



WSTĘP DO FIZYKI JADRA ATOMOWEGO

Wykład - 1

Wiedza i Życie

IV ROK FIZYKI - semestr zimowy

Janusz Braziewicz - Zakład Fizyki Medycznej IF AŚ

Literatura:

- 1.E.Skrzypczak, Z. Szepliński,
Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych
- 2.T. Mayer-Kuckuk,
Fizyka jądrowa
- 3.A. Strzałkowski,
Wstęp do fizyki jądra atomowego
- 4.Z. Wilhelmi
Fizyka reakcji jądrowych
- 5.Sz. Szczeniowski,
Fizyka doświadczalna, Cz.V.2
- 6.I.E. Irodov,
Zadania z fizyki atomowej i jądrowej
- 7.K. N. Muchin,
Doświadczalna fizyka jądrowa
- 8.J. Araminowicz,
Zbiór zadań z fizyki jądrowej



Plan wykładu

1. Przedmiot fizyki jądrowej. Krótka historia rozwoju fizyki jądrowej

Podstawowe oddziaływania. Cząstki elementarne i ich własności. Jądra atomowe i hiperjądra. Rzędy wielkości. Rozpady, reakcje, przekrój czynny. Zasady zachowania.

2. Jądra atomowe i ich własności

Masa, ładunek, rozmiary, rozkład gęstości materii jądrowej. Energia wiązania, stabilność jądra atomowego. Częstość występowania jąder ze względu na liczbę protonów i neutronów, liczby magiczne. Spin a moment magnetyczny. Moment kwadrupolowy, kształt jąder, parzystość. Stany podstawowe i wzbudzone.

3. Siły jądrowe

Potencjał oddziaływania jądrowego. Oddziaływanie nukleon-nukleon. Rozpraszanie nukleon-nukleon. Deuteron jako układ związany dwóch nukleonów.

4. Modele jądra atomowego

Model kroplowy, założenia modelu i przewidywania.

Model gazu Fermiego.

Model powłokowy, liczby magiczne, podstawowe założenia modelu, konstrukcja potencjału oddziaływania.

Model kolektywny, założenia, ruchy kolektywne oscylacyjne i rotacyjne oraz mieszane.

5. Spontaniczne przemiany promieniotwórcze

Prawo rozpadu promieniotwórczego i jego statystyczny charakter. Szeregi promieniotwórcze, równowaga promieniotwórcza. Wyznaczanie stałych zaniku. Rozszczepienie spontaniczne.

6. Przemiany jądrowe

Klasyfikacja przemian promieniotwórczych. Przemiana alfa, widma energii cząstek alfa, czasy życia ze względu na rozpad alfa. Elementy teorii rozpadu alfa, efekt tunelowy, prawo Geigera-Nuttala. Przemiana beta, efekty eksperymentalne, neutrino i ich własności, teoria Fermiego, klasyfikacja przejść beta. Niezachowanie parzystości w słabych oddziaływaniach.

7. Przemiana gamma

Fakty eksperymentalne, zwięzły przegląd najważniejszych wiadomości, izomeria jądrowa. Efekt Mössbauera i jego zastosowanie.

8. Oddziaływanie cząstek naładowanych z ośrodkiem materialnym

Promieniowanie hamowania. Promieniowanie Czerenkowa. Rozpraszanie cząstek na jądrach a struktura jądra. Oddziaływanie kwantów z ośrodkiem materialnym. Efekt fotoelektryczny. Efekt Comptona. Efekt tworzenia par $e+e-$. Współczynnik pochłaniania kwantów gamma. Przykłady oddziaływań fotonów z jądrami. Kaskady fotonowo-elektronowe.

9. Reakcje jądrowe

Zarys historyczny. Kinematyka zderzeń jądrowych, energetyczny próg reakcji. Metody i przedmiot badania, przekroje czynne, analiza energii, mas, rozkładu kąтового cząstek, inne charakterystyki. Modele reakcji jądrowych i metody ich badania. Reakcje jądrowe wprost, jądro złożone, model optyczny.

10. Reakcje rozszczepienia ciężkich jąder

Fakty eksperymentalne, mechanizm reakcji, procesy towarzyszące rozszczepieniu, reaktory jądrowe. Energetyka jądrowa, społeczne, ekonomiczne i ekologiczne uwarunkowania energetyki jądrowej.

11. Detekcja i pomiar energii cząstek naładowanych, neutronów, kwantów gamma, identyfikacja cząstek.

Detektory wykorzystujące procesy jonizacji: komory śladowe, komora Wilsona, dyfuzyjna, pęcherzykowa, iskrowa, strimerowa, emulsje fotograficzne. Detektory wykorzystujące procesy „optyczne”, licznik scyntylacyjny, licznik Czerenkowa, detektory półprzewodnikowe. Detekcja i pomiar energii neutronów. Pomiar energii cząstek alfa, beta i gamma w spektrometrach. Zasady identyfikacji cząstek.

12. Akceleratory cząstek i jonów

Potrzeba akceleracji i rozwój akceleratorów. Zasady przyspieszania cząstek w akceleratorach liniowych i kołowych. Akceleratory elektrostatyczne, cyklotron klasyczny, cyklotron izochroniczny, synchrotron, betatron, akceleratory w.cz. liniowe i kolektywne. Wiązki przeciwbieżne, pierścienie kumulujące. Optyka i transport wiązki jonów.

13. Biologiczne oddziaływanie promieniowania jonizującego

Dawki promieniowania, zastosowanie izotopów promieniotwórczych.

14. Zastosowanie metod eksperymentalnych fizyki jądrowej w naukach przyrodniczych, technice i ochronie środowiska

Fizyczne jądrowe metody określenia śladowych ilości pierwiastków.

Niezbędne podstawy:

- znajomość podstaw fizyki klasycznej
- znajomość najprostszych pojęć fizyki kwantowej
- znajomość równania Schrödingera
- znajomość zagadnień problemów rozpraszania

Zakres zainteresowania

- trwałe i wzbudzone jądra atomowe
- składniki jąder atomowych
- oddziaływanie jąder atomowych
między sobą (zakres niskoenergetyczny ($\sim < 15$ MeV/nukleon))
- oddziaływanie cząstek elementarnych i jąder atomowych



to ‘statyczne’ własności obiektów
i oddziaływań, jakim podlegają

jądro atomowe

- © to układ, w którym mamy do czynienia z:
 - krótko zasięgowymi siłami jądrowymi
 - oddziaływaniami słabymi
 - oddziaływaniami elektromagnetycznymi
 - oddziaływaniami grawitacyjnymi

**to układ wielu ciał badany poprzez
obserwację zjawisk pośrednich**

jądro atomowe

© to układ, w którym mamy do czynienia z:

- krótko zasięgowymi siłami jądrowymi

- oddziaływaniami słabymi

- oddziaływaniami elektromagnetycznymi

- oddziaływaniami grawitacyjnymi

- jako niezmiernie słabe nie odgrywa żadnej roli w fizyce jądrowej
- nośnikami oddziaływań są grawitony

jądro atomowe

© to układ, w którym mamy do czynienia z:

○ krótko zasięgowymi siłami jądrowymi

○ oddziaływaniami słabymi

○ oddziaływaniami elektromagnetycznymi

○ oddziaływaniami grawitacyjnymi

- 
- oddziaływania te między protonami są 10^{37} razy silniejsze niż grawitacyjne
 - odpowiedzialne za strukturę atomów i cząsteczek
 - przeciwdziałają też np. kolapsowi grawitacyjnemu gwiazd
 - nośnikiem oddziaływań są kwanty γ

jądro atomowe

☉ to układ, w którym mamy do czynienia z:

- ⊖ krótko zasięgowymi siłami jądrowymi
- oddziaływaniami słabymi
- oddziaływaniami elektromagnetycznymi
- oddziaływaniami grawitacyjnymi

- 
- ich energię mierzy się w MeV
 - podlegają im hadrony
 - nośnikami oddziaływań są bozony – mezony π ($\sim 140 \text{ MeV}/c^2$)

jądro atomowe

© to układ, w którym mamy do czynienia z:

○ krótko zasięgowymi siłami jądrowymi

○ oddziaływaniami słabymi

○ oddziaływaniami elektromagnetycznymi

○ oddziaływaniami grawitacyjnymi

- 
- powodują rozpad β jąder
 - nośnikami są bozony pośredniczące W^+ , W^- , Z^0 ($\sim 80 \text{ GeV}/c^2$)

jądro atomowe

to układ wielu ciał których średnie odległości są tego samego rzędu co ich promienie

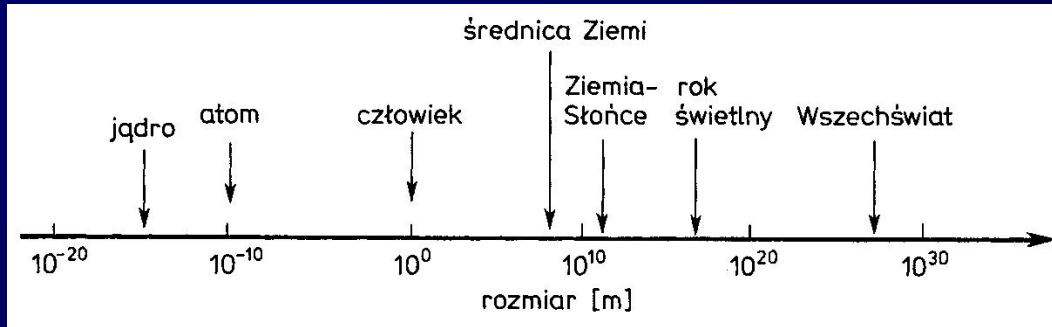


konieczne jest rozumienie i badanie układów wielocząstkowych

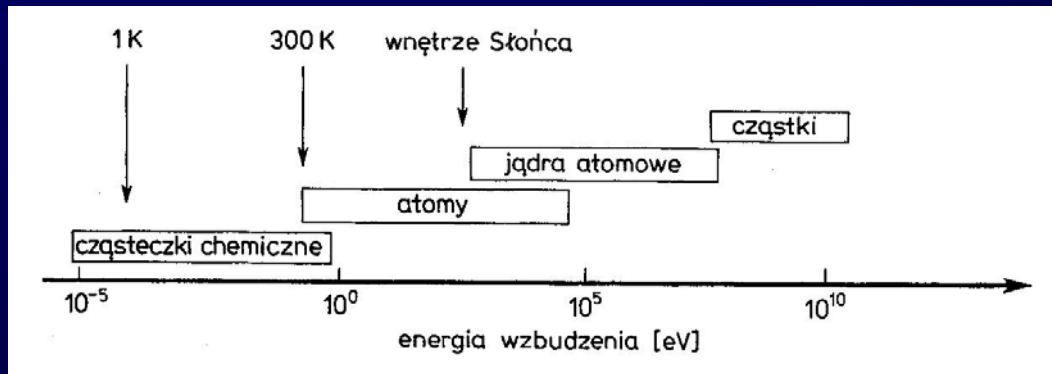


modele jądrowe

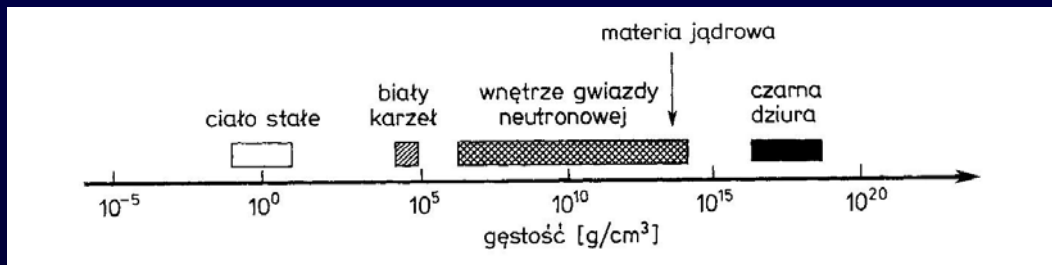
Zakresy wielkości fizycznych



długość - 10^{-15} m



energia - $1\text{eV}=1.602\cdot 10^{-19}$ J

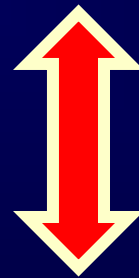
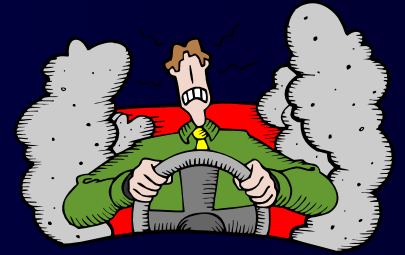


gęstość

makroświat



klasyczna mechanika Newtona



symetria opisu

mikroświat



teoria względności i mechanika kwantowa



mikroświat



kwantyzacja wielkości fizycznych

Światło – kwantyzacja od 1905 r.

$$\lambda \nu = c$$

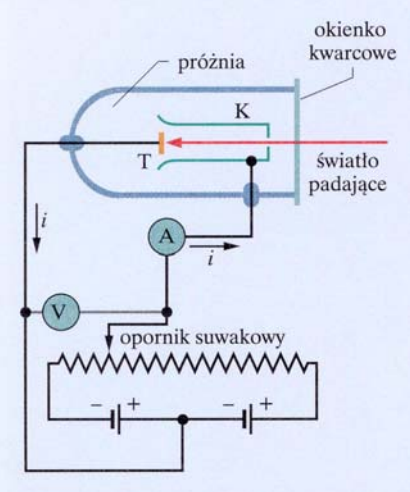
$$E = h \nu$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$= 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

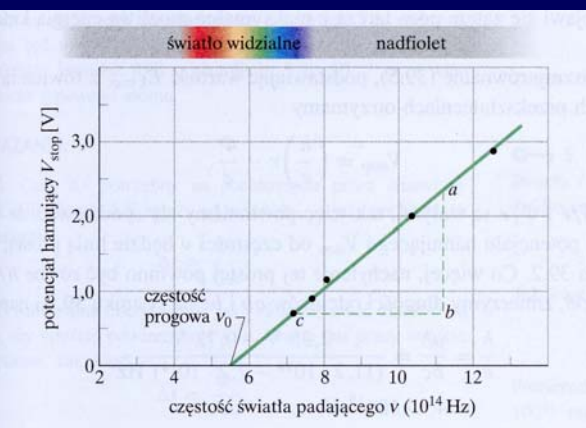
Emisja lub absorpcja promieniowania elektromagnetycznego zachodzi w atomach w porcjach $h\nu$.

Zjawisko fotoelektryczne



$$E_{e_{\max}} = e \cdot V_{\text{stop}}$$

- brak zależności od natężenia światła
- zagadka fizyki klasycznej



$$h\nu = E_{e_{\max}} + W$$

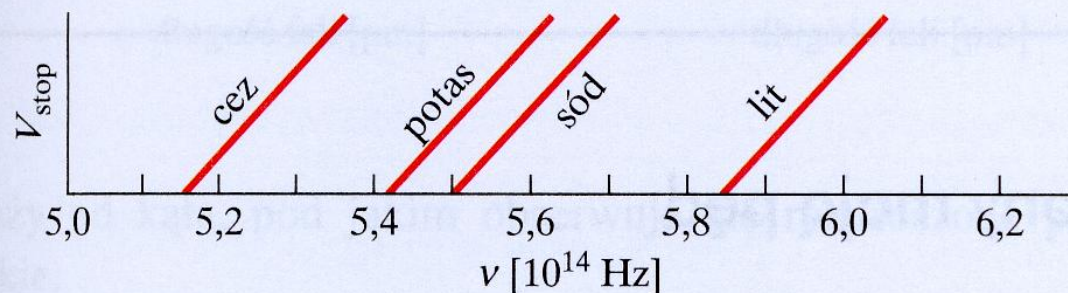
równanie Einsteina

III

zasada zachowania energii
w przypadku pochłonięcia
pojedynczego fotonu

praca wyjścia

$$V_{\text{stop}} = \left(\frac{h}{e} \right) \nu - \frac{W}{e}$$



rok 1916 – postulat Einsteina

$$p_\gamma = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

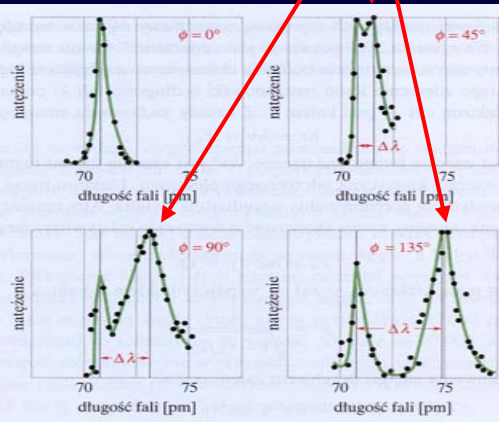
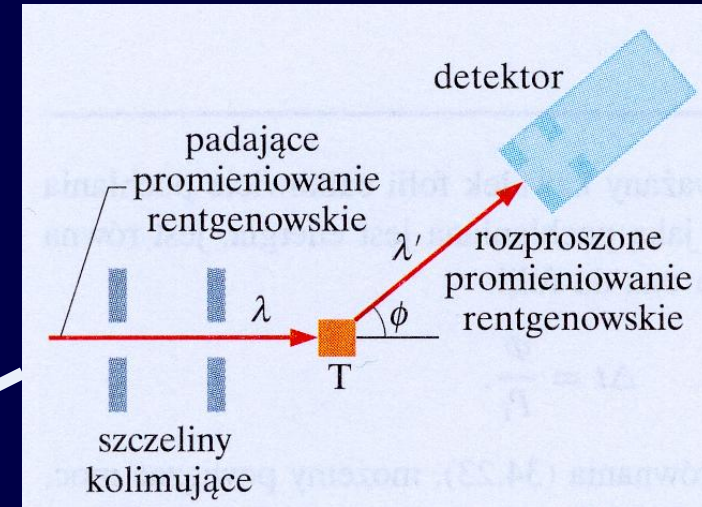
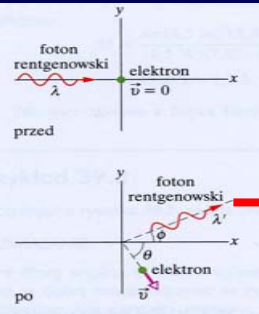
gdy foton oddziałuje z materią, energia i pęd przekazywane są tak, jakby zderzenie fotonu i materii zachodziło w klasycznym sensie

rok 1923 – Artur Compton

$$h\nu = h\nu' + E_k \quad \text{lub} \quad h\nu = h\nu' + mc^2(\gamma - 1)$$

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \phi + \gamma m v \cos \theta$$

$$0 = \frac{h}{\lambda} \sin \phi + \gamma m v \sin \theta$$

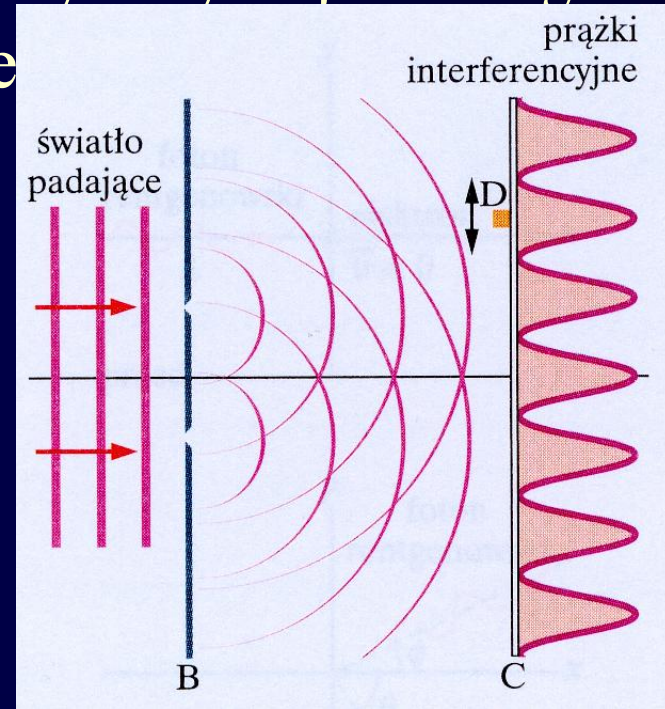


$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi)$$

Zagadka fizyki

w jaki sposób światło w podejściu klasycznym jest falą, podczas gdy w fizyce kwantowej jest pochłaniane w postaci fotonów znikających w pewnych punktach)

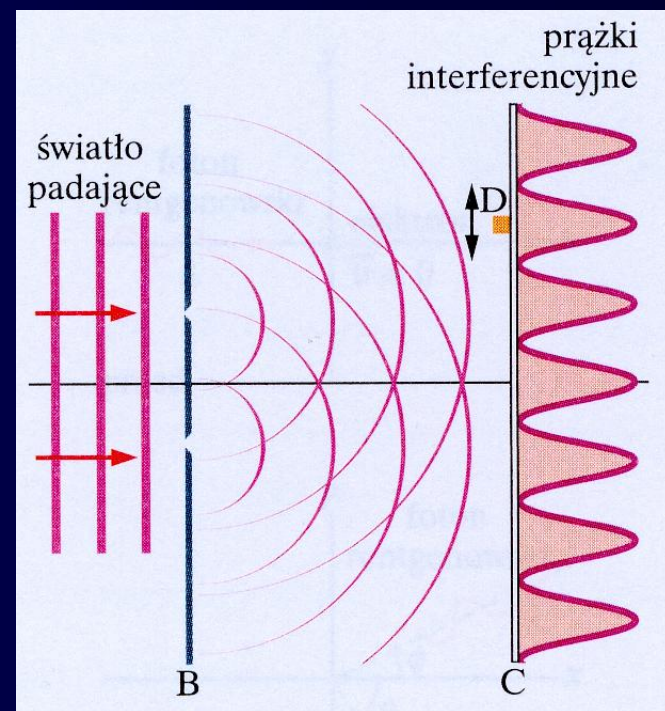
Rok 1801 – doświadczenie
Thomasa Younga



Prawdopodobieństwo (przypadające na jednostkowy przedział czasu), że w pewnej małej objętości wokół danego punktu w fali świetlnej zostanie wykryty foton, jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy wektora pola elektrycznego tej fali w danym punkcie.

Z probabilistycznego opisu fali świetlnej mamy, że jest to nie tylko fala elektromagnetyczna, lecz też fala prawdopodobieństwa

Rok 1801 – doświadczenie
Thomasa Younga



Prawdopodobieństwo (przypadające na jednostkowy przedział czasu), że w pewnej małej objętości wokół danego punktu w fali świetlnej zostanie wykryty foton, jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy wektora pola elektrycznego tej fali w danym punkcie.

doświadczenie Thomasa Younga – wersja jednofotonowa w roku 1909 G. I. Taylor

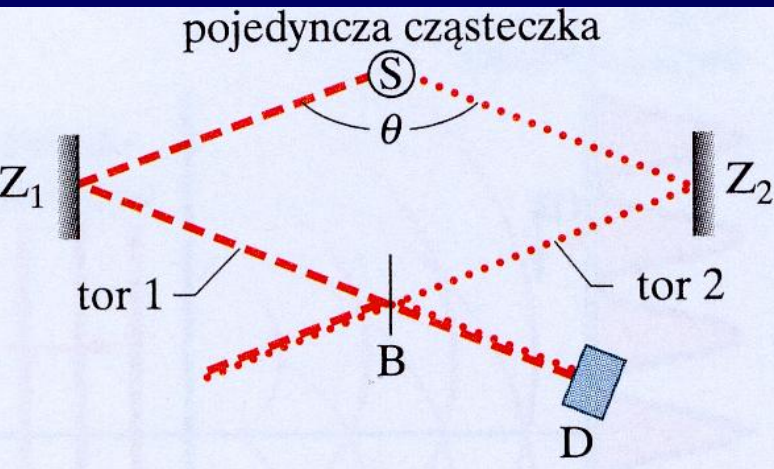
Taki sam wynik doświadczenia



Fala wędrująca ze źródła do ekranu jest falą prawdopodobieństwa wytwarzająca na ekranie obraz „prążków prawdopodobieństwa”

doświadczenie Thomasa Younga – wersja jednofotonowa

w roku 1992 Ming Lai i Jean-Claude Diels
z Univ. Of New Mexico



- źródło S emituje fotony w dobrze oddzielonych momentach
- zwierciadła Z1 i Z2 kierują fotony wzdłuż różnych dróg różniących się o kąt $\sim 180^\circ$

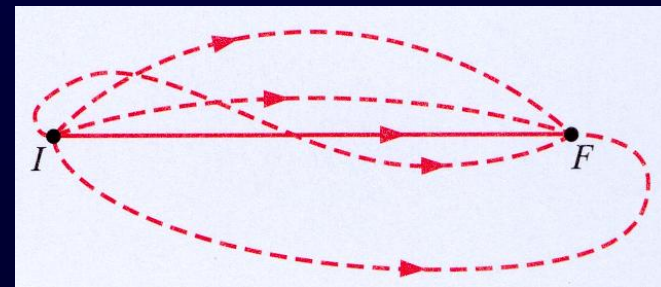
- po przejściu dróg 1 i 2 pada na światłodzielącą płytkę B
- po prawej stronie B światło z drogi 2 odbite przez B dodaje się do światła z drogi 1 przepuszczonego przez B – oba promienie interferują ze sobą docierając do detektora D dając impuls po detekcji fotonu
- płytką B porusza się poziomo ($< 50\mu\text{m}$) zmieniając drogi 1 i 2 co wprowadza przesunięcie fazowe pomiędzy promieniami docierającymi do D
- w sygnale wyjściowym detektora D pojawiają się minima i maksima interferencyjne

Jedyne wytłumaczenie

gdy cząstka emituje foton, we wszystkich kierunkach rozchodzi się fala prawdopodobieństwa – tu wybiera dwa niemalże przeciwne do siebie kierunki.

Wszystkie trzy doświadczenia potrafimy zinterpretować, jeśli założymy, że:

- światło jest generowane w źródle w postaci fotonów
- światło jest pochłaniane w detektorze w postaci fotonów
- światło porusza się pomiędzy źródłem i detektorem jako fala prawdopodobieństwa



Proste zagadnienie symetrii



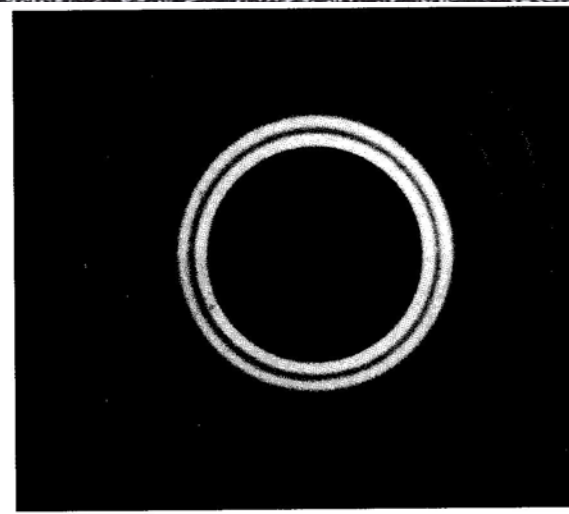
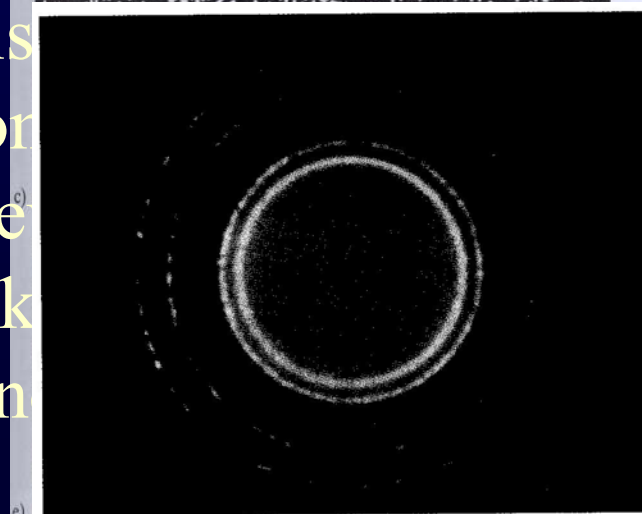
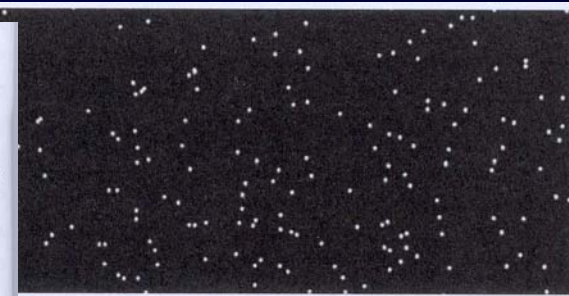
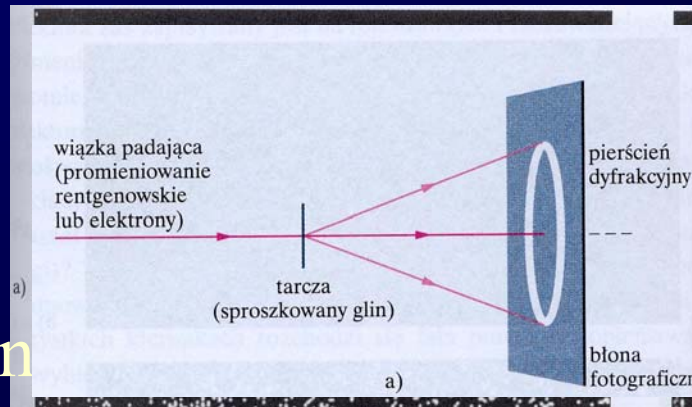
fale materii - koncepcja Louisa de Broglie w 1924 r.

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

λ - długość fali materii

Pierwsze interferencje

- 1927 – C. J. Davisson i G. P. Thomson
- dla protonów i neutronów
- 1994 – dla cząstek
- 1999 – dla fulerenów

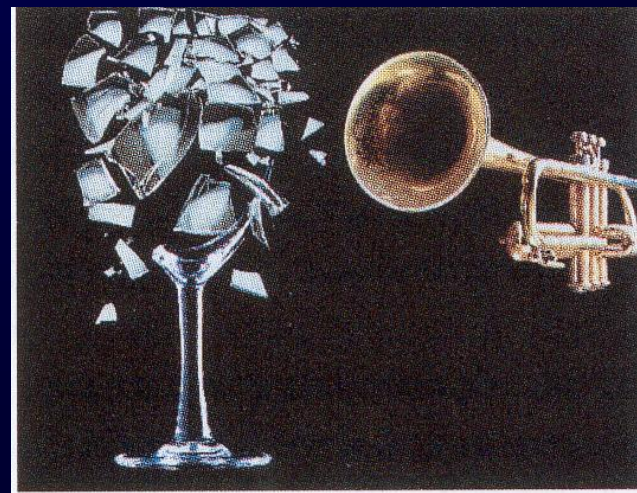


Opis fal

- za pomocą wielkości charakterystycznej dla tej fali

np. falę świetlną charakteryzuje wartość natężenia pola elektrycznego tej fali, tj.

$$\vec{E}(x, y, z, t)$$



Opis fal materii

• Funkcja falowa

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)e^{-i\omega t}$$

gdzie $\omega = 2\pi\nu$

jest częstością kołową fal materii

- fala materii jest również falą prawdopodobieństwa
- zatem $|\psi(x, y, z)|^2$ jest gęstością prawdopodobieństwa

Prawdopodobieństwo (przypadające na jednostkę czasu) wykrycia cząstki w małej objętości wokół danego punktu jest proporcjonalne do wielkości $|\psi(x, y, z)|^2$ w tym punkcie.

- fale dźwiękowe spełniają równania mechaniki newtonowskiej
- fale świetlne spełniają równania Maxwella
- fale materii spełniają równanie Schrödingera

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(x)]\psi = 0$$

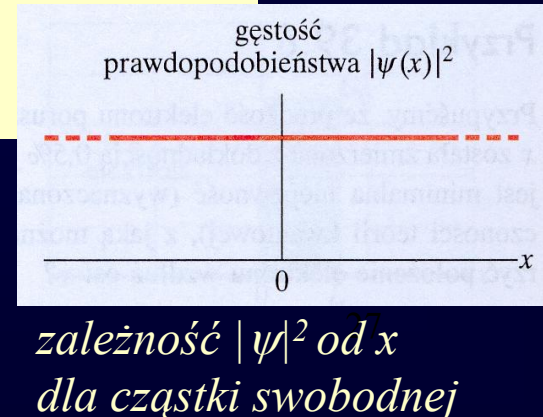
$$\Psi(x,t) = \psi(x)e^{-i\omega t}$$

dla cząstki swobodnej najogólniejszym rozwiązaniem jest

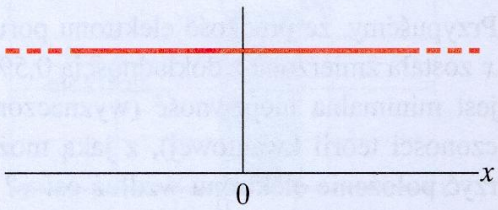
$$\begin{aligned}\Psi(x,t) &= \psi(x)e^{-i\omega t} = \left(Ae^{ikx} + Be^{-ikx}\right)e^{-i\omega t} \\ &= Ae^{i(kx-\omega t)} + Be^{-i(kx+\omega t)}\end{aligned}$$

↙
fala biegnąca w
kierunku rosnących
wartości x

↘
fala biegnąca w
kierunku malejących
wartości x



gęstość
prawdopodobieństwa $|\psi(x)|^2$



*zależność $|\psi|^2$ od x
dla cząstki swobodnej*

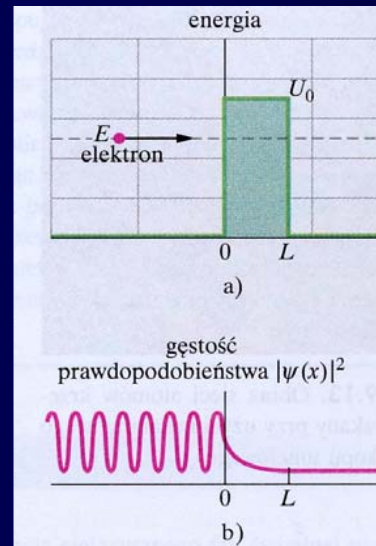
Zasada nieoznaczoności Heisenberga

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar$$

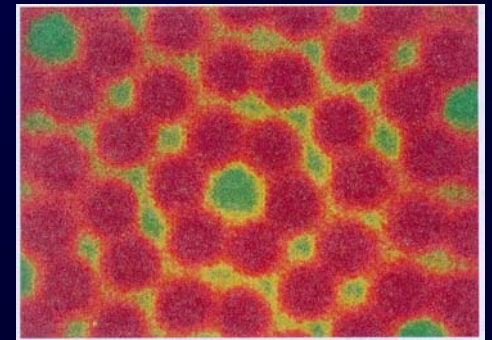
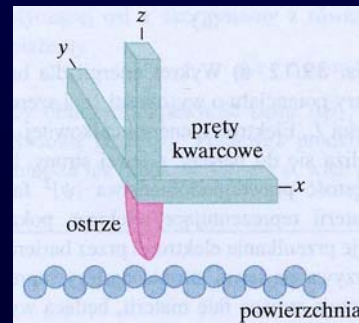
Zjawisko tunelowania

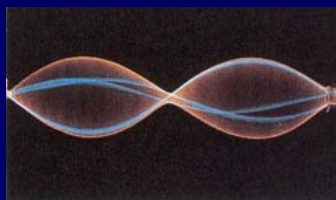
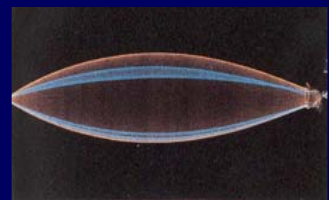


$$T \approx e^{-2kL}$$

$$k = \sqrt{\frac{8\pi^2 m (U_o - E)}{h^2}}$$

Zastosowania w technice: dioda tunelowa,
skaningowy mikroskop tunelowy

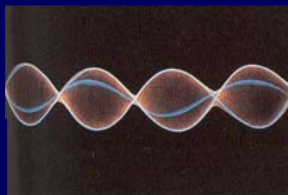
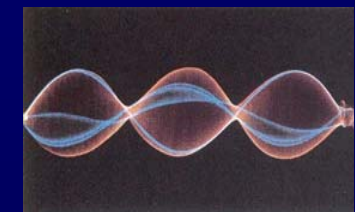




więzy powodują, że mogą powstać fale stojące o dyskretnych częstościach



$$L = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



ograniczenie fali do skończonego obszaru prowadzi do kwantyzacji ruchu

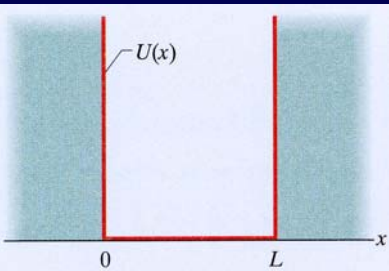
Fale materii w ograniczonej przestrzeni

Wprowadzenie zasady do fal materii

- wygodnie posługiwać się wielkością energii cząstki E
- cząstka swobodna może przyjmować dowolną wartość E
- ograniczona barierą potencjału może istnieć tylko w ściśle określonych stanach energetycznych



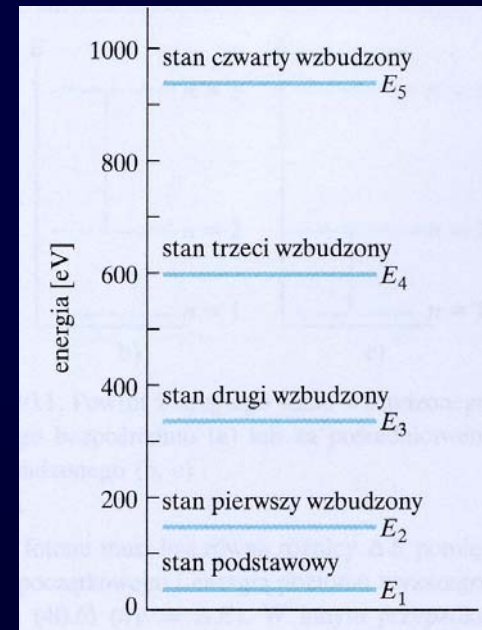
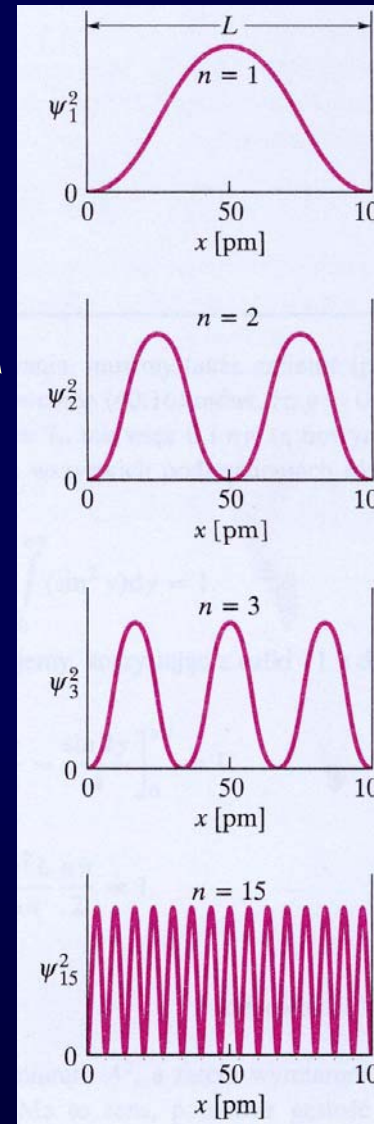
Lokalizacja fali w przestrzeni prowadzi do kwantyzacji, a więc do powstania dyskretnych stanów o dyskretnych energiach. Zlokalizowana fala może przyjmować jedynie takie energie.

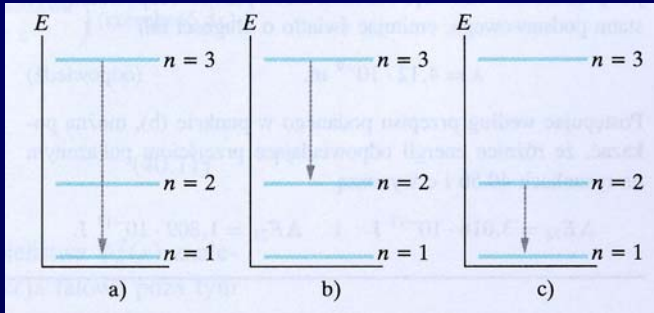


dla cząstki w studni potencjału otrzymamy więc

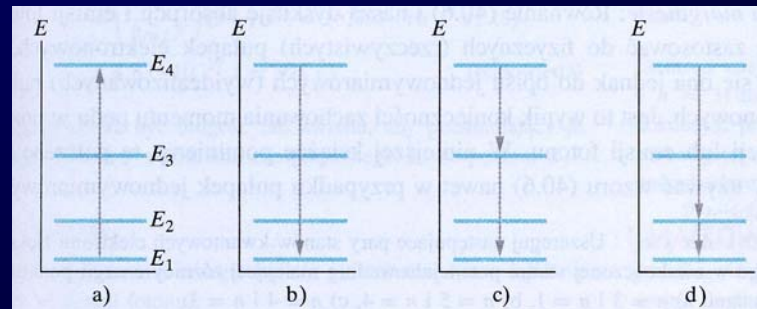
$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$





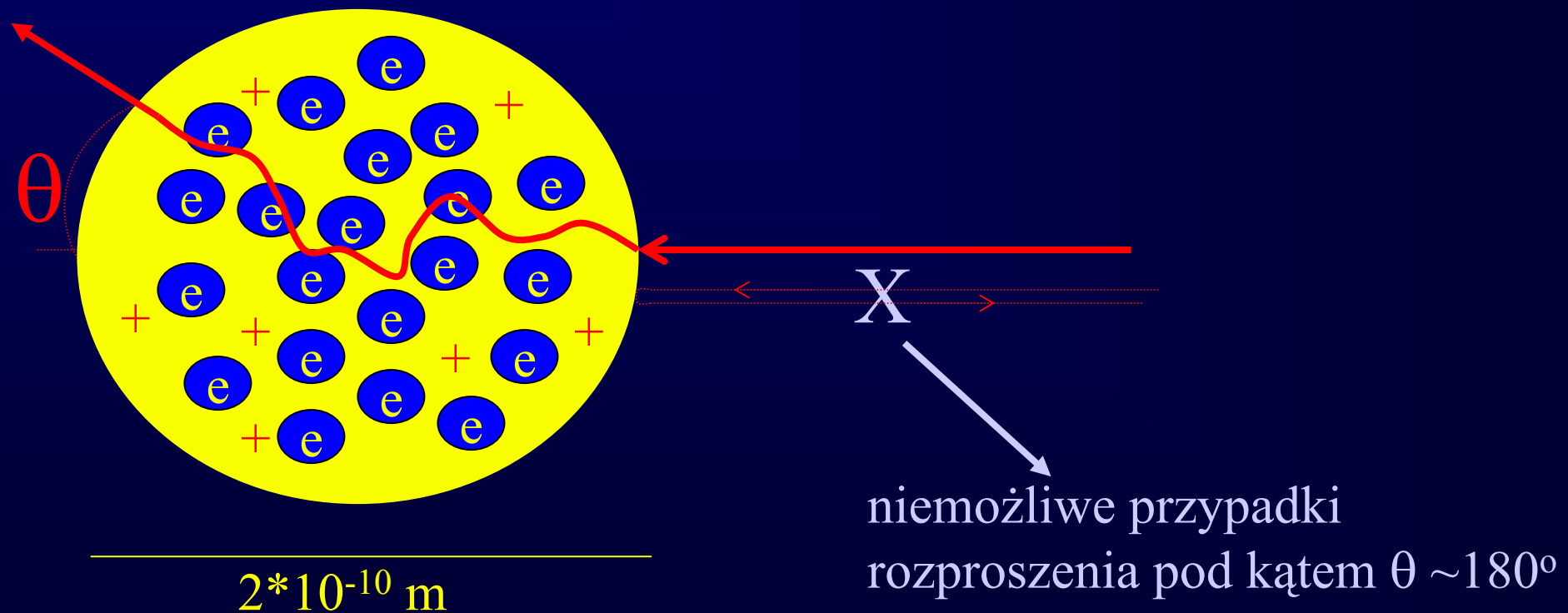
$$\Delta E = E_w - E_n$$



Trochę historii

model budowy atomu Thomsona

obowiązywał do ~1911 r.



rok ~1911 - 1913

Ernest Rutherford

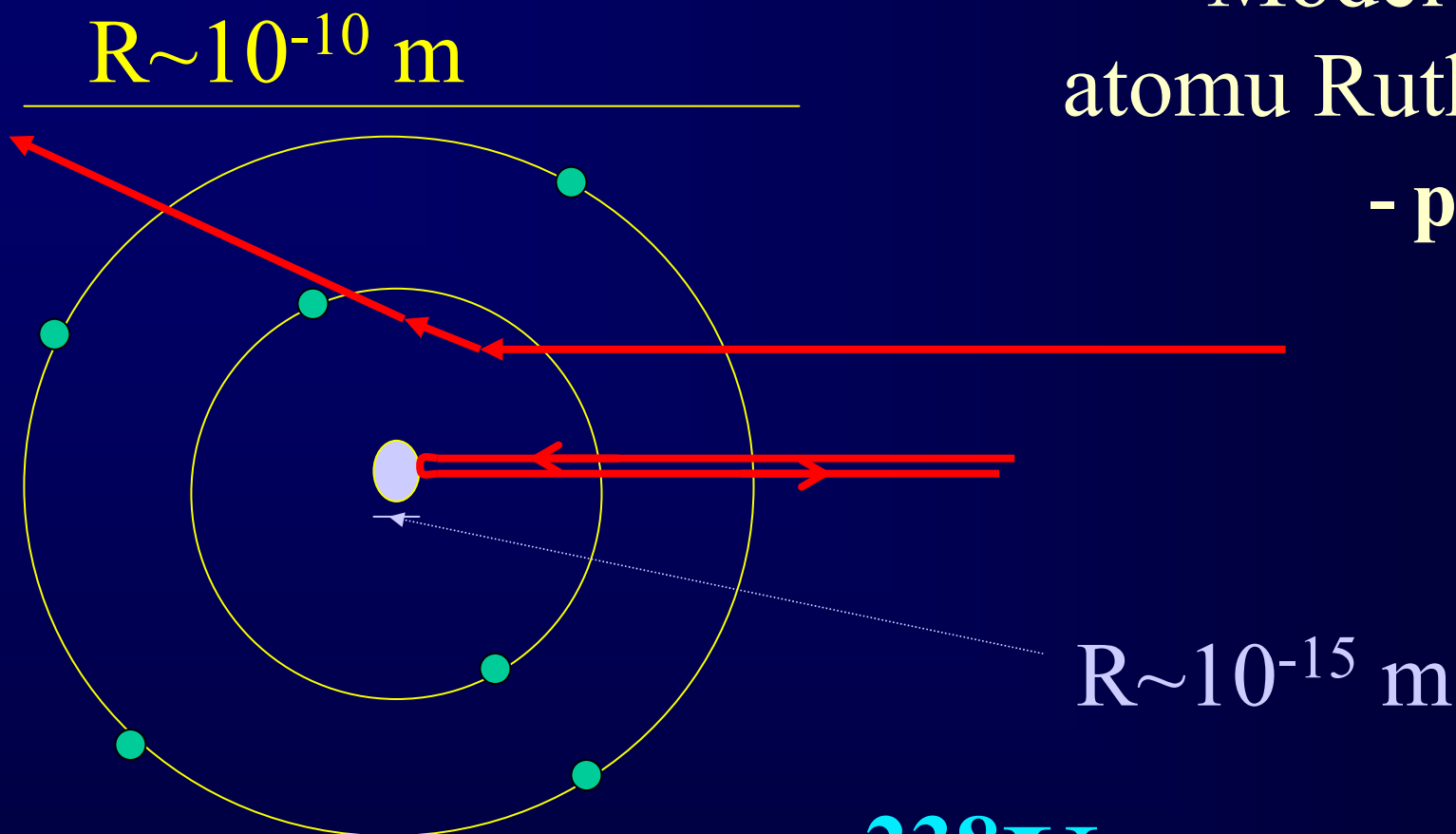


duża liczba cząstek
rozproszonych pod kątem $\theta \sim 180^\circ$



Model budowy atomu Rutherford'a

Model budowy atomu Rutherford'a - pusty twór



^4He

jeśli $R_{\text{jądra}} = 1 \text{ cm}$ to
 $R_K = 12.8 \text{ km}$

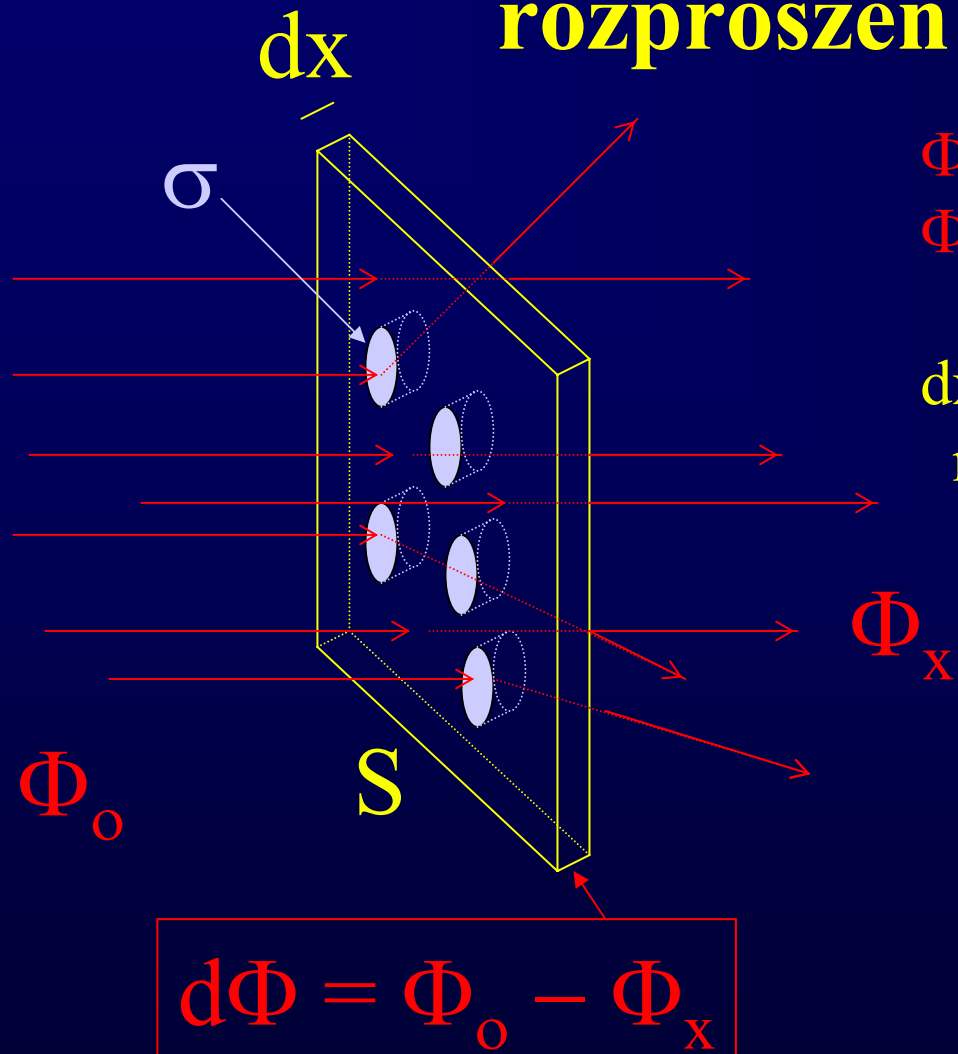
^{238}U

jeśli $R_{\text{jądra}} = 1 \text{ cm}$ to:

$R_K = 71.4 \text{ m}$, $R_L = 285 \text{ m}$,

$R_M = 642 \text{ m}$, $R_N = 1142 \text{ m}$,

Podstawowe definicje rozproszeń cząstek na jądrach



Φ_0 - natężenie cząstek padających

Φ_x - natężenie cząstek
po przejściu tarczy

dx - grubość tarczy

n - liczba 'centrów' rozpraszających
na jednostkę objętości

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{\sigma n S dx}{S}$$

$$d\Phi = \Phi \sigma n dx$$

σ - przekrój czynny

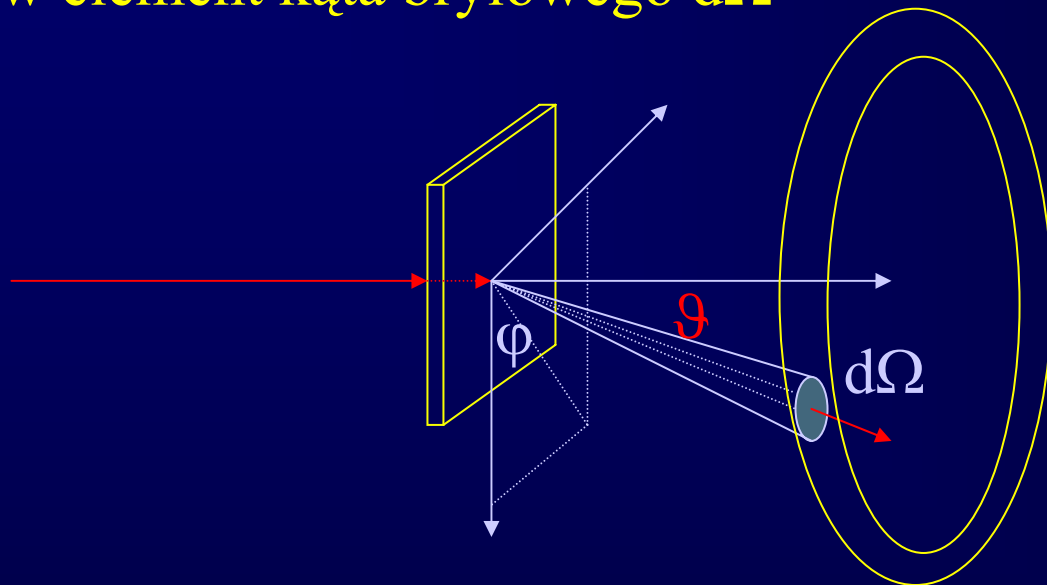
$$\sigma = \frac{\text{liczba reakcji określonego typu}}{\Phi \cdot ndx}$$

określonego typu:

- na rozpraszanie
- na absorpcję
- na wybitcie n.p.. elektronu
- na zajście reakcji jądrowej
- na wybitcie nukleonu
- na rozproszenie pod określonym kątem
- ...

określonego typu:

- na rozproszenie pod kątem ϑ
w element kąta bryłowego $d\Omega$

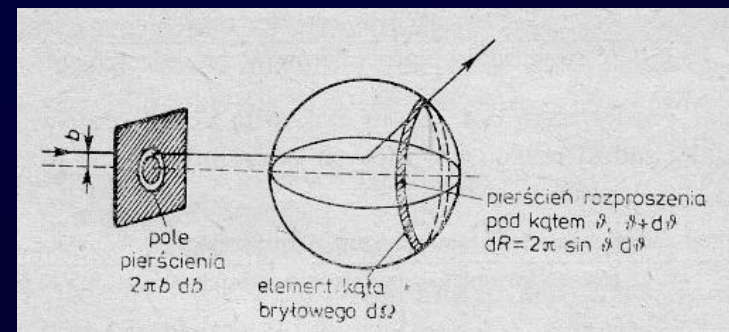


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sigma(\vartheta, \varphi)$$

$$\sigma_{total} = \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega$$

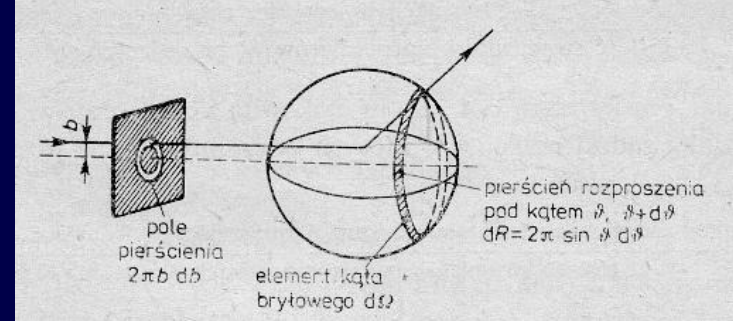
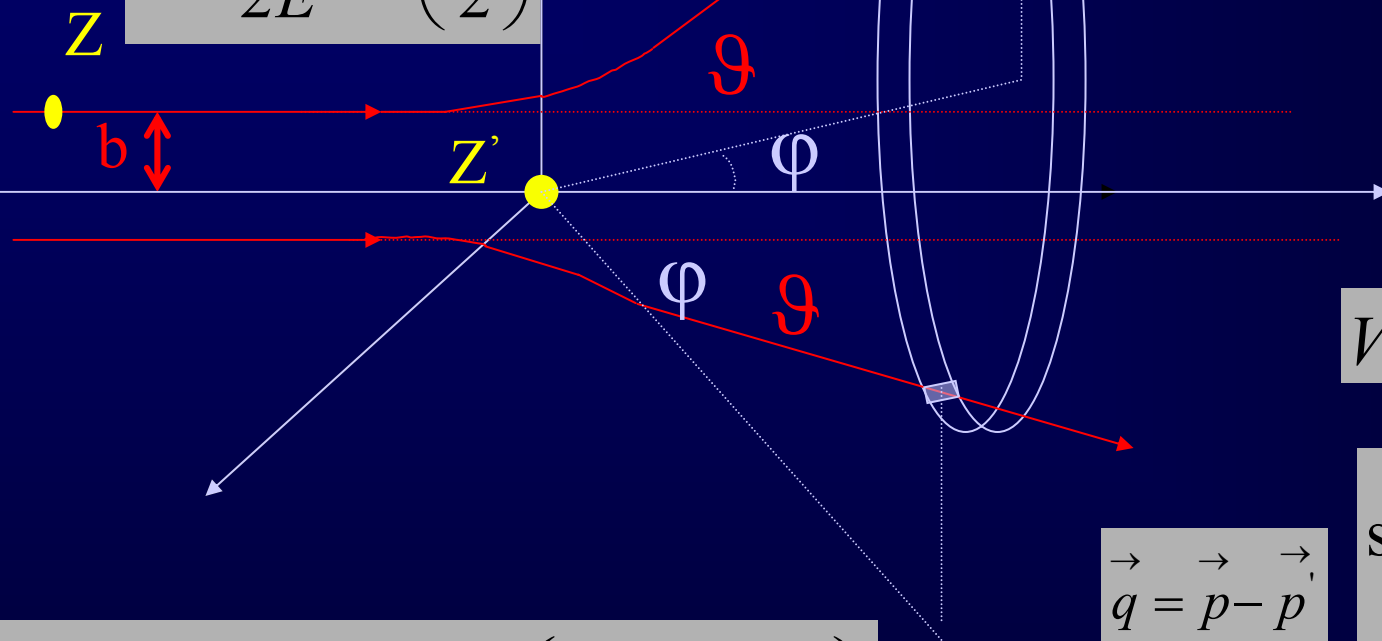
$$\left(\frac{d\sigma}{d\vartheta} \right) d\vartheta = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\vartheta} d\Omega = 2\pi \sin \vartheta \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\vartheta} d\vartheta$$

$$\frac{d\sigma}{d\vartheta} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\vartheta} 2\pi \sin \vartheta$$



$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_g = \frac{b}{\sin \vartheta} \left(\frac{db}{d\vartheta}\right)$$

$$b = \frac{C}{2E} \operatorname{ctg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$$



$$F = ZZ' e^2 / r^2$$

$$V = ZZ' e^2 / r = C / r$$

$$\sin \frac{\vartheta}{2} = \frac{1}{2} \frac{q}{|p|} = \frac{q}{2mv}$$

$$\vec{q} = \vec{p} - \vec{p}'$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_g = \left(\frac{C}{4E}\right)^2 \left(\frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}\right)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_g = (C \cdot 2m)^2 \frac{1}{q^4}$$

Eksperymenty rozproszeniowe dają możliwość:

- oceny promieni jądrowych
- pomiaru ładunku jąder rozpraszanych czy rozpraszających
- określenia potencjału oddziaływania

