



Dualizm

korpuskularno-falowy

a

klasyczno-kwantowy



Mechanika klasyczna

Teoria opisująca prawa ruchu obiektów makroskopowych, oparta na 3 zasadach I. Newtona (1687). Zakres NIE stosowalności:

- prędkości porównywalne z prędkością światła – **STW** i **OTW** (A. Enistein – 1905, 1916)
- wielkości rzędu rozmiaru molekuł (ok. 10^{-9} m średnicy) i mniejszych – **teoria kwantowa** (M. Planck - 1900, L. De Broglie – 1923, E. Schrödinger -1923, M. Born 1926, W. Heisenberg -1927,) .

Korpuskuła

Równanie ruchu $\mathbf{F}(\mathbf{r}, t, \dot{\mathbf{r}}) + \mathbf{f}(\mathbf{r}, t) = m \cdot \ddot{\mathbf{r}}(t)$

- **masa** miara ilości materii zawartej w danym obiekcie fizycznym **m**
- **pęd** (dynamiczne właściwości cząstki) $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$
- **Energia mechaniczna** (zdolność do wykonania pracy) $E = E_k + E_p = m(v^2/2 + gh)$
- **Zasady zachowania**: energii, pędu, momentu pędu,
- **Zasada przyczynowości** - stan początkowy ruchu (dla t_0) określa jednoznacznie stan w chwilach późniejszych.

Fala

Równanie fali $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

- **prędkość** transport energii bez transportu masy **v**

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx) = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(vt - x)\right]$$

- **długość fali** λ
- **częstotliwość** **f** (dla światła **v**)

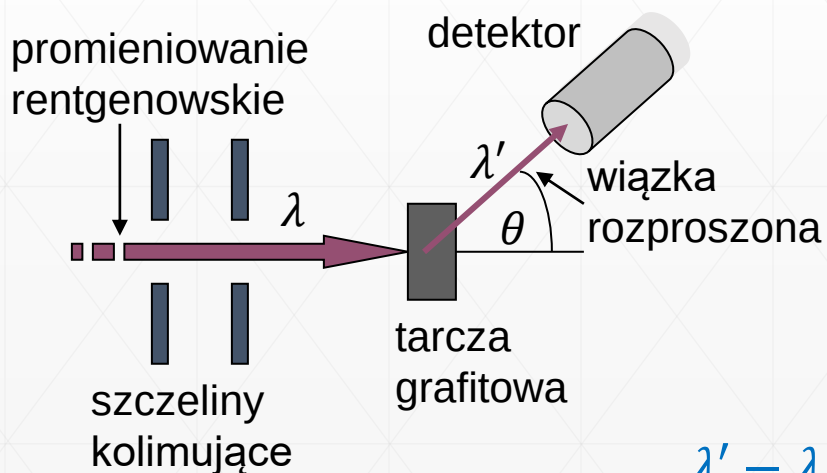
$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = f \cdot \lambda = \text{const}$$

- **Zjawiska falowe**: interferencja, dyfrakcja.

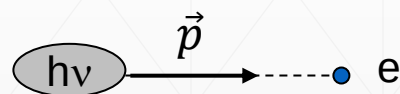
Foton - kwant światła

Opis szeregu zjawisk wymaga uwzględnienia kwantowej natury światła:

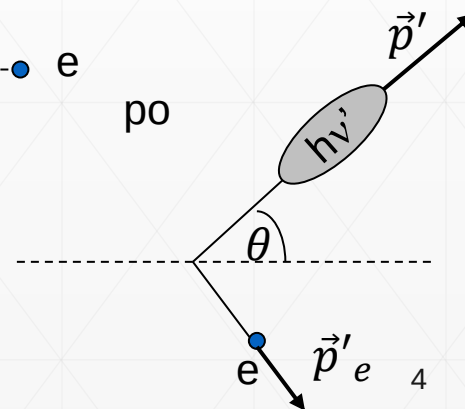
- prawidłowy opis emisyjności promieniowania termicznego z postulatem kwantyzacji energii świetlnej - **prawo Plancka** (1900);
- **zjawisko fotoelektryczne** (1905) – energia kwantów - równanie Einsteina;
- **efekt Comptona** (1923) - rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach (fotony obdarzone energią i pędem):



przed zderzeniem



po



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

Własności fotonu

Foton (kwant światła) jest cząsteczką elementarną, która istnieje tylko w ruchu (nie ma masy spoczynkowej):

- energia fotonu:

$$E = h\nu \qquad mc^2 = h\nu$$

- masa fotonu (w ruchu):

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

- pęd fotonu: Zgodnie z teorią relatywistyczną wszystkie cząstki które posiadają energię muszą posiadać pęd, nawet jeśli nie mają masy spoczynkowej. Wycho-dząc z relatywistycznej zależności energii od pędu otrzymujemy:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 \xrightarrow{m_0 = 0} E = pc \qquad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

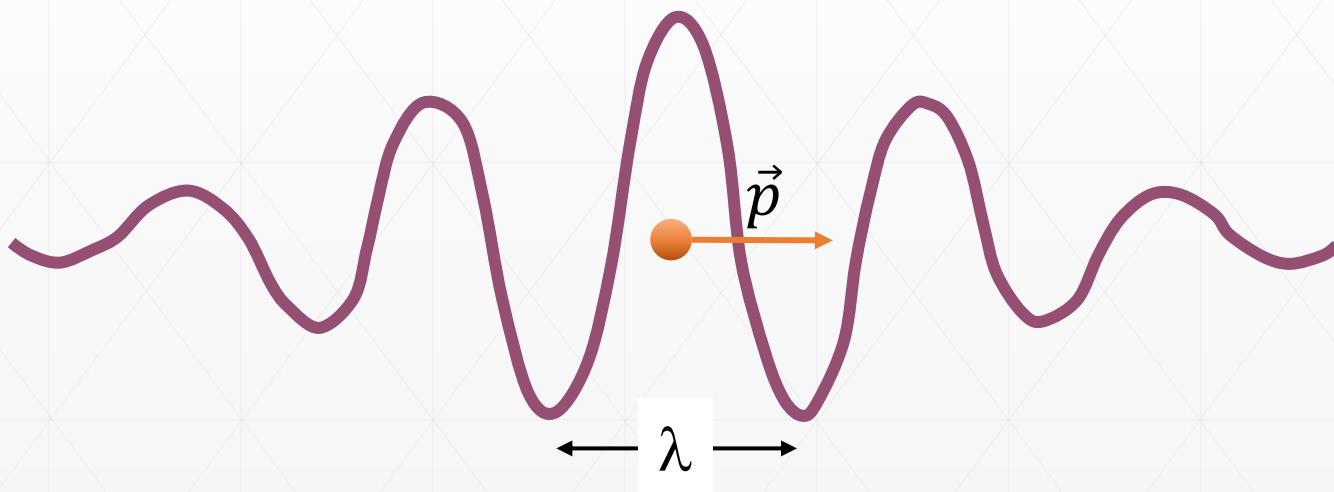
Kierunek pędu fotonu - zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali elektromagnetycznej

- spin $s = 0$ – foton jest bozonem, Foton nie ma ładunku elektrycznego ani momentu magnetycznego, ale może oddziaływać z innymi cząstkami (może wybić elektron z metalu, ale w tym procesie musi być pochłonięty w całości),
- w ośrodkach jednorodnych porusza się prostoliniowo,
- w próżni i powietrzu porusza się z prędkością światła,

m - masa fotonu; **h** - stała Plancka; **v** - częstotliwość; **c** - prędkość światła.

Jak światło może być jednocześnie falą i cząstką

- opisy światła: falowy i korpuskularny są uzupełniające się
- potrzeba obu tych opisów do pełnego modelu świata, ale do określenia konkretnego zjawiska wystarczy tylko jeden z tych modeli
- dlatego mówimy o dualizmie falowo-korpuskularnym światła



Dualizm falowo - korpuskularny

Światło jako fala
elektromagnetyczna
J. Clark-Maxwell **1862**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \equiv c$$

Parametry falowe:

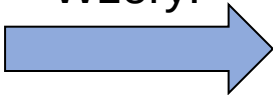
λ - długość fali

c - prędkość światła

ν - częstotliwość

Przeliczanie
parametrów falowych
na korpuskularne

Wzory:


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

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

Światło jako cząstka
(foton)
A. Einstein **1905**

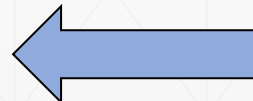
$$h\nu = W_o + E_{Kmax}$$

Parametry
korpuskularne:

E - energia

p - pęd

?



Dualizm korpuskularno-falowy

De Broglie był przekonany, że w przyrodzie panuje symetria. Zgodnie z takim poglądem, należałoby się spodziewać, że materia, którą uważamy za korpuskularną - **elektrony, protony, atomy** itd. zachowa się jak fala.

Falowe właściwości materii Louis de Broglie (1924) przypisał elektronom o pędzie p długość fali λ

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{– długość fali de Broglie'a}$$

Hipoteza fal materii pozwoliła de Broglie'owi znaleźć **uzasadnienie dla postulatu Bohra** dotyczącego kwantowania momentu pędu elektronu w atomie wodoru.

Policzmy długość fali de Broglie'a elektronu na n -tej orbicie atomu wodoru:

$$L = p_n r_n = n\hbar$$

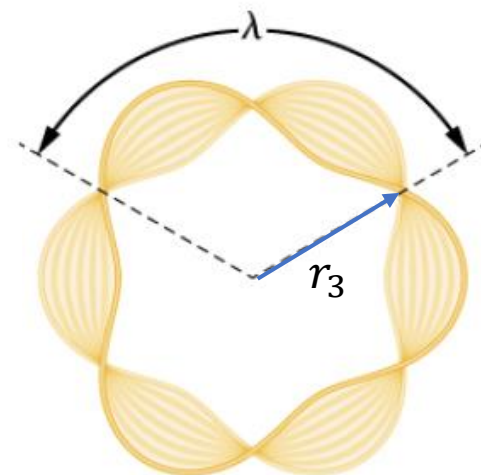
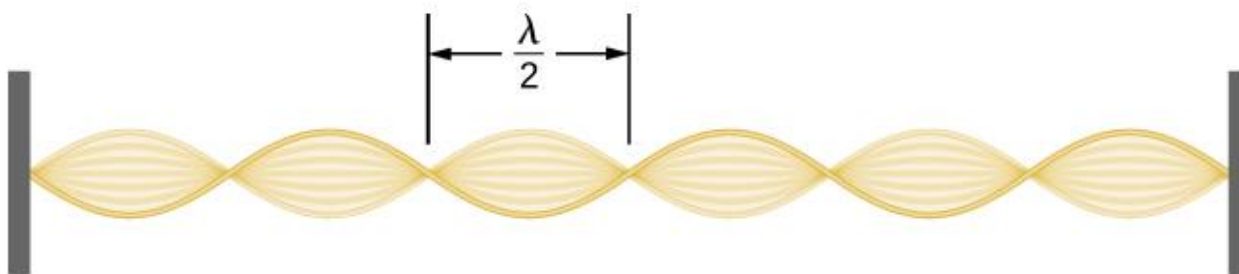
$$\lambda_n = \frac{h}{p_n}$$

$$\lambda_n = \frac{h r_n}{n \hbar} = \frac{2\pi r_n}{n}$$

$$2\pi r_n = n\lambda_n = 2n \left(\frac{\lambda_n}{2} \right)$$

$$\lambda_n = \frac{h}{p_n}$$

$$2\pi r_n = n\lambda_n = 2n \left(\frac{\lambda_n}{2} \right)$$



Na n-tej orbicie w atomie wodoru mieści się n długości fali de Broglie'a przypisanej temu elektronowi. **Fala przypisana elektronowi jest falą stojącą.**

To stwierdzenie uzasadnia postulat Bohra o tym, że moment pędu elektronu na n-tej orbicie jest wielokrotnością stałej Plancka h , podzielaną przez 2π .

dla pyłku unoszonego
przez wiatr

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s}{10^{-7} kg \cdot 1 m/s} = 6,6 \cdot 10^{-27} m$$

wielkość
niemierzalna

dla nierelatywistycznego
elektronu o $E_k = 54 \text{ eV}$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

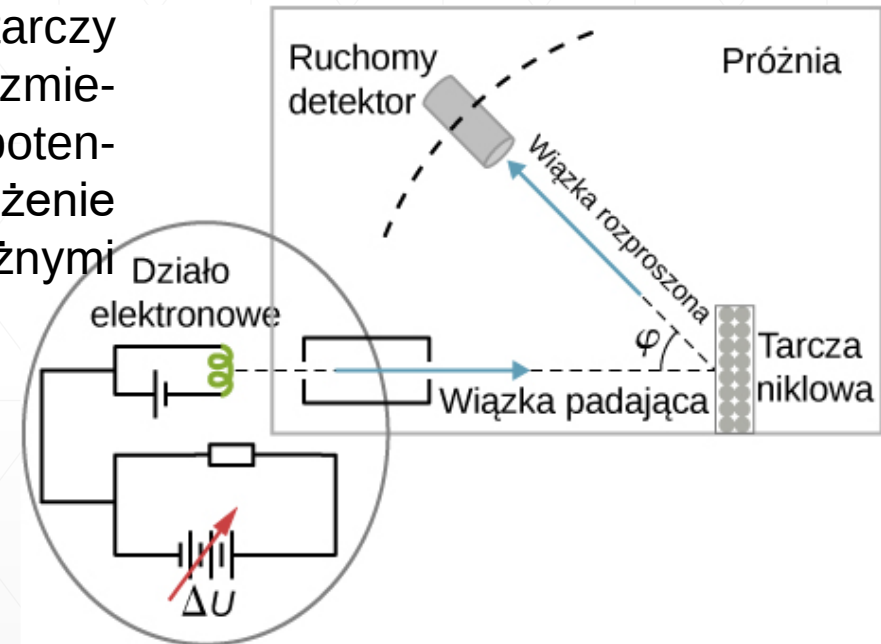
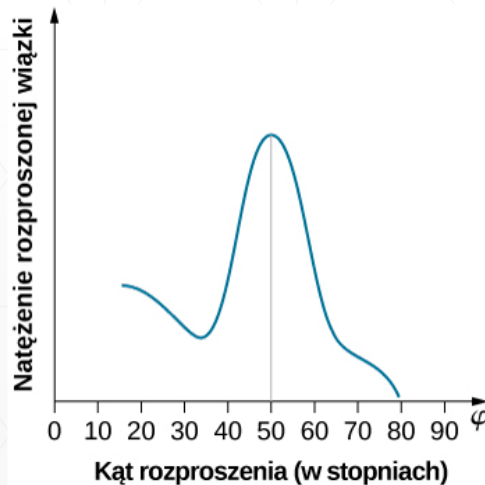
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} kg \cdot 54 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1,67 \cdot 10^{-10} m$$

porównywalna ze stałą sieci kryształu

Dyfrakcja elektronów

Słuszność hipotezy de Broglie'a została potwierdzona w 1927 r. przez Davissona i Germera, którzy wykazali, że wiązka elektronów ulega dyfrakcji tworząc typowy obraz interferencyjny.

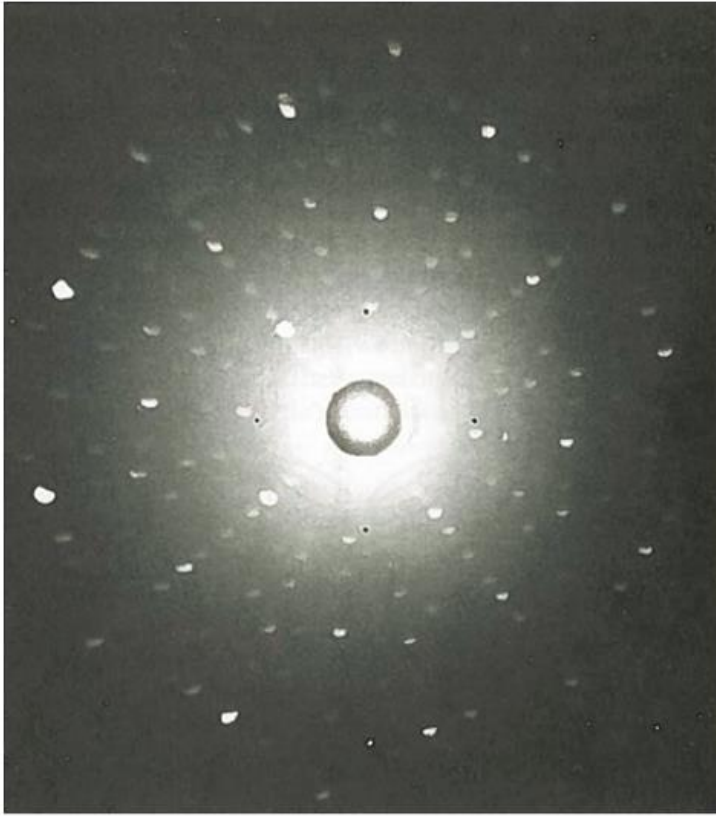
Wiązka elektronów rozpraszana jest na tarczy niklowej. Energia kinetyczna elektronów zmienia się poprzez przyłożoną różnicę potencjałów ΔU w dziale elektronowym. Natężenie rozproszonej wiązki mierzone jest pod różnymi kątami φ .



Maksimum natężenia obserwuje się przy kącie rozproszenia $\varphi = 50^\circ$ dla elektronów o energii 54 eV

Zgodność tego teoretycznego przewidywania z uzyskanym przez Davissona i Germera wynikiem eksperymentalnym $\lambda = 1,64 \text{ \AA}$ stanowi przekonujący dowód realności fal materii.

Fale materii – obserwacje



(a)



(b)

Obserwacja dyfrakcji na kryształach za pomocą:

a) wiązki promieni rentgenowskich (lampa Cu linia $K\alpha$)

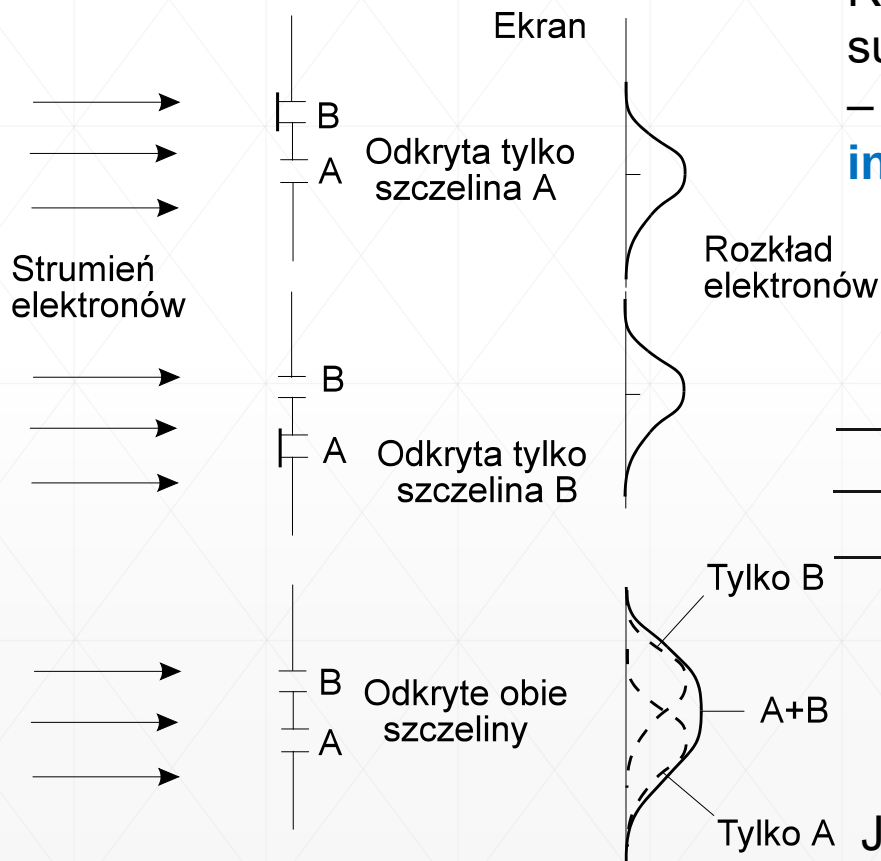
[„Fizyka dla szkół wyższych – tom 3”, www.openstax.pl]

b) wiązki elektronów.

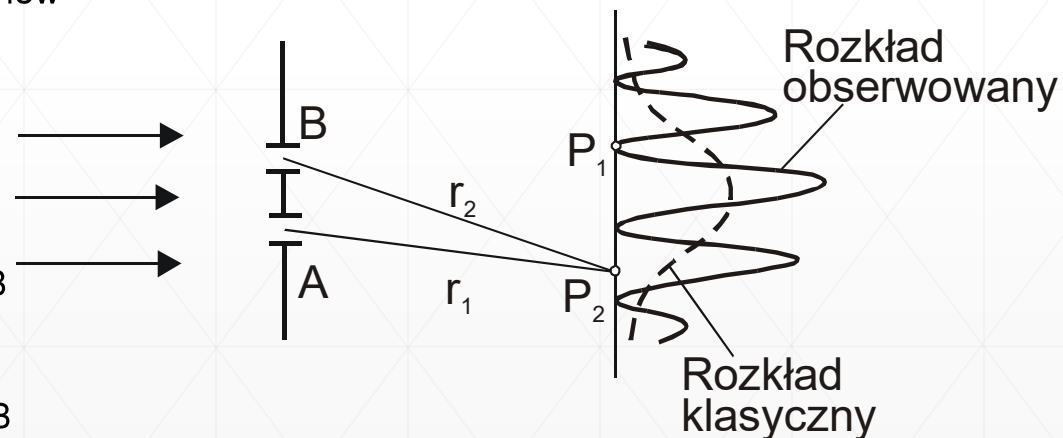
Oba obrazy odpowiadają tej samej strukturze krystalicznej. Jakość obrazu elektronowego jest lepsza. **Uwaga – to jest dyfrakcja zatem potwierdzenie natury falowej ZJAWISKA zwłaszcza elektronu!!!!**

Doświadczenie Younga ze strumieniem elektronów

Kierujemy strumień elektronów w stronę ekranu z dwoma szczelinami

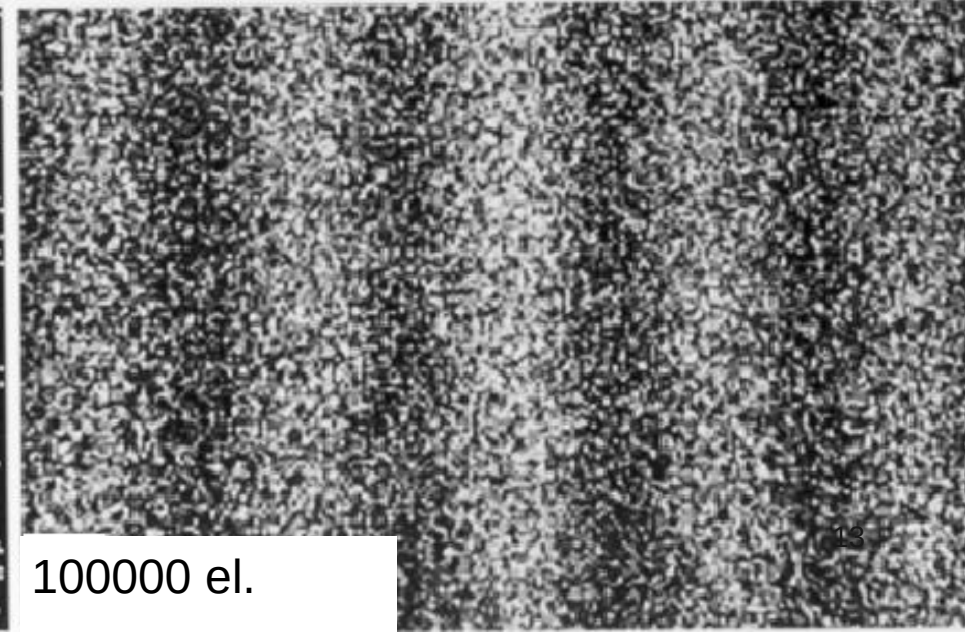
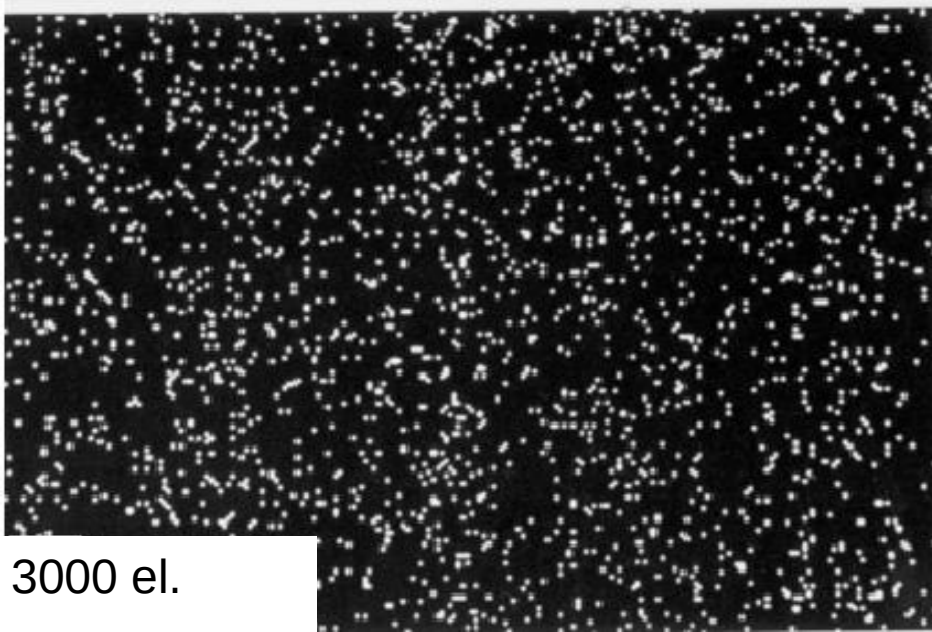
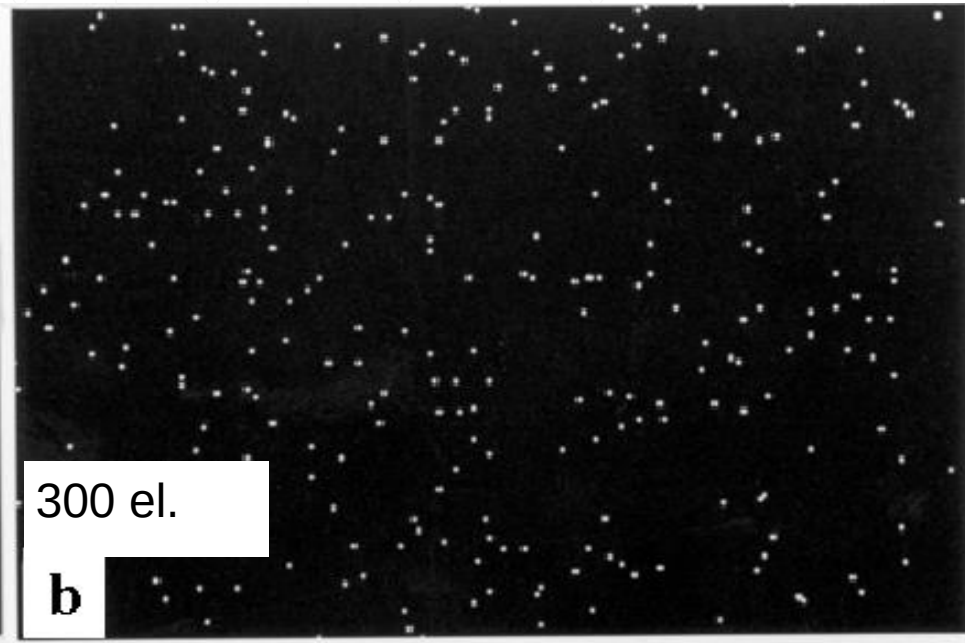


Rozkład elektronów na ekranie powinien być sumą rozkładów dla każdej szczeliny oddzielnie – natomiast obserwujemy **obraz interferencyjny** dla dwóch szczelin



Jeżeli elektrony będą wystrzeliwane w stronę ekranu z dwoma szczelinami pojedynczo to wynik eksperymentu się nie zmieni.

Interferencja pojedynczych elektronów



Mechanika kwantowa

Teoria opisująca prawa ruchu obiektów mikroskopowych, o bardzo małych masach i rozmiarach (atom, cząstki elementarne) oraz nietypowe zjawiska makroskopowe (np. nadprzewodnictwo).

Granicą MK dla średnich rozmiarów, energii czy pędów jest mechanika klasyczna.

Mechanika kwantowa jest jednak znacznie bardziej złożona matematycznie i pojęciowo:

- w świecie mikroskopowym wiele wielkości jest **skwantowanych**, tzn. występuje w całkowitych wielokrotnościach pewnych minimalnych porcji zwanych **kwantami**.
- E. Schrödinger (1923) – równanie falowe materii

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U\Psi$$

- M. Born (1926) – probabilistyczna interpretacja fali materii,

$$PdV = |\Psi|^2 dx dy dz \quad \text{gdzie} \quad |\Psi|^2 = \Psi \cdot \Psi^*$$

- W. Heisenberg (1927) – zasada nieoznaczoności

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2},$$

- **Zasada przyczynowości** - stan początkowy ruchu punktu materialnego określa jedynie prawdopodobieństwo położenia w chwilach późniejszych.

Dualizm korpuskularno - falowy

Elektron jako cząstka

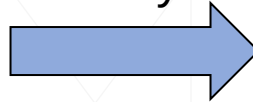
Parametry korpuskularne:

E - energia

p - pęd

Przeliczanie parametrów korpuskularnych na falowe

Wzory:



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

$$u = \frac{p}{m}$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

Elektron jako fala materii

Parametry falowe:

λ - długość fali

u - prędkość fali

ν - częstotliwość

Korpuskularno – falowe zachowanie się jest cechą promieniowania elektromagnetycznego i materii

Jak masa może być jednocześnie cząstką i falą ?

- opisy materii: klasyczny i kwantowy są uzupełniające się
- potrzeba obu tych opisów do pełnego modelu świata, ale do określenia konkretnego zjawiska wystarczy tylko jeden z tych modeli
- dlatego można mówić o dualizmie klasyczno-kwantowym świata

