

Uniwersytet Warszawski

Interdyscyplinarny makrokierunek
Wydziału Fizyki i Wydziału Chemii Uniwersytetu
Warszawskiego

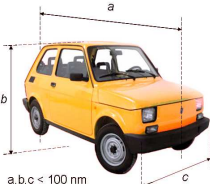
**Inżynieria
nanostruktur**

FIZYKA + CHEMIA

od października 2009

<http://nano.fuw.edu.pl>






Fizyka kwantowa dla początkujących

1. Trochę historii
2. Świat klasyczny i kwantowy

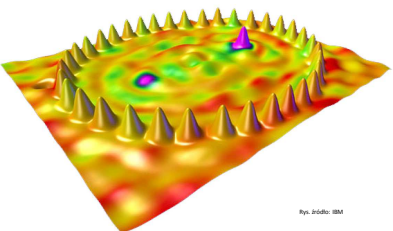
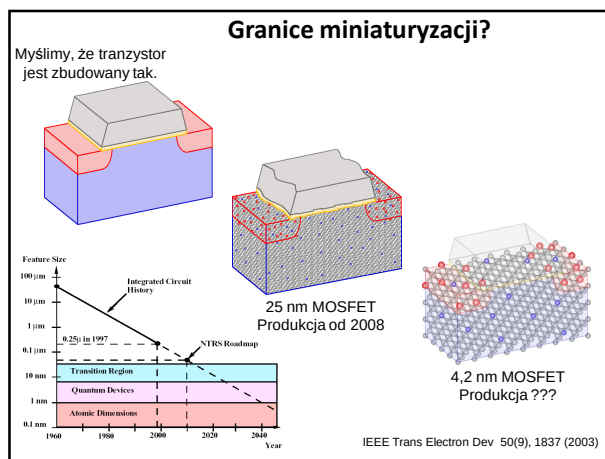
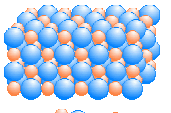


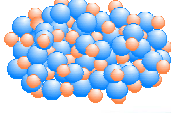
Fig. 10.10.10.1



Czy dwa półprzewodniki dadzą cały przewodnik?

Kryształ



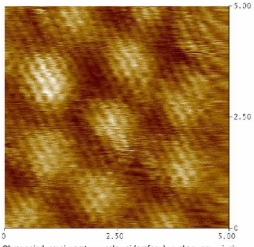
Ciało amorficzne

Kwantowy świat nanotechnologii

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl
<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT>

Wydział Fizyki

- Nanotechnologia na co dzień
- Trendy
- Kwanty
- CO?
- JAK?
- Studnie, druty, kropki
- Top-down, czyli (nano)technologia
- Bottom-up, czyli samoorganizacja
- Nano+bio



Obraz pojedynczej warstwy węglowej (grafenu) uzyskany przy użyciu mikroskopu tunelowego (STM) w Instytucie Fizyki Doświadczalnej UW. Jasne plamki: pojedyncze atomy węgla.

Nanotechnologie i struktury niskowymiarowe



inżynieria
nanostruktur



Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl
http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/NT

Spintronika



Photograph by Felice Fradette

© 2001 Harvard/Corporate Science All rights reserved

National Geographic magazine, November 2001



Kwantowa kryptografia i teleportacja. Splątanie kwantowe

- a. Poplątane stany.
 - i. Eksperyment EPR.
 - ii. Eksperyment Bella
- b. Star-Trec, czyli teleportujcie mnie!
 - i. Co właściwie teleportujemy
 - ii. Ile kosztuje ubezpieczenie
- c. Kryptografia kwantowa
 - i. Czy są szyfry nie do złamania
 - ii. Klucze duże i małe
 - iii. Alice i Bob w świecie kwantów
 - iv. Ewa chce posłuchać



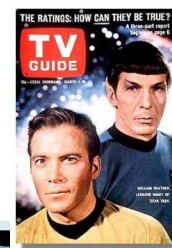
*Dialog z przyrodą musi być prowadzony w
języku matematyki, w przeciwnym razie
przyroda nie odpowiada na nasze pytania.*

Michał Heller

Kwantowa kryptografia i teleportacja. Splątanie kwantowe

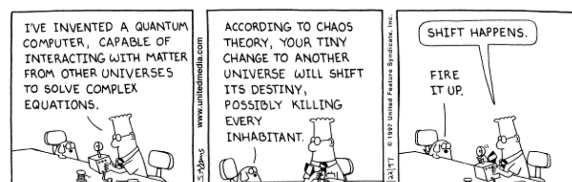
Jacek Szczytko, Wydział Fizyki UW

- a. Poplątane stany.
 - i. Eksperyment EPR.
 - ii. Eksperyment Bella
- b. Star-Trec, czyli teleportujcie mnie!
 - i. Co właściwie teleportujemy
 - ii. Ile kosztuje ubezpieczenie
- c. Kryptografia kwantowa
 - i. Czy są szyfry nie do złamania
 - ii. Klucze duże i małe
 - iii. Alice i Bob w świecie kwantów
 - iv. Ewa chce posłuchać



Quantum Computer I (QC)

1. Komputery kwantowe
 - a. Logika bramek
 - b. Kwantowe algorytmy
 - c. Jak zbudować taki komputer?



Copyright © 1997 United Feature Syndicate, Inc.
Redistribution in whole or in part prohibited

Quantum Computer II (QC)

1. Komputery kwantowe
 - a. Logika bramek
 - b. Kwantowe algorytmy
 - c. Jak zbudować taki komputer?

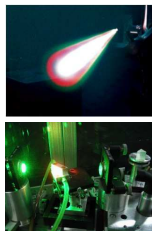
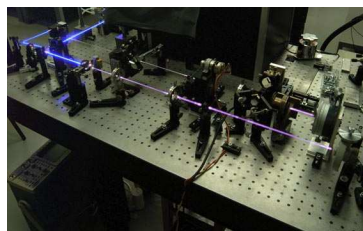
HARDWARE



Świat Nauki 08.1998



Dr Piotr Wasylczyk
Nieliniowo, adaptacyjnie
i femtosekundowo,
czyli ekstremalnie w optyce.



W smutnym kolorze blue



Juliette Binoche

Optoelektronika

Kryształy fotoniczne

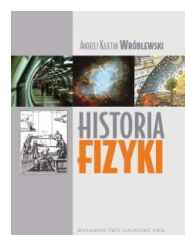


źródło: www.azanta.pl 17-11-2005

Historia Fizyki

Elementy historii nauki i rozwoju fizyki

Prof. dr hab Andrzej Kajetan Wróblewski



Historia fizyki. Od czasów najdawniejszych do współczesności
Wydawnictwo Naukowe PWN

Matematyka i przyroda?

Metoda naukowa:

*Dialog z przyrodą musi być
prowadzony w języku matematyki,
w przeciwnym razie przyroda nie
odpowiada na nasze pytania.*

prof. Michał Heller

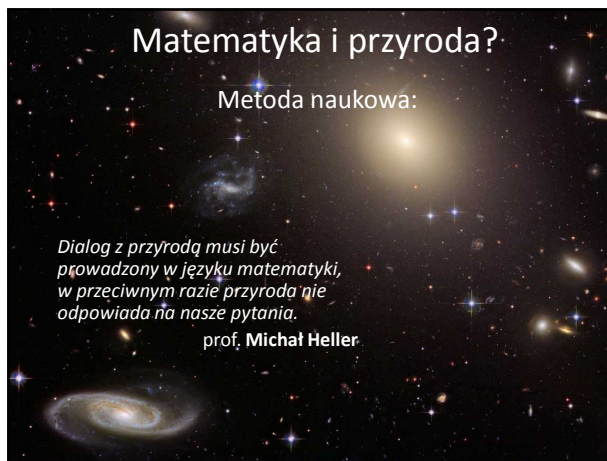


Matematyka i przyroda?

Metoda naukowa:

*Dialog z przyrodą musi być
prowadzony w języku matematyki,
w przeciwnym razie przyroda nie
odpowiada na nasze pytania.*

prof. Michał Heller



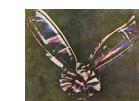
Trochę historii



Sir Isaac Newton (4 January 1643 – 31 March 1727)



Michael Faraday, FRS (September 22, 1791 – August 25, 1867)



James Clerk Maxwell (13 June 1831 – 5 November 1879)

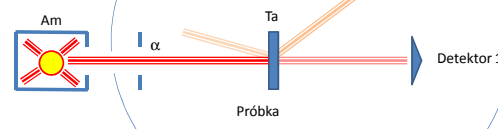
<http://www.personal.umich.edu/~paul/money.htm>

Trochę historii

- XIX w: materia ma budowę ziarnistą, energia (gł. fale e-m) ma charakter falowy



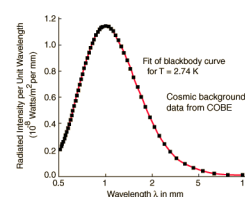
Sir Ernest Rutherford (1871-1937)



Trochę historii

- XIX w: materia ma budowę ziarnistą, energia (gł. fale e-m) ma charakter falowy

- Nierozwiązane problemy:
 - Promieniowanie ciała doskonale czarnego
 - Efekt fotoelektryczny
 - Linie widmowe atomów

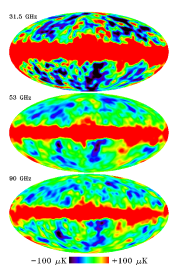


Materia i fale

Trochę historii

- XIX w: materia ma budowę ziarnistą, energia (gł. fale e-m) ma charakter falowy

- Nierozwiązane problemy:
 - Promieniowanie ciała doskonale czarnego
 - Efekt fotoelektryczny
 - Linie widmowe atomów



Pokazy

Trochę historii



Albert Einstein, 5 Israeli Lira (1968)



Erwin Schrödinger, 1000 Austrian Schilling (1983)



Niels Bohr, 500 Danish Kroner



Lord Ernest Rutherford, 100 New Zealand Dollars

<http://www-personal.umich.edu/~jbaurj/money1.htm>

Trochę historii

- XIX w: materia ma budowę ziarnistą, energia (gł. fale e-m) ma charakter falowy
- XX w: materia ma (również) charakter falowy, energia ma (również) charakter ziarnisty (korpuskularny)

Trochę historii

XX w: energia ma (również) charakter ziarnisty (korpuskularny)

• Rozwiązane problemy:

- Promieniowanie ciała doskonale czarnego (Planck 1900, Nobel 1918)
- Efekt fotoelektryczny (Einstein 1905, Nobel 1922)
- Linie widmowe atomów (Bohr 1913, Nobel 1922)

- Fotony – energia: $E = h \nu$ ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$)
- pęd: $p = E/c = h/\lambda$

$$\lambda = h/p$$



Count Dooku's Geonosian solar sailer

Trochę historii

XX w: materia ma (również) charakter falowy

Fale materii – De Broglie 1924 (Nobel 1929), doświadczenia G.P. Thomsona L.H. Germera i C.J. Davissona (Nobel 1937)

$$\lambda = h/p$$

klasycznie



kwantowo



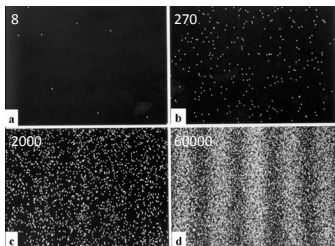
<http://www.colorado.edu/physics/2000/schrodinger/two-slit3.html>

Trochę historii

XX w: materia ma (również) charakter falowy

Fale materii – De Broglie 1924 (Nobel 1929), doświadczenia G.P. Thomsona L.H. Germera i C.J. Davissona (Nobel 1937)

$$\lambda = h/p$$



Single-electron events build up over a 20 minute exposure to form an interference pattern in this double-slit experiment by Akira Tonomura and co-workers. (a) 8 electrons; (b) 270 electrons; (c) 2000 electrons; (d) 60,000. A video of this experiment will soon be available on the web www.hqrd.hitachi.co.jp/etm/doubleslit.html.

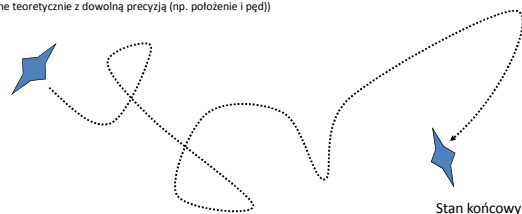
www.hqrd.hitachi.co.jp

Dyfrakcja

Świat klasyczny i kwantowy

Mechanika klasyczna:

Warunki początkowe
(znane teoretycznie z dowolną precyzją (np. położenie i pęd))



Ewolucja (w tzw. przestrzeni stanów)
(Lagranżjan, Hamiltonian)

Świat klasyczny i kwantowy

Mechanika klasyczna:

Warunki początkowe
(znane teoretycznie z dowolną precyzją (np. położenie i pęd))

$$\vec{r}(t=0) = [x_0, y_0, z_0]$$

$$\vec{v} = [v_x, 0, v_z]$$

$$\vec{r}(t) = \left[x_0 + v_x t, y_0, z_0 + v_z t - \frac{gt^2}{2} \right]$$



Ewolucja (w tzw. przestrzeni stanów)
(Lagranżjan, Hamiltonian)

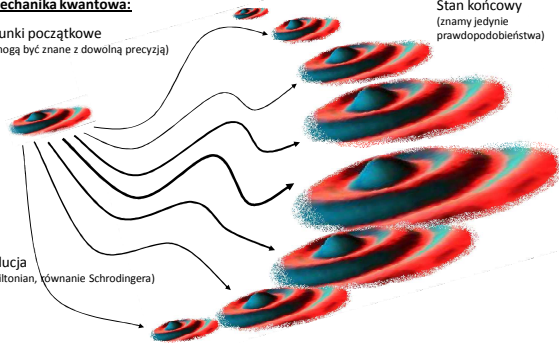


Stan końcowy

Świat klasyczny i kwantowy

Mechanika kwantowa:

Warunki początkowe
(nie mogą być znane z dowolną precyzją)



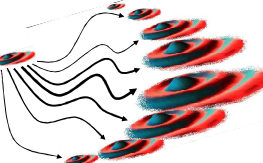
Ewolucja
(Hamiltonian, równanie Schrodingera)

Świat klasyczny i kwantowy

Stan cząstki musi być określony w CAŁEJ przestrzeni
→ FUNKCJA FALOWA

$$\Psi_n(\vec{r}, t)$$

n – liczby kwantowe



Uwaga 1: funkcję falową określają m.in. LICZBY KWANTOWE:

Uwaga 2: funkcja falowa jest określona w całej przestrzeni, w tym sensie jej ewolucja opisuje wszystkie możliwe historie cząstki:

Uwaga 3: liniowa kombinacja funkcji falowych też jest funkcją falową (zasada superpozycji)

Uwaga 4: ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA. Jednak w momencie pomiaru „dowiadujemy” się w jakim stanie jest funkcja (tzw. redukcja f. falowej)

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓŻNIALNE

przestrzeń wektorowa f. falowych (Hilberta), operatory, funkcje i wartości własne, reprezentacje itp.

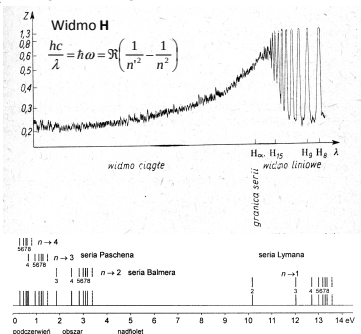
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 1: funkcję falową określają m.in. LICZBY KWANTOWE:

$$\Psi_n(\vec{r}, t)$$

n – liczby kwantowe np.:

Przykłady „kwantów”
masa, ładunek, energia („poziomy energetyczne” w atomie, w kryształach), moment pędu (orbitalny, spinowy), rzut momentu pędu, minimalne natężenie światła o danej energii
 $E = h \nu$, polaryzacja światła, itp...

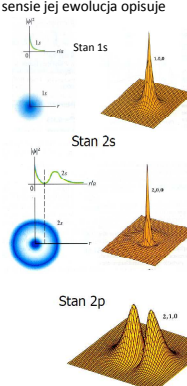
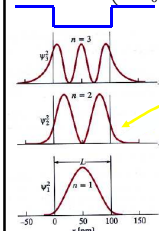


Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 2: funkcja falowa jest określona w całej przestrzeni, w tym sensie jej ewolucja opisuje wszystkie możliwe historie cząstki:

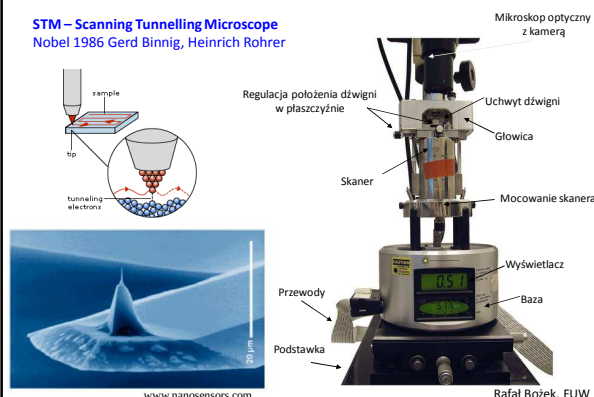
$|\Psi_n(\vec{r}, t)|^2$ określa tzw. gęstość prawdopodobieństwa

$$\hat{H}\Psi(\vec{r}) = \left(\frac{\vec{p}^2}{2m_0} + V(\vec{r}) \right) \Psi(\vec{r}) = E\Psi(\vec{r})$$



Świat klasyczny i kwantowy

STM – Scanning Tunnelling Microscope
Nobel 1986 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer

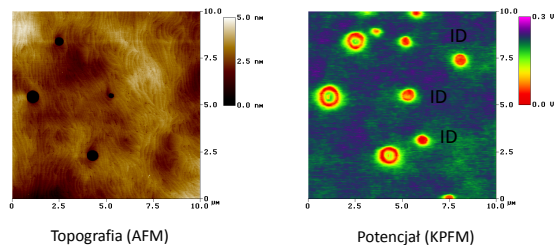


www.nanosensors.com

Rafał Bożek, FUW

Świat klasyczny i kwantowy

GaN polarność galowa - „pinholes” i domeny inwersyjne



Topografia (AFM)

Potencjał (KPFM)

Świat klasyczny i kwantowy

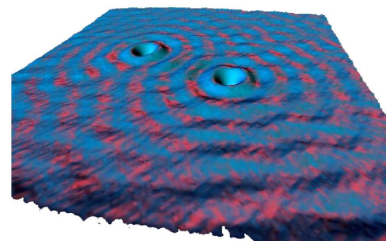
Uwaga 3: liniowa kombinacja funkcji falowych też jest funkcją falową (zasada superpozycji)

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B$$

~~$$|\Psi|^2 \neq A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2$$~~

$$|\Psi|^2 = A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2 + 2AB\Psi_A\Psi_B$$

Człon interferencyjny



A quantum waves

In this scanning tunneling microscope (STM) image, electron density waves are seen to be breaking around two atom-sized defects on the surface of a copper crystal. The resultant standing waves result from the interference of the electron waves scattering from the defects. Courtesy, Don Eigler, IBM.

Świat klasyczny i kwantowy

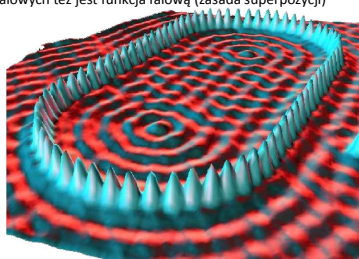
Uwaga 3: liniowa kombinacja funkcji falowych też jest funkcją falową (zasada superpozycji)

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B$$

~~$$|\Psi|^2 \neq A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2$$~~

$$|\Psi|^2 = A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2 + 2AB\Psi_A\Psi_B$$

Człon interferencyjny



A quantum corral

Scanning tunneling microscope (STM) picture of a stadium-shaped "quantum corral" made by positioning iron atoms on a copper surface. This structure was designed for studying what happens when surface electron waves in a confined region. Courtesy, Don Eigler, IBM.

Świat klasyczny i kwantowy

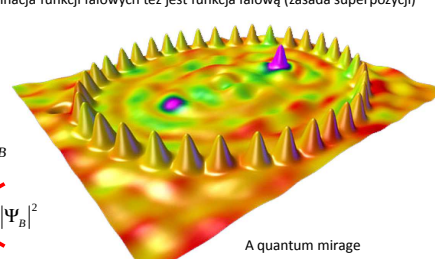
Uwaga 3: liniowa kombinacja funkcji falowych też jest funkcją falową (zasada superpozycji)

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B$$

~~$$|\Psi|^2 \neq A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2$$~~

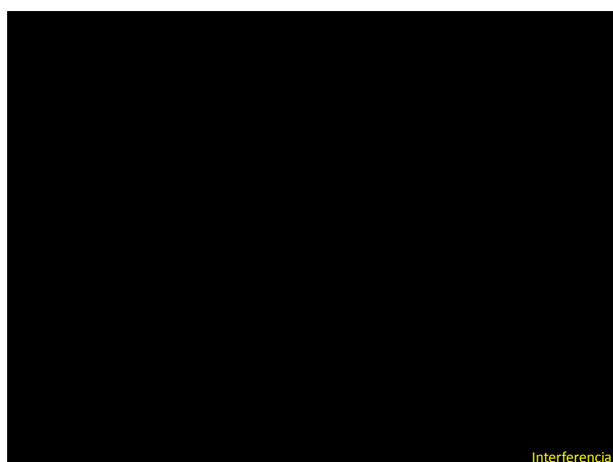
$$|\Psi|^2 = A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2 + 2AB\Psi_A\Psi_B$$

Człon interferencyjny



A quantum mirage

A scanning tunneling microscope was used to position 36 cobalt atoms in an elliptical structure known as a "quantum corral." Electron waves moving in the copper substrate interact both with a magnetic cobalt atom carefully positioned at one of the foci of the ellipse and apparently with a "mirage" of another cobalt atom (that isn't really there) at the other focus. (Courtesy of IBM.) reported by: Manoharan et al., in *Nature* 3 February 2000



Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 4: ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA. Jednak w momencie pomiaru „dowiadujemy” się w jakim stanie jest funkcja (tzw. *redukcja f. falowej*)

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B \xrightarrow{\text{pomiar } A \text{ lub } B} \begin{cases} \Psi = \Psi_A \\ \Psi = \Psi_B \end{cases}$$

↑
prawdopodobieństwo A^2 lub B^2

Czasami ważna jest KOLEJNOŚĆ pomiaru:

Pomiar = obserwabla = operatory = reguły komutacji

Zasady nieoznaczoności Heisenberga (położenie i pęd, energia i czas, rzuty momentów pędu itd).

$$[\hat{p}, \hat{x}] = -i\hbar$$

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2}\hbar$$

$$\hat{U}\hat{W}\Psi \neq \hat{W}\hat{U}\Psi \quad \text{gdy} \quad \hat{U}\hat{W} - \hat{W}\hat{U} = [\hat{U}, \hat{W}] \neq 0$$

Zasada superpozycji stanów. Stany splątane

Synteza kropek kwantowych

Zasada nieoznaczoności Heisenberga



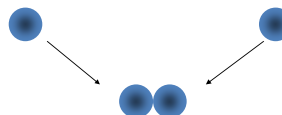
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



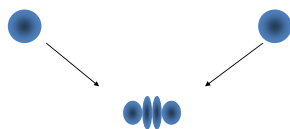
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



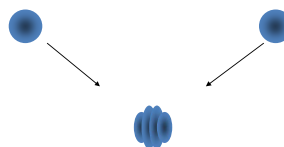
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



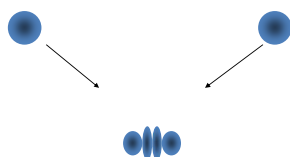
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



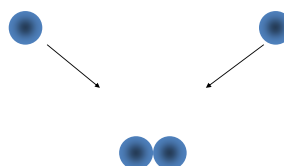
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



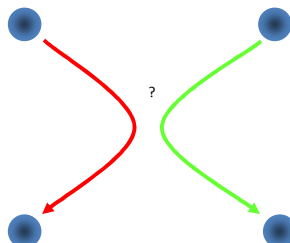
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



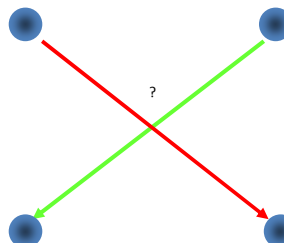
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



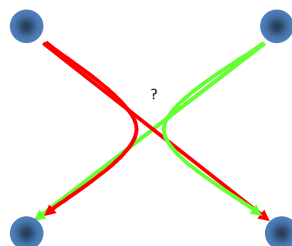
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZRÓŻNIALNE



Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIERÓZDZIALNE



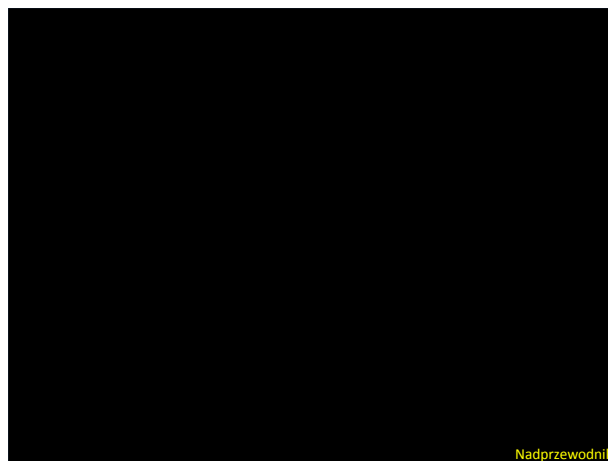
Funkcja falowa CAŁEGO układu

STATYSTYKA:

Świat fermionów (e, p, n)

Świat bozonów (foton, bozon W)

Zakaz Pauliego, statystyka Fermiego-Diraca, Bosego-Einsteina, oddziaływanie wymienne, ferromagnetyzm



Nadprzewodnik

Wnioski (niektóre)

Opis matematyczny to tzw. *stany własne* (ortogonalne, ang. *eigen states*)

$$\{|A\rangle, |B\rangle\}$$

dwa poziomy atomy $\{|g\rangle, |e\rangle\}$ np. $g = 1s, e = 2s$

spin elektronu $\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$

$$\{|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle\}$$

foton o dwóch wzajemnie ortogonalnych stanach polaryzacji

$$\{|\rightarrow\rangle, |\uparrow\rangle\}$$

Jeśli stan cząstki opisują jednocześnie dwa stany A i B (mówimy o *superpozycji stanów*), to cząstka nie może być zaobserwowana w obu z nich na raz (tzw. *ortogonalność stanów*)!

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B$$

$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B \xrightarrow{\text{ewolucja}} \begin{cases} \Psi = \Psi_A \\ \Psi = \Psi_B \end{cases} \xrightarrow{\text{pomiar A lub B}} \begin{cases} \Psi = \Psi_A \\ \Psi = \Psi_B \end{cases}$$

prawdopodobieństwo A^2 lub B^2

Zakaz klonowania



$$|\Psi\rangle \rightarrow |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, \dots$$

„czysta kartka”

Dziękuję za uwagę



Uniwersytet Warszawski

Interdyscyplinarny makrokierunek
Wydziału Fizyki i Wydziału Chemii Uniwersytetu
Warszawskiego

**Inżynieria
nanostruktur**

FIZYKA + CHEMIA

od października 2009

wkrótce więcej informacji na stronie
<http://nano.fuw.edu.pl>

a, b, c < 100 nm