

Podstawy fizyki – sezon 2

10. Dualizm światła i materii

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 106

amucha@agh.edu.pl

<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

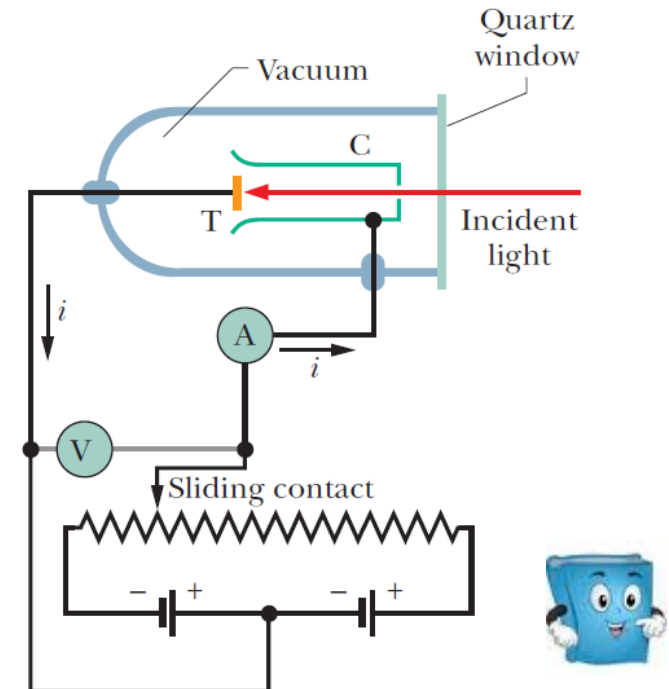
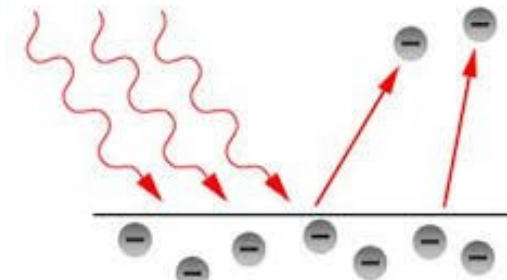
Foton

- ▶ 1886 Hertz - wyładowanie elektryczne między dwoma elektrodami zachodzi łatwiej, gdy na jedną z elektrod pada promieniowanie nadfioletowe.
- ▶ Lenard – wyjaśnienie - pod wpływem promieniowania następuje emisja elektronów z powierzchni katody.
- ▶ Einstein 1905 – światło – fala elektromagnetyczna, jest pewną porcją (kwant) energii, nazywa ją **FOTON**,
- ▶ Foton (fala) o częstotliwości ν , niesie energię $E = h\nu$, ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), stała Planca.
- ▶ Energia kilku fotonów jest wielokrotnością kwantu (porcji) $E = h\nu$.
- ▶ Fala (foton) nie może mieć ułamkowej porcji energii $E = h\nu$

Ale jak to sprawdzić?

Efekt fotoelektryczny

- ▶ Zaobserwowano, że w wyniku padania światła na powierzchnię metalu, wybijane są z niej elektrony.
- ▶ Einstein nazwał to zjawisko **EFEKTEM FOTOELEKTRYCZNYM** (występuje w fotokomórkach)
- ▶ Zbudowanie odpowiedniego układu elektrycznego pozwoliło na zbadanie własności tego efektu:
 - Metal w rurze próżniowej (brak strat energii na zderzenia) z kwarcowym oknem (przepuszczalnym dla promieni UV, które niosą najwyższą energię)
 - Opornica pozwalająca na zmianę napięcia w obwodzie – wybite elektrony są hamowane lub przyspieszane w polu elektrycznym



Efekt fotoelektryczny – obserwacja I

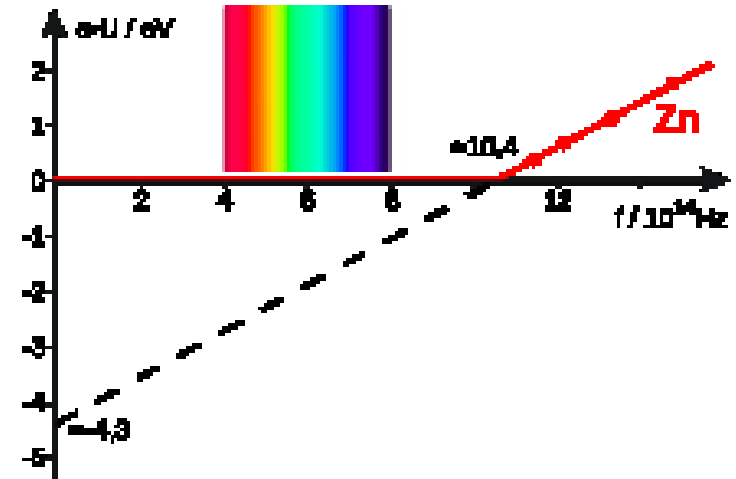
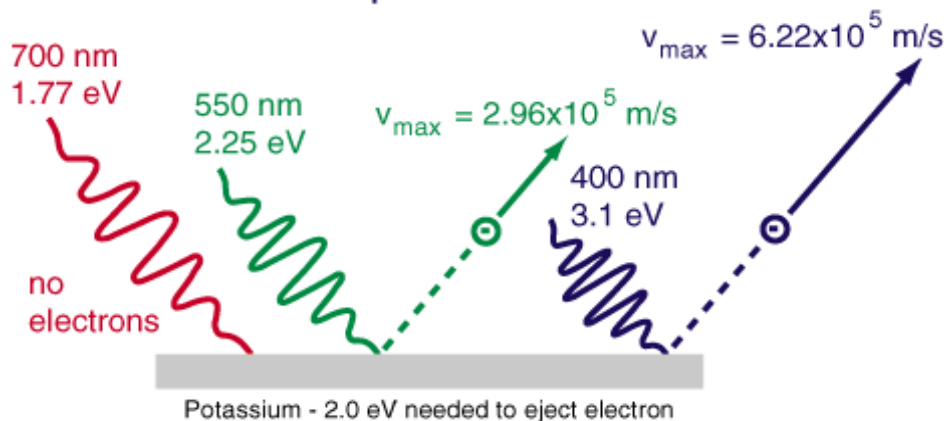
- ▶ Pomiedzy płytka T, z której uwalniane są elektrony a płytka zbierającą C wytwarzamy różnicę potencjałów.
- ▶ Gdy napięcie U jest dostatecznie duże – prąd fotoelektryczny osiąga nasycenie. Wartość prądu nasycenia jest wprostproporcjonalna do natężenia światła.
- ▶ Gdy przyłożymy przeciwne napięcie, będzie ono działało hamująco na elektrony i prąd zaniknie.
- ▶ Wartość napięcia hamującego nie zależy od natężenia padającego światła
- ▶ Maksymalna energia kinetyczna uwalnianych elektronów:

$$E_{K,max} = eU_h$$



Efekt fotoelektryczny – obserwacja II

- ▶ Klasycznie – zjawisko fotoelektryczne powinno występować dla światła o dowolnej częstotliwości (jeśli dostarczona energia jest wystarczająca do wybicia elektronów).
- ▶ Obserwujemy jednak, że dla każdego metalu istnieje pewna częstość graniczna, światło niższej częstości, nawet o dużym natężeniu, nie wywołuje efektu



en. światła = en. kin el + praca wyjścia

$$h\nu = E_k + W$$

Efekt fotoelektryczny - problemy

- ▶ Obserwacji tych nie można wyjaśnić traktując światło jako falę:
 - Energia wybitych elektronów powinna wzrosnąć, gdy wzrasta natężenie światła (bo fala elm działa na elektron siłą eE).

Teoria kwantów -zwiększając natężenie światła, zwiększamy liczbę fotonów, ale przekazana elektronowi energia jest niezmienna.

- Dla częstotliwości światła niższej niż graniczna efekt nie zachodzi.

Teoria kwantów – światło o niższej częstości ma za niską energię, aby wyrwać elektron z powierzchni metalu.

$$h\nu = W + E_k$$

- Powinno zachodzić opóźnienie czasowe pomiędzy chwilą padania światła, a momentem emisji elektronów (elektron powinien gromadzić energię z docierających powierzchni falowych, a dopiero potem wydostać się z metalu) – żadnego opóźnienia się nie obserwuje

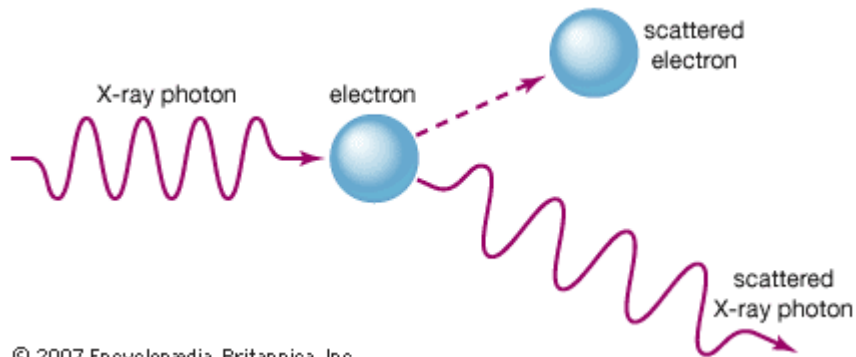
fala porusza się z prędkością światła, a jeden elektron absorbuje jeden foton

Fotony mają pęd?

- ▶ Einstein 1916 – skoro foton ma energię, to powinien również mieć pęd ($p = mv?$)

lepiej:
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- ▶ Można się spodziewać, że skoro foton ma pęd i energię, to jego oddziaływanie z materią opiszemy jako klasyczne zderzenia:



Efekt Comptona (1923)

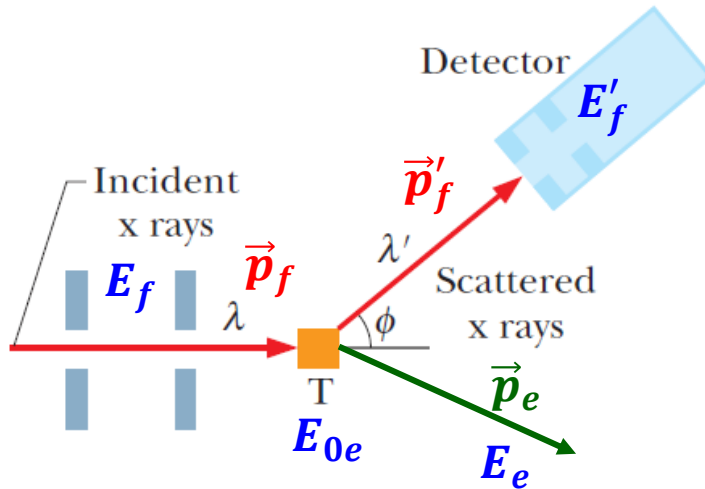
$$h\nu = h\nu' + E_K$$

$$h\frac{c}{\lambda} = h\frac{c}{\lambda'} + E_K$$

Po zderzeniu zmieniła się energia fotonu (długość fali) – klasycznie fala nie może zmienić długości

Efekt Comptona - doświadczenie

- ▶ Zaobserwowano, że foton padając na (zderzając się z) swobodny elektron, rozprasza się pod pewnym i zmienia energię (długość fali)
- ▶ Efekt Comptona jest drugim dowodem, iż światło (fala) przenoszona jest w postaci porcji (kwantów) energii i oddziałuje podobnie jak materia.



$$E_f + E_{0e} = E_e + E'_f \quad E_{0e} = m_e c^2$$

$$\vec{p}_f = \vec{p}_e + \vec{p}'_f$$

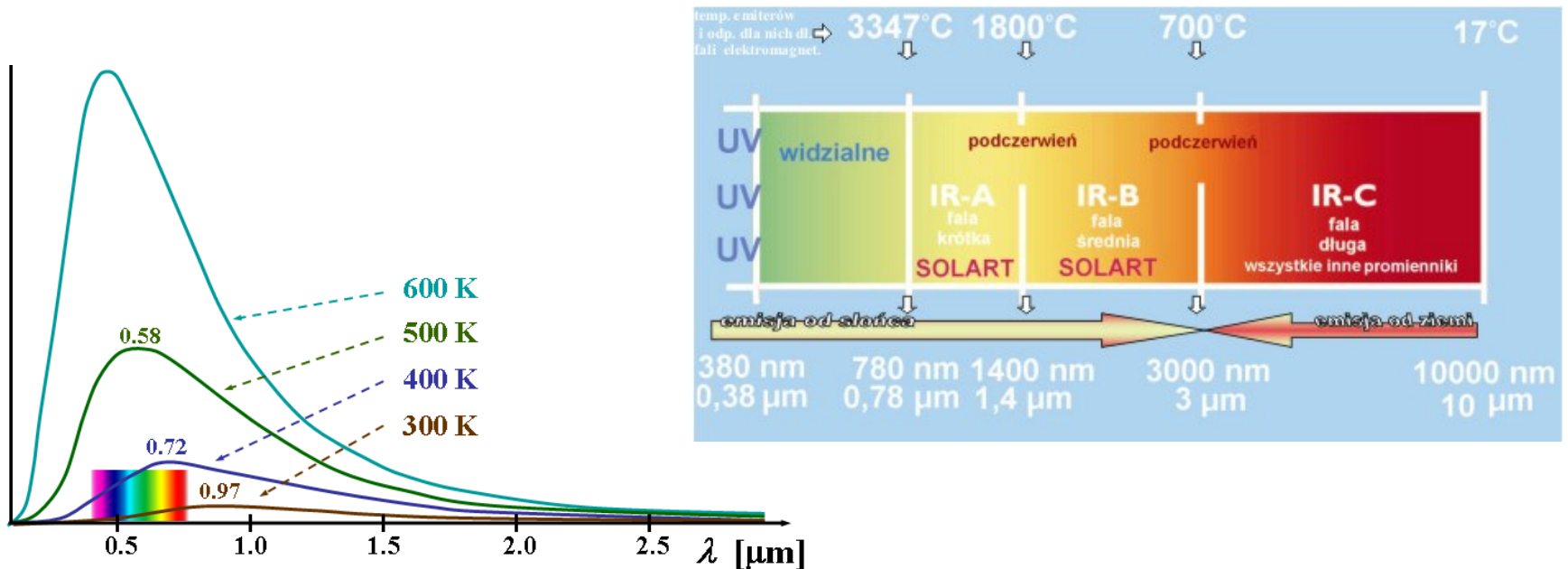
$$E_e^2 = E_{0e}^2 + p_e^2 c^2$$

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$

- ▶ Elektron po rozproszeniu ma prędkość porównywalną do prędkości światła (relatywistyczny elektron).
- ▶ Foton może rozproszyć się o dowolny kąt (nawet 180° -”wstecz”)

Promieniowanie ciepłe

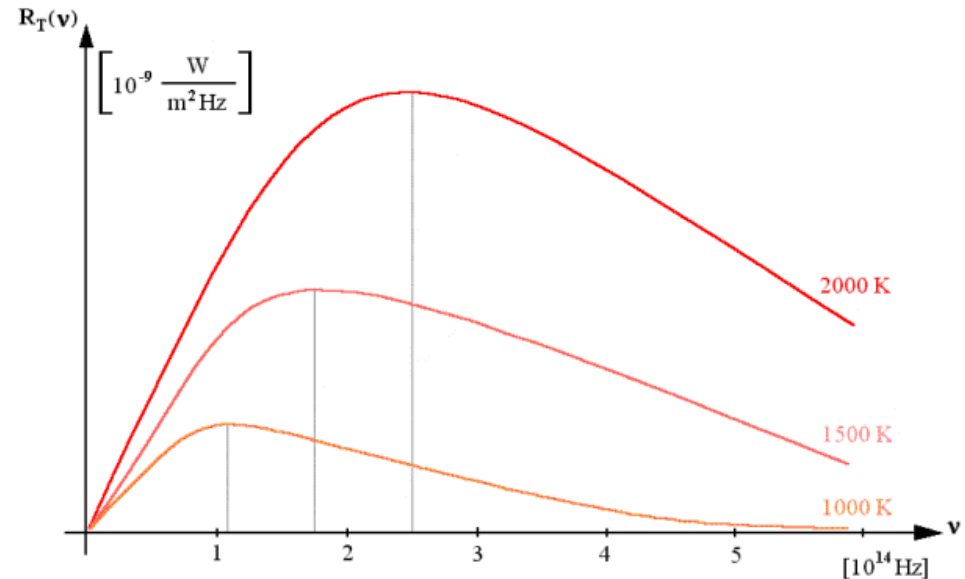
- ▶ Powierzchnia ciała o dowolnej temperaturze wysyła promieniowanie (podczerwone, termiczne) o szerokim widmie długości fal.
- ▶ Niewielki fragment tego widma jest widzialny dla oka.



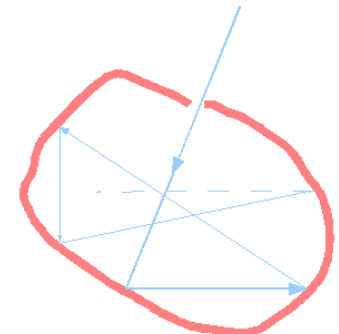
Własności promieniowania ciepłego (podczerwone)

- ▶ Wykres zdolności emisyjnej ciała $R_T(\nu)$:

- maksimum, które przesuwa się ze wzrostem temperatury, położenie tego maksimum prawie nie zależy od rodzaju powierzchni
- zarówno dla długich, jak i dla krótkich fal dąży do zera.



- ▶ Do opisu emisji termicznej wprowadza się wzorcowy model – **ciało doskonale czarne** (takie, które pochłania całe padające na niego promieniowanie)



Promieniowanie ciała doskonale czarnego

- ▶ Krzywa $R_T(\nu)$ została bardzo dokładnie zbadana doświadczalnie:
 - prawo Stefana- Boltzmana – całkowita zdolność emisyjna c.d.cz.:

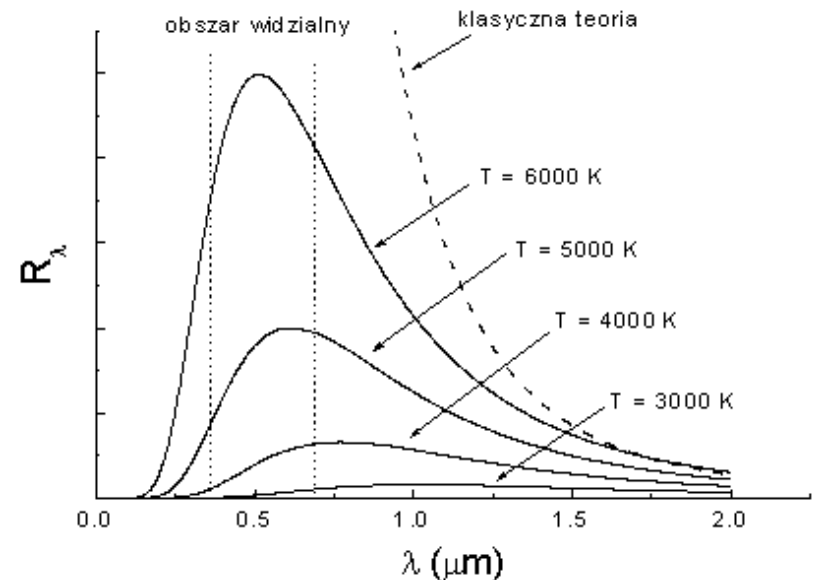
$$R = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- Prawo przesunięć Wienna:

$$\lambda_{max} T = 2.898 \cdot 10^{-3} m K$$

I okazało się, że wyniki nie pasują do klasycznej teorii falowej (katastrofa w podczerwieni, nadfiolecie) –

- w granicy wyższych długości (niskich częstotliwości) - wyniki zgodne
- dla wysokich częstotliwości teoria przewiduje wzrost zdolności emisyjnej do nieskończoności



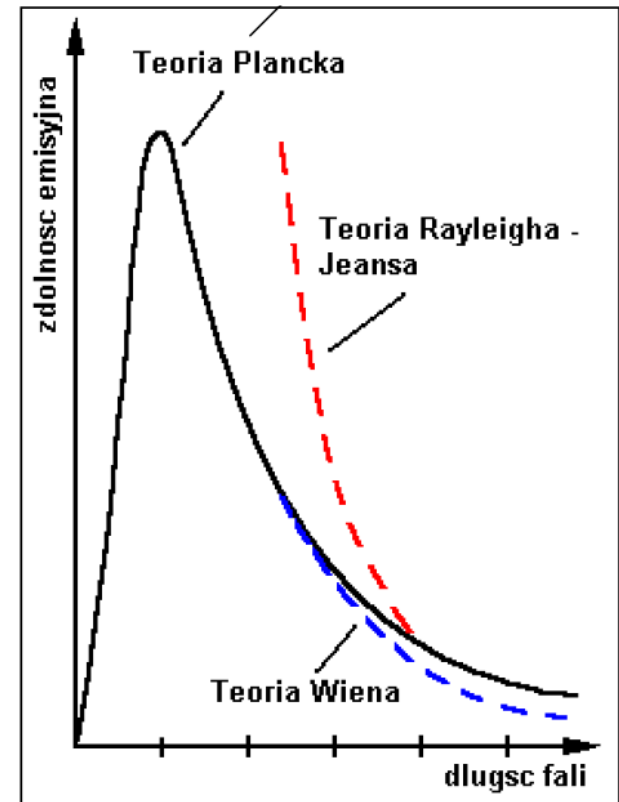
Teoria Plancka (1900)

- ▶ Musimy przyjąć założenie, że promieniowanie elektromagnetyczne emitowane i absorbowane jest w postaci osobnych porcji energii (kwantów) o wartości:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E_T(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1}$$

Wzór Plancka – rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego, zgodny z doświadczeniem



Fale czy cząstki?

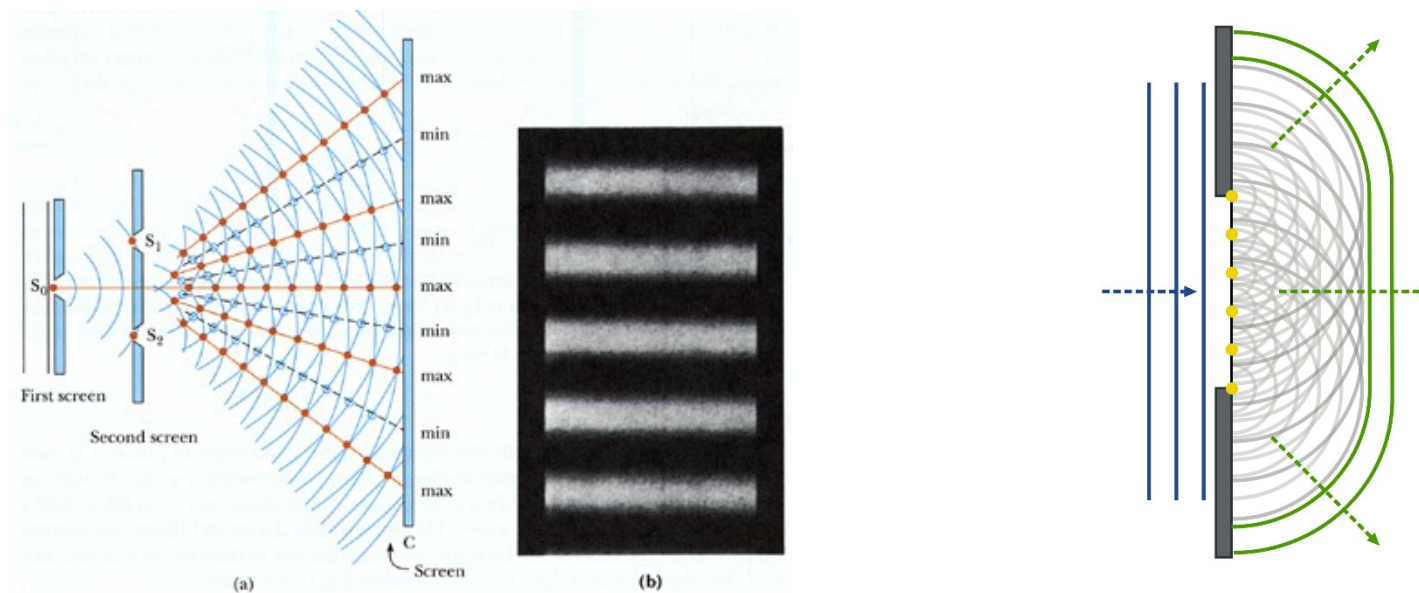
- ▶ Jaka jest natura otaczającego nas świata? Falowa czy o charakterze materii?
- ▶ Mówimy o dualizmie korpuskularno-falowym światła –
 - Efekty falowe (dyfrakcja, interferencja, polaryzacja)
 - Efekty korpuskularne – promieniowanie termiczne, efekt fotoelektryczny i efekt Comptona
- Jeżeli opisujemy mikroświat spodziewamy się efektów relatywistycznych i kwantowych

Światło ma naturę **korpuskularno-falową**:
w jednych zjawiskach zachowuje się jak fala (zjawiska związane z propagacją, rozchodzeniem się fali), w innych zachowuje się jak strumień cząstek (fotonów) – zjawiska związane z oddziaływaniem promieniowania z materią)

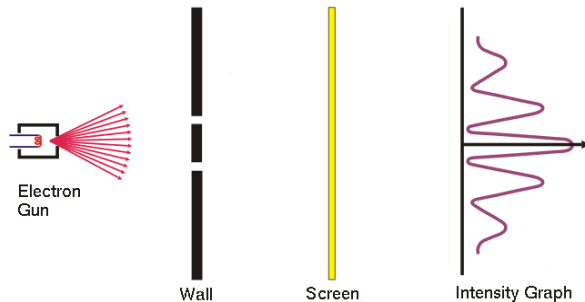
Cząstki jako fale

- ▶ Skoro okazuje się, że fale zachowują się jak cząstki, to może cząstki zachowują się jak fale?

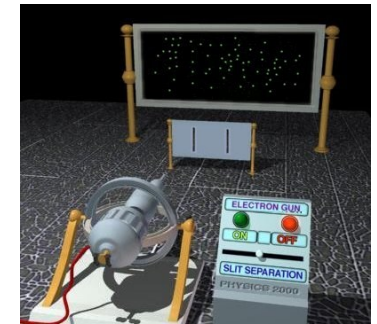
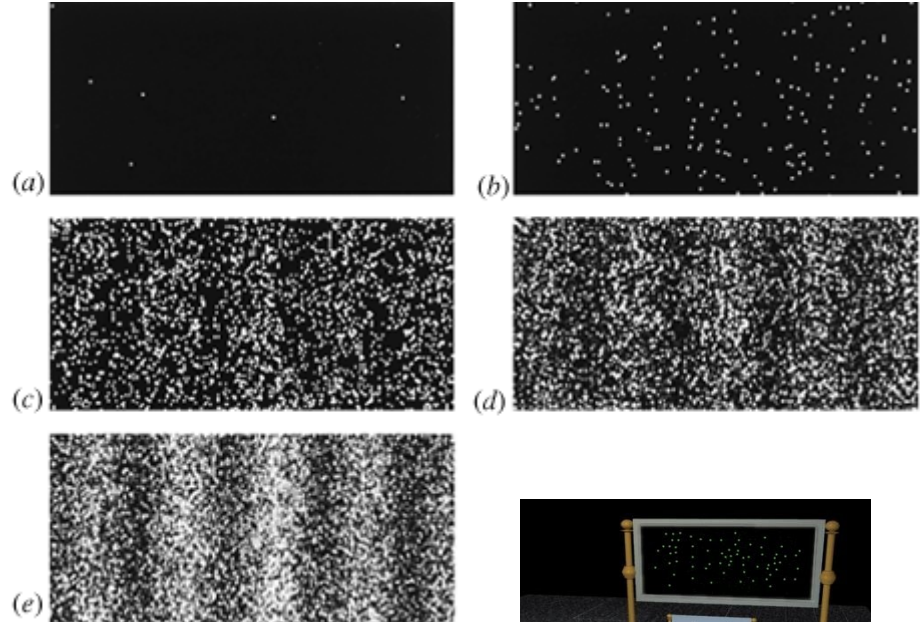
Jako przypomnienie – fale ulegały interferencji i dyfrakcji– po przejściu przez dwie szczeliny, na ekranie obserwuje się prążki – wzmocnienia i wygaszenia. Czy można taki efekt zaobserwować dla cząstek materii (np. elektronów)?



Dyfrakcja i interferencja elektronów



Intensywność po przejściu przez dwie szczeliny *nie* jest sumą intensywności po przejściu przez każdą szczelinę z osobna. Występują efekty interferencyjne, więc elektrony zachowują się jak fala!

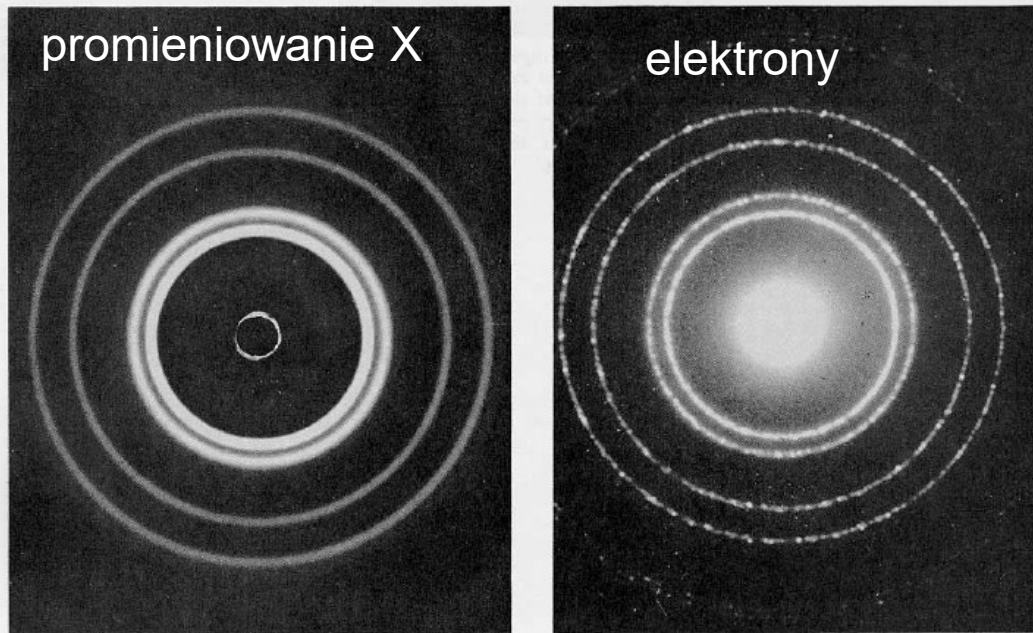


Zarówno cząstki naładowane jak i nienaładowane wykazują cechy charakterystyczne dla fal

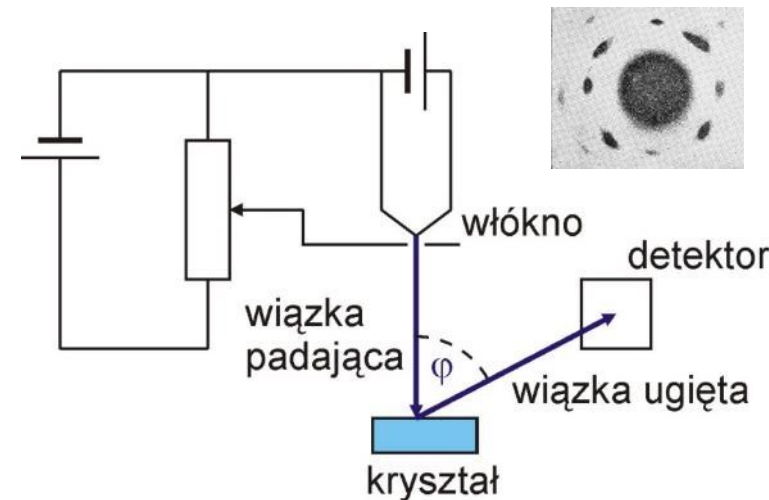
Dyfrakcja elektronów

- ▶ Obrazy dyfrakcyjne promieni X i elektronów są takie same:

The diffraction pattern on the left was made by a beam of x rays passing through thin aluminum foil. The diffraction pattern on the right was made by a beam of electrons passing through the same foil.



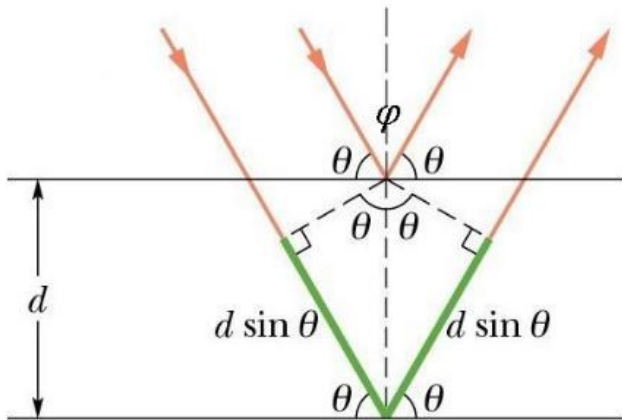
Doświadczenie Davissona i Germera



przyspieszane elektrony padają na kryształ,

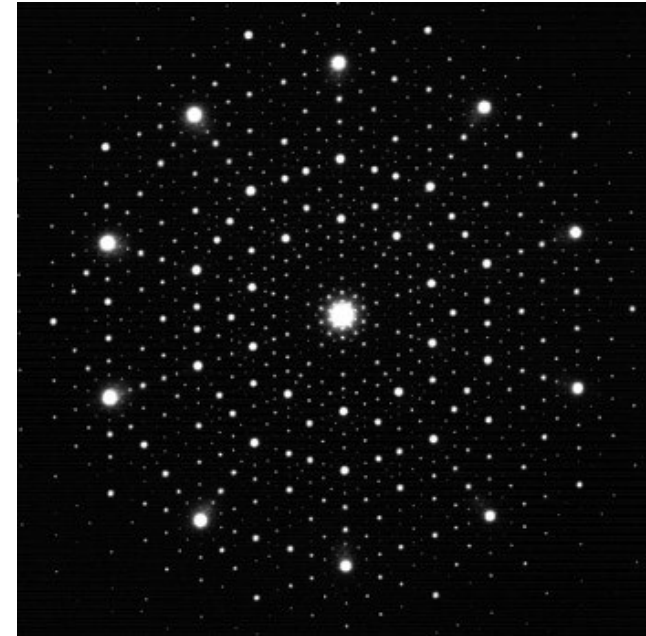
rejestrowane jest natężenie wiązki ugiętej w detektorze ustawionym pod zmiennym kątem

Dyfrakcja elektronów na kryształach



maksimum dyfrakcyjne powstanie, gdy:

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



elektrony zachowują się jak fala, ale o jakiej długości???

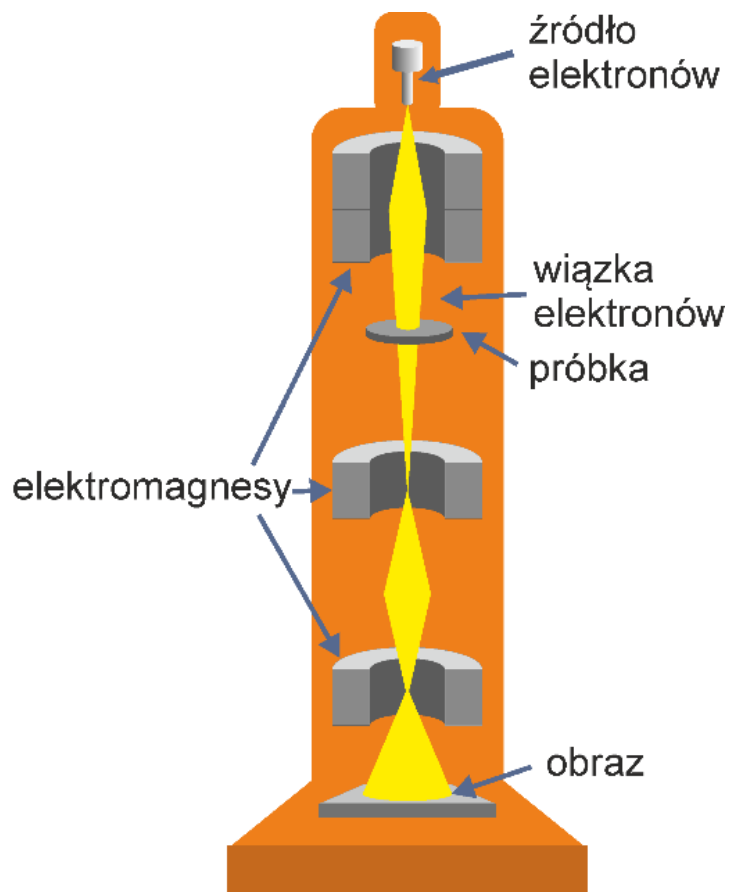
Fale materii inaczej nazywamy falami de Broglie'a:

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

np. dla elektronu przyspieszanego napięciem 54V
długość fali wynosi:

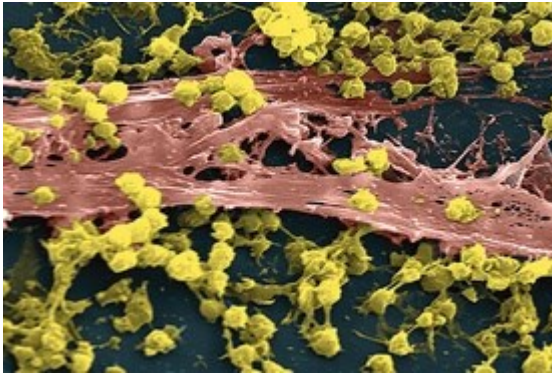
$$\lambda = \frac{h}{mv} = 0.165 \text{ nm} \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2 = eU$$

Mikroskop elektronowy



elektronowy mikroskop transmisyjny - powiększenie 3 mln razy

Mikroskop elektronowy



Komórki gronkowca (pow. 2300 razy)



Powierzchnia ciała stałego (mikroskop tunelowy)



<http://zasoby.open.agh.edu.pl/~1sasshot/strona.php?t=mb&h=tem&v=>

Promieniowanie X

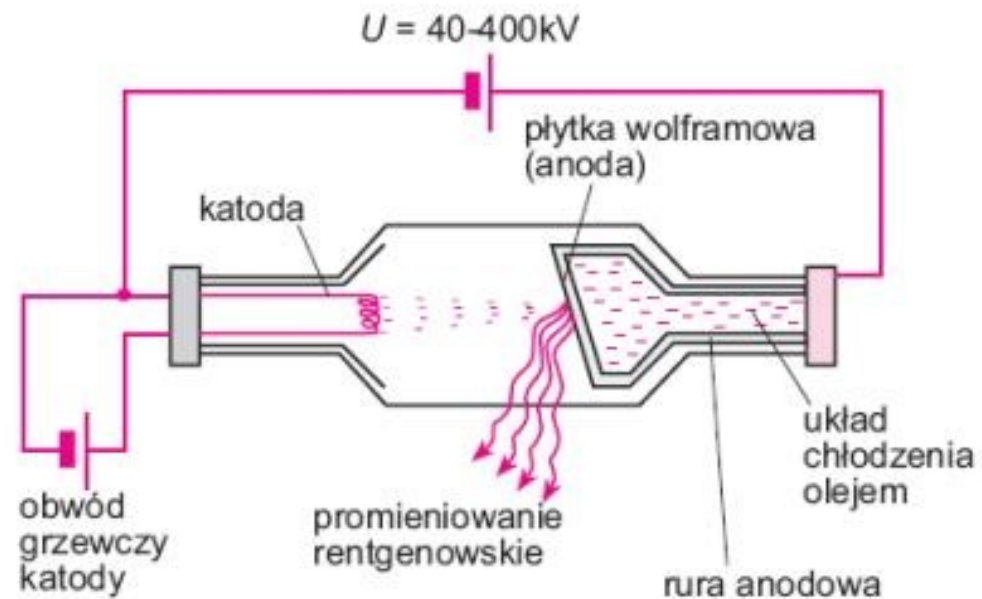
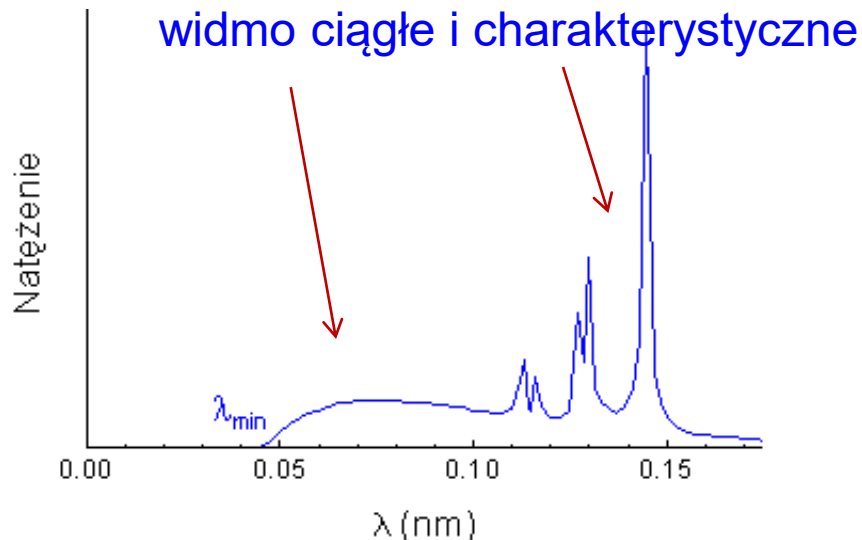
► Promieniowanie X:

- elektrony wytwarzane są na katodzie,
- przyspieszane w polu elektrycznym do energii kilkuset keV,
- hamowane na ciężkiej tarczy

- Energia hamowania wypromieniowana zostaje w postaci promieniowania o energii keV (długości fali nm).

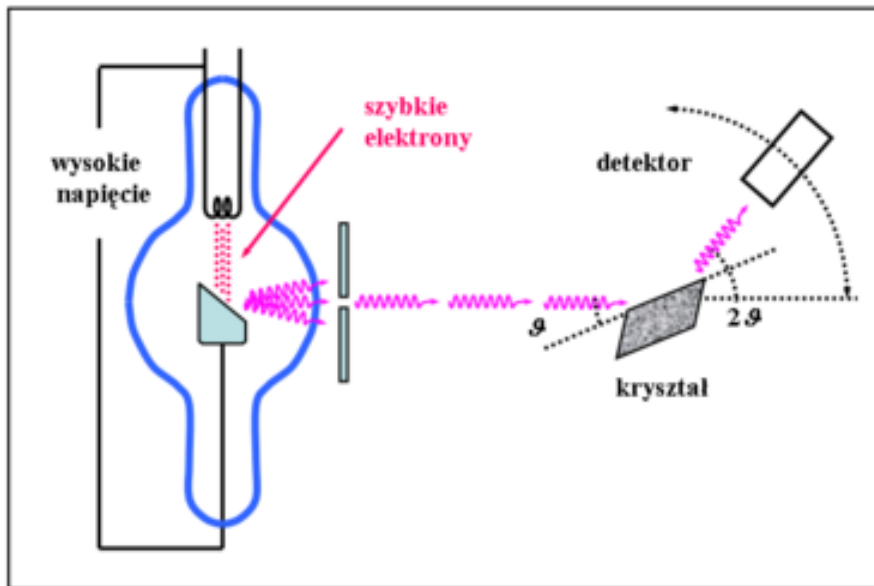
$$eU = h\nu_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}}$$

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}$$



Promieniowanie X - badania kryształów

- ▶ Promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali nm bardzo dobrze nadaje się do badania struktury ciała stałego.



- ▶ Czy promieniowanie X świadczy raczej o naturze falowej światła, czy też jest przejawem jego kwantowej (korpuskularnej natury)

Podsumowanie

- ▶ Kwanty światła (fotony) – potwierdzenie
 - promieniowanie ciała doskonale czarnego,
 - efekt fotoelektryczny,
 - efekt Comptona
- ▶ Fale materii – dyfrakcja elektronów i neutronów