłuż łuku koła odpowiadającego torowi elektronów znajdowały się szczeliny; dzięki nim otrzymywał on jednorodną wiązkę elektronów, która przechodząc przez cienką płytę metalową ulegała ugięciu dając obraz na ekranie. Długości fal de Broglie'a wyznaczone zostały na podstawie budowy siatki krystalicznej, wartości zmierzonej średnicy pierścieni i odległości ekranu od powierzchni padania wiązki elektronicznej. Uzyskane przez Ruppę długości fal różniły się nieznacznie (były mniejsze) od wartości uzyskanych w sposób teoretyczny. Oznacza to, że skuteczna długość fali λ de Broglie'a ulegającej ugięciu różni się od długości obliczonej ze wzoru $\lambda = \frac{12,22}{\sqrt{V}}$ A°. W celu wytłumaczenia tego

faktu Ruppę nawiązał do wcześniejszej pracy H. Bethego, przyjmując, iż współczynnik załamania tych fal wynosi: $n = \frac{\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda \text{ teor.}}{\lambda \text{ dośw.}}$ ²⁴

Wspomniana tu praca Bethego i niezależne badania C. Eckarta dotyczyły wyjaśnienia różnic występujących w doświadczeniu Davissona i Germera bez uwzględniania deformacji siatki krystalicznej. Otrzymane przez tych autorów wartości współczynnika załamania fal były mniejsze od 1,0, co pozostawiało wątpliwości, o których była wyżej mowa.

Jednak Ruppowi udało się uzgodnić wyniki Davissona i Germera z własnymi dzięki innemu — niż dokonane przez autorów amerykańskich w ich własnym doświadczeniu — przyporządkowaniu ugiętych wiązek elektronowych określonym płaszczyznom kryształu²⁵. Uzyskane w ten sposób wartości długości fal elektronowych były mniejsze od obliczonych w sposób teoretyczny. Obliczone z danych doświadczenia Davissona i Germera współczynniki załamania fali rosły (od 1,02 do 1,1) ze spadkiem prędkości wiązek. Dla porównania, wartości współczynnika załamania w doświadczeniu Ruppę zmieniały się w granicach od 1,01 do 1,06, a w doświadczeniu Thomsona (elektrony prędkie) $n=1,0$. Natomiast współczynnik załamania wyznaczony w doświadczeniu Szczeniowskiego zmieniał się w granicach od 1,013 do 1,047 wzrastając, podobnie jak u Ruppę, ze spadkiem prędkości elektronów.

Powyższe wyniki prowadziły — zdaniem Szczeniowskiego — do wniosku, że odchylenia podane przez Ruppę były rzeczywiste²⁶. Szczeniowski był świadomy tego, że nawiązując do badań H. Bethego, Ruppę podjął się uzgodnienia wyników doświadczalnych z przeprowadzonych przez wspomnianych autorów eksperymentów, oraz wyjaśnienia zaobserwowanych różnic. Zauważał, że skoro długość skuteczna fal elektronowych jest mniejsza od teoretycznej, to prędkość odpowiednich fal de Broglie'a wewnątrz metalu jest mniejsza od prędkości w powietrzu, co jest po-

²⁴ Tamże, s. 999.

²⁵ Tamże, s. 1008.

²⁶ Sz. S z c z e n i o w s k i: *Fotony i elektrony...*, s. 245.

wodem załamania tych fal. Jeżeli jednocześnie zachowa się ogólne zależności optyki, zachodzące dla wszelkich ruchów falowych, to spełniona jest zależność: $uv=c^2$, gdzie u — oznacza prędkość fazową fal elektronowych, a v — prędkość elektronów. Prowadzi to do wniosku, że prędkość elektronów wewnątrz metalu jest większa od prędkości elektronów padających.

E. Rupp przyjął, że przyczyną tego zjawiska jest (jak to zauważył wcześniej H. Bethe) dodatkowe przyśpieszenie jakiego doznają elektrony wewnątrz metalu, wynikające z dodatkowego potencjału wewnętrznego E , charakterystycznego dla danej siatki krystalicznej metalu²⁷. Prędkość v wiązki elektronowej w metalu zależy wobec tego od potencjału $V+E$, skuteczna długość fali de Broglie'a wynosi $\lambda = \frac{12,22}{\sqrt{V+E}} \text{ \AA}$, a współczynnik załamania tych fal $u = \sqrt{\frac{V+E}{V}}$ ²⁸. Równocześnie stosowany wzór

Bragga nie zakłada zmiany prędkości fal wewnątrz kryształu i przestaje być adekwatny dla wyrażenia tego zjawiska, dając jedynie wartości przybliżone. W tej sytuacji otrzymuje się wyjaśnienie dlaczego długości fal de Broglie'a obliczone za pomocą wzoru Bragga są mniejsze od długości przewidywanych przez teorię de Broglie'a.

L. de Broglie zwrócił uwagę na podstawowy charakter pracy E. Rупpa, stwierdzając, że zawiera ona potwierdzenie teorii w granicach małego błędu, który jest zawarty w wyrażeniu na współczynnik załamania fal²⁹, nie wspomniał jednak o pracy Sz. Szczeniowskiego.

Należy podkreślić, że Szczeniowski pierwszy zastosował metodę analogiczną do metody Bragga, co pozwoliło mu na spójną interpretację otrzymanych wyników (zgodną z rezultatami osiągniętymi przez Thomsona i Rупpa), oraz na krytykę stanowiska Davissona i Germera co do efektów powierzchniowych.

Nieco później Davisson i Germer zastosowali metodą podobną do tej, jaką posłużył się Szczeniowski, co pozwoliło im na prawidłowe przyporządkowanie wiązek otrzymanych wiązkom przewidywanym³⁰. Zmierzone długości fali były mniejsze od wartości teoretycznych, podobnie jak u Thomsona, Rупpa i Szczeniowskiego, co skłoniło ich do rezygnacji

²⁷ Teoria przewodnictwa metali, podana przez A. Sommerfelda i W. Houstona, prowadzi do przyjęcia dodatkowego potencjału wewnątrz metali i w konsekwencji do wyjaśnienia zaobserwowanych odchyłań przez wprowadzenie efektu załamania fal elektronowych. Por. A. S o m m e r f e l d: *Zur Elektronentheorie der Metalle auf Grund der Fermischen Statistik*, „Zeitschrift für Physik” 1928 s. 1—32; W. V. H o u s t o n: *Elektrische Leitfähigkeit auf Grund der Wellenmechanik*. Tamże s. 449—464.

²⁸ E. R u p p, dz. cyt. s. 1009.

²⁹ L. de B r o g l i e: *Einführung in die...*, s. 78; Tenze: *Théorie de la Quantification dans la Nouvelle Mécanique*. Paris 1968 s. 21—22.

³⁰ S z z c z e n i o w s k i: *O selektywnym odbiciu...*, s. 419.

ze swoich wcześniejszych interpretacji i przyjęcia wytłumaczenia poprzednich odchyłeń, podanego przez Ruppą.

Sz. Szczeniowski przedstawił swoje wyniki m. in. w czasie IV Zjazdu Fizyków Polskich w Wilnie w 1928 r. Przytoczymy refleksję J. Wasiułyńskiej z tego Zjazdu: „Na naczelnie miejsce referatów zjazdowych wysuwa się praca Dr Sz. Szczeniowskiego o selektywnym odbiciu elektronów od powierzchni kryształów. Stosując metodę Bragga, dr Szczeniowski wykazał uginanie fal de Broglie, dając tym samym jeszcze jeden dowód na korzyść mechaniki undulacyjnej. Praca ta stawia autora w rzędzie awangardy współczesnej fizyki. Doniosłość osiągniętych przez Dr Szczeniowskiego wyników podkreślił w specjalnym przemówieniu Prof. Reczyński, wywołując gorącą owację uczestników Zjazdu”³¹.

Uznanie, z jakim spotkała się praca Sz. Szczeniowskiego w ówczesnym środowisku fizyków polskich, pozwoliło mu na otrzymanie stypendium Rockefeller Foundation i wyjazd do pracowni A. H. Comptona w Chicago w 1929 r.³². Pobyt u A. H. Comptona umożliwił Szczeniowskiemu zapoznanie tamtego środowiska z własnymi wynikami, a także nawiązanie kontaktów naukowych z fizykami zachodnimi (m. in. z W. Heisenbergiem i C. Eckartem)³³.

Jednakże należy zaznaczyć, że w podstawowej pracy M. Jammera, dotyczącej rozwoju mechaniki kwantowej, brakuje analizy prac Ruppą i Szczeniowskiego³⁴. Ogranicza się on jedynie do uwagi o doniosłości prac Ruppą, pomijając wyniki osiągnięte przez Szczeniowskiego.

Również G. P. Thomson, pisząc o dyfrakcji elektronów, wymienia doświadczenia Davissona i Germera przeprowadzone w USA, własne i innych fizyków pracujących w Anglii, nie nawiązując do badań Ruppą i Szczeniowskiego³⁵.

Nie zmienia to faktu, że doświadczenia wykonane przez Davissona i Germera, Thomsona, Ruppą i Szczeniowskiego były pierwszym bezpośrednim, opartym na eksperymencie, poparciem i adekwatną interpretacją leżącej u podstaw mechaniki kwantowej hipotezy L. V. de Broglie'a.

Recenzenci: Jerzy Kociński i Adam Synowiecki

³¹ J. Wasiułyńska: *Wrażenia z IV Zjazdu Fizyków Polskich*. „Mathesis Polska” 1928 s. 130.

³² J. Kociński: *Szczepan Szczeniowski*. „Nauka Polska” 1973 nr 3 s. 82—87. Por. też K. Záveta: *Otázky a názory — s prof. S. Szczeniowským o přítomnosti i minulosti* (Interview). „Czechoslovak Journal of Physics” 1977 A 27, s. 273—275.

³³ O badaniach Sz. Szczeniowskiego dotyczących promieni X oraz kwantowej teorii ruchu elektronu zob. J. Kociński, dz. cyt. s. 82. Por. też H. Cofta: *Szczepan Szczeniowski (1898—1979)*. „Postępy Fizyki” 1980 s. 253—260.

³⁴ M. Jammer, dz. cyt. s. 253.

³⁵ G. Thomson: *Atom*. Warszawa 1957 s. 117—119. Na doświadczenie Szczeniowskiego zwraca uwagę m. in. Cz. Białoobryński: *Podstawy poznawcze fizyki świata atomowego*. Warszawa 1956 s. 40. Por. też W. Rubińowicz: *Kwantowa teoria atomu*. Warszawa 1957 s. 189.

Б. Ланге

ИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ПОДТВЕРЖДЕНИЮ ИДЕИ ВОЛИ МАТЕРИИ

В статье с исторической точки зрения представлены основные идеи и проблемы, способствовавшие тому, что в 1923 году Л. В. де Бройль сформулировал гипотезу о волнах материи, а тем самым открытию оптики волн материи. Обсуждаются проблемы, возникшие после объявления гипотезы де Бройля и обстоятельства, которые благоприятствовали исследованиям с целью открытия этих волн. В статье анализируются эксперименты Ц. И. Дэвиссона и Л. Г. Гермера, Г. П. Томсона, Э. Руппа и Ш. Щениовского (в 1927—1928 годах), которые явились первой, экспериментально обоснованной поддержкой и адекватной интерпретацией гипотезы де Бройля — основы квантовой механики.

Предложение интерпретации результатов, достигнутых Ш. Щениовским, представленное с учетом тогдашних теоретических работ и экспериментов, изучающих гипотезу де Бройля, исходит из положения, что выводы, к которым он пришел, имеют характер, обобщающий эмпирические данные.

Цель статьи — обсуждение того, до какой степени исследования Ш. Щениовского сходятся к общей схеме тогдашних экспериментов, а в какой степени они являются совершенно оригинальными их продолжением и интерпретацией.

Вопросы развития оптики волн материи обсуждались уже много раз, однако, эти анализы ограничивались вопросами, связанными с исследованиями Дэвиссона, Гермера и Г. П. Томсона, но не включали оригинальных работ Э. Руппа и Ш. Щениовского.

Следует предполагать, что представленный подход к проблематике волн де Бройля обогатит существующие разработки, касающиеся развития квантовой механики, а особенно оптики волн материи.

Тлум. Л. Тызько

В. Ланге

STUDIES ON THE EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF MATTER WAVES

The article presents in a historical outline the basic ideas and problems which led in 1923 to the formulation by L. V. de Broglie of the hypothesis of the wave nature of matter, and consequently to the optics of matter waves. The author discusses the problems raised by Broglie's conception after its statement and the experiments which were supposed to discover these waves. There is an analysis in the article of the experiments conducted in 1927—1928 by C. J. Davisson and L. H. Germer, by G. P. Thomson, E. Rupp and Sz. Szczeniowski. They were first to confirm and to interpret de Broglie's hypothesis which formed the basis of the quantum mechanics.

In analysing the experiments done by Sz. Szczeniowski in this sphere the author states that the conclusions this researcher arrived at generalized the empirical data. The next question is to what extent Sz. Szczeniowski's investigations remained within the framework of contemporary experimental knowledge and how far they constituted its original continuation and interpretation.

The problems of the optics of matter waves have been frequently discussed but they were usually referred to the researches done by Davisson and Germer, as well as by G. P. Thomson, without mentioning the original ones done by E. Rupp and Sz. Szczeniowski.

It seems that the approach presented in the article, and relating to de Broglie's waves, could enrich our present knowledge of the development of the quantum mechanics and specially of the matter waves optics.

Thum. L. Wiewiórkowski