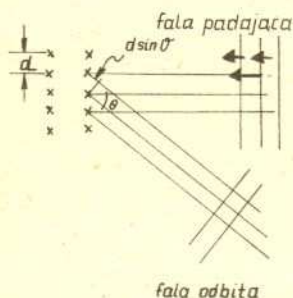


# Dyfrakcja neutronów

Dr hab. Jan KALINOWSKI



Dla piłki futbolowej o masie 1 kg poruszającej się z prędkością 10 m/s długość fali de Broglie'a wynosi  $6,6 \times 10^{-25}$  A.



Istotną rzeczą w doświadczeniu Davissona i Germera było użycie kryształu niklu, którego atomy tworzą regularną sieć wykazującą własności podobne do siatki dyfrakcyjnej. Maksyma powstające przy rozpraszaniu elektronów na kryształach zinterpretowali jako maksima dyfrakcyjne powstające, gdy spełniony jest warunek  $n\lambda = d \sin \theta$ , gdzie  $n$  – liczba naturalna będąca rzędem maksimum,  $\lambda$  – długość fali elektronów,  $d$  – odległość atomów w kryształach i  $\theta$  – kąt rozpraszania.

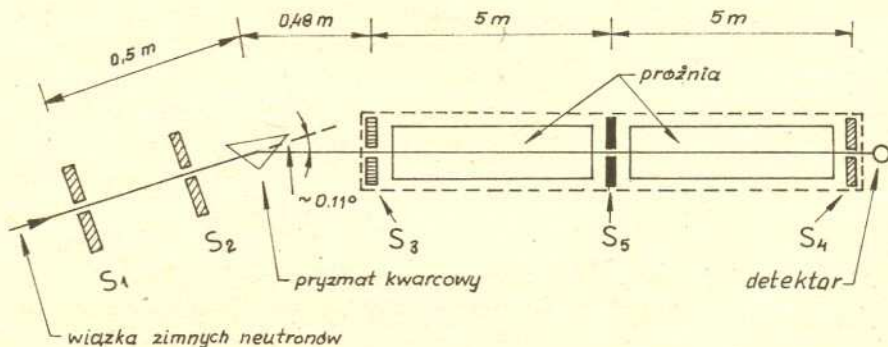
W 1923 r. trzydziestodwuletni student Sorbony Louis de Broglie w swojej pracy doktorskiej wysunął hipotezę, że materia wykazuje własności falowe. Dzisiaj, po przeprowadzeniu klasycznych już doświadczeń z dyfrakcją elektronów i neutronów na kryształach oraz licznych doświadczeń z dyfrakcją innych cząstek (w tym i z atomami) nikt nie kwestionuje poprawności tej hipotezy. Przypomnijmy, że po obserwacji kwantowej (cząstkowej) natury światła, a więc fali elektromagnetycznej, de Broglie powołał ideę, że dualizm falowo-cząstkowy powinien być powszechną cechą całej przyrody. Cząstkom powinna odpowiadać jakaś fala. Założył, że częstość i długość fali są powiązane z pędem i energią takimi samymi wzorami jak dla fotonu, to jest  $E = h\nu$  i  $p = h/\lambda$ . Aby jakoś uzasadnić tę hipotezę, zastosował ją do atomu wodoru i zakładając dodatkowo, że stanom stacjonarnym elektronu odpowiada fala stojąca, wyprowadził warunek kwantyzacji Bohra. Jeśli elektronowi ma towarzyszyć jakaś fala, to można próbować to sprawdzić doświadczalnie badając zjawiska interferencji i dyfrakcji.

Już od 1919 r. C.J. Davisson, współpracując później z L.H. Germerem, badał rozpraszanie elektronów na kryształach niklu. Zauważył on, że natężenie elektronów zależy od kąta rozproszenia, czego nie można było wytłumaczyć traktując elektrony jak cząstki klasyczne. Dopiero w 1926 r. doświadczenia Davissona i Germera zostały zinterpretowane jako pomyślny sprawdzian teorii falowej.

Ze względu na olbrzymie znaczenie mechaniki kwantowej oraz jej poprawnej interpretacji niesłychanie ważne z punktu widzenia poznania i nauczania fizyki jest badanie dyfrakcji cząstek na prostych układach makroskopowych, których własności możemy ustalić innymi metodami. Właśnie od dyskusji zjawiska interferencji elektronów na dwóch szczelinach rozpoczyna się III tom znakomitego podręcznika *Wykłady Feynmana z fizyki* (PWN 1969). Gdy Feynman prowadził wykłady z fizyki, takich doświadczeń jeszcze nie przeprowadzono, gdyż urządzenie do dyfrakcji musi być bardzo małe. Dyskutował więc jedynie eksperyment myślowy. Zdziwiająca jest, że do dzisiaj takich doświadczeń wykonano bardzo mało, w szczególności takich, w których sprawdzano by teorię w sposób ilościowy. Z tego powodu interesująca wydaje mi się praca poświęcona dyfrakcji neutronów na pojedynczej i podwójnej szczelinie (A. Zeilinger i in., *Review of Modern Physics*, tom 60, str.1067, 1988 r.).

Doświadczenie zostało przeprowadzone z wiązką zimnych neutronów z reaktora w Instytucie Lauego-Langevina w Grenoble. O otrzymaniu zimnych i ultrazimnych (to znaczy o bardzo niskich energiach kinetycznych) neutronów będziecie mogli przeczytać w *Delcie* 10/1989. Schemat układu doświadczalnego jest przedstawiony na rysunku 1. Szczeliny  $S_1$  i  $S_2$  formowały wiązkę neutronów, która padała na pryzmat z kwarcu. Po przejściu przez pryzmat długość fali neutronów zależy od kąta odchylenia. Zmieniając położenie szczeliny  $S_3$  można zmieniać długość fali wiązki neutronów  $\lambda_n$  w zakresie od 15 do 30 angstromów ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ). Tak przygotowana wiązka neutronów padała na układ szczelin  $S_5$ , na którym badano dyfrakcję, natomiast szczelina  $S_4$ , ustawiona bezpośrednio przed detektorem neutronów, pozwalała na pomiar rozkładu natężenia neutronów docierających do detektora. Szczeliny  $S_3$  i  $S_4$  miały szerokość  $20 \mu\text{m}$ ,  $S_2$  –  $100 \mu\text{m}$ , natomiast szczelina  $S_1$  miała regulowaną szerokość.

Atomy w kryształach niklu są odległe o około 1 Å. Aby efekty dyfrakcyjne były zauważalne, długość fali elektronów powinna być tego samego rzędu co odległości między atomami  $\lambda \approx d$ . Pęd elektronów powinien więc wynosić  $p = h/\lambda = 6,6 \times 10^{-19} \text{ g cm/s}$ , to znaczy, że ich energia kinetyczna  $T = p^2/2m = \frac{(6,6 \times 10^{-19} \text{ g cm/s})^2}{2(9,1 \times 10^{-27} \text{ g})} = 2,4 \times 10^{-10} \text{ erg} = 150 \text{ eV}$ .



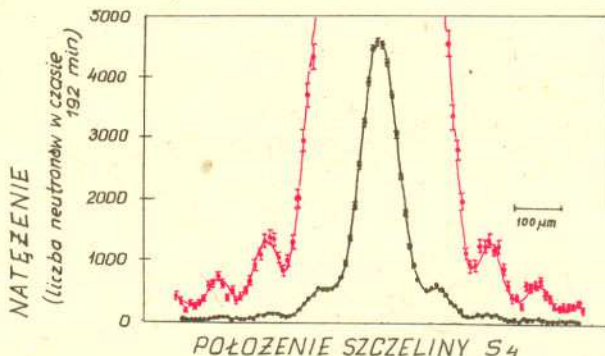
Rys. 1. Schemat doświadczenia

W 1929 r. I. Estermann i O. Stern wykazali, że również atomy helu i cząsteczki wodoru ulegają dyfrakcji zgodnie z teorią de Broglie'a. Doświadczenia te dowodzą, że atom jako całość i cząsteczka jako całość są falami. Możemy więc wierzyć, że w odpowiednich warunkach doświadczalnych również i słoń będzie zachowywał się jak fala.

Układ szczeliny  $S_5$ , na którym badano dyfrakcję, został wykonany ze szkła z dużą zawartością boru. Równoległość brzegów szczeliny o długości 400 mm sprawdzono z dokładnością lepszą niż  $1 \mu\text{m}$ . Doświadczenie przeprowadzono z pojedynczą i podwójną szczeliną  $S_5$ .

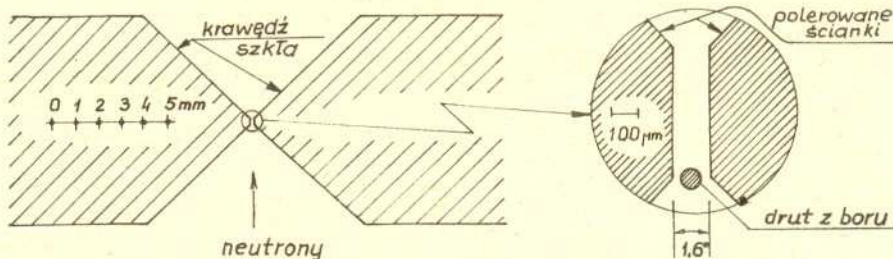
### Wyniki dla pojedynczej szczeliny

Doświadczenie przeprowadzono dla szczeliny o szerokości  $90 \mu\text{m}$  i  $\lambda_n = 19,26 \pm 0,7 \pm 0,02 \text{ \AA}$  (pierwsza liczba podaje średnią długość fali neutronów, druga – szerokość pasma długości, trzecia – błąd). Pomiary natężenia neutronów wykonano dla stu położzeń szczeliny  $S_4$ . Wyniki pomiarów wraz z krzywą teoretyczną przedstawione są na rysunku 2. Zgodność jest doskonała, nawet dla maksimum dyfrakcyjnego trzeciego i czwartego rzędu.



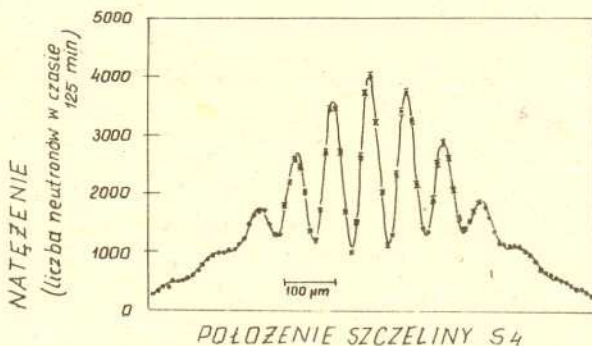
Rys. 2. Obraz dyfrakcyjny na pojedynczej szczelinie  $90 \mu\text{m}$ . Linia czarna przedstawia przewidywanie teorii. Kolorem zaznaczono te same dane powiększone dziesięciokrotnie.

### Wyniki dla podwójnej szczeliny



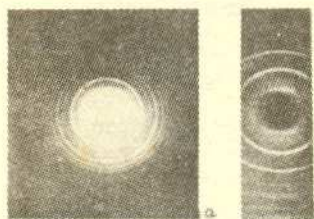
Rys. 3. Przekrój podwójnej szczeliny.

Podwójną szczelinę skonstruowano umieszczając cienki drut z boru w środku szczeliny o szerokości  $150 \mu\text{m}$  (rysunek 3). Za pomocą mikroskopu stwierdzono, że odległości między brzegami szczeliny a drutem wynosiły  $21,9$  i  $22,5 \mu\text{m}$ , a średnica drutu –  $104,1 \mu\text{m}$ . Doświadczenie przeprowadzono z wiązką neutronów o długości fali  $\lambda_n = 18,45 \pm 1,40 \pm 0,02 \text{ \AA}$  (oznaczenia jak poprzednio). Wyniki przedstawione są na rysunku 4. Ponownie zgodność obliczeń z danymi doświadczalnymi jest znakomita.



Rys. 4. Obraz dyfrakcyjny na podwójnej szczelinie.

Doświadczenia z podwójną szczeliną są często traktowane jako fundamentalne potwierdzenie teorii kwantowej. Według Feynmana w tym doświadczeniu zawiera się sedno mechaniki kwantowej. Autorzy omawianej pracy uważają, że ich doświadczenie jest najbardziej precyzyjną realizacją „eksperymentu myślowego” Feynmana. Z tego powodu rzucają wyzwanie wszystkim, którzy proponują alternatywne teorie, aby porównali je dokładnie z ich pomiarami.



Fotografie przedstawiają dyfrakcję a) elektronów o energii  $100 \text{ keV}$ , b) promieni rentgenowych o długości  $1,5 \text{ \AA}$ , na mikrokryształkach białej cyny. Podobieństwo jest uderzające.

W doświadczeniach z dyfrakcją na kryształach strukturę „siatki dyfrakcyjnej”, to znaczy odstęp między atomami poznajemy również poprzez zjawisko dyfrakcji. W doświadczeniach opisanych w tym artykule szerokość szczeliny była zmierzona niezależnie metodami optycznymi.

Do doświadczeń użyto szkła (z firmy Vacuumschmelze Hanau) z dodatkiem  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  dla zwiększenia absorpcji neutronów. Płaszczyzny szczeliny o szerokości  $0,5 \text{ mm}$ , równoległe do wiązki, były szlifowane w Zakładach Zeissa. Aby zmniejszyć odbicie neutronów od tych płaszczyzn, nie były one dokładnie równoległe, lecz zeszlifowane pod kątem  $0,8^\circ$  do wiązki padającej. Szerokość szczeliny była ustalona przez włożenie cienkich blaszek między dwa kawałki szkła.