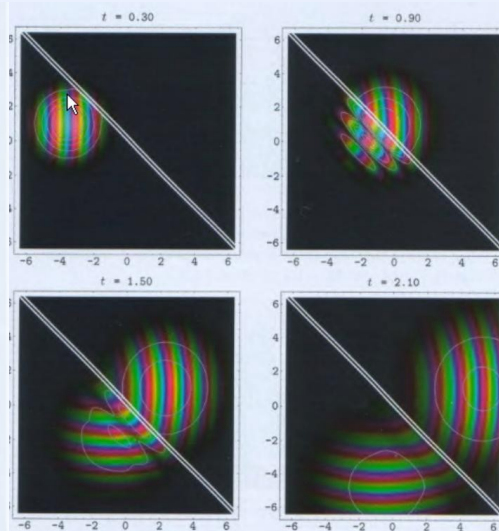
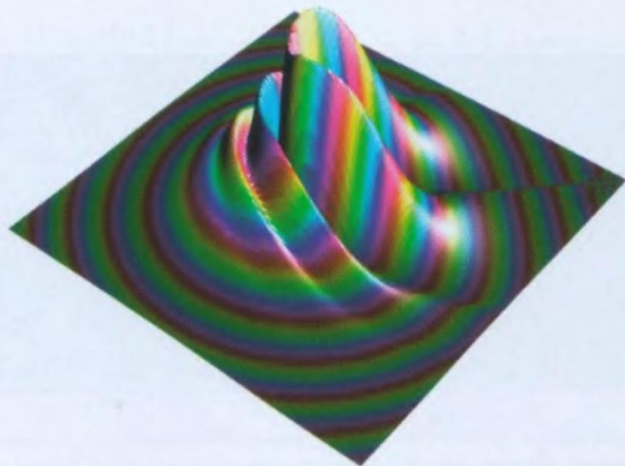


Mechanika Kwantowa

Mechanika Kwantowa



wykład 1

Fizyka klasyczna

- mechanika klasyczna – równania Newtona
- Elektrodynamika klasyczna – równania Maxwella
- Mechanika ośrodków ciągłych
- Fizyka statystyczna
- Hydrodynamika

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}\end{aligned}$$

JCM

www.justinmullins.com

Let There Be Light--Maxwell's Equations

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)

STARA TEORIA KWANTÓW

1. Max Planck (1858-1947) (1918),
2. Albert Einstein (1879-1955) (1921),
3. Nils Bohr (1885-1962) (1922),
4. Robert Millikan (1868-1953) (1923),
5. Arnold Sommerfeld (1868-1951),
6. Johannes Stark (1874-1957) (1919),
7. James Frank (1882-1964) (1925),
8. Gustav Hertz (1887-1975) (1925),
9. Philips Lenard (1862-1947) (1905).

NOWA TEORIA KWANTÓW

1. Edwin Schrödinger (1887-1961) (1933),
2. Werner Heisenberg (1901-1976) (1932),
3. Luis de Broglie (1900-1958) (1929),
4. Wolfgang Pauli (1902-1958) (1945),
5. Pascual Jordan (1902-1984),
6. Max Born (1883-1970) (1954),
7. Paul Dirac (1902-1986) (1933),
8. Enrico Fermi (1901-1954) (1938),
9. Artur Compton (1892-1962) (1927),
10. Otto Stern (1888-1969) (1943),
11. George Thomson (1892-1957)),
12. Clinton Davisson (1881-1958) (1937),
13. Lester Germer (1896-1971) (1937),
14. Satyendra Bose (1894-1974).

Rewolucja kwantowa



Louis Victor de Broglie
(1892 - 1987)



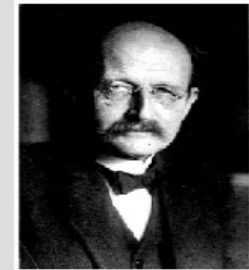
Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



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



Fragmenty korespondencji z tamtych czasów

Jeśli te przekłete przeskoki kwantowe rzeczywiście pozostaną w fizyce to nie mogę sobie wybaczyć, że w ogóle związałem się z teorią kwantów

Erwin Schrödinger

Zachowuję się jak struś, który chowa głowę w piasek względności, aby nie patrzeć w twarz wstrętnym kwantom

Albert Einstein

Jeżeli Bóg stworzył ten świat, z pewnością nie troszczył się o to, byśmy mogli go łatwo zrozumieć.

Albert Einstein

Bohr tłumaczył mi, gdzie nie miałem racji..Pamiętam, jak to się skończyło: trysnęły mi łzy z oczu i rozplakałem się, gdyż nie potrafiłem wytrzymać presji wywieranej przez Bohra.

Werner Heisenberg

Teoria kwantów przypomina niektóre zwycięstwa: śmiejemy się przez dwa miesiące, a potem płaczemy przez długie lata

Hendrik Kramers

Zaczelśmy dochodzić do stanu kompletnego wyczerpania i mieliśmy nerwy napięte do ostatnich granic.

Werner Heisenberg

Fizyka jest dla mnie za trudna i żałuję, że nie zostałem komikiem filmowym lub kimś w tym rodzaju, aby nigdy nie słyszeć więcej o fizyce

Wolfgang Pauli

Straciłem przekonanie, że moja praca naukowa prowadziła do obiektywnej prawdy, i nie wiem, po co żyłem: żałuję tylko, że nie umarłem pięć lat wcześniej, gdy jeszcze wszystko wydawało mi się jasne,

Antoon Lorentz

„Bóg nie gra w kości”.

Albert Einstein

„Przecież nie naszą rzeczą
jest pouczać Pana Boga, jak
powinien rządzić światem”

Niels Bohr

W 1963 roku w 36
lat po Kongresie
Solvayowskim
W. Heisenberg o
roli dyskusji Bobra
z Einsteinem:

a później:

„Odpowiedziałem, że już starożytni myśliciele podkreślali konieczność wielkiej ostrożności w przypisywaniu Opatrzności atrybutów wyrażonych w języku codziennego doświadczenia”

Wicie, dziś mógłbym wyrazić sens ówczesnej przemiany w terminach z dziedziny sądownictwa: „Ciężar dowodów przeszedł na drugą stronę”. Ciężar ten przeszedł na ludzi w rodzaju Wilhelma Wiena, albowiem rozpowszechniła się wieść, że istnieje cała grupa uczonych, którzy potrafią odpowiedzieć na każde pytanie postawione przez eksperyment. I jeśli chce się przedstawić coś niezgodnego z ich poglądami, to trzeba znaleźć argumenty. Wieść głosiła jednak, że do tej pory nikomu, nawet Einsteinowi, nie udało się obalić ich punktu widzenia... Rozniosło się, że Einstein nie potrafił tego uczynić w czasie przeciągającego się kongresu w Brukseli... Zwolennicy Kopenhagi uzyskali prawo by powiedzieć młodszemu pokoleniu: „**Teraz wszystko już w porządku, idźcie dalej**”

Kiedyś dziennikarze wymyślili, że tylko dwunastu ludzi na świecie rozumie teorię względności. Nie wierze w tę ich rewelacje. Natomiast kiedyś było tak, że znał ja 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

Niels Bohr twórca teorii kwantów: Jeżeli ktoś nie traci czasami gruntu pod nogami, myśląc o mechanice kwantowej, oznacza to iż jej tak naprawdę nie rozumiał.

Rozmowa Diraca z reporterem
‘Wisconsin State Journal’, 1929



Reporter: A więc doktorze, czy zechciałby pan powiedzieć w kilku słowach całą prawdę o swoich badaniach?

Dirac: Nie.

Reporter: Czy będzie w porządku, jeśli ujmę to w sposób: „Profesor Dirac rozwiązuje wszystkie problemy fizyki matematycznej, ale nie potrafi znaleźć lepszego sposobu obliczenia statystyk baseballu”?

Dirac: Tak.

Reporter: Co najlepiej lubi pan w Ameryce?

Dirac: Ziemniaki.

Kłopoty Fizyki Klasycznej (dynamika Newtona, Równania Maxwella, Siła Lorentza)

Kirchhoff, Bunsen (1858)

Widma pierwiastków

Mendelejew (1869)

Układ okresowy

Balmer (1885), Rydberg (1890)

$$\lambda = 3696 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

Röntgen (1895)

Promienie X

Zeeman (1896), Lorentz (1897), Preston (1897)

Normalny i anomalny efekt Zeemana

Hertz (1887), Lenard (1899)

Efekt fotoelektryczny

Kirchhoff (1859), Wien (1896)

Promieniowanie ogrzanych ciał

Becquerell (1896), Piotr i Maria Curie

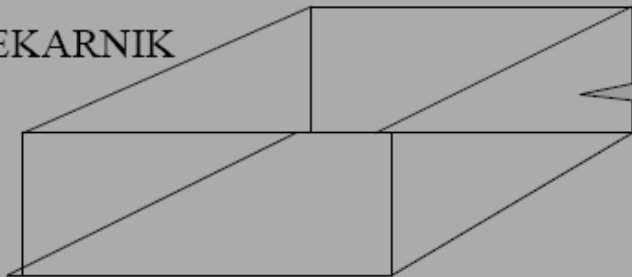
Promieniowanie β

Joseph, John Thomson (1896)

Promieniowanie katodowe

Zaczęło się na przełomie XIX i XX wieku:

PIEKARNIK



Pod koniec XIX wieku fizycy obliczyli całkowitą energię, którą zawiera promieniowanie elektromagnetyczne znajdujące się wewnątrz piekarnika nagrzanego do danej temperatury.

Odpowiedź: dla dowolnej temperatury całkowita energia zawarta w piekarniku jest nieskończona

Planck wpadł na pomysł: Energia niesiona przez falę elektromagnetyczną występuje w porcjach, te porcje zależą od częstotliwości fali. Jeżeli oznaczymy częstość jako ν , to energia takiej fali przyjmuje postać:

1900
rok

$$E = \nu h = \omega \hbar; \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

$h = 6.62606876 \times 10^{-34}$ Joul sek

h - Stała Plancka

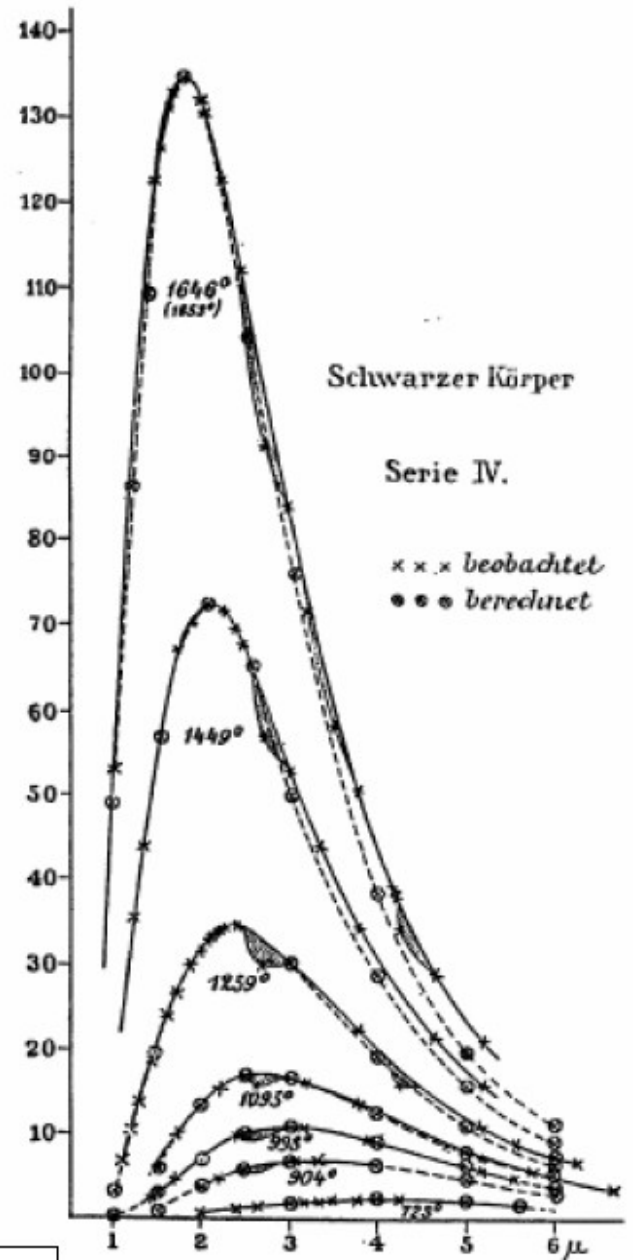


Otto Lummer



Ernst Pringsheim

Pierwsze dokładne pomiary promieniowania ciała czarnego dla dużych długości fali (1899)



Korzystam ze slajdów przygotowanych przez Andrzeja Wróblewski w jego wykładzie „Historia fizyki” <http://info.fuw.edu.pl/~akw/historia.html>

Kirchhoff (1859), Energia wypromieniowana z ogrzanego ciała zależy tylko od temperatury i częstości promieniowania, postawił pytanie jak wygląda $E(T, \nu)$,

Stefan (1879), Boltzman (1884), eksperymentalnie i teoretycznie pokazali, że $E \sim T^4$,

Wien(1896), znalazł związek $\rho_T(\nu) = \alpha \nu^3 \exp[-\beta \frac{\nu}{T}]$

Lummer, Pringsheim (1899), prawo Wiena nie zgadza się dla $\nu \rightarrow \infty$

Rayleigh, Jeans (czerwiec, 1900), Korzystając z elektrodynamiki Maxwella wyprowadzili wzór na gęstość promieniowania ciała doskonale czarnego:

Liczba dozwolonych wartości częstości dla $(\nu, \nu + d\nu)$:

$$N(\nu) d\nu = \frac{8\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu$$

Zasada ekwipartycji energii:

$$E = k T$$

stąd

$$\rho_T(\nu) = \frac{N(\nu)}{V} E = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$$

Parametryzacje $e(\lambda, T)$ ciała czarnego

Wien 1896

Rayleigh 1900

Lummer, Pringsheim 1900

Lummer, Jahnke 1900

Thiesen 1900

Planck 19 X 1900

Planck 14 XII 1900

$$a\lambda^{-5} \exp(-b/\lambda T)$$

$$aT\lambda^{-4} \exp(-b/\lambda T)$$

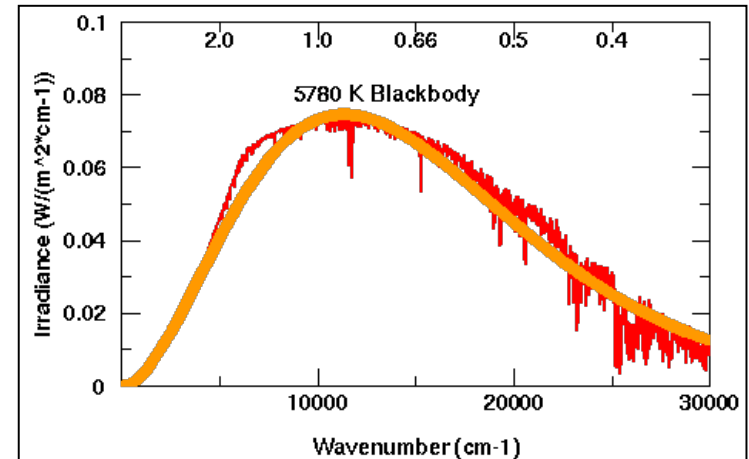
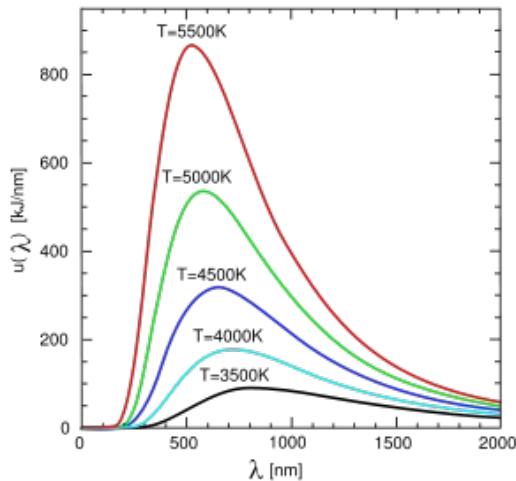
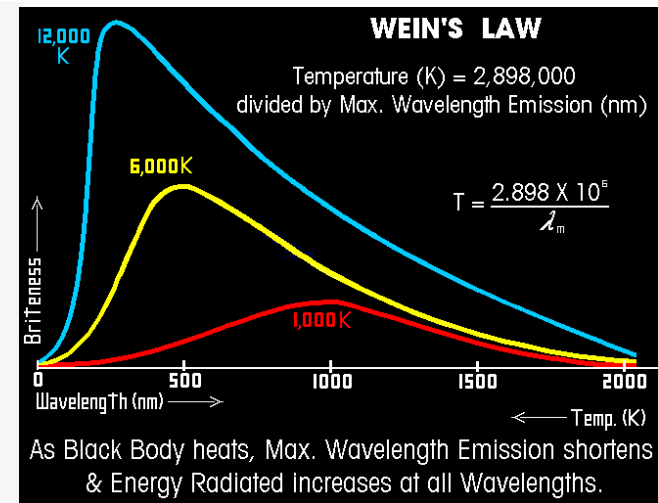
$$aT\lambda^{-4} \exp(-b/(\lambda T)^{1.25})$$

$$a\lambda^{-5} \exp(-b/(\lambda T)^{0.9})$$

$$aT^{0.5}\lambda^{-4.5} \exp(-b/\lambda T)$$

$$a\lambda^{-5} \left(\frac{1}{\exp(b/k\lambda T) - 1} \right)$$

$$8\pi hc \lambda^{-5} \left(\frac{1}{\exp(hc/k\lambda T) - 1} \right)$$



PLANCK:

Fenomenologia: $\rho_T(\nu) = \alpha \nu^3 \frac{1}{(\exp[\frac{h\nu}{kT}] - 1)}$

Teoria klasyczna: $\rho_T(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT;$

$$\frac{\alpha \nu}{(\exp[\frac{\beta \nu}{kT}] - 1)} \Leftrightarrow \frac{8\pi}{c^3} kT$$

W granicy $\nu \rightarrow 0$:

$$\alpha T / \beta \rightarrow 8\pi kT / c^3;$$

zupełnie źle dla $\nu \rightarrow \infty$.

Planck zrezygnował z zasady ekwipartycji energii, zamiast tego przyjął:

$$\Delta E = h\nu,$$

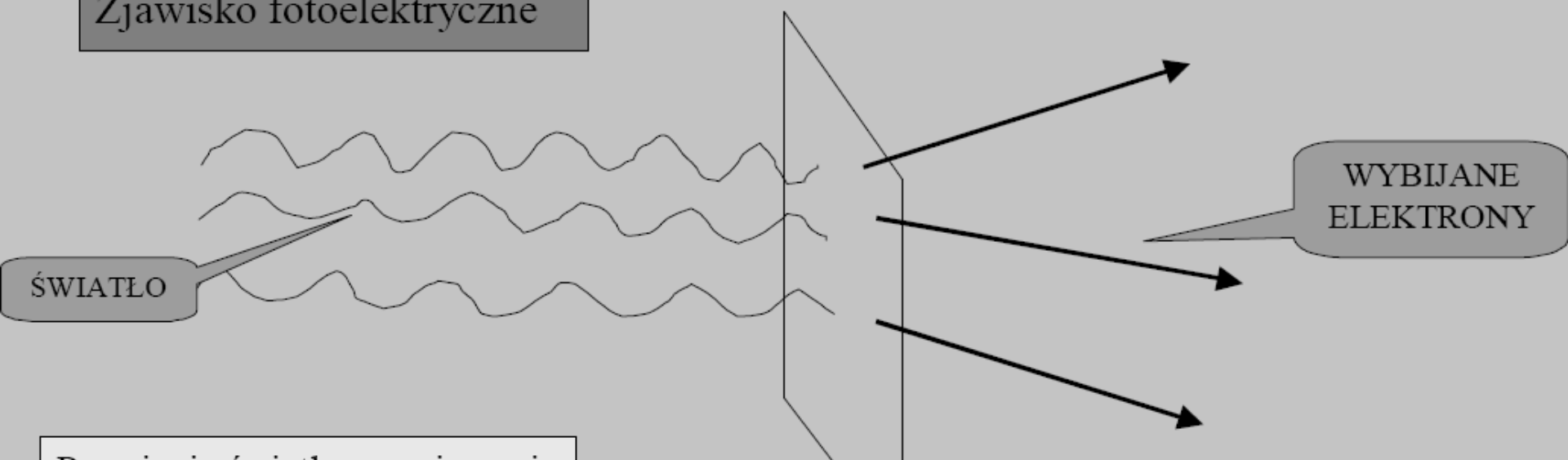
i otrzymał wzór na gęstość energii:

$$\rho_T(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{(\exp[\frac{h\nu}{kT}] - 1)}$$

Wyznaczył wartość stałych h i k .

A. Einstein znalazł wyjaśnienie w 1905 r.

Zjawisko fotoelektryczne



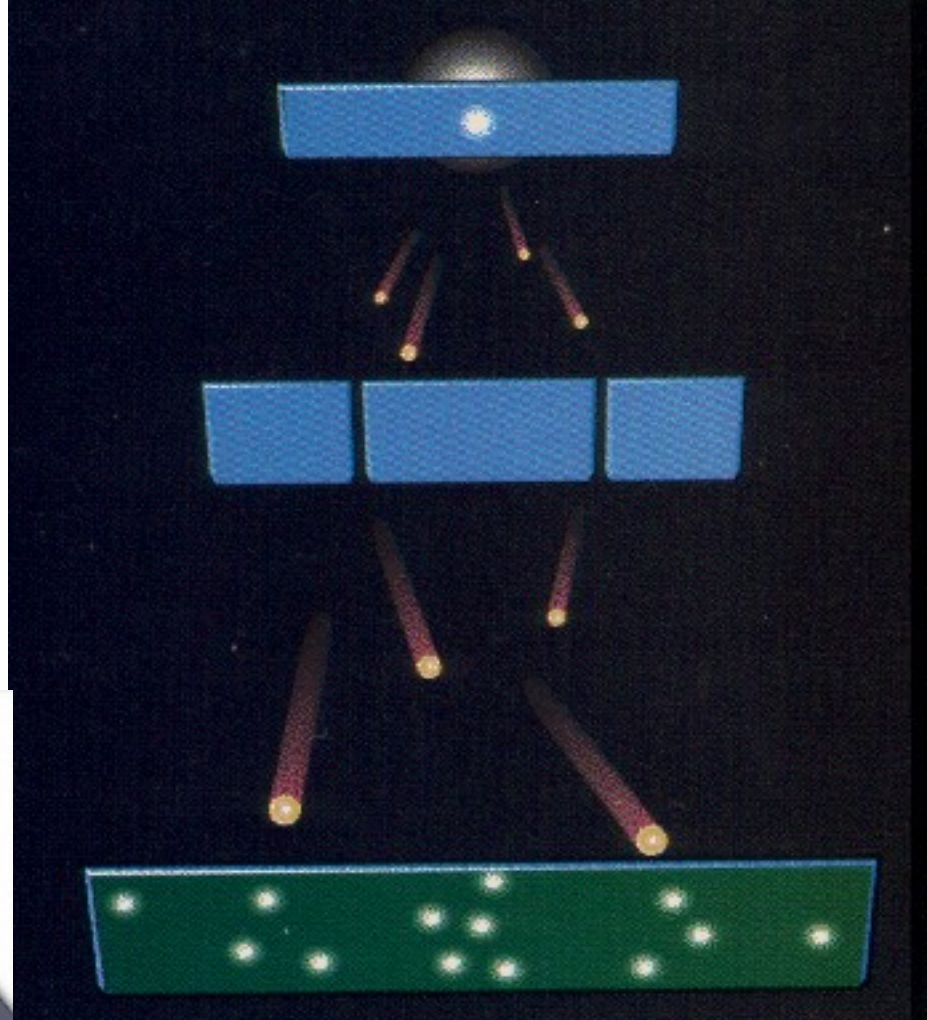
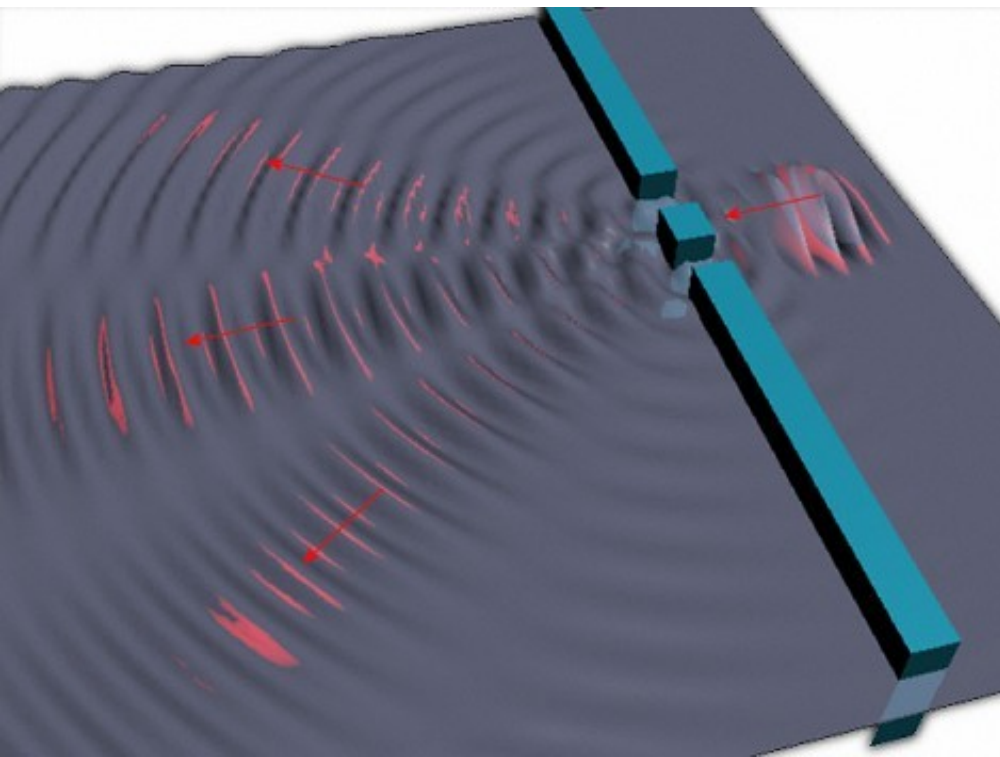
Promienia świetlne powinno się uważać za strumień małych cząstek, które nazwano **FOTONAMI** (chemik - Gilbert Lewis).
(Żarówka wysyła w ciągu 1 seksto miliardów miliardów fotonów).

- Energia wybijanych elektronów nie zależy od natężenia fali elektromagnetycznej, zależy natomiast od częstości padającego światła,
- Liczba wybijanych elektronów zależy od natężenia fali elektromagnetycznej

Ślad Plancka – energia każdego fotonu jest proporcjonalna do częstości fali:

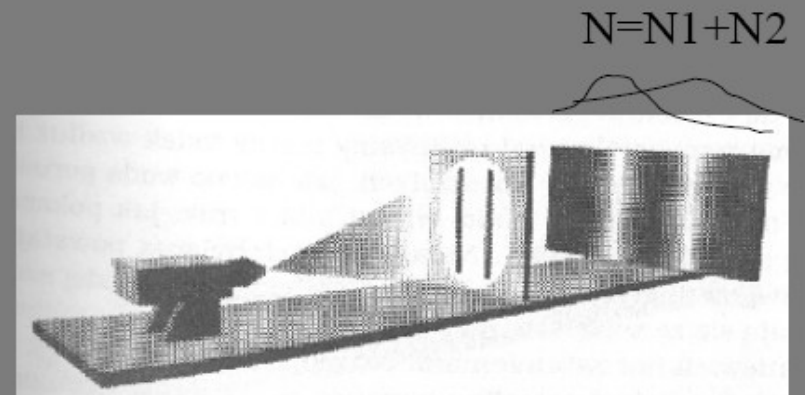
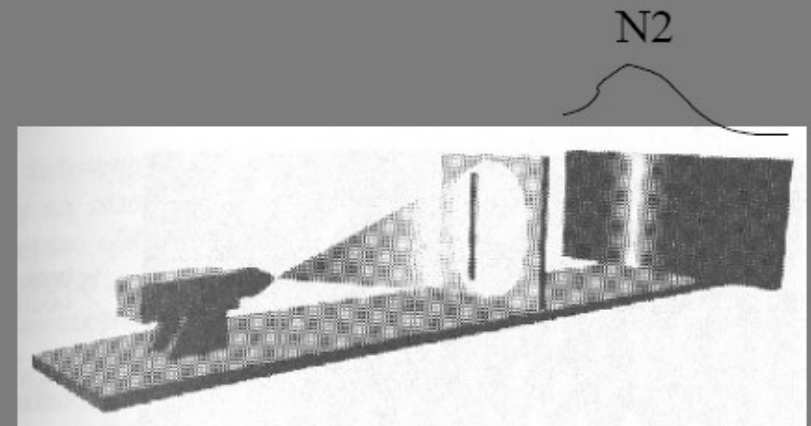
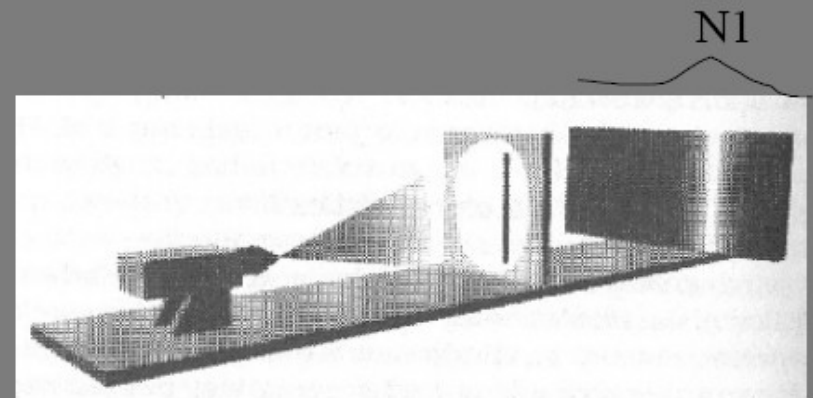
$$E = \hbar \omega$$

Eksperyment z dwoma szczelinami



Zaczynamy od pocisków

- Do detektora dociera jedna porcja,
- Pocisk trafia w jedno miejsce a nigdy w dwa równocześnie,
- Liczba pocisków, gdy obie szczeliny są otwarta, jest równa sumie pocisków przelatujących przez szczelinę **1** gdy **2** jest zamknięta i przez szczelinę **2** gdy **1** jest zamknięta.



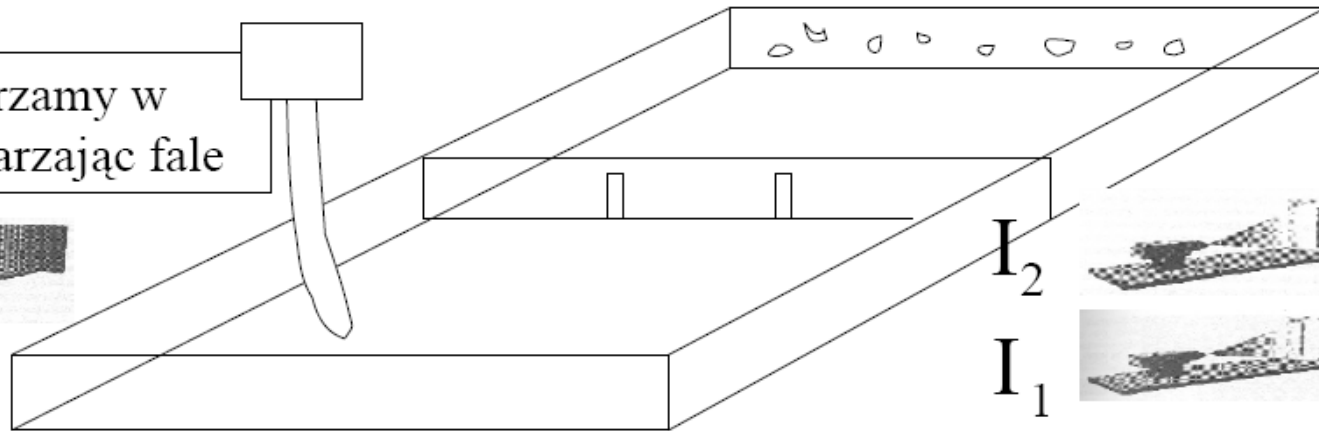
A teraz fale na wodzie

korki na wodzie

Palcem uderzamy w wodę wytwarzając fale

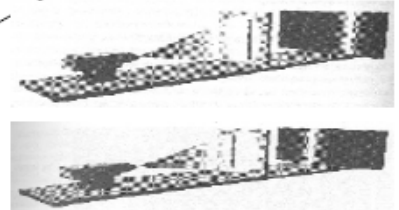


I_{12}

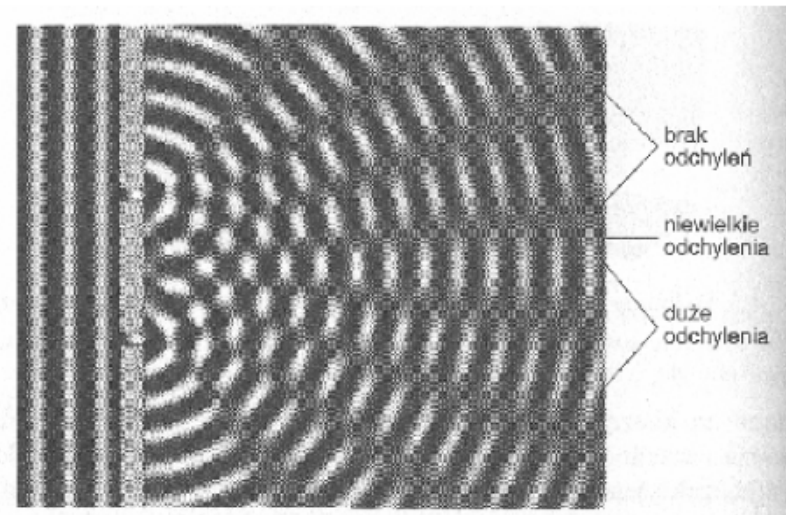


I_2

I_1



- Mierzmy natężenie fali poprzez ruch korka na wodzie,
- Fale mają grzbiety i doliny, które mogą się wzajemnie wzmacniać lub osłabiać,
- Wskutek interferencji fal pojawiają się maksima i minima,
- Natężenie jest proporcjonalne do kwadratu wysokości fali.



$$h_{12} = h_1 + h_2, \quad I_{12} = (h_1 + h_2)^2,$$

$$I_1 = (h_1)^2, \quad I_2 = (h_2)^2,$$

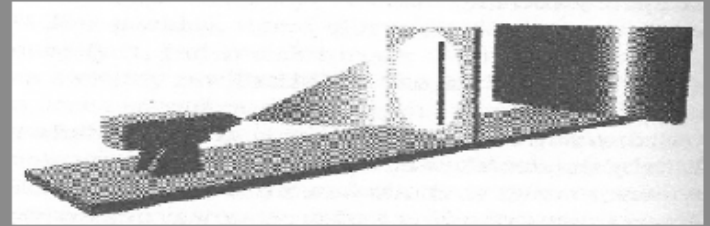
Interferencja

$$I_{12} \neq I_1 + I_2$$

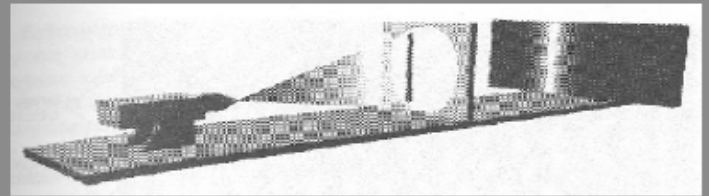
Przez szczelinę przechodzą elektrony

- Elektrony, tak jak pociski, przychodzą do detektora pojedynczo,
- Elektron, jak klasyczny pocisk, pada w jedno miejsce na ekranie, czyli detektory rejestrują wielkości w postaci skupionej, mające określone rozmiary i docierające do określonego miejsca,
- Zmniejszając natężenie wiązki mniej elektronów będzie dolatywać do detektora, ale zawsze będą to pojedyncze elektrony,
- Są miejsca, do których przy otwarciu jednej szczeliny dociera dużo elektronów, a po otwarciu obydwu szczelin nie dociera prawie nic,
- Po otwarciu dwóch szczelin elektrony docierają w całości, jak pociski, ale prawdopodobieństwo ich rejestracji jest określone takim wzorem jak natężenia fal.

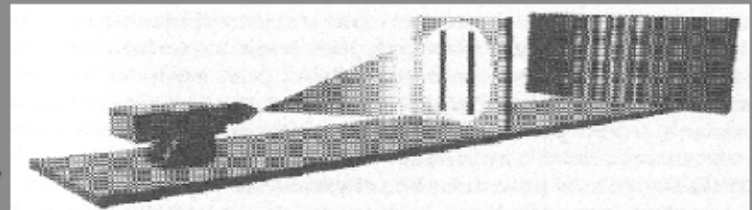
N_1



N_2



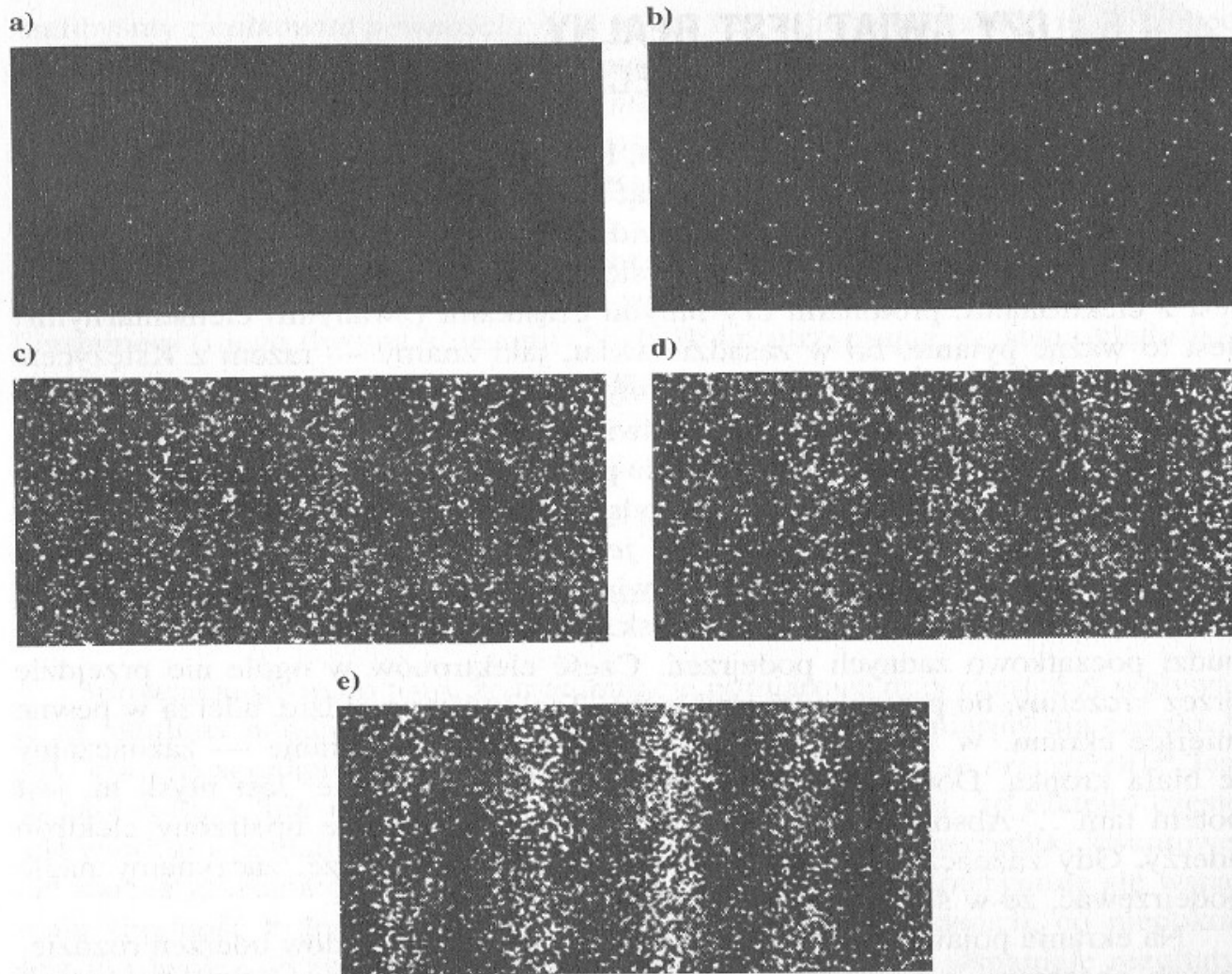
N_{12}



$$N_{12} \neq N_1 + N_2$$

$$a_{12} = a_1 + a_2; \quad N_{12} = (a_{12})^2;$$

$$N_1 = (a_1)^2; \quad N_2 = (a_2)^2;$$



Rys. 1.7. Oryginalny obraz interferencji elektronu wykonany przez Akirę Tonomurę [*Am. J. Physics*, **57** (1989) 117] na dwóch szczelinach. a) 10 elektronów; b) 100 elektronów; c) 3000 elektronów — już można coś podejrzewać; d) 20000 elektronów — nie ma wątpliwości, że będziemy mieć jakąś niespodziankę; e) 70000 elektronów — jest! Wniosek: jest tylko jedna możliwość — każdy z elektronów przechodził równocześnie przez dwie szczeliny (wg J. Gribbin, „Encyklopedia fizyki

Czy prawdziwe jest twierdzenie?:

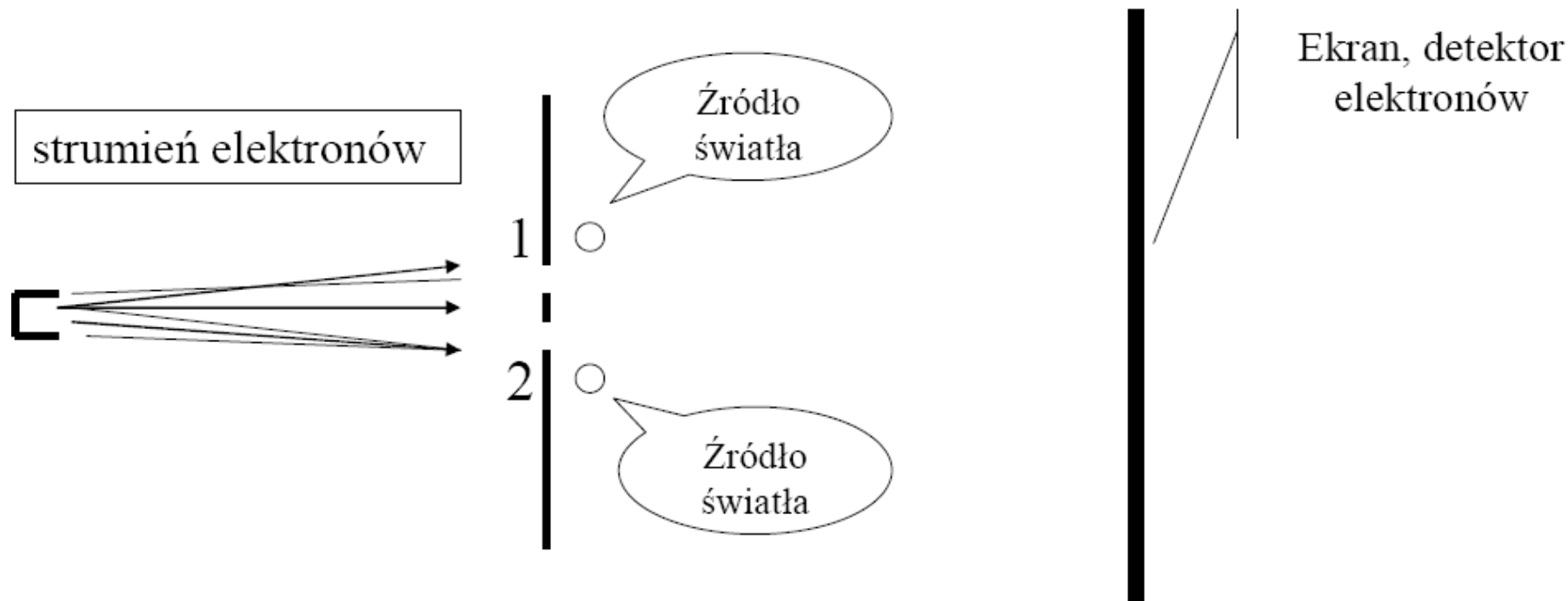
„Elektrony przelatują albo przez szczelinę nr 1, albo przez szczelinę nr 2”

Nie takie twierdzenie nie jest prawdziwe. Bo gdyby było, to po otwarciu dwóch szczelin rozkład elektronów musiałby być równa sumie rozkładów pojawiających się po otwarciu szczeliny nr 1 oraz szczeliny nr 2.

Możemy sprawdzić eksperymentalnie, czy

- elektron przelatuje przez jedną lub drugą szczelinę ,
- może się rozdwaja i krąży przez obie,
- może jeszcze robi coś innego.

W tym celu wystarczy abyśmy obserwowali elektrony przechodzące przez szczeliny!



- Gdy wiązka fotonów jest dostatecznie jasna, możemy zobaczyć przelatujące elektrony,
- Widzimy, że gdy detektor rejestruje elektron widzimy błysk światła przy jednej ze szczelin \implies elektron przelatuje w całości przez jedną ze szczelin \implies mamy **PARADOKS**,
- Gdy szczelina **2** jest zamknięta, widzę elektrony przy **1**, \implies rozkład na ekranie: N_1 i odwrotnie gdy zamkniemy szczelinę **2**,
- Gdy rejestrujemy elektrony przy przy obydwu otwartych szczelinach, rozkład jest sumą N_1+N_2 , brak interferencji.

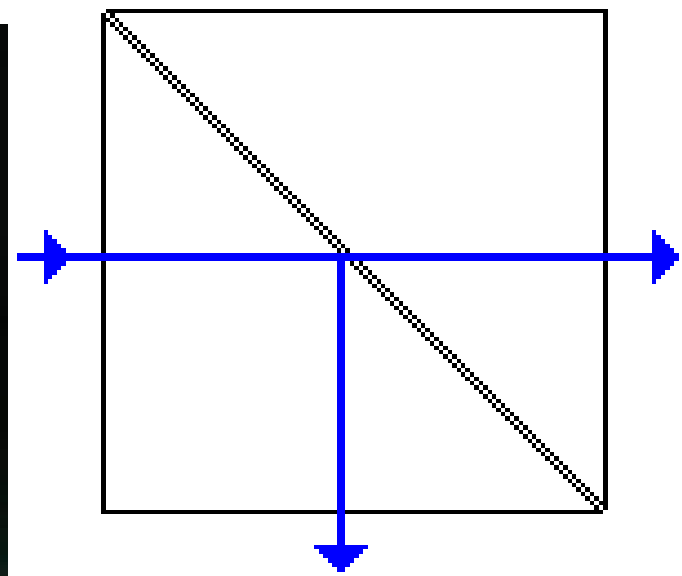
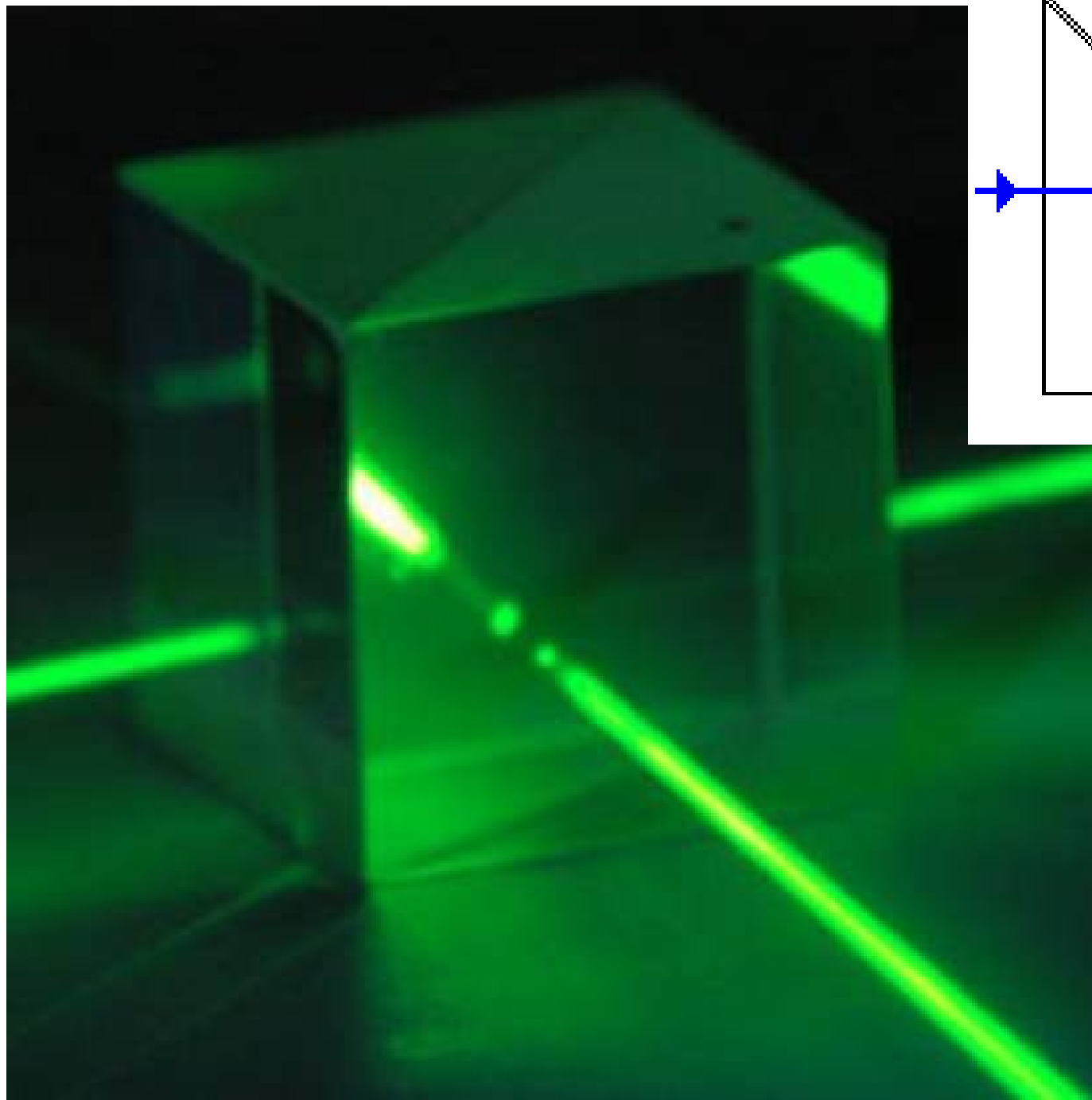
Do tej pory światło było traktowane jako fala elektromagnetyczna, typowe zjawiska były obserwowane: **dyfrakcja i interferencja**

- ❖ Einstein – fala elektromagnetyczna to strumień fotonów (1905),
- ❖ Potwierdzenie doświadczalne – rozpraszanie fali elektromagnetycznej na elektronach Compton (1922).

W 1923 roku Louis de Broglie -----
-----dualizm dotyczy wszystkich cząstek, także posiadających masę różną od zera.

DUALIZM
KORPUSKULARNO
-- FALOWY

- Cząstkowy i falowy aspekt światła są nierozłączne,
- Mogę podać jedynie prawdopodobieństwo lokalizacji fotonów,
- Identyczne fotony mogą się w różny sposób zachowywać .



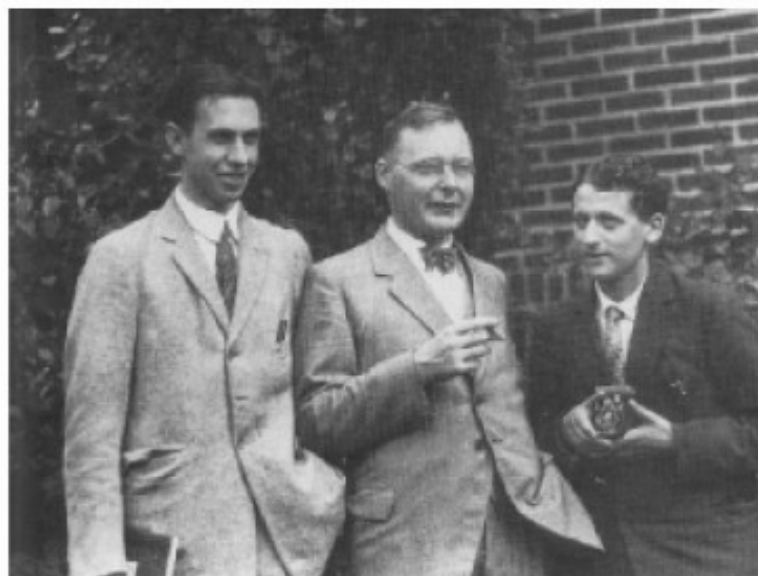
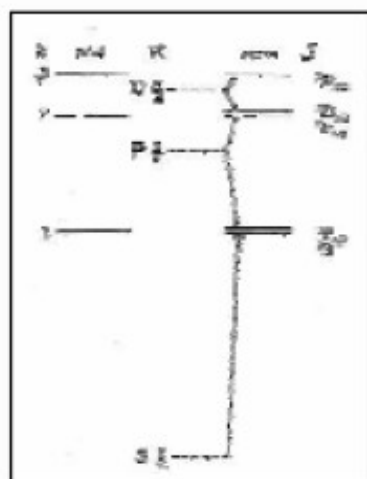
Heisenberg w liście do Pauliego (9 VII 1925 r.)



”Jestem przekonany, że wyjaśnianie wzoru Rydberga [np. dla wodoru] przez odwoływanie się do orbit kołowych i eliptycznych (zgodnie z *klasyczną* geometrią), nie ma najmniejszego sensu fizycznego. Poświęcam cały mój rozpaczliwy wysiłek w celu całkowitego zniszczenia pojęcia orbity - której i tak nie można zaobserwować - i zastąpienia go przez bardziej odpowiednie pojęcie.”



Spinning Electrons and the Structure of Spectra, *Nature*, **117**, 264 (1926)



George Uhlenbeck, Hendrik Kramers
i Samuel Goudsmit

”Jesteście obaj dostatecznie młodzi, aby sobie pozwolić na taką głupotę”
- *Ehrenfest do Uhlenbecka i Goudsmita*



Schrödinger
o mechanice macierzowej
Heisenberga (1926)

”Moja teoria była inspirowana przez L. de Broglie’a i przez krótkie, ale nieskończenie dalekowzroczone 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*).”