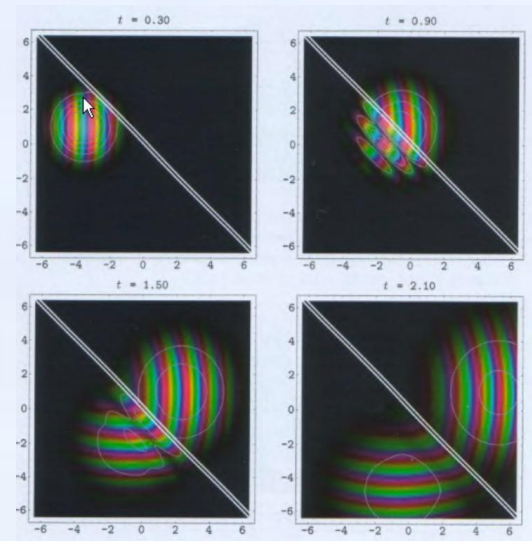
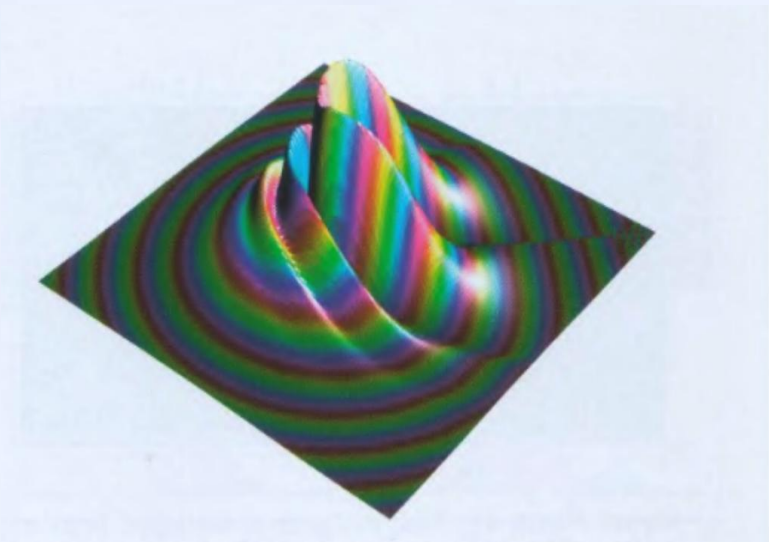


# Rewolucja w fizyce



# FIZYKA KWANTOWA

```
graph TD; A[FIZYKA KWANTOWA] --> B[Stara Teoria Kwantów (1900 - 1920)]; A --> C[Nowa Teoria Kwantów (1924 - 1928)]; A --> D[Relatywistyczna Teoria Kwantów - Kwantowa Teoria Pola (>1925)];
```

Stara Teoria Kwantów  
(1900 - 1920)

Nowa Teoria Kwantów  
(1924 - 1928)

Relatywistyczna Teoria Kwantów  
- Kwantowa Teoria Pola  
( >1925 )

# Rewolucja kwantowa



**Louis Victor  
de Broglie**  
(1892 - 1987)



**Werner  
Heisenberg**  
(1901 - 1976)



**Erwin  
Schrödinger**  
(1887 - 1961)



**Pascual  
Jordan**  
(1902 - 1980)



**Max  
Born**  
(1882 - 1970)



**Wolfgang  
Pauli**  
(1900 - 1958)



**Paul Adrien  
Dirac**  
(1902 - 1984)



**Niels Hendrik  
Bohr**  
(1885 - 1962)



Z A. Wróblewskiego



# **Fizyka klasyczna**

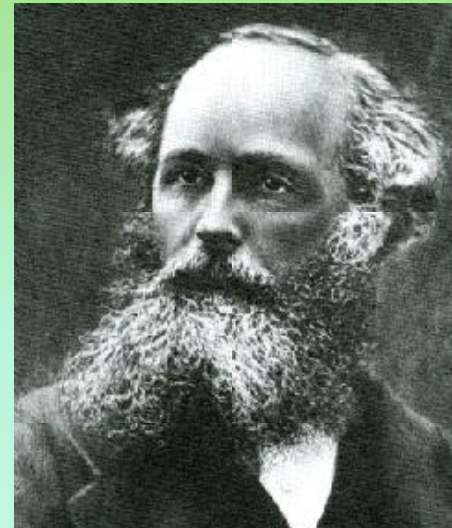
- Mechanika klasyczna – prawa Newtona
- Elektrodynamika – prawa Maxwella
- Fizyka statystyczna
- Hydrtodynamika
- Astronomia

# Zaczniemy historię od optyki

W połowie XIX wieku Maxwell wprowadził pojęcie fal elektromagnetycznych

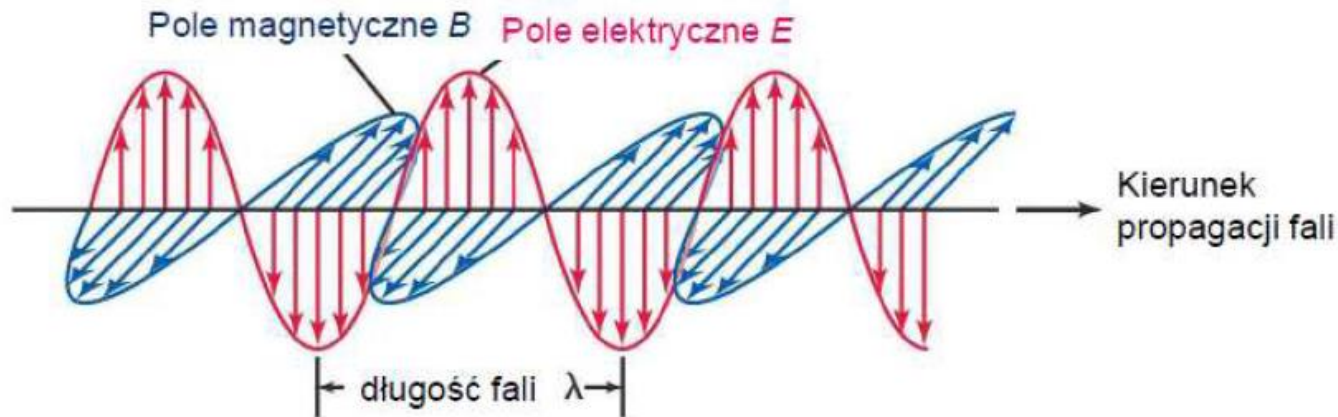
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

# Światło: promieniowanie elektromagnetyczne



Światło ma naturę promieniowania elektromagnetycznego

- ❑ 1860 - James Clerk Maxwell opisał podstawowe własności elektryczności i magnetyzmu w postaci czterech równań: równania Maxwella elektromagnetyzmu
- ❑ Maxwell pokazał, że pole elektryczne i magnetyczne porusza się w przestrzeni w kierunku  $\vec{c} \parallel \vec{E} \times \vec{B}$  z prędkością  $c$  (w próżni)



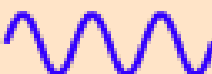

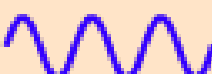
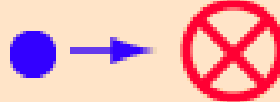
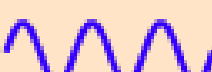
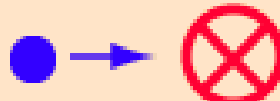

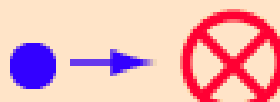


Związek częstości i długości fali promieniowania elektromagnetycznego :

$$c = \lambda \nu$$

$c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s – prędkość światła

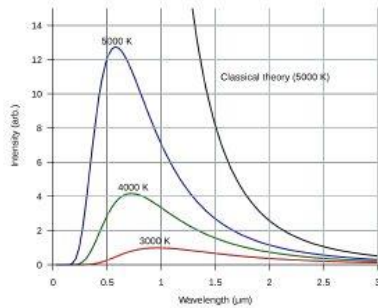
$\lambda$  : długość fali

$\nu$  : częstość

Phenomenon	Can be explained in terms of waves.	Can be explained in terms of particles.
<u>Reflection</u>	 ✓	 ✓
<u>Refraction</u>	 ✓	 ✓
<u>Interference</u>	 ✓	 ✗
<u>Diffraction</u>	 ✓	 ✗
<u>Polarization</u>	 ✓	 ✗
<u>Photoelectric effect</u>	 ✗	 ✓

# FALE JAKO CZĄSTKI

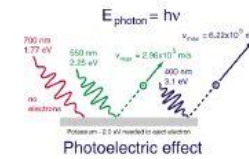
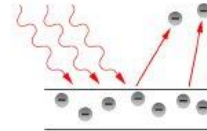
## Promieniowanie ciała doskonale czarnego



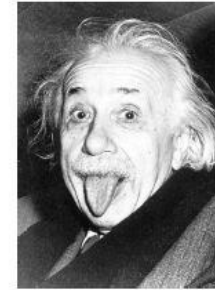
Teoria zgadza się z eksperymentem, jeśli założyc, że promieniowanie elektromagnetyczne jest emitowane kwantami

$$E = h\nu \quad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

## Efekt fotoelektryczny

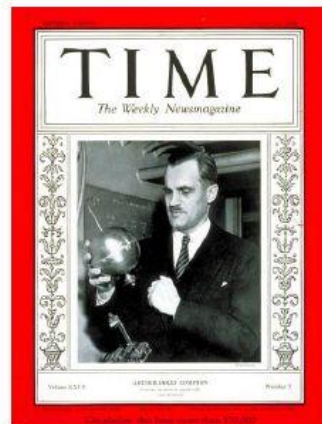
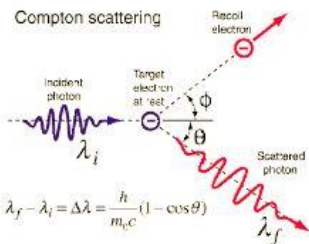


W myśl klasycznej teorii energia elektronu powinna zależeć od natężenia promieniowania

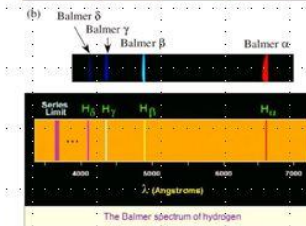
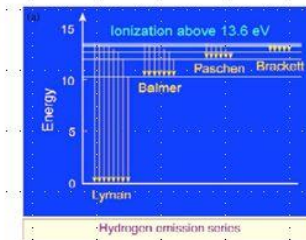
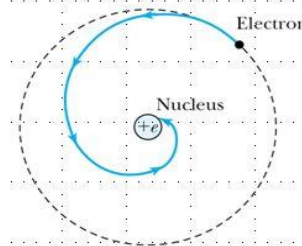


$$E = h\nu - W$$

## Efekt Comptona

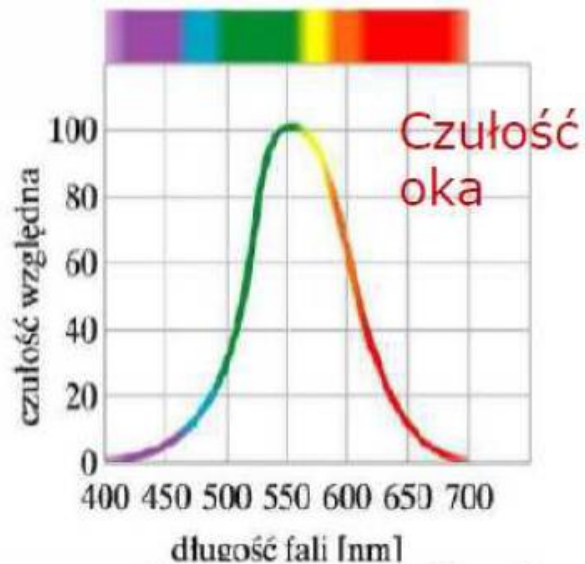


## Promieniowanie atomów

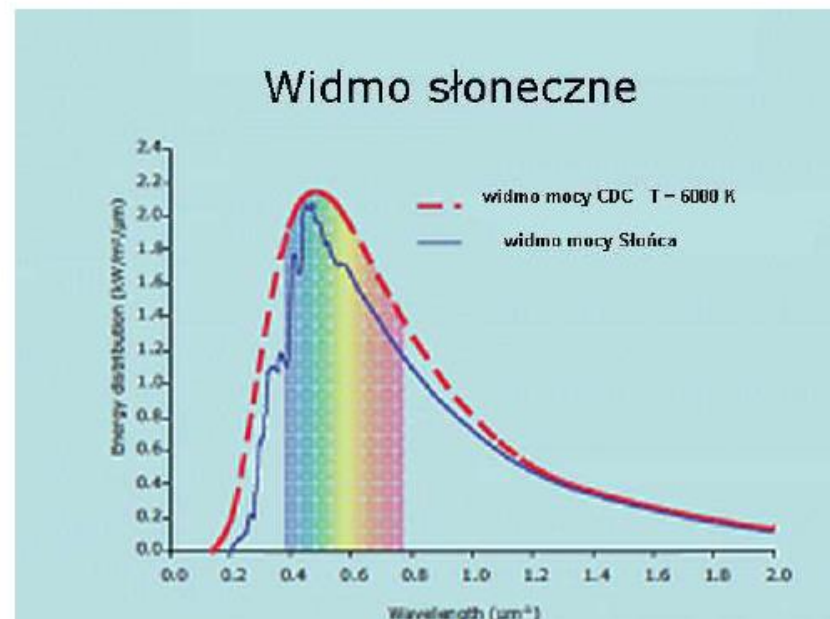
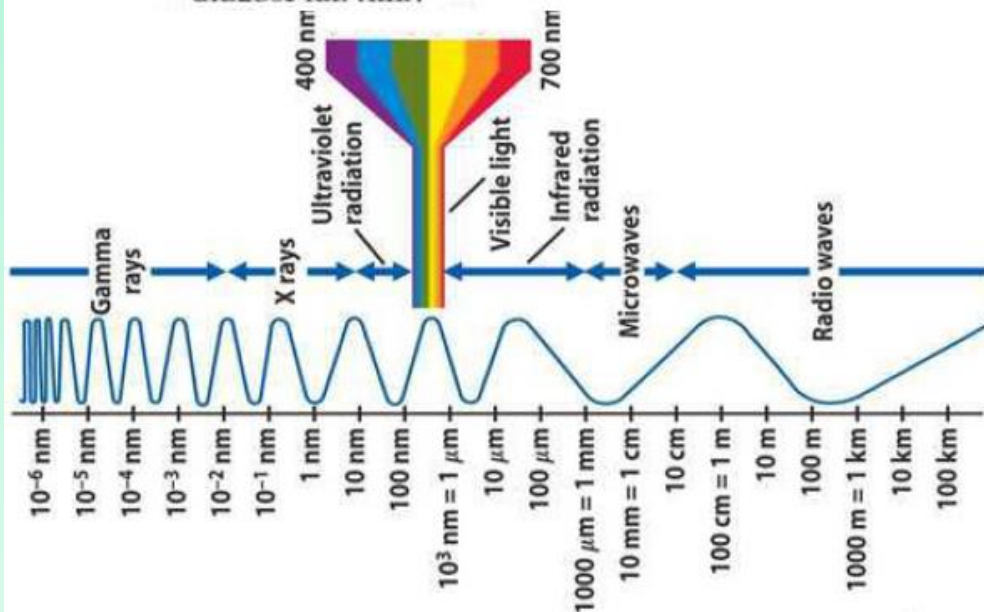




# Promieniowanie elektromagnetyczne



- Zakres widzialny od 400 do 700 nm
- Zakresy (od fal najdłuższych):
  - Fale radiowe: 1 m
  - Mikrofałe: 1 mm
  - Podczerwień: 1  $\mu\text{m}$
  - Widzialne: 500 nm
  - Ultrafiolet: 100 nm
  - Promieniowanie X: 1 nm
  - Promieniowanie gamma:  $10^{-3}$  nm

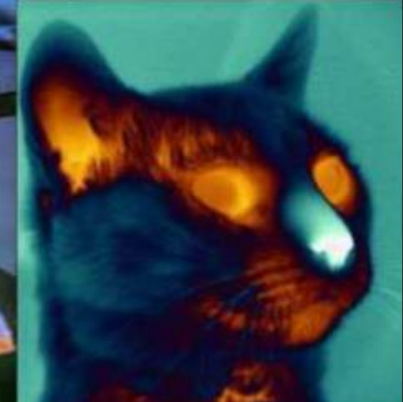
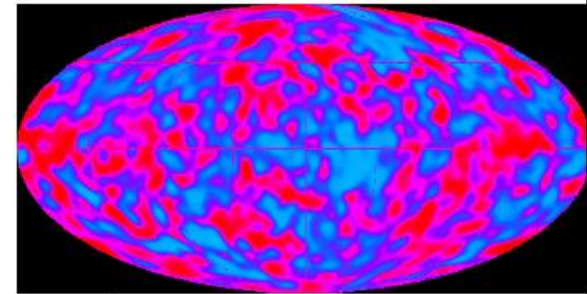


# Promieniowanie termiczne

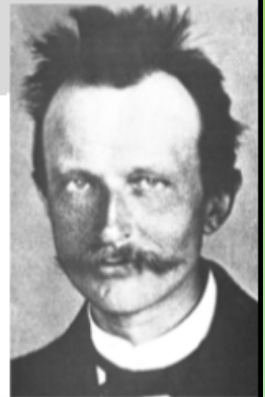
Gęste ciała rozgrzane emitują promieniowanie !

Promieniowanie termiczne to najbardziej powszechna forma emisji promieniowania :

- $T > 0K$
  - dotyczy materii gęstej
- ❖ Promieniowanie termiczne jest promieniowaniem równowagowym
  - ❖ Po upływie dostatecznie długiego czasu ustala się stan równowagi pomiędzy pochłanianiem a emisją
  - ❖ Zaburzenie równowagi pomiędzy absorpcją a emisją prowadzi do wzrostu lub obniżenia temperatury



# Prawo Plancka



Max Planck  
1858 - 1947

Widmo promieniowania Ciała Doskonale Czarnego :

pamiętamy, że :

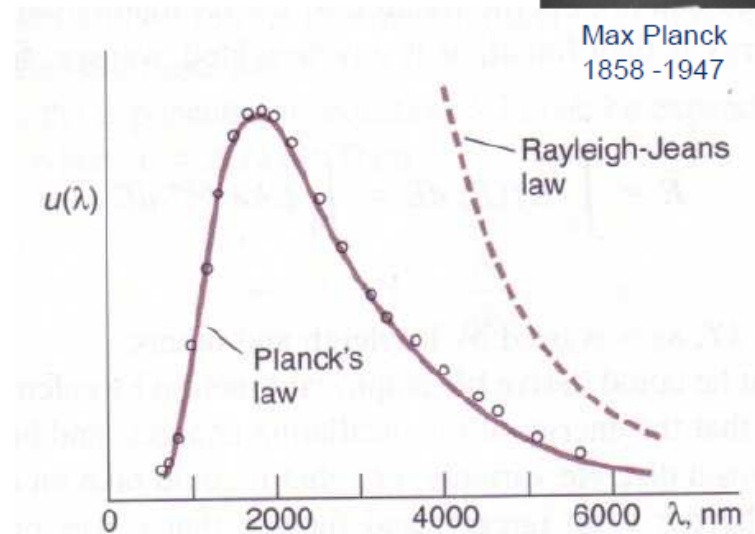
$$R(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle E \rangle$$

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \langle E \rangle$$

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$$R(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

To jest  
prawo Plancka



$h\nu \gg kT$  – asymptotyczny wykładniczy zanik intensywności

$h\nu \ll kT$  – relacja Rayleigha-Jeansa, ponieważ

$$\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \approx \frac{h\nu}{kT} \quad \text{czyli:} \quad R(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

W warunkach równowagi termicznej strata energii związana z promieniowaniem jest skompensowana energią zaabsorbowaną

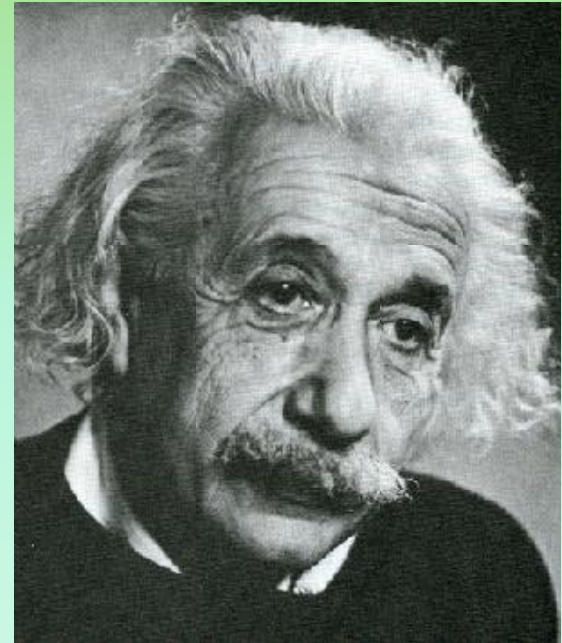
# In 1905, Einstein had a very good year.

In 1905, Einstein explained Brownian motion and the photoelectric effect (for which he later won the Nobel prize).

Einstein also explained Michelson's and Morley's experiment: he realized that light didn't need a medium and was a property of free space.

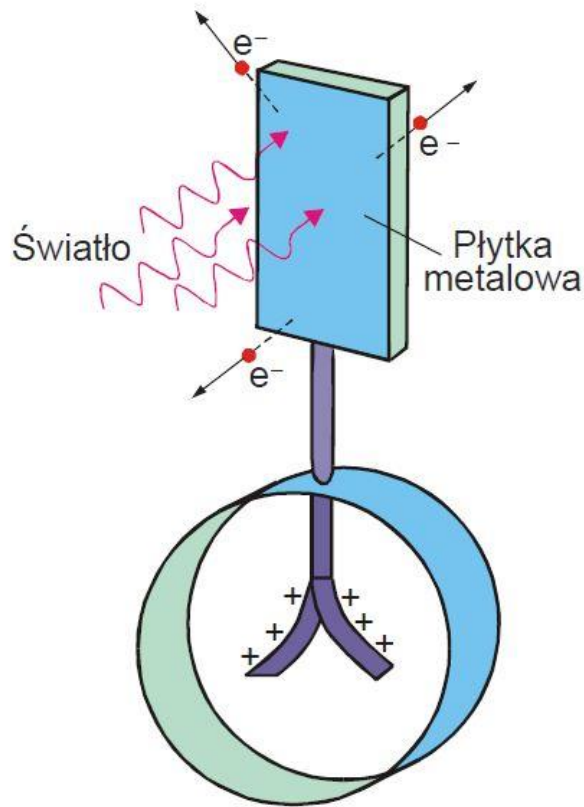
And it traveled at the same velocity no matter what speed you were going. This is **Special Relativity**.

Oh, and he graduated from grad school that year, too.



Albert Einstein (1879-1955)

## Fotoefekt



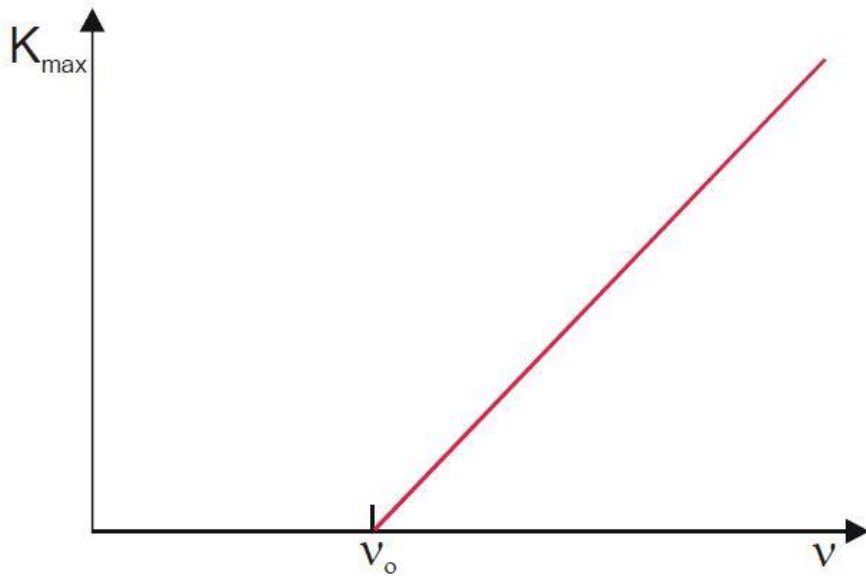
**Rys. 10.3.** Neutralny elektroskop połączony z płytką metalową. Przy oświetleniu płytki przez światło wybijane są fotoelektrony i listki elektroskopu ładowane są dodatnio.

W końcu XIX w. odkryto elektron a następnie zauważono, że elektrony uciekają z niektórych powierzchni metalicznych, kiedy na powierzchnię pada światło (rys. 10.3). Można było tego oczekiwać.

Amplituda drgań swobodnego elektronu w zmiennym polu elektrycznym padającej fali  $E = E_0 \cos \omega t$  zapiszemy w postaci  $A = eE_0/m\omega^2$  [wyrażenie (9.15)]. W związku z tym elektron znajdujący się w pobliżu powierzchni opuści metal gdy amplituda  $A$  przekroczy pewną krytyczną wartość.

Z falowej teorii światła wynika:

- elektron nie opuści metalu dopóki  $E_0$  nie przekroczy określonej wartości krytycznej,
- energia emitowanych elektronów wzrasta proporcjonalnie do  $E_0^2$ ,
- jeżeli wielkość  $E_0$  (a także natężenie) zachować stałą a częstotliwość światła zwiększać, to liczba emitowanych elektronów powinna zmniejszyć się.



Rys. 10.4. Zależność maksymalnej energii kinetycznej elektronów wybitych z metalu od częstotliwości światła.

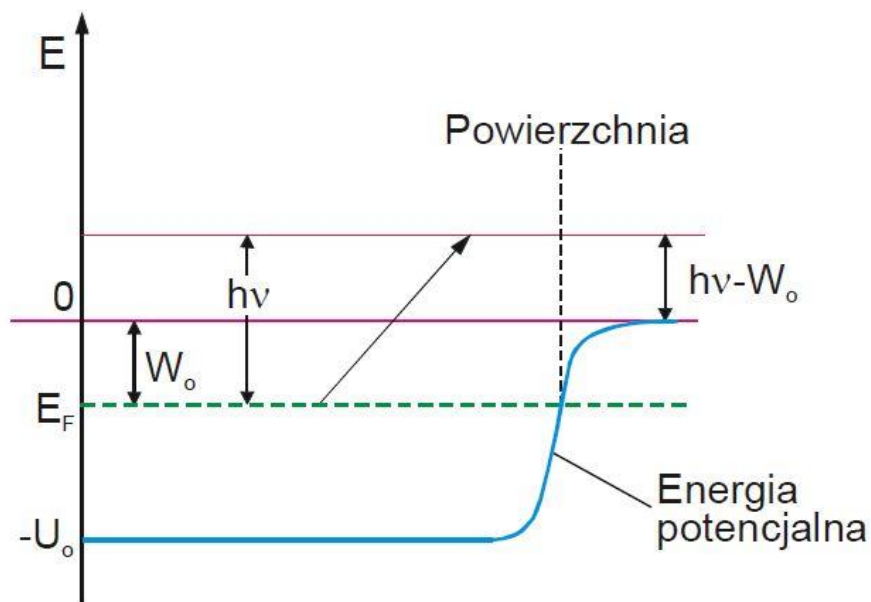
Wyniki eksperymentalne obaliły powyższe przewidywania:

- progowego natężenia nie zaobserwowano, liczba uciekających elektronów okazała się ściśle proporcjonalna do  $E_o^2$  przy dowolnie małej intensywności padającego promieniowania,
- energia elektronów okazała się niezależna od wielkości  $E_o$ ,

Zauważono zależność energii elektronów od częstotliwości; okazało się, że **istnieje progowa częstotliwość  $\nu_o$ , powyżej której energia emitowanych elektronów rośnie liniowo ze wzrostem częstotliwości** – faktycznie energia kinetyczna elektronów zmienia się w przedziale od zera do maksymalnej wartości  $K_{max}$ .

W 1905 r. A. Einstein zaproponował, że:

- **światło stanowi zbiór kwantów z których każdy posiada energię  $h\nu$ ,**
- **kwanty światła (fotony) zachowują się podobnie do cząstek materialnych** (przy zderzeniu foton może być pochłonięty, a cała jego energia przekazana jest elektronowi).



**Rys. 10.5. Jama potencjału w której znajdują się elektrony metalu. Elektron o energii  $E_F$  pochłania foton i przechodzi na wyższy poziom energetyczny.**

Teoria Einsteina wyjaśnia fakty eksperymentalne. Maksymalna energia kinetyczna elektronu opuszczającego metal wynosi

$$K_{max} = h\nu - W_o \quad (10.10)$$

Nachylenie prostej (rys. 10.4) jest określone stałą Plancka  $h$ .

Wielkość  $W_o$  nazywana jest pracą wyjścia i zależy od rodzaju metalu.

Elektron w metalu znajduje się w studni potencjału o głębokości  $U_o$ . Wewnątrz metalu elektrony walencyjne atomu są swobodne (tj. nie są związane z określonymi atomami), a ich energia kinetyczna może się zmieniać od zera do  $E_F$ , zwaną energią Fermiego.

Elektron opuści metal, jego energia staje się równa  $K = 0$ . Z rys. 10.5 widzimy, że

$$W_o + E_F = U_o, \quad \text{czyli} \quad W_o = U_o - E_F.$$

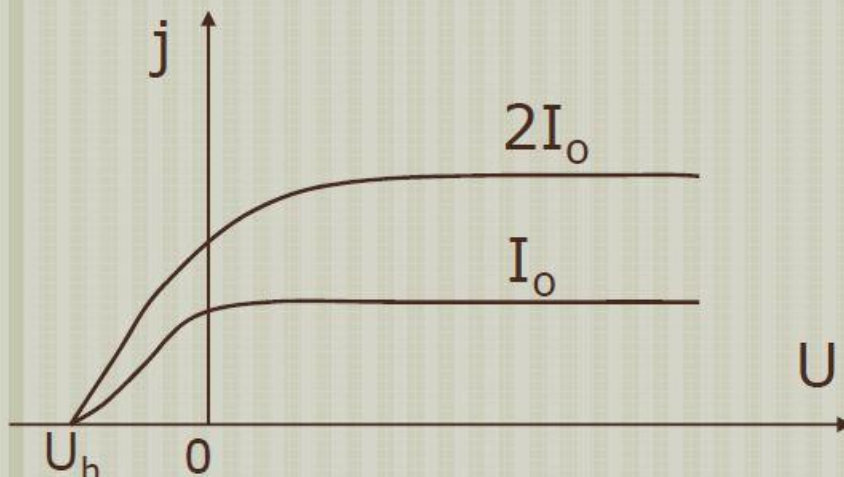
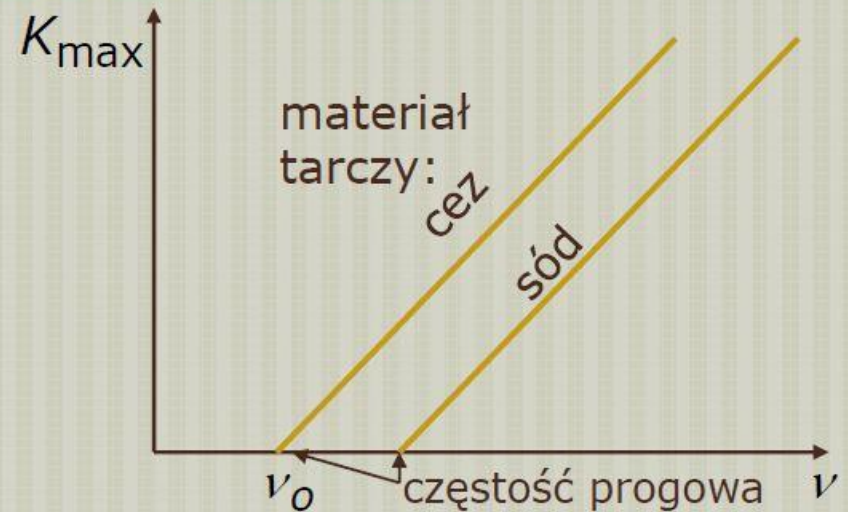
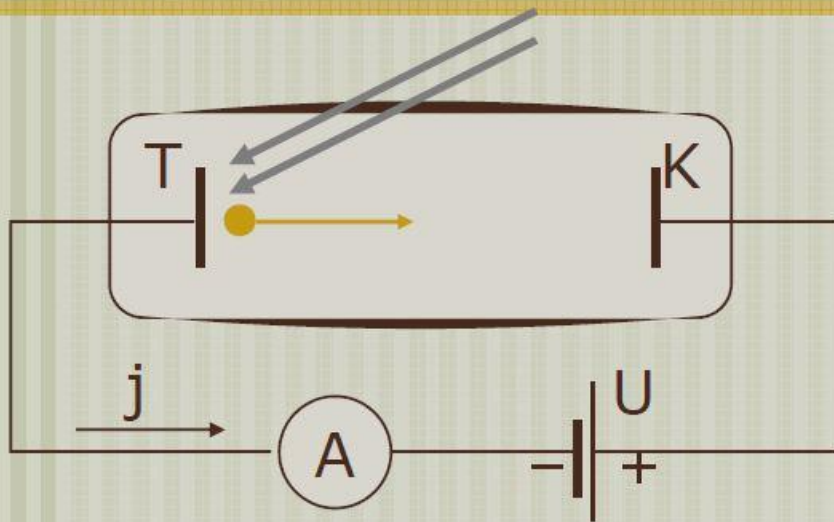
Maksymalna energia elektronu na zewnątrz metalu

$$K_{max} = h\nu - W_o.$$

# Doświadczenia fotoelektryczne

$$K_{\max} = h\nu - W_0$$

$$h\nu_0 = W_0$$

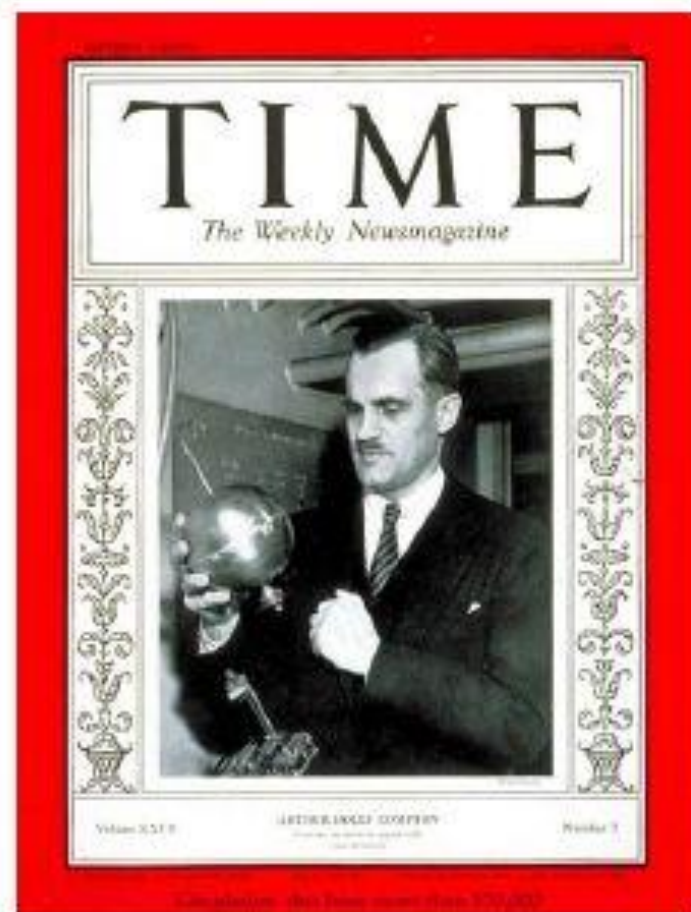
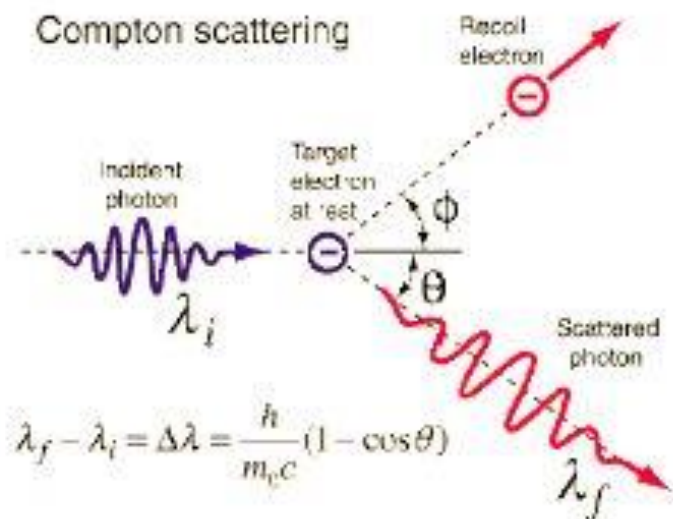


liczba emitowanych elektronów (prąd  $j$ ) rośnie ze wzrostem natężenia światła  $I_0$

maksymalna energia elektronów  $K_{\max} = U_h$  nie zależy od natężenia światła  $I_0$ , rośnie ze wzrostem częstotliwości  $\nu$

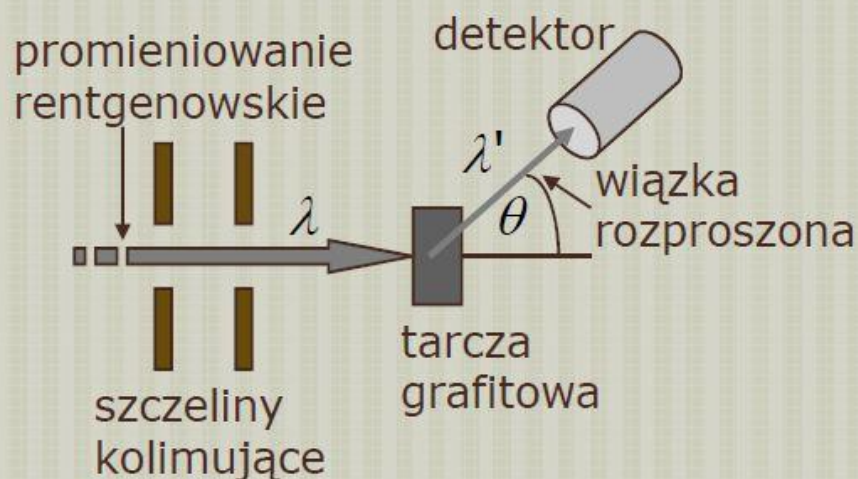


# Efekt Comptona



# Efekt Comptona

Rozpraszanie fotonów na swobodnych elektronach: wiązka promieniowania rentgenowskiego o długości fali  $\lambda$  rozpraszana przez grafitową tarczę zmieniała swą długość w zależności od kąta rozpraszania  $\theta$  (położenia detektora). W klasycznym podejściu częstość, a więc i długość wiązki rozproszonej powinna być taka sama jak padającej.



# Zderzenie fotonu z elektronem

Foton oprócz energii  $E=h\nu$  posiada również pęd

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad E = pc$$

z prawa zachowania energii i pędu przed i po zderzeniu ( $m$  – masa spoczynkowa) energia spoczynkowa i całkowita elektronu

$$pc + mc^2 = p'c + E'_e \quad (p - p' + mc)^2 = (E'_e / c)^2$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}'_e \quad \vec{p} - \vec{p}' = \vec{p}'_e \quad p^2 - 2\vec{p}\vec{p}' + p'^2 = p'^2_e \quad [-]$$

$$m^2c^2 - 2pp' + 2pmc - 2p'mc + 2pp'\cos\theta = \frac{E'^2_e}{c^2} - p'^2_e$$

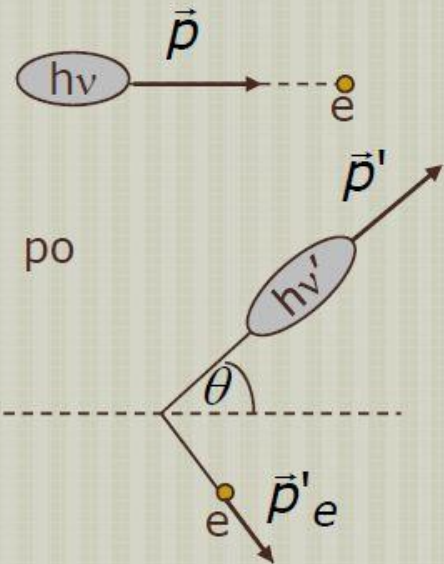
$$E_0^2 = m^2c^4 = E_e'^2 - p^2c^2$$

$$m^2c^2 - 2p'(p + mc - p\cos\theta) + 2pmc = m^2c^2$$

$$p' = \frac{p}{1 + \frac{p}{mc}(1 - \cos\theta)}$$

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

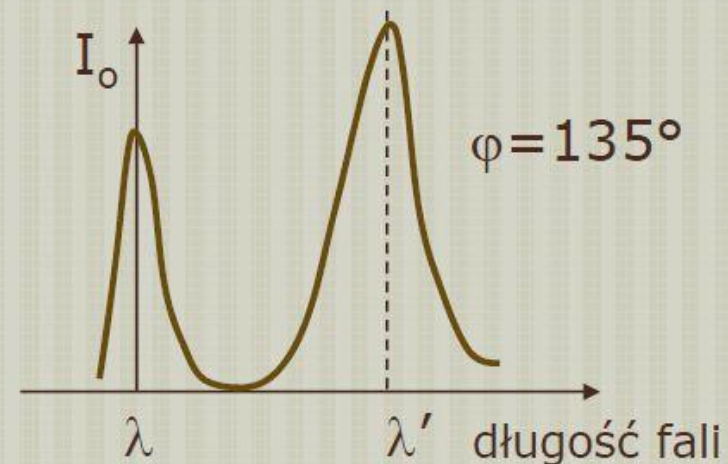
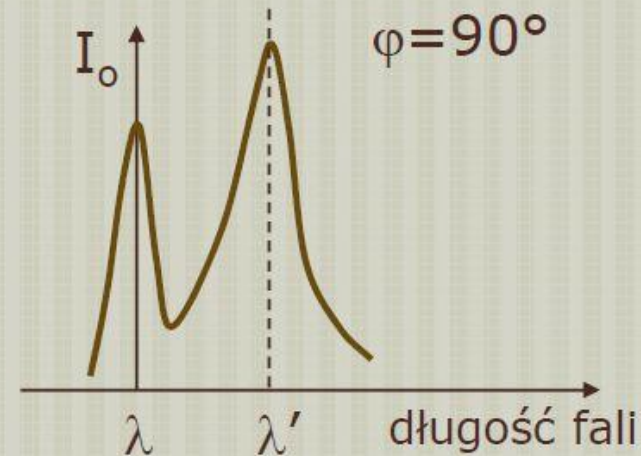
przed zderzeniem



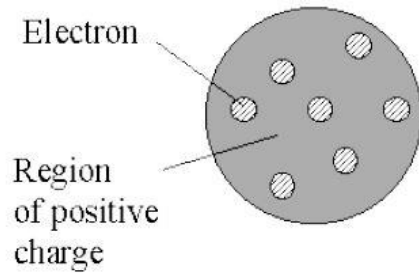
# Wyniki doświadczenia Comptona

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

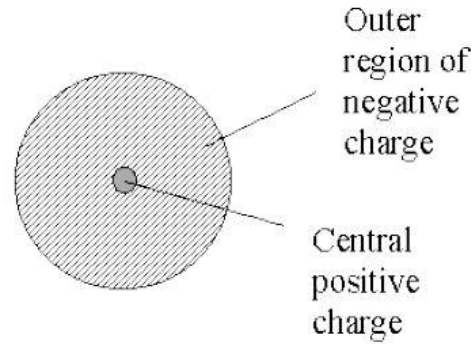
- przesunięcie comptonowskie  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  zwiększa się wraz ze wzrostem kąta rozpraszania
- obecność wiązki o nie zmienionej długości fali wynika z rozproszenia na elektronach związanych
- im większa masa cząstki tym mniejsze przesunięcie  $\Delta\lambda$
  
- efekt Comptona potwierdza korpuskularny charakter światła – fotony obdarzone energią i pędem



# Wczesne modele struktury atomów



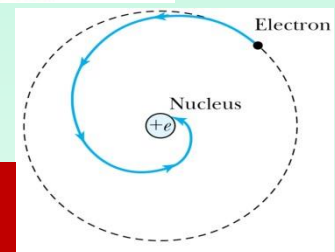
J.J. Thomson  
"plum pudding"  
atomic model



Rutherford  
atomic model



W planetarnym modelu, elektron powinien wypromieniowywać energię i poruszając się po spirali spaść na jądro



**Promieniowanie  
atomów**

# Model atomu Bohra

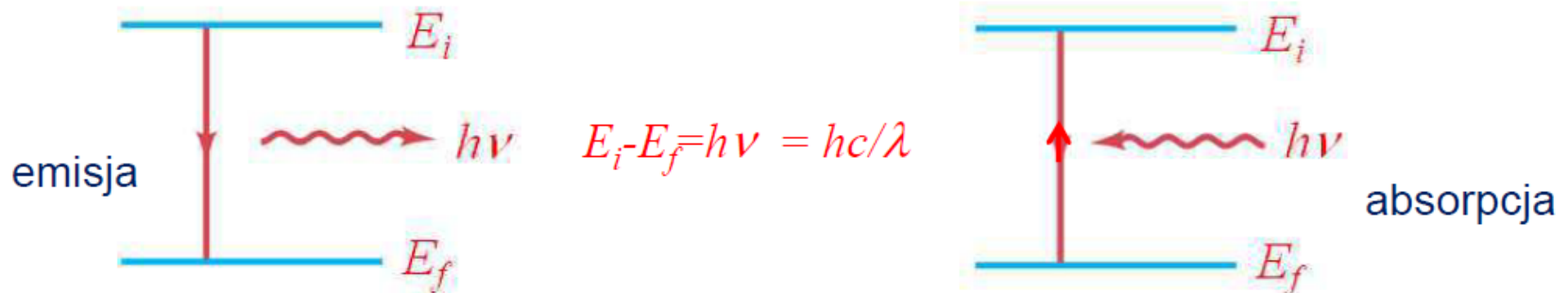
- dozwolone orbity, dla których moment pędu jest wielokrotnością stałej Plancka  
 $mvr = n\hbar$
- zreprodukowane widmo atomu wodoru
- zupełne fiasko dla atomu helu
- bardziej wyszukane reguły kwantyzacji (Sommerfeld - *stara teoria kwantów*)
- Bohr jako ojciec założyciel mechaniki kwantowej



# Atomowe linie widmowe i poziomy energii

## Fundamenty hipotezy Bohra :

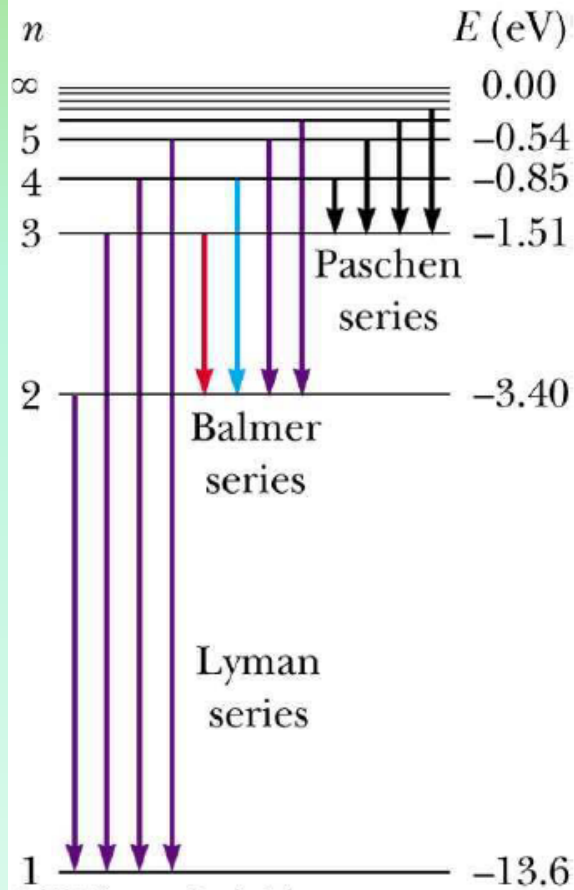
- Foton zachowuje się jak cząstka (korpuskularna natura światła)
- Atom może istnieć tylko w określonych stanach energii (poziomy energii)
- Izolowane atomy danego pierwiastka mają identyczne dozwolone poziomy energii
- Izolowane atomy różnych pierwiastków mają różne dozwolone poziomy energii
- Najniższy poziom energii nazywamy stanem podstawowym; wyższe poziomy energii nazywamy stanami wzbudzonymi
- Emisja fotonu następuje gdy atom przechodzi ze stanu o wyższej energii do stanu o energii niższej
- Energia fotonu jest równa różnicy energii stanu początkowego i stanu końcowego atomu



# Widmo emisyjne atomu wodoru - parametryzacja

## Doświadczenie:

zależność między długościami fal odpowiadającym i prążkom w widmie atomu wodoru można opisać :



Rydberg & Ritz (1890)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \begin{array}{l} R_H := \text{stała Rydberga} \\ R_H = 1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \end{array}$$

$$\nu = c \cdot R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (\text{gdzie } n_i > n_f)$$

Poziomy energii atomu wodoru :

$$E_n = -\frac{h \cdot c \cdot R_H}{n^2}$$

Serie widmowe:

Seria Lymana :  $n_f = 1, n_i = 2, 3, 4, 5, \dots$

Seria Balmera :  $n_f = 2, n_i = 3, 4, 5, \dots$

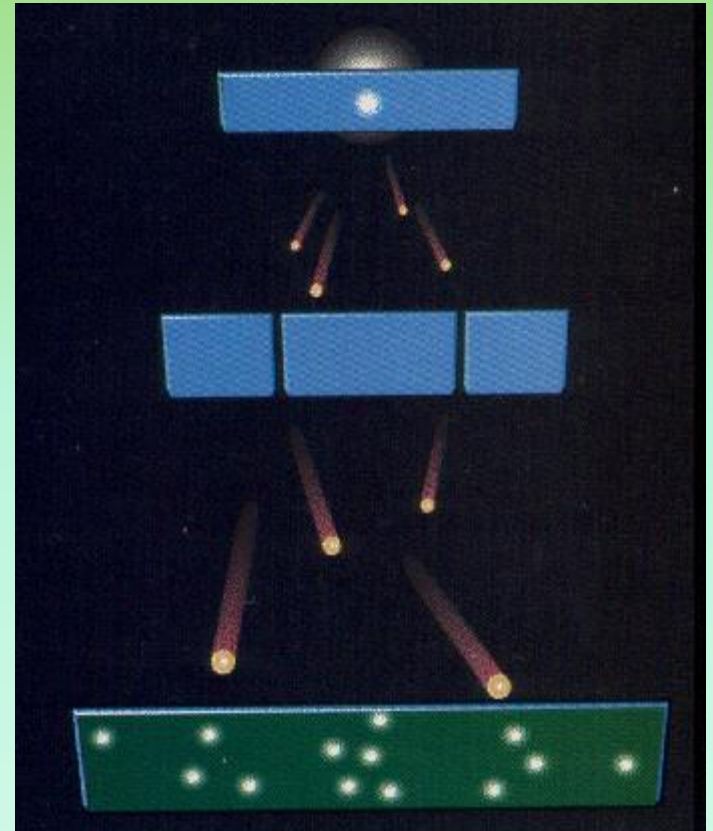
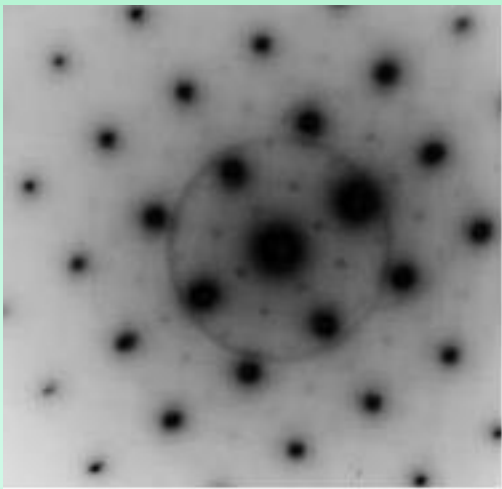
Seria Paschena :  $n_f = 3, n_i = 4, 5, 6, \dots$

- ✓ Najniższy stan energetyczny  $n=1$  : stan podstawowy  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$
- ✓ Pierwszy stan wzbudzony  $n=2$  :  $E_2 = -3.40 \text{ eV}$
- ✓ Energia jonizacji := energia konieczna do oderwania elektronu od atomu; dla atomu wodoru energia jonizacji równa  $E_\infty = 13.6 \text{ eV}$



# CZĄSTKI JAKO FALE

$$p = mv = h/\lambda = \hbar k$$



The figure shows a diffraction pattern of electron beams. Electron beams are diffracted by a crystal of manganese-nickel alloy. In this case, the de Broglie wavelength is  $< 0.01 \text{ \AA}$  which corresponds to a very high speed electron beam.

# Fale materii



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

Długość fali dla piłki zaserwowanej przez Federera: rzędu  $10^{-34}\text{m}$



dyfrakcja elektronów na kryształach

# Falowe właściwości materii

Promień świetlny jest falą, ale energię i pęd przekazuje materii w postaci fotonów. Dlaczego innych cząstek np. elektronów nie traktować jako fal materii ?

W 1924 r. Louis de Broglie przypisał elektronom o pędzie  $p$  długość fali  $\lambda$

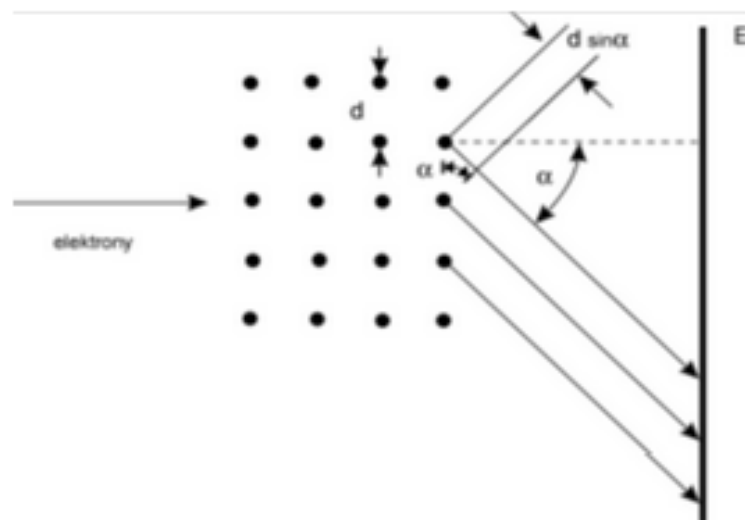
$$\lambda = \frac{h}{p} \quad - \text{długość fali de Broglie'a}$$

dla pyłku unoszonego  
przez wiatr

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{0,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}} = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ m}$$

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

1927 doświadczenia Clintona Davissona (1881–1958) i Lestera Germera (1896–1971) potwierdziły hipotezę de Broglie'a: elektrony, podobnie jak fale elektromagnetyczne, ulegają dyfrakcji i interferencji, a więc zjawiskom typowym dla fal



Dla elektronów o  $K=1000\text{eV}$   $\lambda=4\times 10^{-11}\text{ m}$

# Dyfrakcja elektronów $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mK}}$

Doświadczenie Davissona - Germera  
(dyfrakcja elektronów)

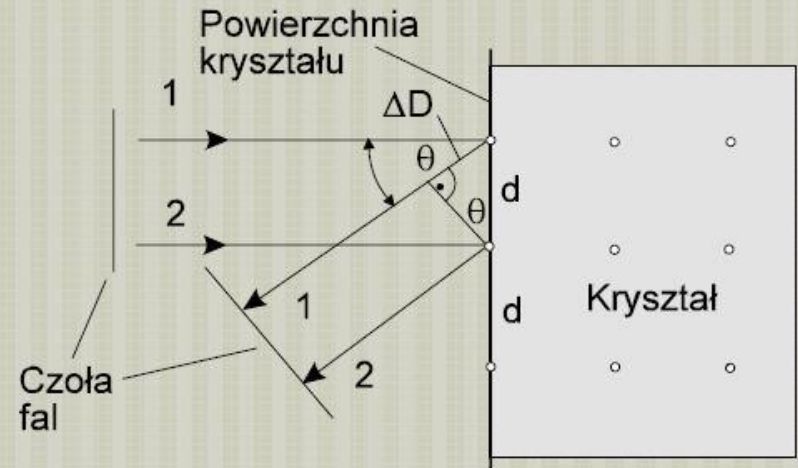
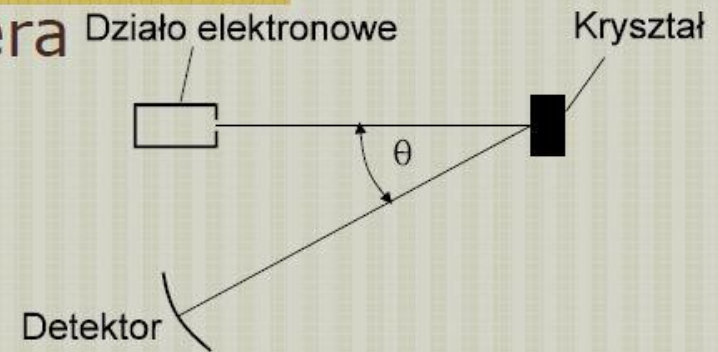
Znając kąt  $\theta$  przy którym obserwuje się pierwsze maksimum można określić stałą Plancka

$$\Delta D = d \sin \theta$$

$$\Delta D = \lambda$$

$$\frac{h}{p} = d \sin \theta$$

$$h = pd \sin \theta$$

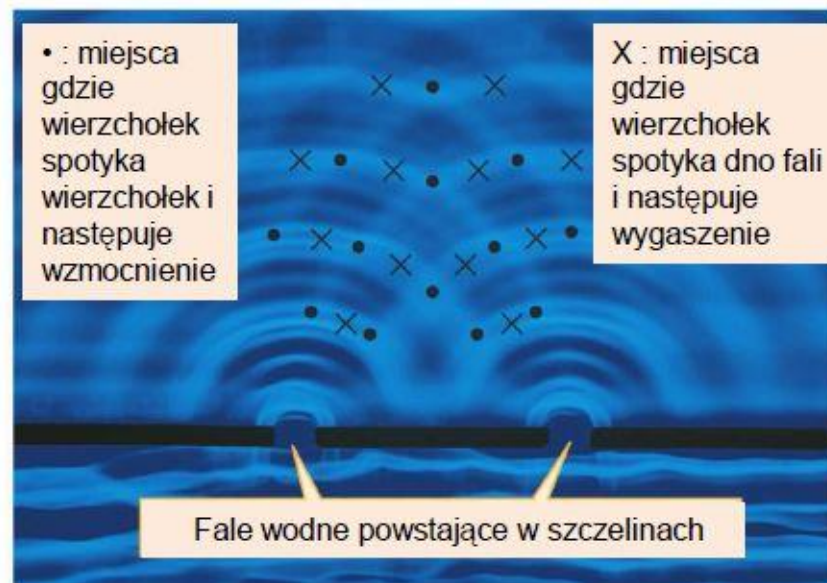


Promieniowanie i materia wykazują dwoistą falowo-korpuskularną naturę – nazywamy to **dualizmem korpuskularno-falowym**

# Światło ma własności falowe - dyfrakcja

Doświadczenie Younga – rozpraszanie światła monochromatycznego na podwójnej szczelinie wskazuje, że światło zachowuje się jak fala (1801)

Naprzemienne ciemne i jasne prążki na ekranie są analogami rozkładu maksimów fali wodnej przenikającej przez dwie szczeliny w barierze

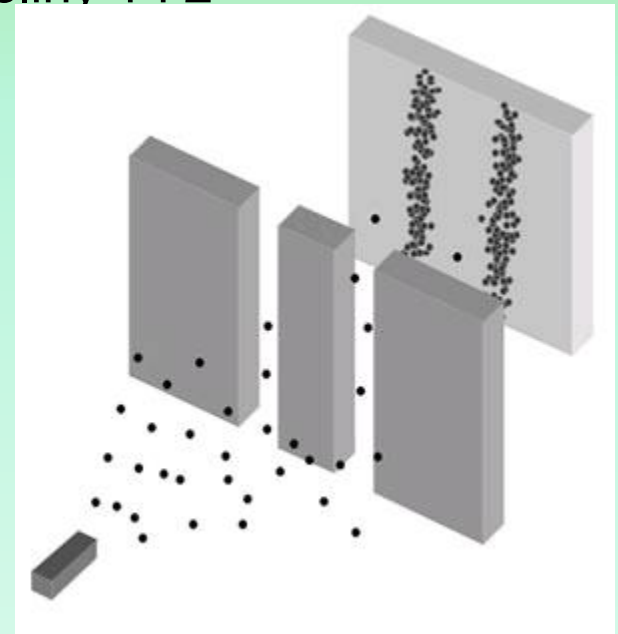


# Eksperyment z dwiema szczelinami

- „[...] nikt nie rozumie mechaniki kwantowej”.  
(Richard P. Feynman, *Charakter praw fizycznych*, s. 137)
- „Ten jeden eksperyment zawiera w sobie wszystkie tajemnice mechaniki kwantowej. Jego analiza pozwoli nam na zapoznanie się ze wszystkimi osobliwościami i paradoksami natury. Każdy inny problem z dziedziny teorii kwantów można zawsze wyjaśnić, wracając do tego doświadczenia”.  
(Richard P. Feynman, *Charakter praw fizycznych*, s. 138).

# Przejście klasycznych cząstek przez układ dwóch szczelin (brak interferencji)

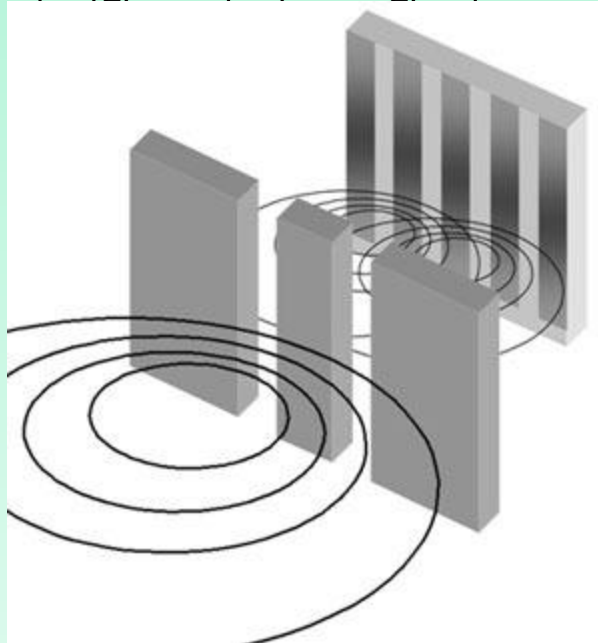
- $N_1$  – liczba cząstek przechodzących przez szczelinę 1
- $N_2$  – liczba cząstek przechodzących przez szczelinę 2
- $N_{12}$  – prawdopodobieństwo = średnia liczba cząstek trafiających w dane miejsce ekranu, gdy otwarte są szczeliny 1 i 2
- $N_{12} = N_1 + N_2$  (brak interferencji)
- Źródło grafiki:  
<http://www.blacklightpower.com/theory/DoubleSlit.shtml>





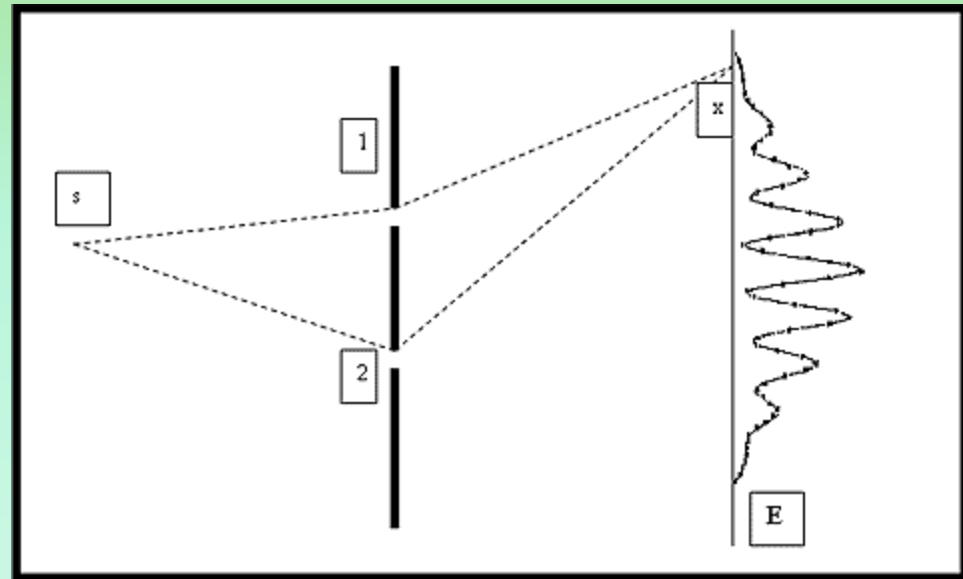
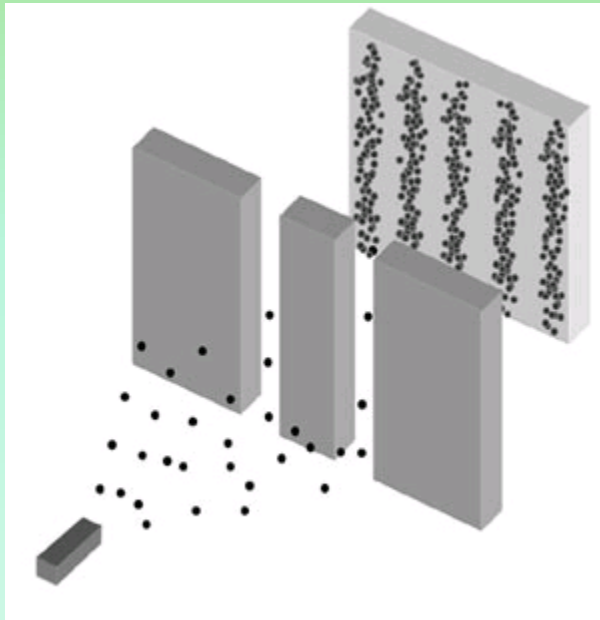
# Przejsięcie klasycznych fal przez ukłád dwóch szczelin (interferencja)

- $H_1$  – amplituda fali przechodzącej przez szczelinę 1
- $H_2$  – amplituda fali przechodzącej przez szczelinę 2
- $H_{12}$  – amplituda fali (obydwie szczeliny otwarte)
- $H_{12} = H_1 + H_2$
- Natężenie fali:  $I_{12} = (H_{12})^2 = (H_1 + H_2)^2$  (interferencja),  
 $I_1 = (H_1)^2$   
 $I_2 = (H_2)^2$



# Przejście elektronów (lub fotonów) przez układ dwóch szczelin

- Interferencja elektronów (fotonów)

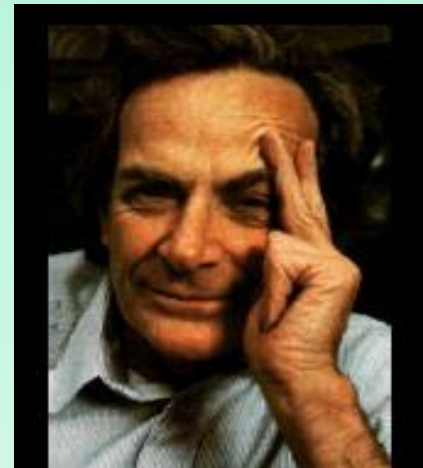


# Przejście elektronów (lub fotonów) przez układ dwóch szczelin

- Rezultaty eksperymentu:
  - Elektrony trafiają w detektor pojedynczo
  - Detektor rejestruje zawsze taką samą, dyskretną wartość (cały elektron lub nic)
  - Nigdy dwa detektory nie rejestrują jednego elektronu
- Ale!
- $N_{12} \neq N_1 + N_2$
- $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$  – prawdopodobieństwo trafienia elektronu (fotonu) w dany punkt ekranu (interferencja! – jak w przypadku fal)
- **a – amplituda prawdopodobieństwa**

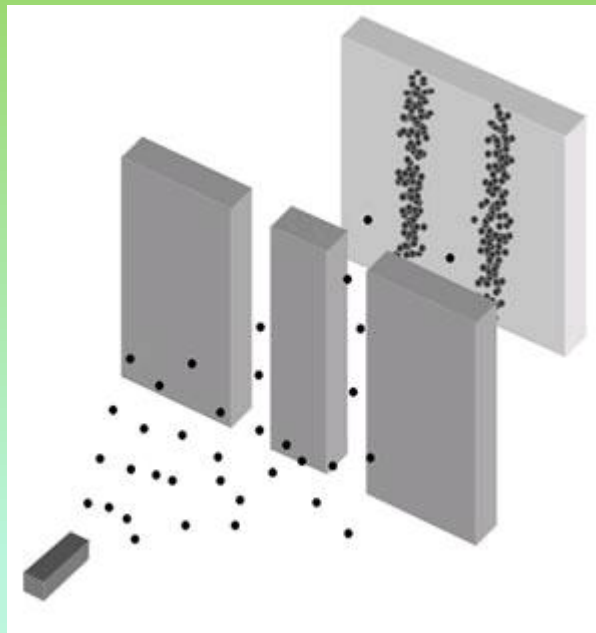
- „Podsumowując, można powiedzieć, że elektrony docierają do detektorów w całości, tak jak pociski, ale prawdopodobieństwo rejestracji elektronów jest określone takim wzorem jak natężenie fali. W tym sensie elektron zachowuje się jednocześnie jak cząstka i jak fala”.

(R. P. Feynman, *Charakter...*, s. 147)



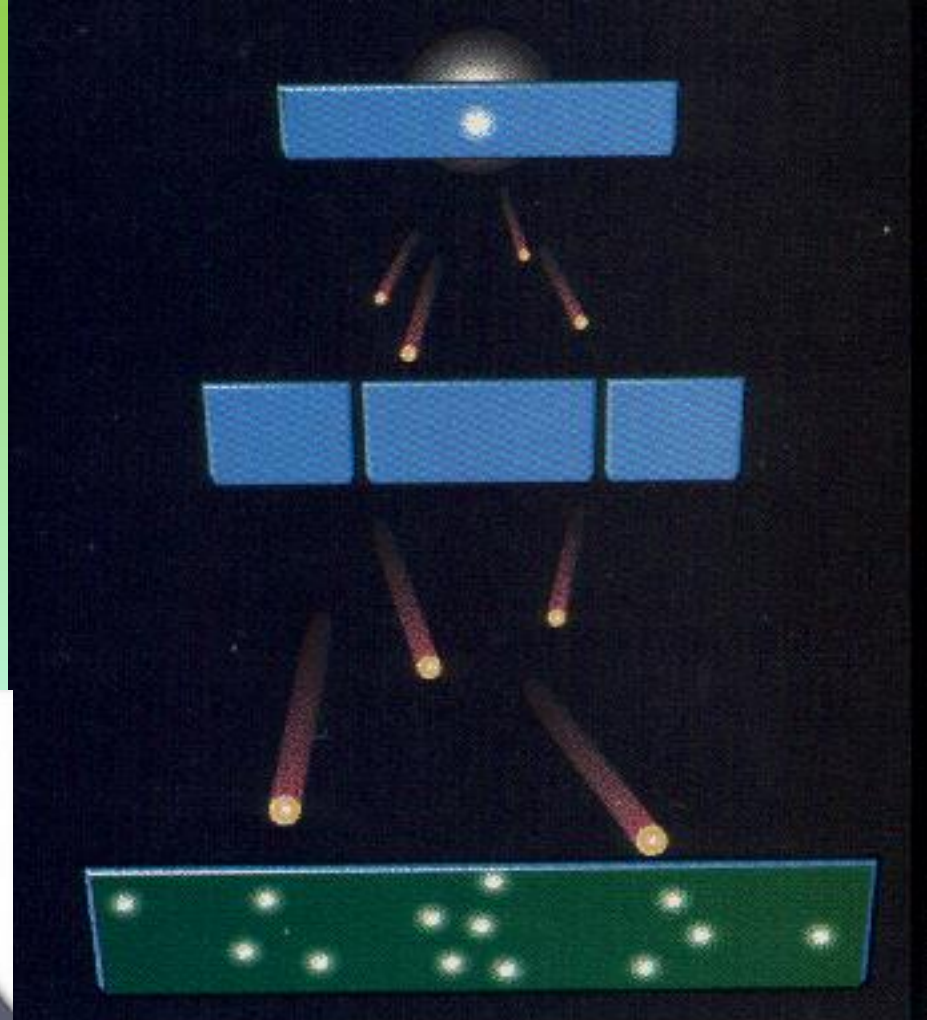
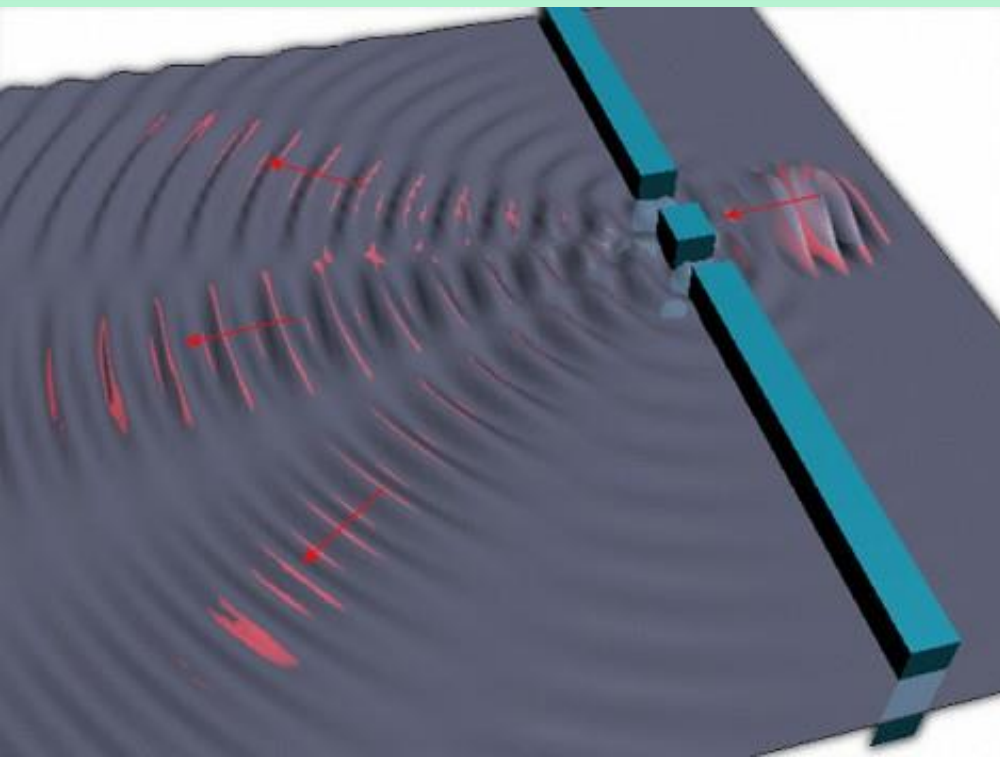
- Określenie, przez którą szczelinę przechodzi elektron

brak interferencji



- Elektrony rejestrowane są jako niepodzielne cząstki
- Twierdzenie „elektron przechodzi albo przez szczelinę 1 albo przez szczelinę 2” jest FAŁSZYWE!
- „jest rzeczą niemożliwą tak ustawić światła, aby stwierdzić, przez którą szczelinę przeleciał elektron, nie zaburzając go na tyle, że znika obraz interferencyjny” (Feynman, *Charakter*, s. 151)

# Dwie szczeliny dla fal i cząstek



# Interference experiments

## 1) Single electrons

„Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern”, A. Tonomura, ....Amer. J. Phys., 57(1989)117

## 2) Neutrons

Wave-optical experiments with very cold neutrons, R.Gähler, A.Zeilinger, Amer.J.Phys., 59(1991)316

## 3) Atoms

Young's double-slit experiments with atoms:A simple atom interferometry, O.Cornal, J.Mlynek, Phys.Rev.Lett.,66(1991)2689,

## 4) Molecules (C-70 molekuł)

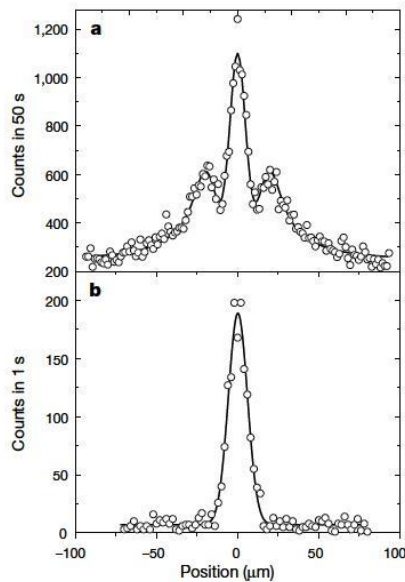
Arndt at al., Nature, 14 October 1999

# letters to nature

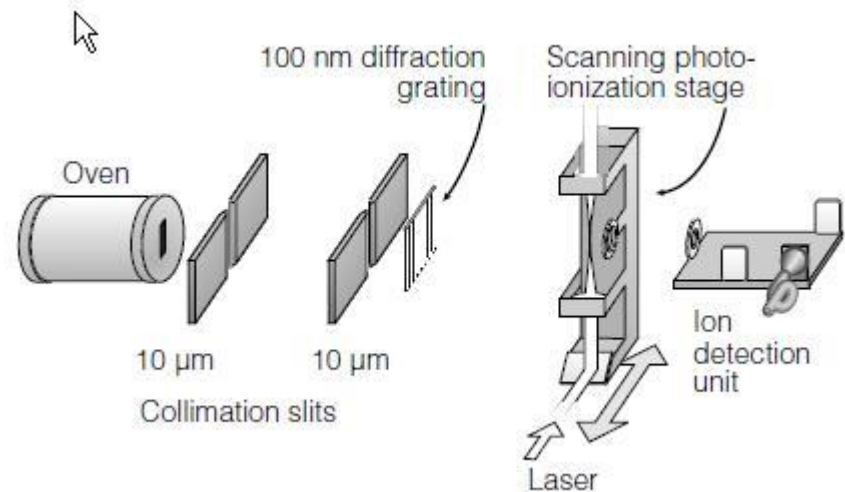
## Wave-particle duality of $C_{60}$ molecules

Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae, Claudia Keller,  
Gerbrand van der Zouw & Anton Zeilinger

Institut für Experimentalphysik, Universität Wien, Boltzmannngasse 5,  
A-1090 Wien, Austria



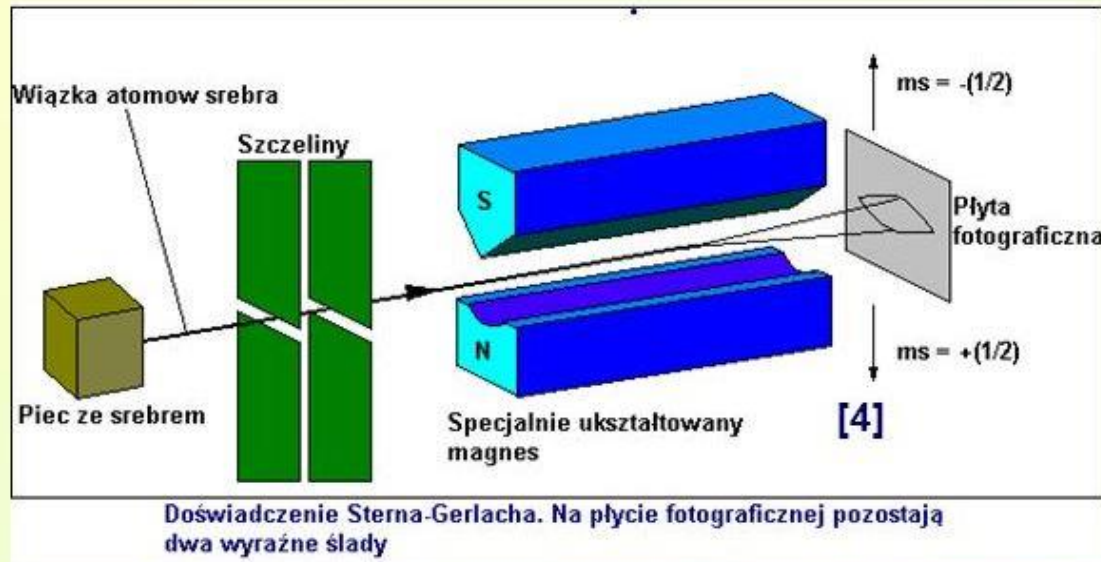
**Figure 2** Interference pattern produced by  $C_{60}$  molecules. **a**, Experimental recording (open circles) and fit using Kirchhoff diffraction theory (continuous line). The expected zeroth and first-order maxima can be clearly seen. Details of the theory are discussed in the text. **b**, The molecular beam profile without the grating in the path of the molecules.





# Doświadczenie Sterna-Gerlacha - 1

W 1922 r (przed opisem teoretycznym 'spinu' ) Otto Stern i Walter Gerlach zaobserwowali na kliszy rozszczepienie wiązki atomów srebra na dwie !!!.



Atom srebra posiadający jeden elektron na zewnętrznej orbicie może być w zależności od wartości magnetycznej spinowej liczby kwantowej wciągany, bądź wypychany z obszaru silniejszego pola magnetycznego. Gdy spin elektronu wynosi  $+1/2$  atom jest wypychany, gdy spin wynosi  $-1/2$  atom jest wciągany. Tak więc w czasie przechodzenia przez obszar niejednorodnego pola magnetycznego wiązka atomów srebra zostaje rozszczepiona na dwie wiązki. Każda z tych wiązek składa się z atomów, których zewnętrzne elektrony mają tę samą wartość spinu. [ 8 ]

1901	Planck	Blackbody radiation
1905	Einstein	Photoelectric effect
1913	Bohr	Quantum theory of spectra
1922	Compton	Scattering photons off electrons
1924	Pauli	Exclusion principle
1925	de Broglie	Matter waves
1926	Schrödinger	Wave equation
1927	Heisenberg	Uncertainty principle
1927	Davisson and Germer	Experiment on wave properties of electrons
1927	Born	Interpretation of the wavefunction

# Nowa mechanika



mechanika macierzowa



mechanika falowa

Interpretacja kopenhaska: kwadrat modułu funkcji falowej określa gęstość prawdopodobieństwa znalezienia cząstki (cząstek) w określonym punkcie (punktach) przestrzeni



Schrödinger  
o mechanice macierzowej  
Heisenberga (1926)

"Moja teoria była inspirowana przez L. de Broglie'a i przez krótkie, ale nieskończone dalekowzrocne uwagi A. Einsteina [*Berl. Ber.* 1925, p.9ff]. Byłem całkowicie nieświadomy jakiegokolwiek związku genetycznego z Heisenbergiem. Oczywiście wiedziałem o jego teorii, ale była dla mnie odpychająca, czy raczej odrażająca, ze względu na bardzo trudne metody transcendentnej algebry i brak pogładowości (*Anschaulichkeit*)."



Heisenberg  
o mechanice falowej  
Schrödingera (1926)

"Im więcej myślę o części fizycznej teorii Schrödingera, tym bardziej obrzydliwa mi się ona wydaje. To, co Schrödinger pisze o jej pogładowości (*Anschaulichkeit*), nie ma w ogóle sensu, i inaczej mówiąc, myślę, że jest to gnój (*Mist*)."

Kiedyś dziennikarze wymyślili, że tylko dwunastu ludzi na świecie rozumie teorię względności. Nie wierze w tę ich rewelację. Natomiast kiedyś było tak, że znał ją tylko jeden człowiek, ten, który ją odkrył lecz jeszcze nie opublikował swojej pracy. Gdy jednak ludzie przeczytali jego artykuł, wielu z nich w ten czy inny sposób zrozumiało teorię względności. Z pewnością było ich więcej niż dwunastu. Z drugiej strony sądzę, i mogę bezpiecznie stwierdzić, iż nikt nie rozumie mechaniki kwantowej

Richard Feynman 1965