

**JAK FIZYKA KWANTOWA ZMIENIŁA  
NASZE ROZUMIENIE ŚWIATA**

**albo**

**O NATURZE PROMIENIOWANIA  
czyli O ANI-FALACH-ANI-CZĄSTKACH**

**i o niezwykłych z tego wnioskach**

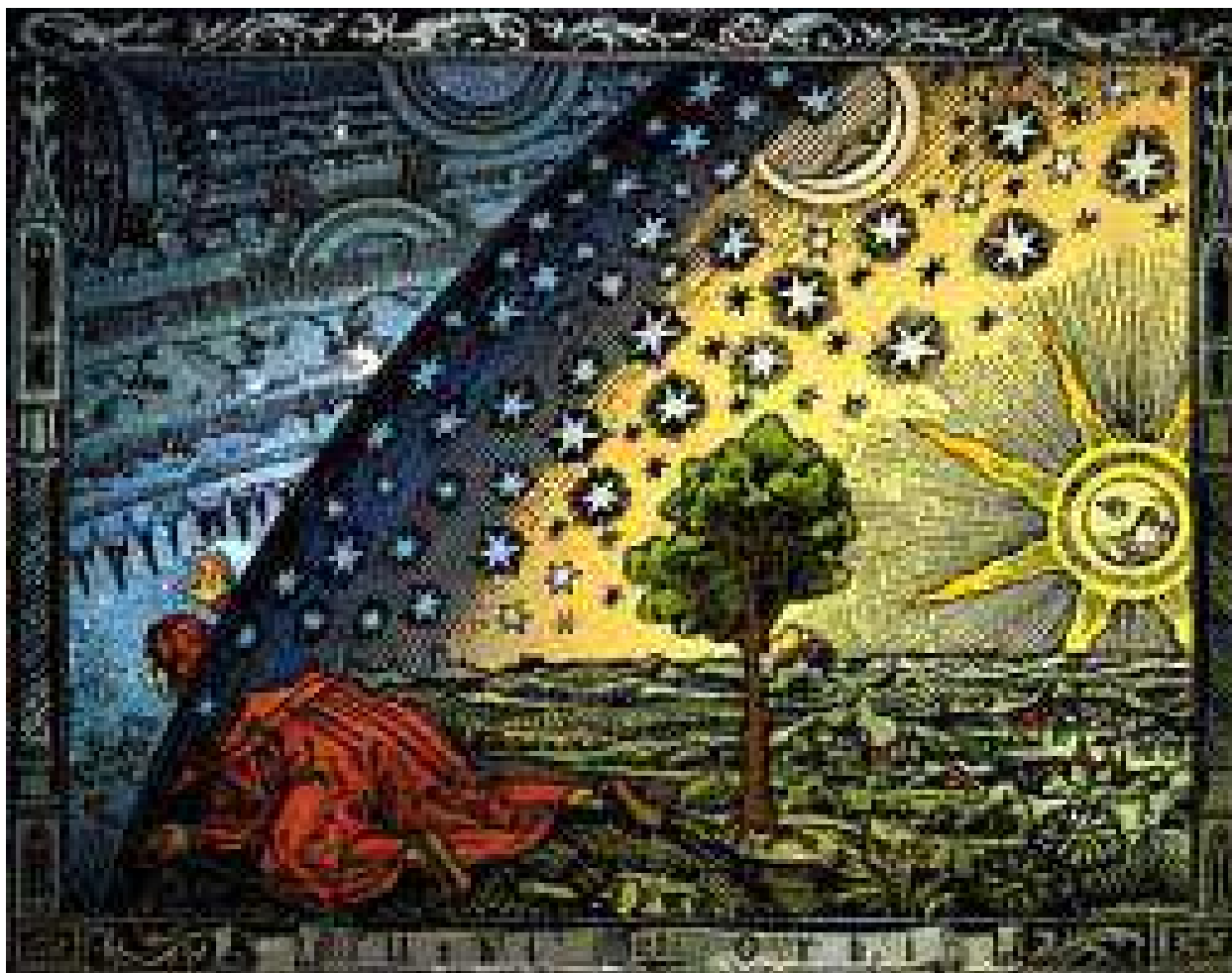
**Jacek Karwowski**

**Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika**

**VIII Ogólnopolskie Seminarium**

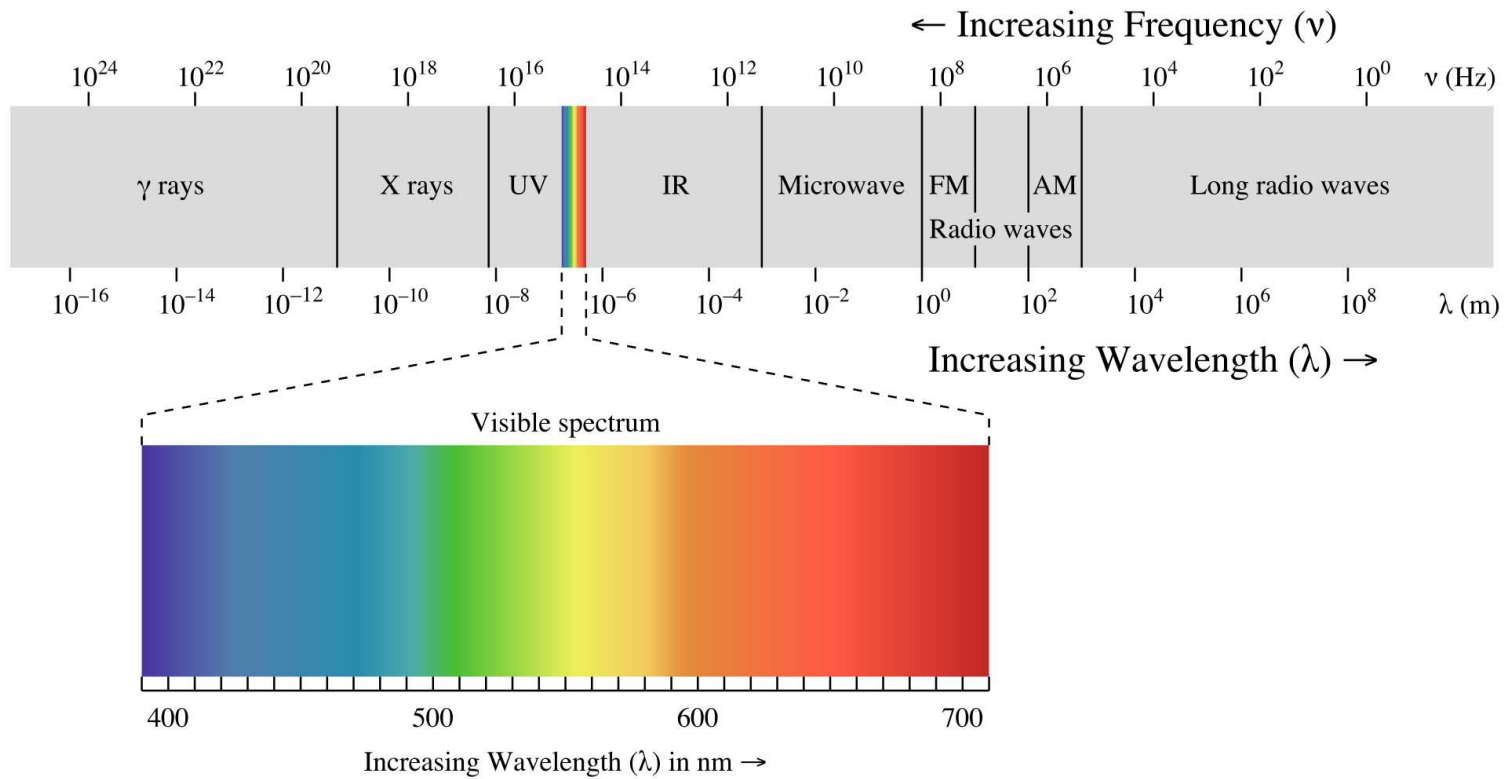
**Komputer w szkolnym laboratorium przyrodniczym**

**3-4 grudnia 2015, UMK Toruń**



**Poszerzaniu granic poznania niemal zawsze towarzyszy zdumienie.**

# PROMIENIOWANIE ELEKTROMAGNETYCZNE



## TREŚĆ

- FIZYKA KLASYCZNA
- MAŁE TRUDNOŚCI I PROSTE RECEPTY
- KŁOPOTY ZE ŚWIATŁEM
- GŁĘBOKI KRYZYS: FALE CZY CZĄSTKI
- FIZYKA KWANTOWA

## **FIZYKA KLASYCZNA**

- Mechanika klasyczna
- Klasyczna elektrodynamika
- Klasyczna termodynamika
- Teoria względności
- Dynamika nieliniowa i teoria chaosu

## **MECHANIKA KLASYCZNA**

Teoria opisująca ruch ciał i relacje pomiędzy ruchem ciał, a działającymi na nie siłami. Powstawała w okresie od XVII do XIX wieku.

Do końca XIX wieku była uznawana za teorię dokładną,

Największy wkład do rozwoju tej teorii wnieśli

- Galileo Galilei (1564-1642),
- Isaac Newton (1643-1727),
- Joseph-Louis Lagrange (1736-1813),
- William Rowan Hamilton (1805-1865).

## **GALILEO GALILEI: 1564-1642**



Włoski fizyk, matematyk, astronom i filozof. Twórca astronomii obserwacyjnej i współczesnej fizyki. Zapoczątkował formułowanie ilościowych praw fizyki. Zdefiniował względność ruchu. Wprowadził pojęcie bezwładności. Użył teleskopu do obserwacji astronomicznych. Odkrył księżyce Jowisza i góry na Księżycu. Stwierdził, że Droga Mleczna składa się z ogromnej liczby słabych gwiazd. Za popieranie idei Kopernika został w roku 1633 skazany przez Inkwizycję na dożywotni areszt domowy.

## SIR IZAAK NEWTON: 1642-1727



Angielski fizyk, matematyk, astronom, alchemik i filozof. W dziele *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* sformułował podstawy mechaniki i teorii grawitacji. Przez wielu uważane za najważniejszą książkę naukową kiedykolwiek napisaną. Dzięki pracom Newtona i Galileusza zrozumiano zasady rządzące ruchami planet i innych obiektów astronomicznych. **Sformułował korpuskularną teorię światła.** Za osiągnięcia otrzymał tytuł lordowski.



## STRUKTURA MECHANIKI KLASYCZNEJ

Równania opisujące ruch ciał (równania Newtona) są równaniami różniczkowymi drugiego rzędu względem czasu. Są one określone jeżeli znane są siły działające na ciała i więzy które ograniczają ruch tych ciał. Liczba równań jest równa liczbie stopni swobody układu. Rozwiązaniami równań ruchu są położenia i pędy ciał określone jako funkcje czasu. Aby poznać ewolucję układu, tzn. zależność jego zachowania się od czasu, musimy znać, oprócz równań ruchu, warunki początkowe, tzn. położenia i pędy w chwili początkowej. Po rozwiązaniu równań ruchu znamy **dokładnie** wszystkie położenia i pędy w dowolnej chwili czasu. Stąd możemy wyznaczyć matematycznie wszystkie inne mechaniczne charakterystyki układu.

## PIERRE-SIMON LAPLACE: 1749-1827



Francuski matematyk i astronom. Wniósł ogromny wkład w rozwój mechaniki nieba oraz fizyki matematycznej. Autor koncepcji *demona Laplace'a*: Skoro przyroda jest opisana równaniami różniczkowymi drugiego rzędu, znajomość warunków początkowych jednoznacznie określa przeszłość i przyszłość. Hipotetyczna istota (demon) posiadająca kompletną wiedzę o położeniach i pędach wszystkich ciał we wszechświecie może odtworzyć całą przeszłość i przewidzieć przyszłość.

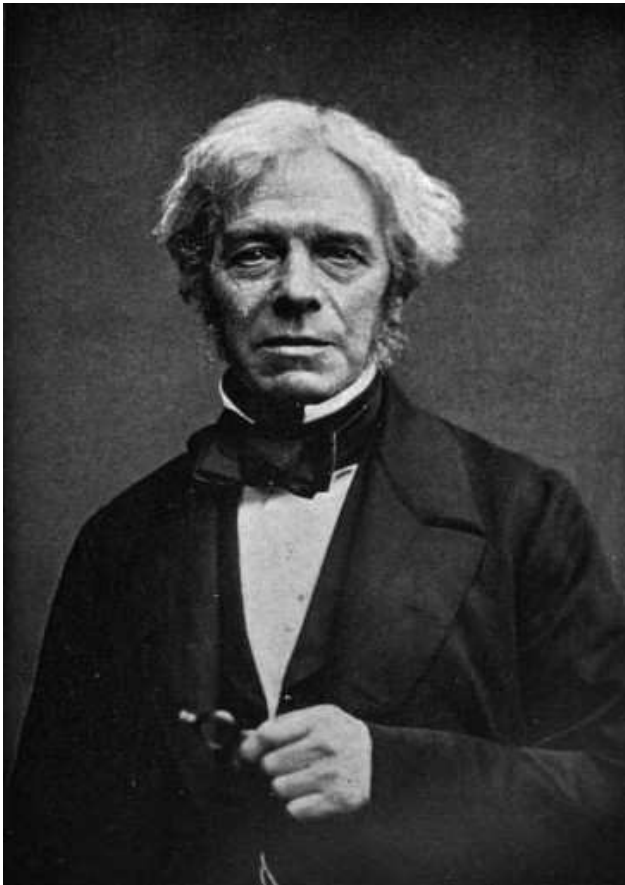
## **KLASYCZNA ELEKTRODYNAMIKA**

Opisuje zjawiska w których uczestniczą ładunki elektryczne i magnetyczne oraz prądy. Podstawowymi pojęciami elektrodynamiki klasycznej są pole elektryczne, pole magnetyczne, ładunek elektryczny, oraz prąd elektryczny. Podstawę teorii tworzą równania Maxwella (James Clerk Maxwell) i zasada zachowania ładunku.

Największy wkład do rozwoju tej teorii wnieśli

- Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806)
- André-Marie Ampère (1775-1836)
- Georg Simon Ohm (1789-1854)
- Michael Faraday (1791-1867)
- James Clerk Maxwell (1831-1879).

## MICHAEL FARADAY: 1791-1867



Angielski fizyk i chemik. Wprowadził pojęcia pola elektrycznego i magnetycznego oraz linii sił pola. Wysunął twierdzenie, że ładunki elektryczne działają na siebie za pomocą takiego pola. Odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Sformułował prawa elektrolizy. Wynalazł silnik elektryczny. Stworzył podstawy elektrochemii. Odkrył benzen. Opracował metodę skraplania gazów.

## JAMES CLERK MAXWELL: 1831-1879



Szkocki fizyk matematyczny. Sformułował klasyczną teorię elektromagnetyzmu w której zjawiska elektryczne i magnetyczne są przedstawione jako różne przejawy pola elektromagnetycznego. Teorię Maxwella nazywa się 'drugą wielką unifikacją' (pierwszą była newtonowska unifikacja mechaniki i astronomii).

**Z teorii Maxwella wynika, że światło jest falą elektromagnetyczną.**

## STRUKTURA ELEKTRODYNAMIKI KLASYCZNEJ

Równania opisujące zmienność w czasie i w przestrzeni pól elektrycznych i magnetycznych (równania Maxwella) są równaniami różniczkowymi względem czasu i zmiennych przestrzennych. Są one określone jeżeli znane są rozkłady ładunków i prądów. Aby poznać ewolucję układu, tzn. zależność jego zachowania się od czasu, musimy znać, oprócz równań Maxwella, warunki początkowe i brzegowe. Po rozwiązaniu równań ruchu znamy **dokładnie** pola elektryczne i magnetyczne w dowolnym punkcie i w dowolnej chwili. Stąd możemy wyznaczyć matematycznie wszystkie inne elektromagnetyczne charakterystyki układu. W szczególności, **rozwiązaniami równań Maxwella są fale elektromagnetyczne.**

**DO KOŃCA XIX WIEKU UWAŻANO, ŻE PRAWA MECHANIKI I  
ELEKTRODYNAMIKI OPISUJĄ RZECZYWISTOŚĆ W SPOSÓB  
ŚCISŁY I KOMPLETNY**



## MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK: 1858-1947

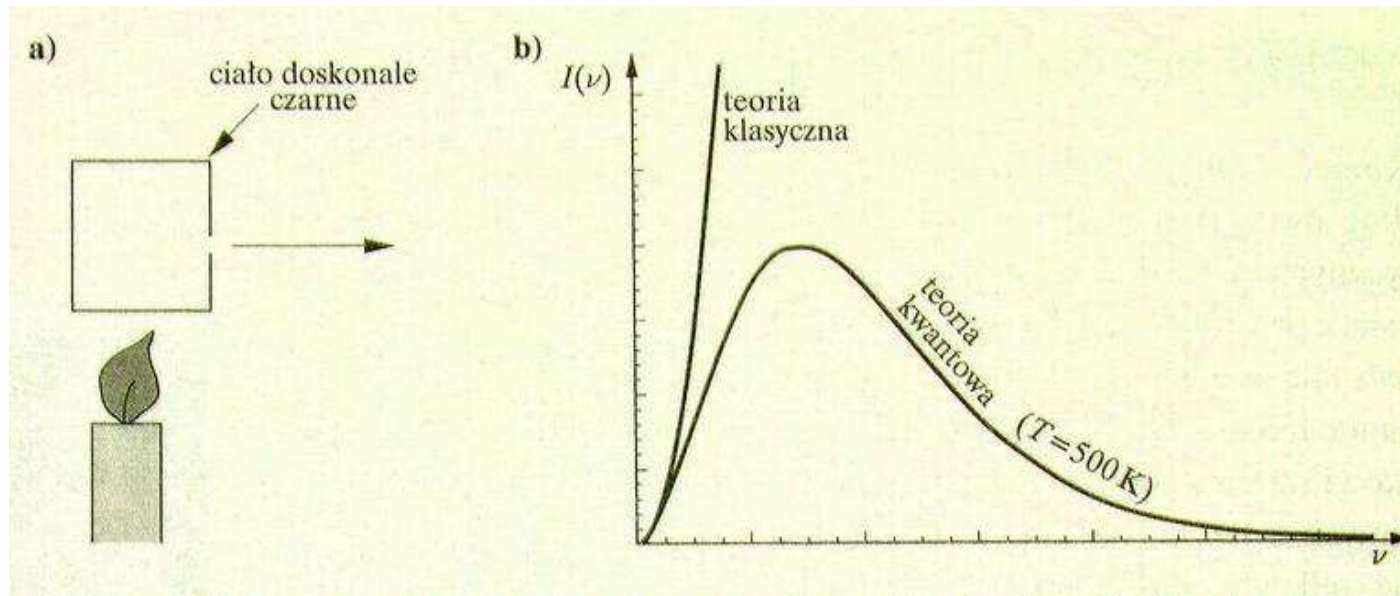


Fizyk niemiecki. Kiedy postanowił studiować fizykę, monachijski profesor fizyki Philipp von Jolly odradzał mu to, twierdząc, że jest to dziedzina, w której prawie wszystko już odkryto i do wypełnienia pozostało jedynie kilka luk. Pomimo tego w roku 1874 podjął studia na Uniwersytecie Monachijskim. 26 lat później jego koncepcja, że energia może być emitowana tylko w określonych porcjach, zwanych kwantami, dała początek nowej fizyce – fizyce kwantowej (nagroda Nobla 1918).



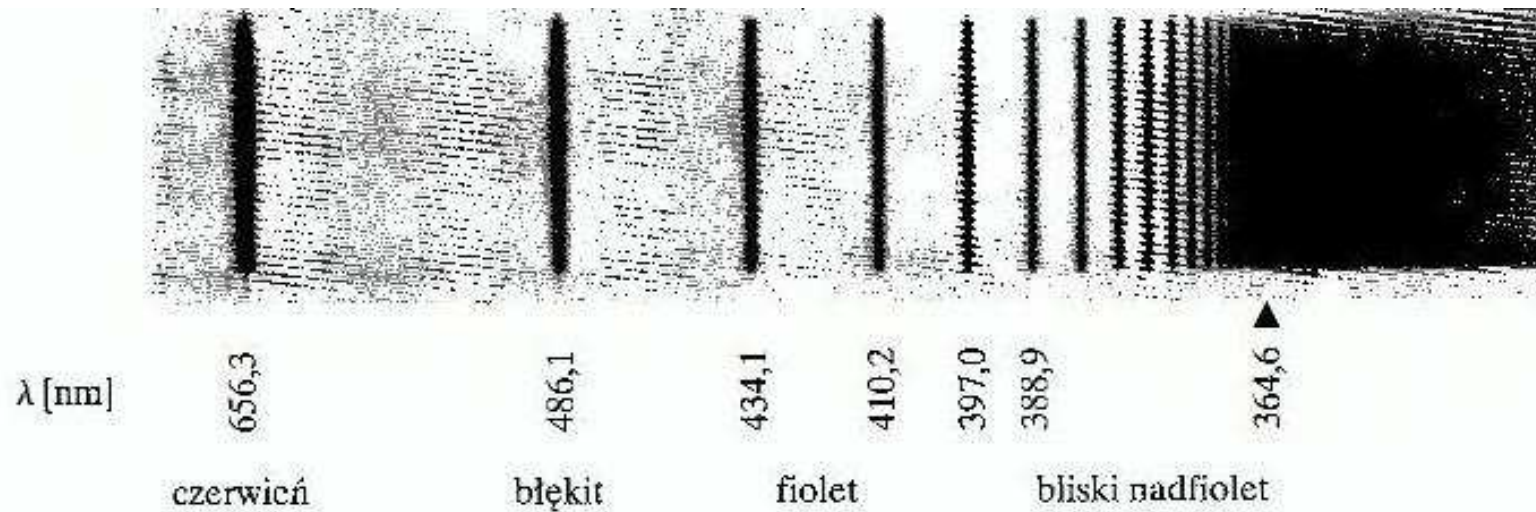
## MAŁE TRUDNOŚCI I PROSTE RECEPTY:

### 1. Promieniowanie termiczne:



Max Planck 14 XII 1900: Oscylator może pochłaniać lub tracić energię porcjami (kwantami)  $E = h\nu$ ,  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ .

## 2. Widmo atomu wodoru



### Widmo emisyjne wodoru - seria Balmera

Niels Bohr: elektrony w atomie poruszają się po orbitach stacjonarnych. Proste reguły ograniczające dopuszczalne wartości momentu pędu elektronów (podobne do reguł Plancka) pozwalają na dokładny opis widma.

## NIELS HENRIK DAVID BOHR: 1885-1962



Fizyk duński. Po doktoracie (Kopenhaga 1911) wyjechał do Ernesta Rutherforda do Manchester. Tam rozwijał teoretycznie model atomu Rutherforda i w 1913 skonstruował teorię budowy atomu wodoru znaną jako *model Bohra*. W 1922 otrzymał Nagrodę Nobla. Był inicjatorem i dyrektorem ośrodka naukowego skupiającego najważniejszych twórców mechaniki kwantowej. Jest głównym autorem powszechnie przyjętej *kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej*.

## KŁOPOTY ZE ŚWIATŁEM

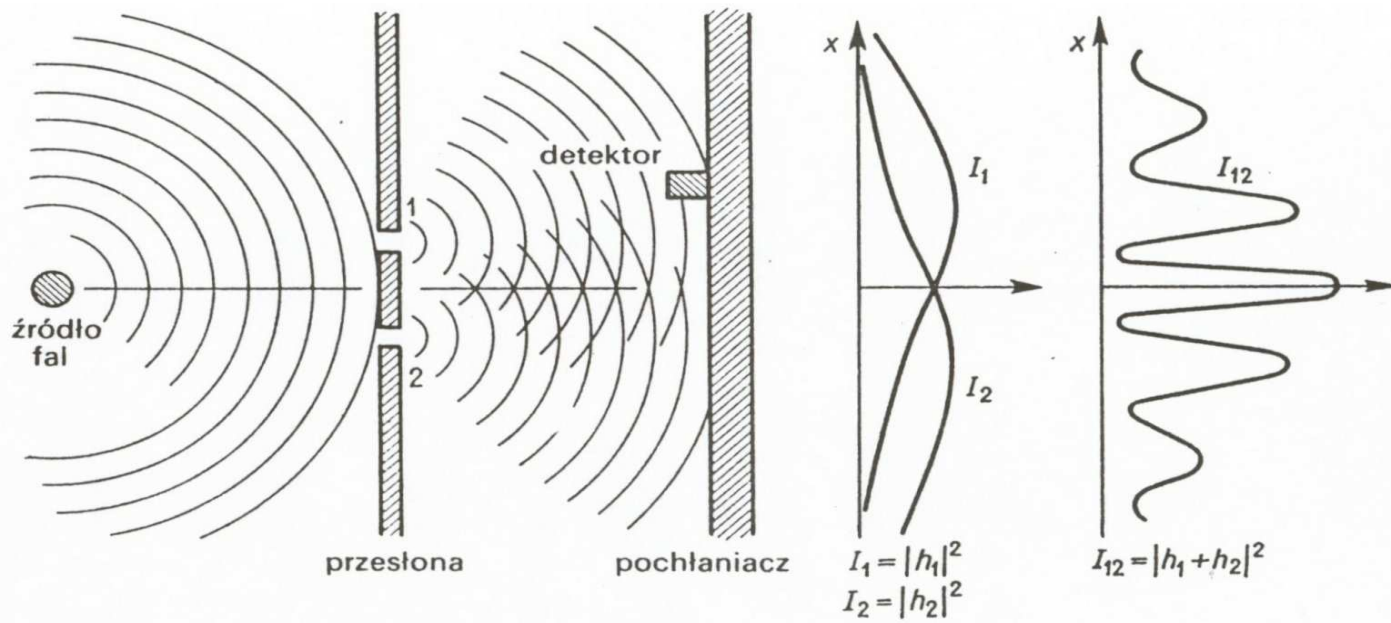
- Pierre Gassendi (1592-1655; francuski duchowny i wolnomyśliciel) w dziele opublikowanym w 1660 dowodził, że światło jest strumieniem cząstek. Izaak Newton udoskonalił ten model i opisał w pracy z roku 1704. Był powszechnie przyjęty do 1800.
- Thomas Young, 1801: światło jest falą. Ośrodkiem, w którym rozchodzą się fale świetlne jest hipotetyczny eter kosmiczny.
- James Clerk Maxwell, 1862: światło jest falą elektromagnetyczną, która może rozchodzić się bez konieczności wprowadzania eteru.
- Albert Abraham Michelson, seria doświadczeń na przełomie XIX i XX wieku: prędkość światła jest taka sama we wszystkich układach współrzędnych, a zatem nie ma eteru.
- Albert Einstein, 1905: aby wyjaśnić zjawisko fotoelektryczne trzeba przyjąć, że światło jest strumieniem cząstek.

## THOMAS YOUNG: 1773-1829



Angielski fizyk, lekarz fizjolog i egiptolog. Był genialnym dzieckiem, czytał w wieku 2 lat. Znał 14 języków. Studiował w Londynie, Edynburgu i Getyndze - medycynę, matematykę, fizykę oraz języki wschodnie. Zajmował się różnymi dziedzinami fizyki. W 1801 odkrył interferencję światła - słynne doświadczenie Younga. Doświadczenie to obaliło korpuskularną teorię Newtona i zapoczątkowało teorię falową światła.

## FALE WODNE:

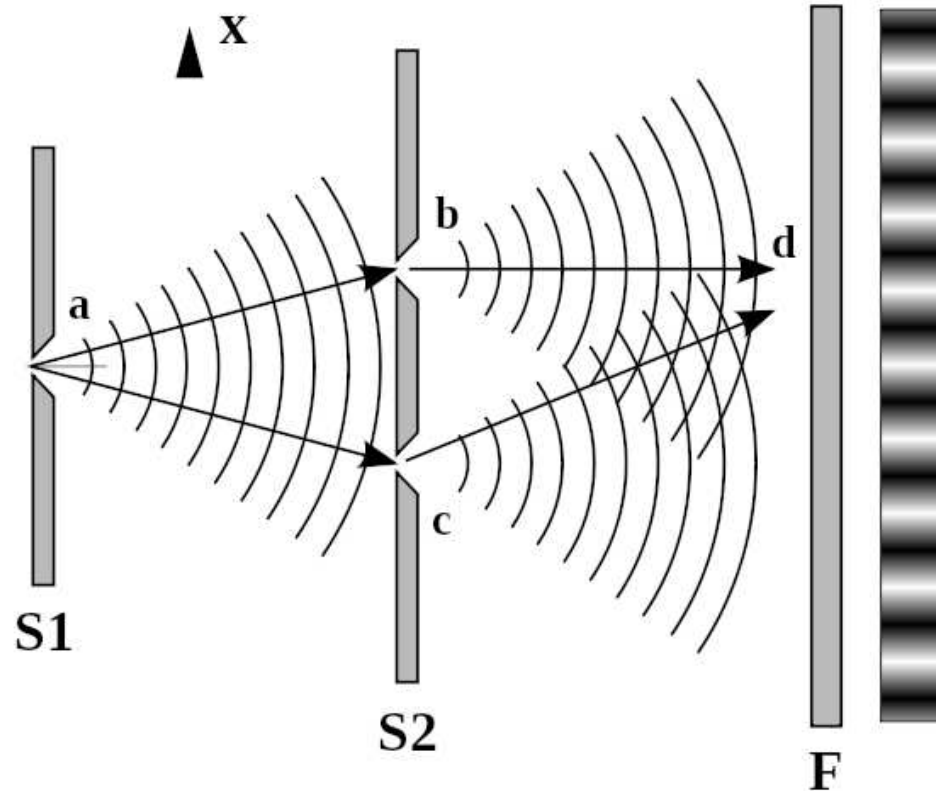


Interferencja (nakładanie się) fal:

$$I_{12} = |\mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2|^2 = \mathbf{h}_1^2 + 2\mathbf{h}_1\mathbf{h}_2 + \mathbf{h}_2^2 = \begin{cases} 4\mathbf{h}^2, & \text{jeżeli } \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2 = \mathbf{h}, \\ 0, & \text{jeżeli } \mathbf{h}_1 = -\mathbf{h}_2. \end{cases}$$



## ŚWIATŁO



Wynik taki sam jak dla fal wodnych. Wniosek: światło jest falą.  
Skoro jest falą, to musi być ośrodek wykonujący ruch falowy.  
Ten hipotetyczny ośrodek nazwano *eterem*.

## **ALBERT ABRAHAM MICHELSON: 1852-1931**



Urodził się w Strzelnie koło Inowrocławia. W 1855 wyjechał z rodzicami do USA. Był profesorem na Uniwersytecie w Chicago, członkiem Narodowej Akademii Nauk, laureatem nagrody Nobla. W 1887 przeprowadził eksperyment dowodzący, że prędkość światła jest taka sama w każdym układzie współrzędnych. Było to bardzo trudne do pogodzenia z hipotezą eteru kosmicznego i miało zasadnicze znaczenie dla sformułowania szczególnej teorii względności.



## ALBERT EINSTEIN: 1879-1955



Fizyk teoretyk urodzony w Niemczech. Później obywatel Szwajcarii, Austrii i Stanów Zjednoczonych. Twórca szczególnej i ogólnej teorii względności, Laureat nagrody Nobla. Uważany za największego fizyka XX wieku. Ogólna teoria względności, jako współczesna teoria grawitacji, jest podstawą współczesnej kosmologii.

## ZJAWISKO FOTOELEKTRYCZNE

Światło padając na powierzchnię metalu wybija z niego elektrony.

**Energia tych elektronów zależy jedynie od częstości fali świetlnej**

a nie od natężenia światła (tzn. od całkowitej energii przekazanej do metalu przez światło). Zjawisko nie zachodzi dla częstości mniejszych od pewnej częstości granicznej.

Wyjaśnienie tego zjawiska nie jest możliwe jeżeli przyjmiemy, że światło jest falą elektromagnetyczną. Przy założeniu, że światło jest strumieniem cząstek (fotonów) o energii  $h\nu$ , Einstein wyjaśnił wszystkie jego własności (1905). W 1921 otrzymał za to nagrodę Nobla

Wniosek:

**Światło nie jest falą, ale ma naturę dwoistą: w pewnych okolicznościach zachowuje się jak fala, a w innych jak strumień cząstek.**

## ZWARIOWANA HIPOTEZA DE BROGLIE'A



Louis-Victor Pierre Raymond książę de Broglie 1892-1987:

**Wszystkie cząstki mają dwoistą naturę i w pewnych okolicznościach ujawniają swój falowy charakter (1923).**

Z cząstką o pędzie  $p$  związana jest fala o długości

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

Doświadczalne potwierdzenie: 1927.

Nagroda Nobla: 1929.

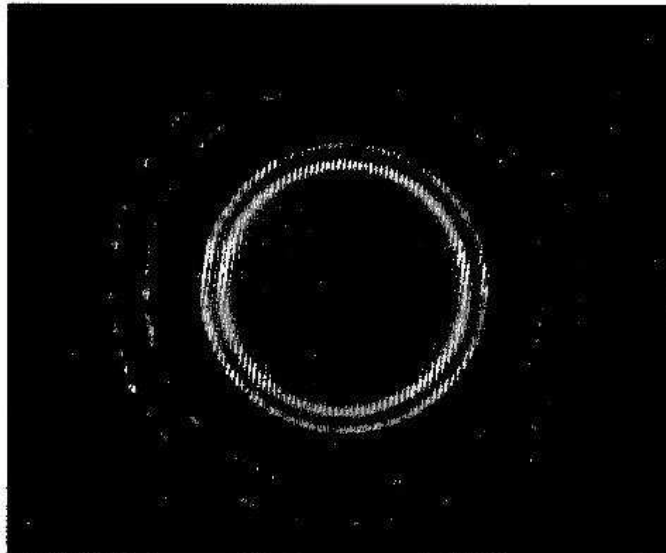
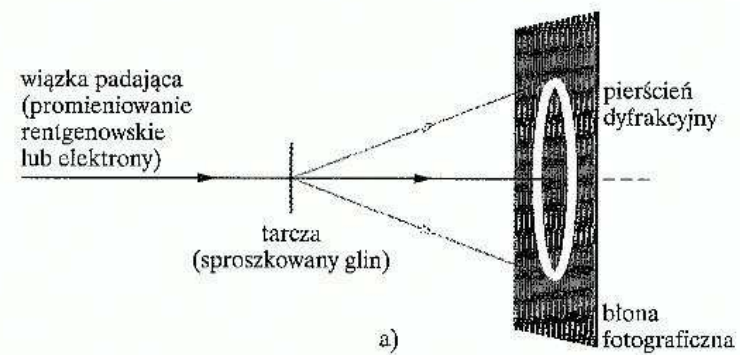
## DYFRAKCJA ELEKTRONÓW



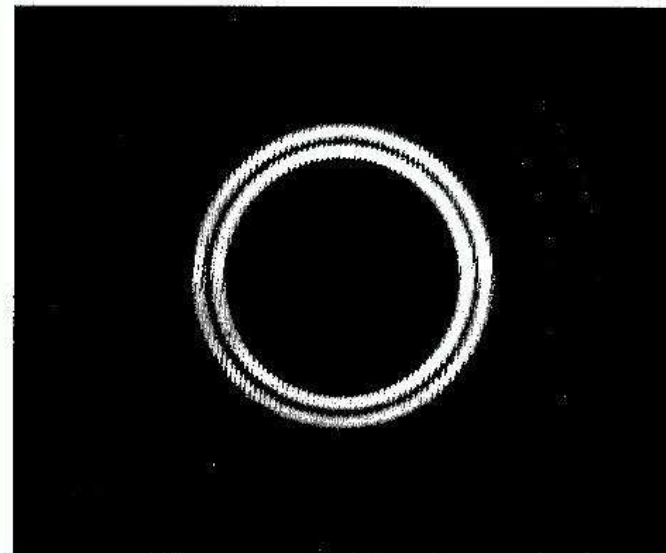
Sir George Paget Thomson (1892-1975), Brytyjczyk, i Clinton Joseph Davisson (1881-1958), Amerykanin, odkrywając w 1927 zjawisko dyfrakcji elektronów (doświadczenie Davissona i Germera) potwierdzili hipotezę de Broglie'a (nagroda Nobla 1937).

## ELEKTRONY I PROMIENIE X

Rys. 39.9. a) Układ doświadczalny wykorzystywany do prezentacji falowego charakteru padającej wiązki metodami dyfrakcyjnymi. Obrazy dyfrakcyjne otrzymane dla b) wiązki promieniowania rentgenowskiego i c) wiązki elektronów (fali materii). Zwróć uwagę, że zasadnicza geometria obu obrazów jest identyczna

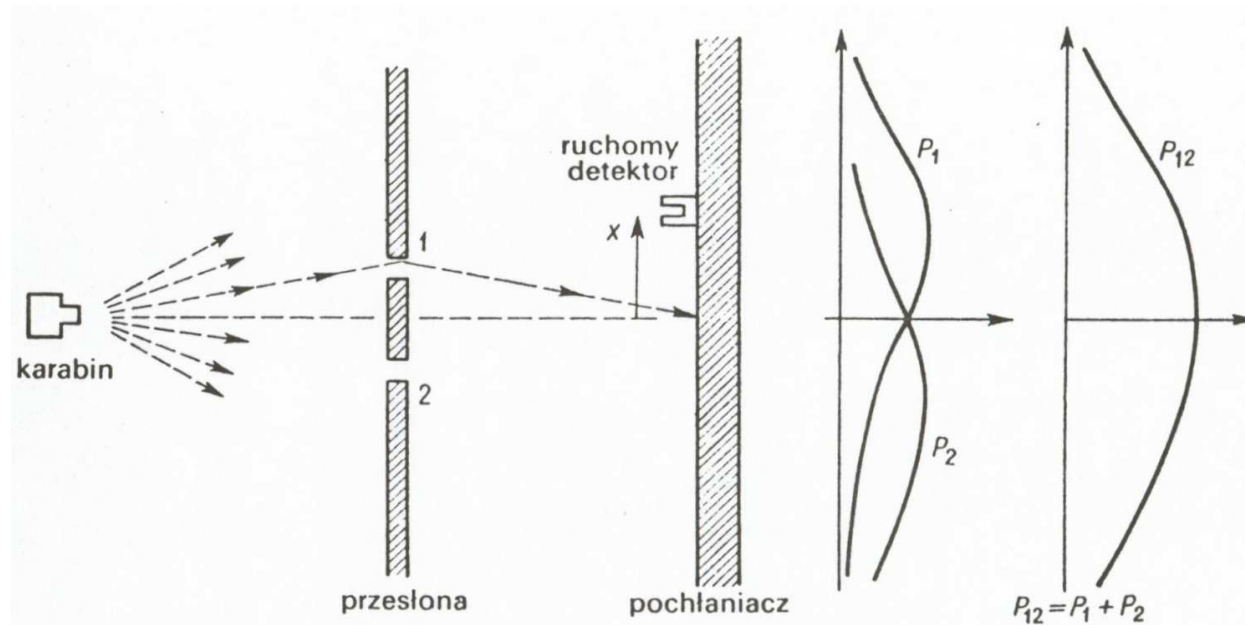


b)



c)

## DOŚWIADCZENIE Z DWIEMA SZCZELINAMI - POCISKI

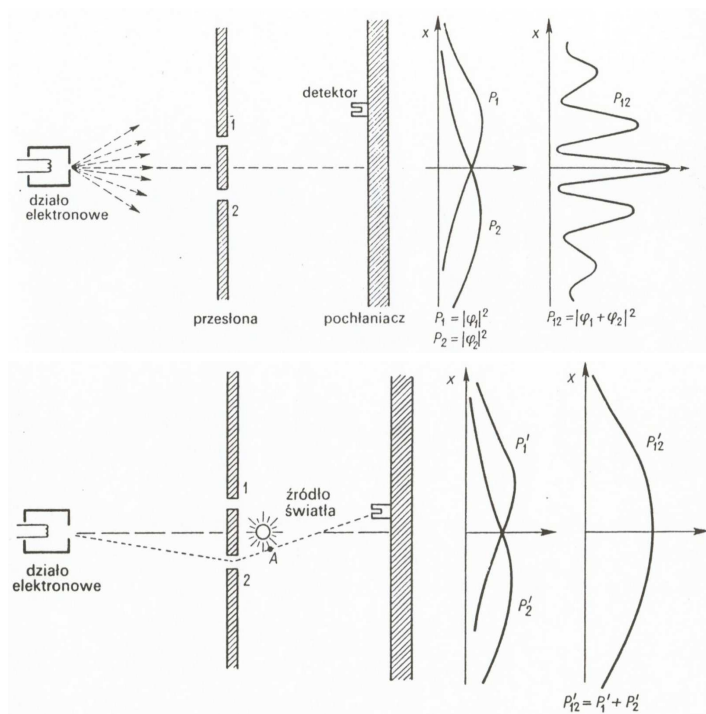


Mechanika klasyczna:

Każdy pocisk ma dobrze określony tor i zawsze można określić przez którą szczelinę przechodzi.

Rozkład pocisków w pochłaniaczu przy dwóch otwartych szczelinach jest sumą rozkładów pochodzących od każdej ze szczelin osobno.

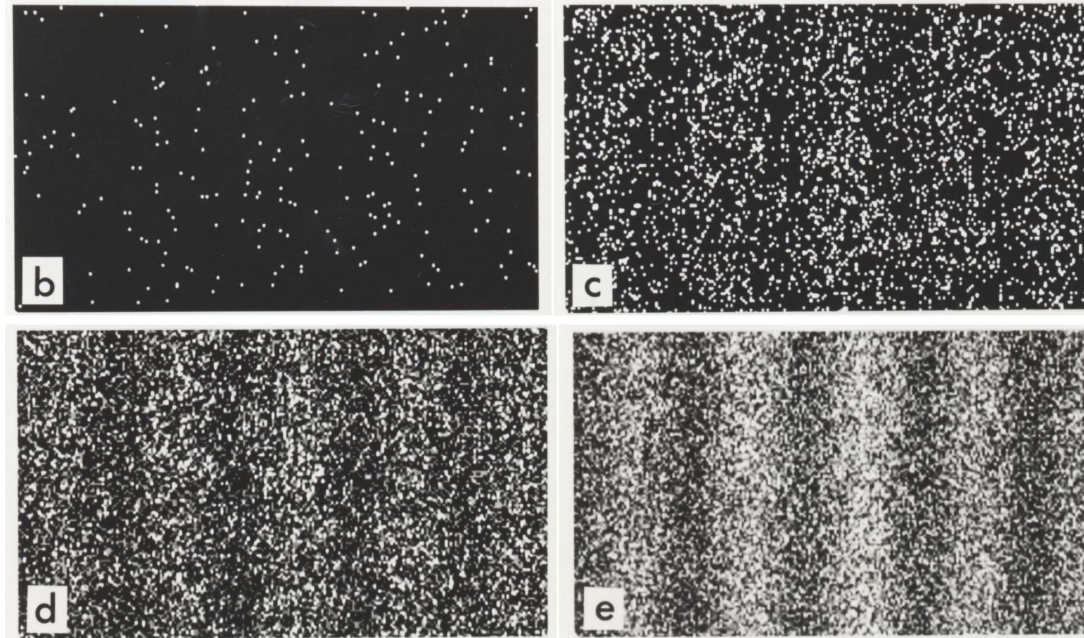
## DOŚWIADCZENIE Z DWIEMA SZCZELINAMI - ELEKTRONY



Jeżeli obie szczeliny są otwarte i nie sprawdzamy przez którą szczelinę przeszedł elektron, to na ekranie pojawia się obraz dyfrakcyjny. Jeżeli w jakikolwiek sposób zaburzamy ruch elektronu (np. sprawdzając jego położenie w czasie lotu), obraz dyfrakcyjny znika i mamy sumę rozkładów pochodzących od każdej ze szczelin osobno. Podobnie jest dla fotonów, atomów, a nawet dla cząsteczek tak dużych jak fulereny.



## 'FALE MATERII' SĄ FALAMI PRAWDOPODOBIENSTWA!



Doświadczenie Younga z elektronami zamiast fotonów (Akira Tonomura, 1989, firma Hitachi, Japonia). Emitowano jeden elektron na sekundę. Fale materii, tak jak fale światła, tworzą obraz interferencyjny i, jak widać, są falami prawdopodobieństwa. Na kolejnych fotografiach zarejestrowano: **200,**      **6 000,**      **40 000,**      **140 000**      elektronów. Podobny wynik otrzymamy jeżeli w doświadczeniu użyjemy fotonów.



## DLACZEGO ŚWIATŁO ZACHOWUJE SIĘ JAK FALA?

**Przykład:** Żarówka o mocy 100 watów emituje około 1 wata światła widzialnego o długości fali około 500 nm, tzn o częstotliwości  $6 \cdot 10^{14}$  Mhz. Łatwo stąd obliczyć, że żarówka emituje w ciągu jednej sekundy

$$2.5 \cdot 10^{18}$$

fotonów o tej częstotliwości.

Dlatego światło, pomimo swojej ziarnistej struktury (jest strumieniem fotonów), w doświadczeniu Younga i w innych doświadczeniach optycznych, wykazuje falowy charakter.

**Ciekawostka:** Oko ludzkie potrafi wykryć źródło światła dostarczające do siatkówki 10 fotonów na sekundę. Oznacza to, że 100-watową żarówkę można zobaczyć z odległości 280 km.

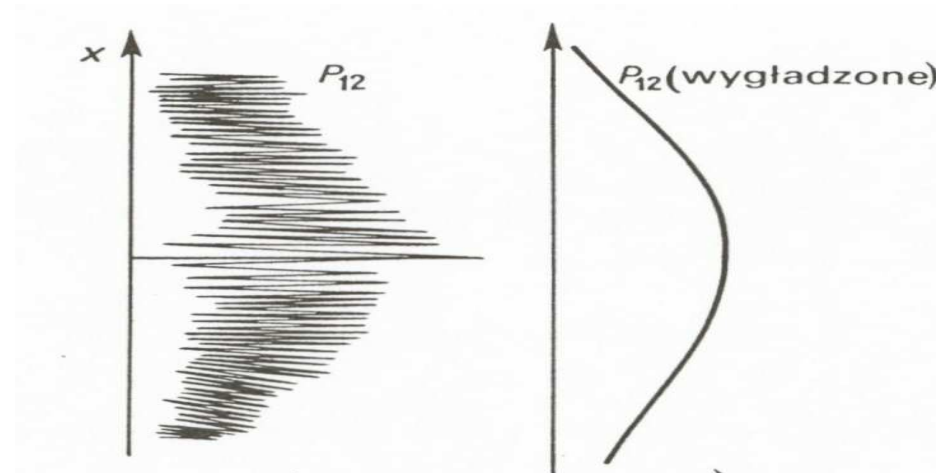
## DOŚWIADCZENIE Z DWIEMA SZCZELINAMI - POCISKI

Długość fali de Broglie'a:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \begin{cases} \text{elektron o energii 1 eV :} & 1 \text{ nm} \\ 10 \text{ gramowa kula o prędkości 500 m/s :} & 10^{-25} \text{ nm} \end{cases}$$

Odległość kolejnych maksimum na obrazie dyfrakcyjnym:  $x = \lambda (r/d)$

$r$  – odległość szczelin od ekranu;  $d$  – odstęp pomiędzy szczelinami.



$$x = \lambda \frac{r}{d}.$$

Jakie będą odległości prążków interferencyjnych  $x$  jeżeli odstęp pomiędzy szczelinami  $d = 1 \text{ nm}$ , a odległość szczelin od ekranu wnosi  $r = 100 \text{ km} = 10^{14} \text{ nm}$ ?

$$x = 10^{-25} \text{ nm} \cdot 10^{14} = 10^{-11} \text{ nm}.$$

Wniosek:

Odległości kolejnych maksimów obrazu interferencyjnego są tak małe, że w najmniejszym detektorze znajdą się setki bilionów maksimów i minimów. Dlatego w przypadku obiektów makroskopowych możemy widzieć jedynie *wygładzony obraz*.

## WNIOSKI

1. Bardzo małe obiekty (fotony, elektrony, protony, ...) nie zachowują się ani jak fale ani jak cząstki ani jak coś co kiedykolwiek mogliśmy zobaczyć.
2. Fotony, elektrony, protony, ... zachowują się w podobny sposób.
3. Nie potrafimy 'wytłumaczyć' sposobu w jaki te obiekty zachowują się, ale potrafimy ich zachowanie bardzo dokładnie opisać.

Uwaga:

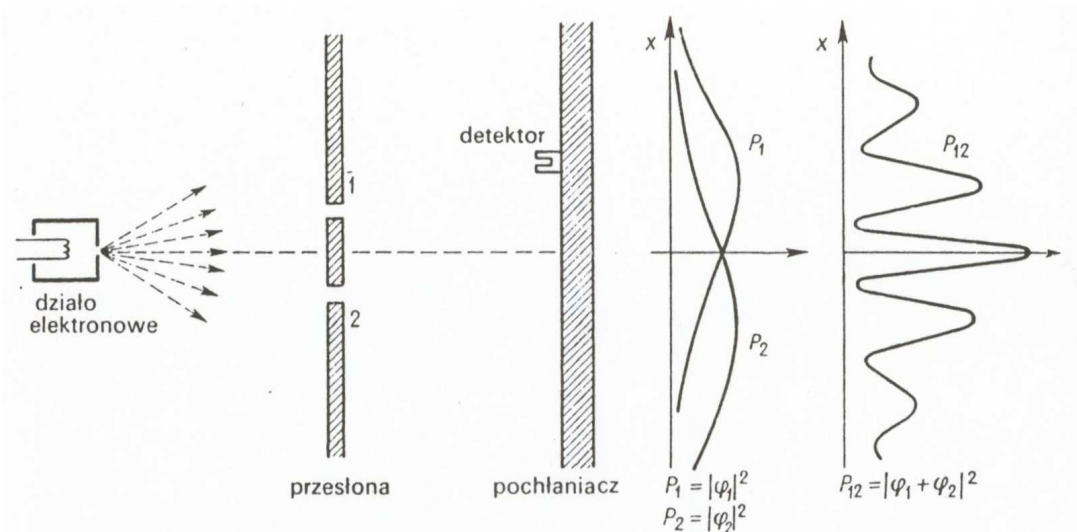
Dzięki rozwojowi technik eksperymentalnych zaobserwowano interferencję atomów, a nawet cząsteczek tak dużych jak fulereny  $C_{60}$ , o masie ponad milion razy większej od masy elektronu.

## NOWA FIZYKA



Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger 1887-1961. Skonstruował równanie falowe opisujące fale prawdopodobieństwa (równanie Schrödingera) i wprowadził funkcję falową  $\Psi$ . Funkcja  $\Psi$  nie ma bezpośredniego sensu fizycznego, ale zawiera w sobie kompletną informację o układzie fizycznym który opisuje. Kwadrat jej modułu określa rozkład prawdopodobieństwa znalezienia opisywanych przez nią cząstek. Nagroda Nobla 1933.

## DOŚWIADCZENIE Z DWIEMA SZCZELINAMI - ELEKTRONY



Cząstka opisana jest przez funkcję falową  $\Psi(x)$ . Prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w punkcie  $x_0$  dane jest przez  $|\Psi(x_0)|^2$ .

Jeżeli cząstka może dotrzeć od źródła do detektora kilkoma drogami, to jej funkcja falowa jest suma po wszystkich drogach.

W naszym przypadku:

$$P_1 = |\Psi_1|^2, \quad P_2 = |\Psi_2|^2, \quad P_{12} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 - \text{interferencja.}$$

## WERNER KARL HEISENBERG: 1901-1976



Fizyk niemiecki, współtwórca mechaniki kwantowej w wersji znanej jako mechanika macierzowa. Laureat nagrody Nobla (1932).

**Zasada nieoznaczoności Heisenberga:**

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

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

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

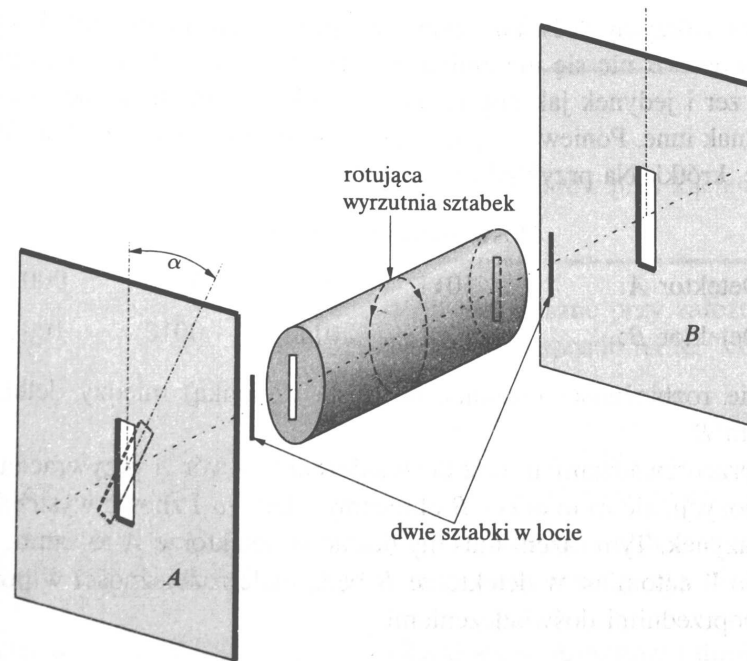
## JOHN STEWART BELL: 1928-1990



Brytyjski matematyk i fizyk. Wniósł istotny wkład w interpretację mechaniki kwantowej. Doświadczalny dowód niespełnienia nierówności Bella w procesach kwantowych wykazuje zasadniczą odmienną obiektów fizycznych opisywanych przez fizykę kwantową od tych, które opisuje jakakolwiek teoria klasyczna. Ponadto prace Bella stanowią fundament informatyki kwantowej. Nie dostał nagrody Nobla, ale otrzymał Medal Hughes'a.



## NIERÓWNOŚĆ BELLA - DOŚWIADCZENIE



Wyrzutnia sztabek rotuje i emituje w przeciwnych kierunkach po dwie identyczne i tak samo ustawione sztabki. W pewnej odległości od wyrzutni stoją dwie przesłony ze szczelinami o identycznej szerokości. Przesłony można obrócić wokół osi całego urządzenia. Część sztabek przejdzie przez szczeliny (wynik **1**) a część nie przejdzie (wynik **0**).

## NIERÓWNOŚĆ BELLA

Cztery doświadczenia:

	1	2	3	4
	$A \parallel B$	$A \triangleleft \alpha$	$B \triangleleft (-\alpha)$	$A \triangleleft \alpha, B \triangleleft (-\alpha)$
A	10010	11000	10010	11000
B	10010	10010	10011	10011
różnica	.....	.1 · 0.	..... 0	.1 · 00
	.....	.0 · 1.	..... 1	.0 · 11

Wniosek:

$$N(2\alpha) \leq N(\alpha) + N(-\alpha)$$

$N(\alpha)$  – liczba rozbieżności przy kącie  $\alpha$  między szczelinami A i B.

## **DOŚWIADCZENIE ASPECTA**

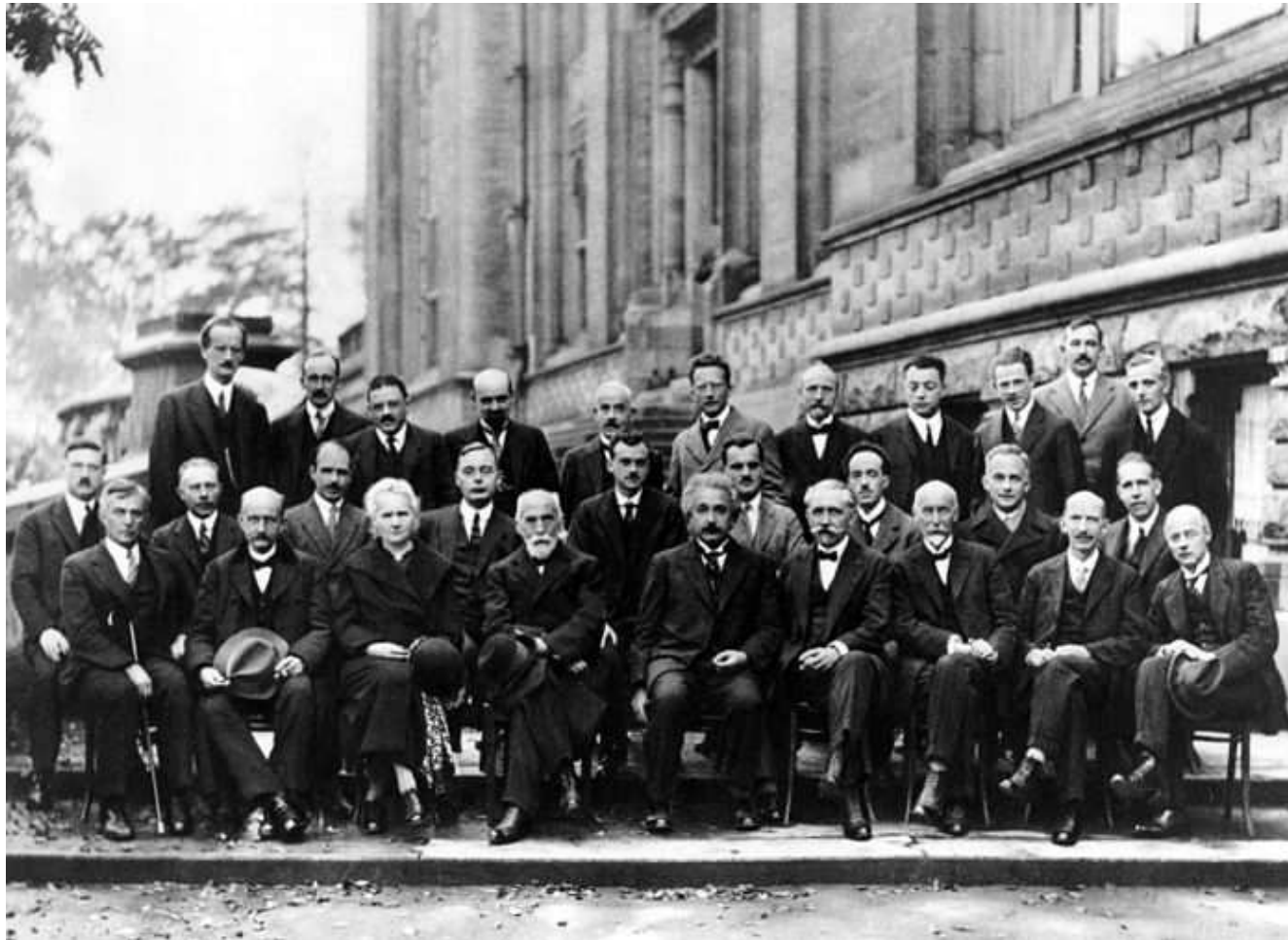
Alain Aspect, Instytut Optyki w Orsay pod Paryżem:

**w analogicznym doświadczeniu wykonanym z fotonami nierówność**

**Bella nie jest spełniona!.**



Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, Maurice de Broglie, Knudsen, Hasenöhrl, Hostelet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerlingh-Onnes, Einstein, Langevin.  
Nernst, Brillouin, Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wien, Skłodowska-Curie, Poincaré. (1911)



Piccard, Henriot, Ehrenfest, Herzen, de Donder, Schrödinger, Verschaffelt, Pauli, Heisenberg, Fowler, Brillouin  
Debye, Knudsen, Bragg, Kramers, Dirac, Compton, de Broglie, Born, Bohr  
Langmuir, Planck, Skłodowska-Curie, Lorentz, Einstein, Langevin, Guye, Wilson, Richardson. (1927)

## FIZYKA KWANTOWA

- Max Karl Ernst Ludwig Planck 1858-1947 – Promieniowanie ciał doskonale czarnych, kwanty energii 1900, nagroda Nobla 1918
- Albert Einstein 1879-1955 – Efekt fotoelektryczny  $\Rightarrow$  kwantowa natura światła 1905, nagroda Nobla 1921
- Sir Ernest Rutherford 1871-1937 – Odkrycie jądra atomowego 1911, nagroda Nobla 1908
- Niels Hendrik Bohr 1885-1962 – "Stara teoria kwantów", pierwszy model atomu wodoru 1913, nagroda Nobla 1922
- Arnold Sommerfeld 1868-1951 – Połączenie teorii kwantów i teorii względności 1916
- Louis-Victor Pierre Raymond książę de Broglie 1892-1987 – falowa natura materii 1923, nagroda Nobla 1929

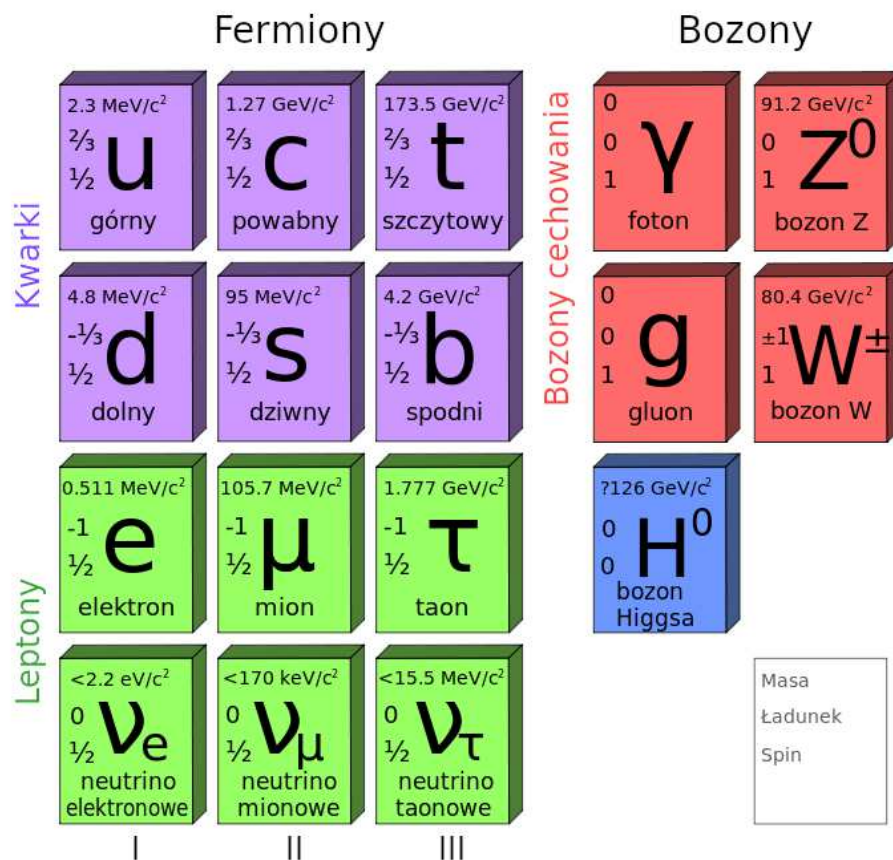
- Werner Karl Heisenberg 1901-1976 – mechanika macierzowa, zasada nieoznaczoności 1925, nagroda Nobla 1932
- Erwin Schrödinger 1887-1961 – Mechanika kwantowa, równanie falowe 1926, nagroda Nobla 1933
- Wolfgang Pauli 1900-1958 – struktura układów wielu cząstek, zasada Pauliego 1925, nagroda Nobla 1945
- Paul Adrien Maurice Dirac 1902-1984 – połączenie mechaniki kwantowej i teorii względności 1928, nagroda Nobla 1933
- John Stewart Bell 1928-1990 – nierówności Bella, Alain Aspect 1947 – doświadczalny dowód zupełności mechaniki kwantowej 1981
- Richard Philips Feynman 1918-1988, Julian Schwinger 1918-1994, Shinichiro Tomonaga 1906-1979 – Kwantowa teoria pola elektromagnetycznego 1948, nagroda Nobla 1965



- Enrico Fermi 1901-1954 – Sztuczna promieniotwórczość, teoria ciała stałego, statystyka identycznych cząstek 1934, nagroda Nobla 1938
- Hans Albrecht Bethe 1906 – źródła energii gwiazd, nukleosynteza, nagroda Nobla 1967.
- George Gamow 1904-1968 – wyjaśnienie mechanizmu rozpadu  $\alpha$ , wielki wybuch, przewidział promieniowanie reliktowe.
- Murray Gell-Mann (rodzice wyemigrowali z Czerniowców na Ukrainie) 1929 – Klasyfikacja cząstek elementarnych, model kwarkowy, chromodynamika kwantowa, nagroda Nobla 1969,
- Sheldon Lee Glashow (ojciec Ludwik Głuchowski z Bobrujska) 1932, Abdus Salam 1926-1996, Steven Weinberg 1933. Unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych, nagroda Nobla 1979
- Eric Allin Cornell 1961, Carl Edwin Wieman 1951, Wolfgang Ketterle 1957 – kondensacja Bosego-Einsteina 1995, nagroda Nobla 2001

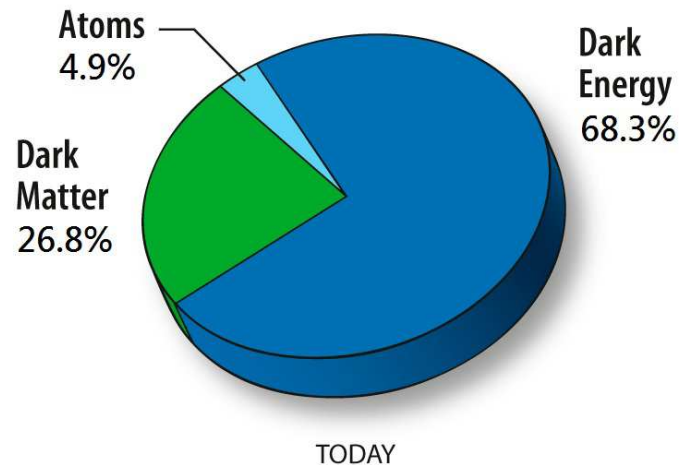


## CZĄSTKI ELEMENTARNE MODELU STANDARDOWEGO

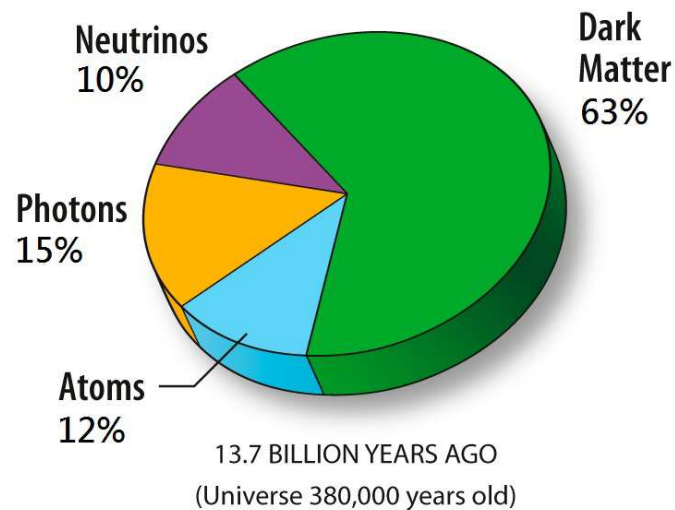


Cząstki elementarne, tzn. cząstki których struktura wewnętrzna nie jest znana: 12 fermionów (6 kwarków i 6 leptonów), 4 bozony cechowania przenoszące oddziaływania oraz bozon Higgsa, nadający masę cząstkom, z którymi oddziałuje (odkryty w CERN 14 marca 2013).

## RODZAJE MATERII WE WSZECHŚWIECIE



Szacunkowy skład materii i energii we wszechświecie dziś i gdy powstało obecne mikrofalowe promieniowanie tła, 380 000 lat po big bang.



Współczesny skład znanej materii:

swobodny wodór i hel - 4 %;

gwiazdy - 0.5 %;

atomy cięższe od helu - 0.03 %;

neutrino - 0.3 %.

## **ODLEGŁOŚCI WE WSZECHŚWIECIE (czas transmisji światła)**

- Wszechświat Ptolomeusza: 5 min
- Wszechświat Kopernika: 30 min
- Orbita Neptuna: 40 godzin
- Obłok Oorta: 1 rok
- Proxima Centauri: 4 lata
- Odległość od środka Galaktyki: 27 tysięcy lat
- Średnica Galaktyki: 100 tysięcy lat
- Średnica największej znanej galaktyki: 6 milionów lat
- Odległość do Mgławicy Andromedy: 2.5 miliona lat
- Rozmiary Wielkiej Ściany 1400 miliony lat
- Średnica Wszechświata: 93 miliardy lat



Wydaje się, że dopiero zaczynamy poznawać otaczający nas świat.