

Fizyka Materii Skondensowanej

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Konrad.Dziatkowski@fuw.edu.pl

<http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/FMS>

 **inżynieria**
nanostruktur



Fizyka Materii Skondensowanej

Proponowane podręczniki:

- P. W. Atkins, *Chemia fizyczna*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- R. Bacewicz, *Optyka ciała stałego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
- W. Demtröder, *Spektroskopia laserowa*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- H. A. Enge, M. R. Wehr, J. A. Richards, *Wstęp do fizyki atomowej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
- J. Ginter, *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
- Gołębiewski, *elementy mechaniki i chemii kwantowej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982.
- H. Haken, H. C. Wolf, *Fizyka molekularna z elementami chemii kwantowej*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- H. Haken, H. C. Wolf, *Atomy i kwanty*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- Hennel, W. Szuszkiewicz, *Zadania z fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985.**
- H. Ibach, M. Lüthi, *Fizyka Ciała Stałego*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1996.**
- F. Kaczmarek, *Wstęp do fizyki laserów*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986.
- C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- Kopystyńska, *Wykłady z fizyki atomu*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
- P. Kowalczyk, *Fizyka cząsteczek*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2000.**
- T. Stacewicz, A. Witowski, J. Ginter, *Wstęp do optyki i fizyki ciała stałego*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2002.**
- A. Twardowski, *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2002.**
- G. K. Woodgate, *Struktura atomu*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.

Fizyka Materii Skondensowanej

Proponowane podręczniki:

A. Twardowski, *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2002.

P. Kowalczyk, *Fizyka cząsteczek*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2000.

T. Stacewicz, A. Witowski, J. Ginter, *Wstęp do optyki i fizyki ciała stałego*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2002.

Fizyka Materii Skondensowanej

Zasady zaliczania:

2 kolokwia (po 3 zadania) – $2 \times 30p = 60p$

Testy z wykładu (2 pytania, 10 testów) – 20p

Prace domowe (5 serii 3 zadania) – 10p


Zaliczenie ćwiczeń – 40p / 90p

Egzamin (4 zadania) – 40p

Należy uzyskać min. 50p / 140p żeby odpowiadać

Ćwiczenia są obowiązkowe – dr Konrad Działkowski

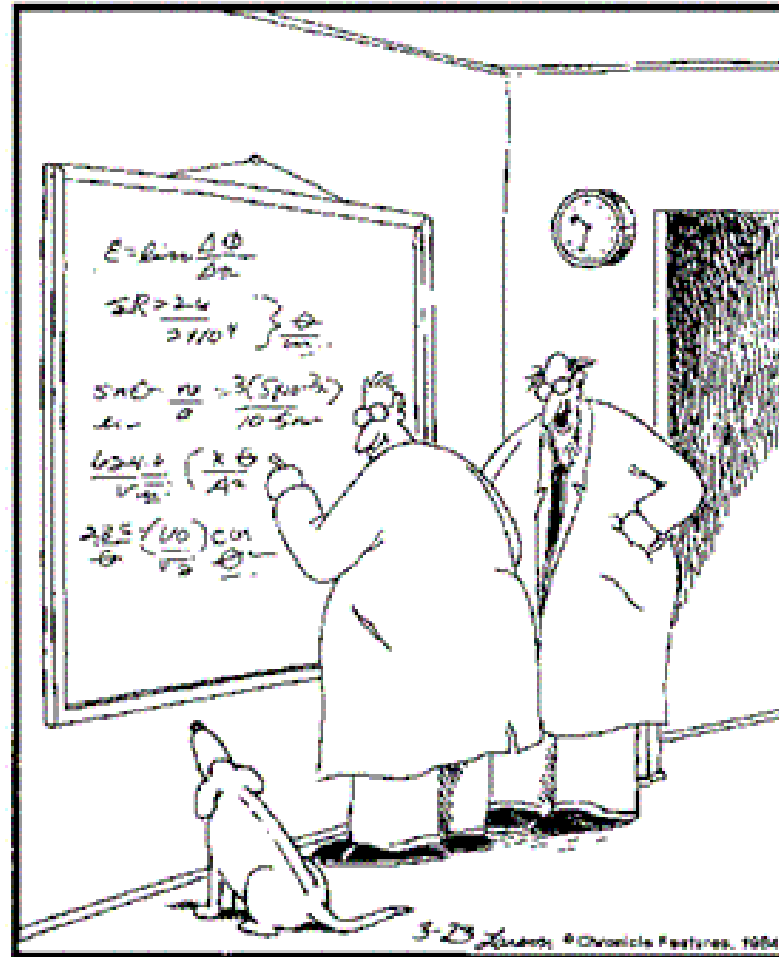
GryPlan

- 4.10 Mechanika kwantowa. Stany. Studnia kwantowa, Stany atomu wodoru. Symetrie stanów.
 - 11.10 Pole magnetyczne, sprzężenie spin orbita, J, L, S
 - 18.10 Dipolowe przejścia optyczne. Reguły wyboru, czas życia
 - 25.10 Lasery – współczynniki Einsteina
 - 8.11 Optyka – powtórzenie, klasyczny współczynnik załamania
 - 14.11 **PONIEDZIAŁEK RANO - KOLOKWIUM**
 - 15.11 Wiązania chemiczne i cząsteczki, hybrydyzacje
 - 22.11 Przejścia optyczne w cząsteczkach, widma oscylacyjno-rotacyjne
 - 29.11 Ciało stałe, kryształy, krystalografia, sieci Bravais
 - 6.12 Pasma, tw. Blocha, masa efektywna, przybliżenie kp
 - 13.12 **KOLOKWIUM**
 - 20.12 Elektrony i dziury cz. 1
 - 3.01 Elektrony i dziury cz. 2 Nanotechnologia
 - 10.01 Urządzenia półprzewodnikowe. Diody, tranzystory, komputery
 - 17.01 Fizyka subatomowa
- 

Mechanika kwantowa

THE FAR SIDE

By GARY LARSON



"Ohhhhhh . . . Look at that, Schuster . . .
Dogs are so cute when they try to comprehend
quantum mechanics."

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.*

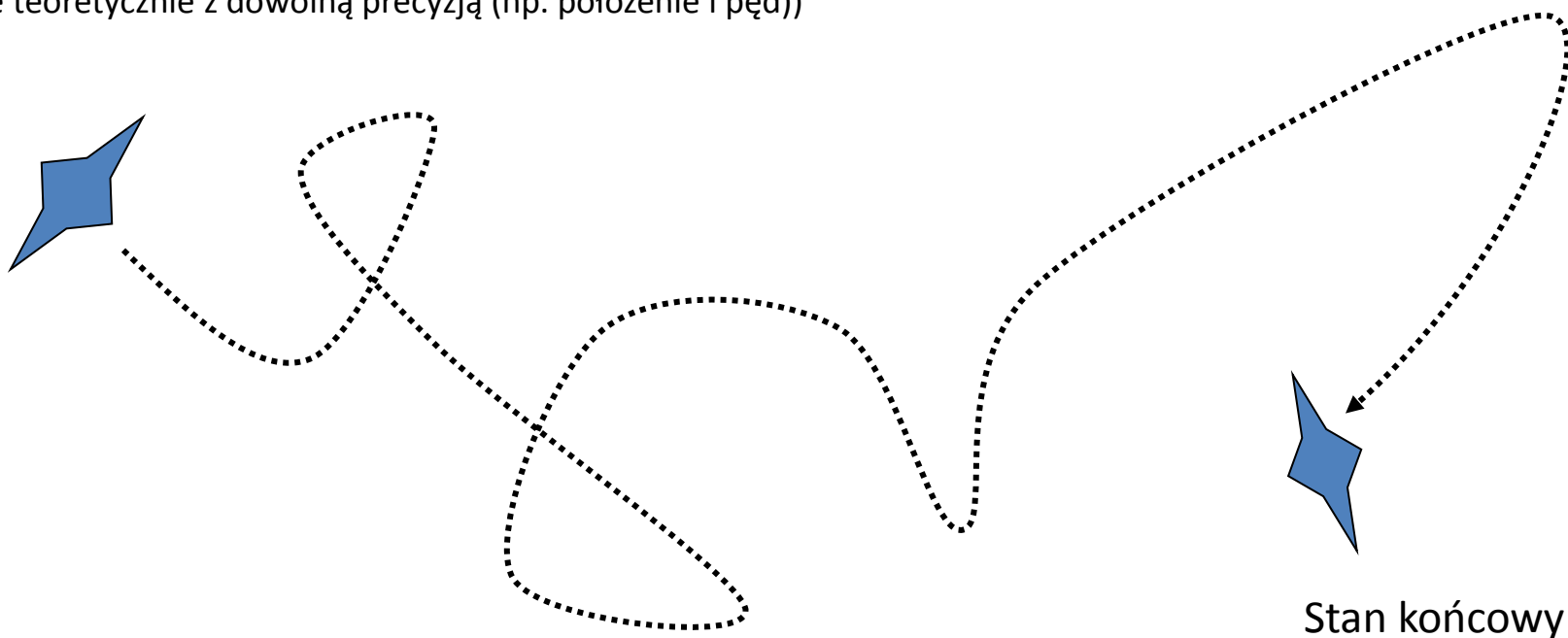
prof. **Michał Heller**

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:

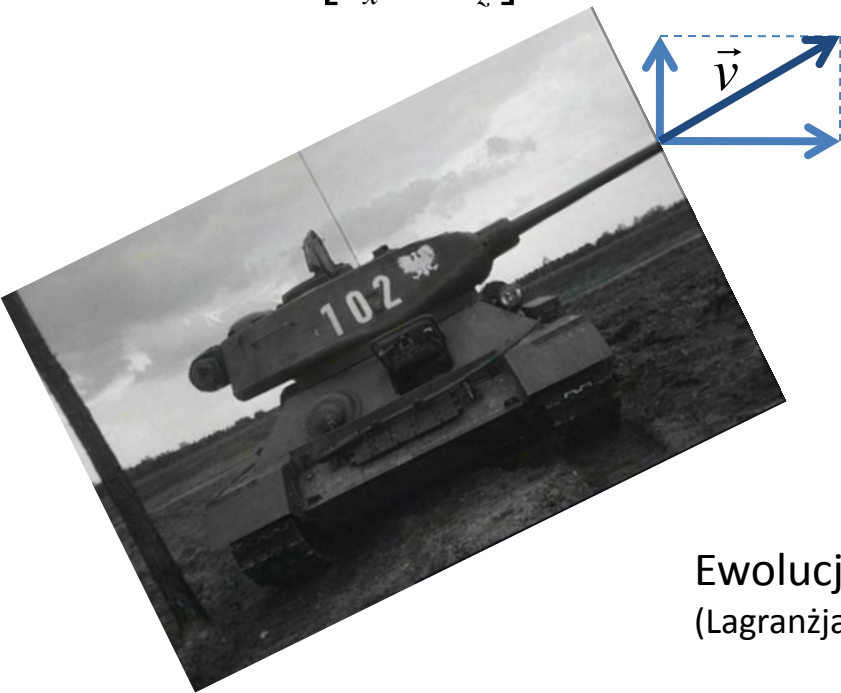
Warunki początkowe

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

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

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

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



Stan końcowy

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

Świat klasyczny i kwantowy

Mechanika klasyczna:

Warunki początkowe

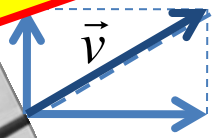
(znane teoretycznie z dowolną precyzją (np. położenie i prędkość))

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

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

Skąd się wzięły prawa Newtona?

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



Stan końcowy

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

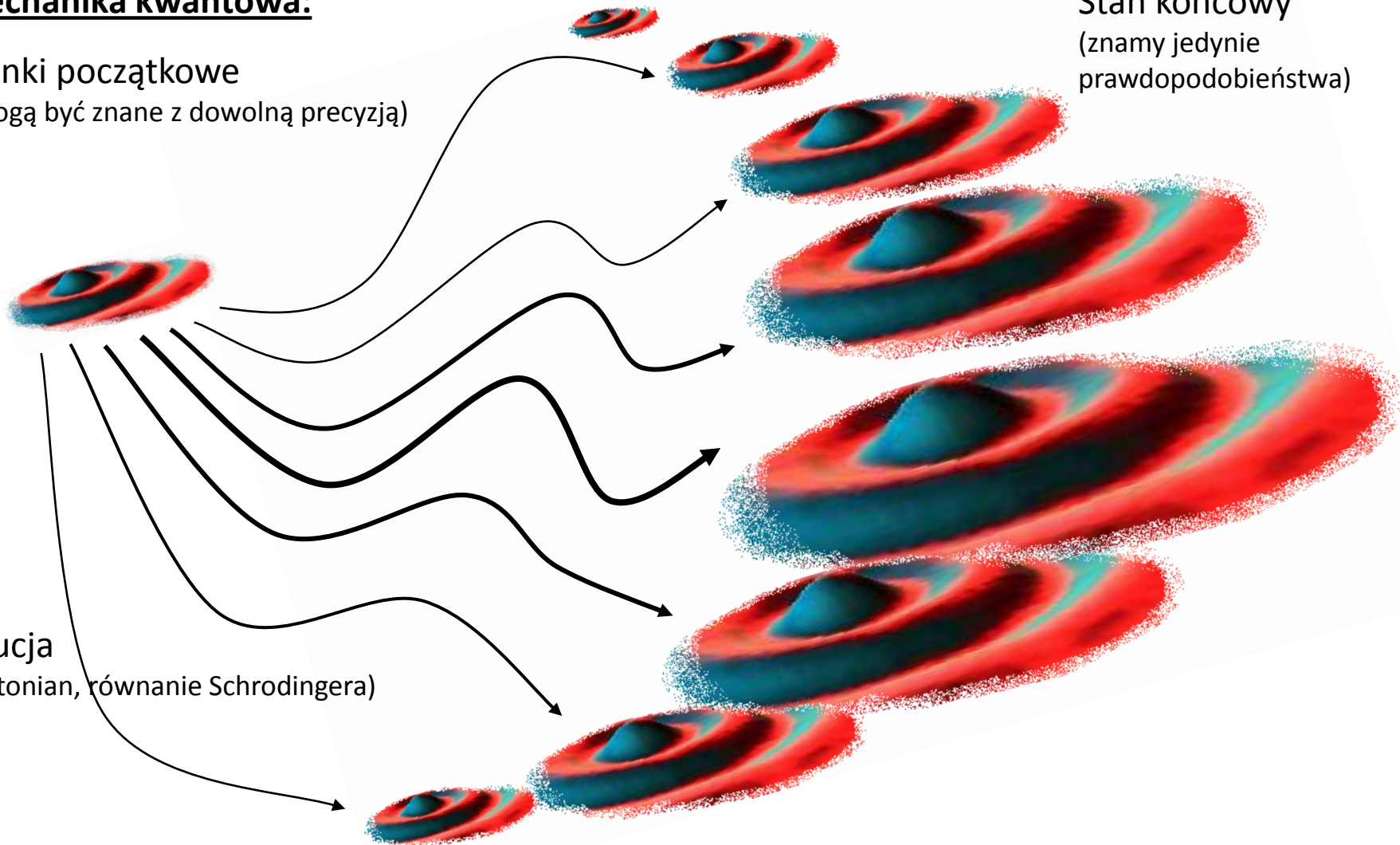
Świat klasyczny i kwantowy

Mechanika kwantowa:

Warunki początkowe
(nie mogą być znane z dowolną precyzją)

Stan końcowy
(znamy jedynie
prawdopodobieństwa)

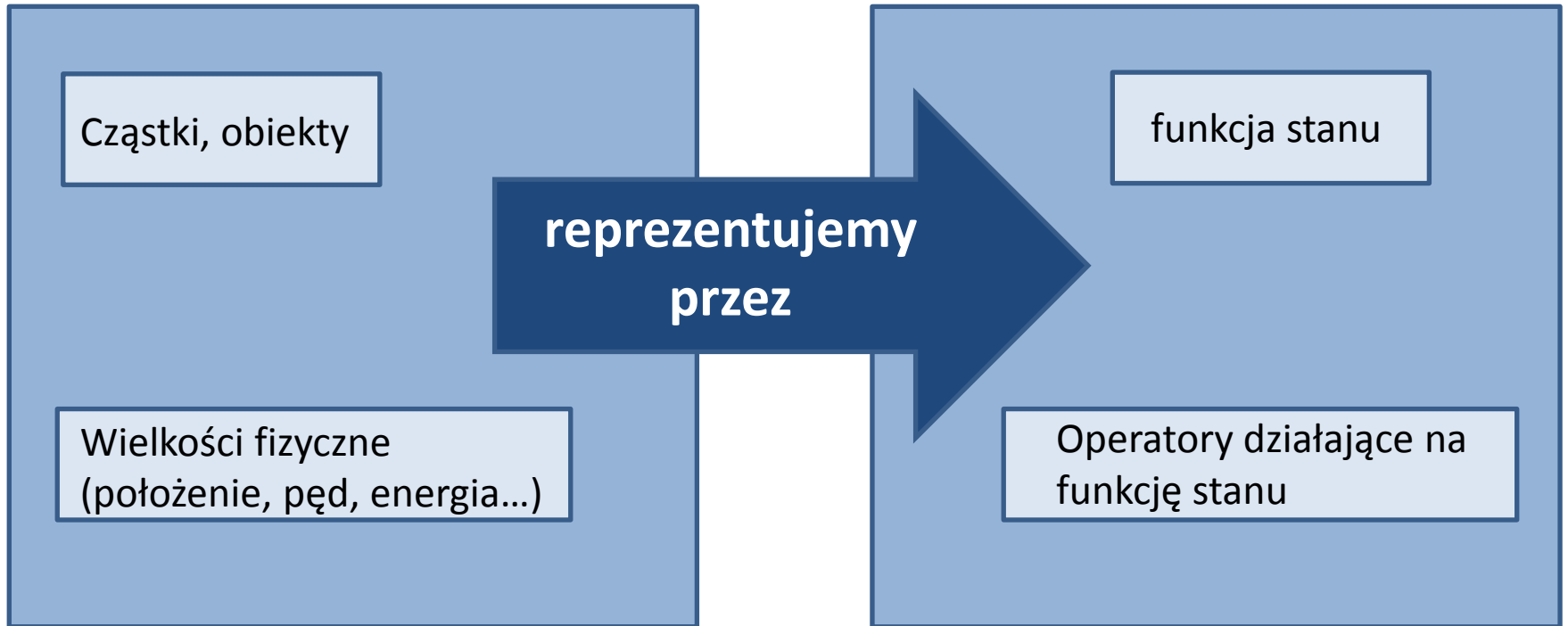
Ewolucja
(Hamiltonian, równanie Schrodingera)



Świat klasyczny i kwantowy

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

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



Co to jest OPERATOR?

Świat klasyczny i kwantowy

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

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

Co to jest OPERATOR?

algebra liniowa, operatory liniowe
przestrzeń wektorowa,
baza, wartość własna, funkcja własna operatora
iloczyn skalarny, bra, ket
złożenie (iloczyn) operatorów, komutatory

Operatory a obserwable

Świat klasyczny i kwantowy

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

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

Co to jest OPERATOR?

Operator położenia (r)

Operator pędu (p)

Operator momentu pędu ($L = r \times p$)

Operator energii całkowitej $E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$

Świat klasyczny i kwantowy

Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$$

Postulujemy, że funkcja falowa spełnia równanie Schrödingera:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Równanie Schrödingera możemy uważać za takie samo prawo fizyki jak równanie Newtona – można uzasadnić jego postać, ale nie można go wyprowadzić z bardziej fundamentalnych zasad (na razie ☺).

Postulujemy: interpretację probabilistyczną funkcji falowej:

$$\int_{\mathcal{V}} d^3r |\psi(\vec{r}, t)|^2 = \|\psi\|^2 = 1$$

Świat klasyczny i kwantowy

Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$$

Postulujemy, że funkcja falowa spełnia równanie Schrödingera:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Równanie Schrödingera jest za takie samo prawo fizyki jak równanie Newtona – można uzasadnić jego poprawność, ale nie można go wyprowadzić z bardziej fundamentalnych zasad.

Skąd się wzięło równanie falowe Schrödingera?

Postulujemy: interpretację probabilistyczną funkcji falowej:

$$\int_{\mathcal{V}} d^3r |\psi(\vec{r}, t)|^2 = \|\psi\|^2 = 1$$

Świat klasyczny i kwantowy

Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

iloczyn skalarny funkcji (falowych)
normalizacja
rzut funkcji falowej
wartość średnia operatora

Postulujemy: interpretację probabilistyczną funkcji falowej:

$$\int_{\mathcal{V}} d^3r |\psi(\vec{r}, t)|^2 = \|\psi\|^2 = 1$$

Świat klasyczny i kwantowy

Szczególne rozwiązania równania Schrödingera

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Potencjał niezależny od czasu

Cząstka swobodna

Potencjał harmoniczny – na ćwiczeniach!

Potencjał w studni

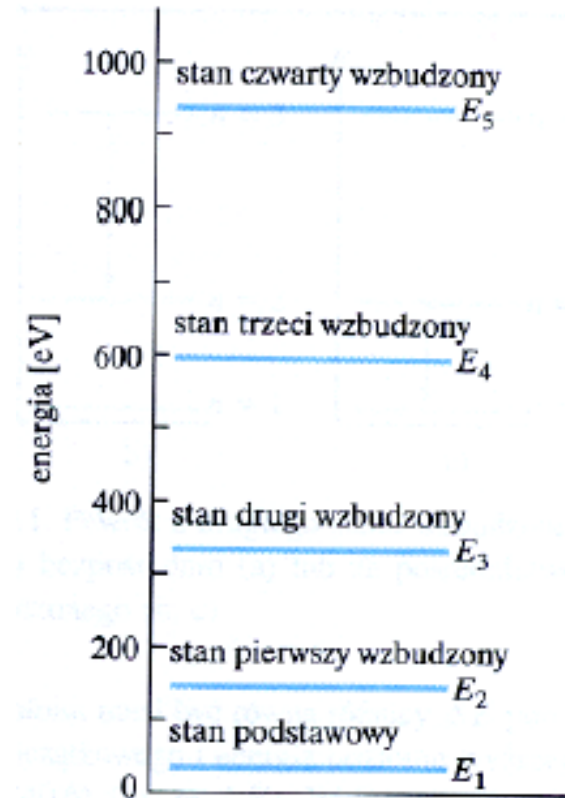
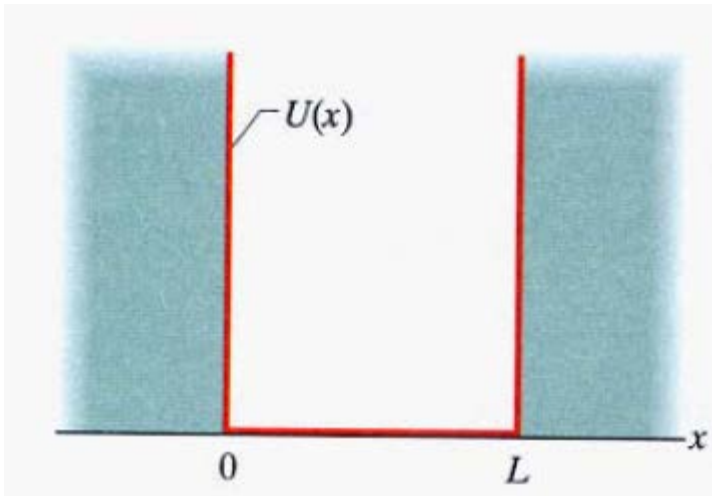
Potencjał centralny (atom wodoru) – ważne!

Świat klasyczny i kwantowy

Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Przykład: cząstka w nieskończonej studni:

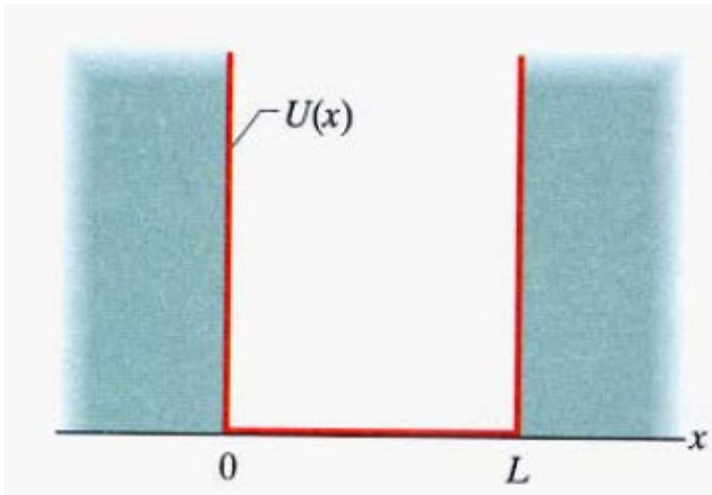


Świat klasyczny i kwantowy

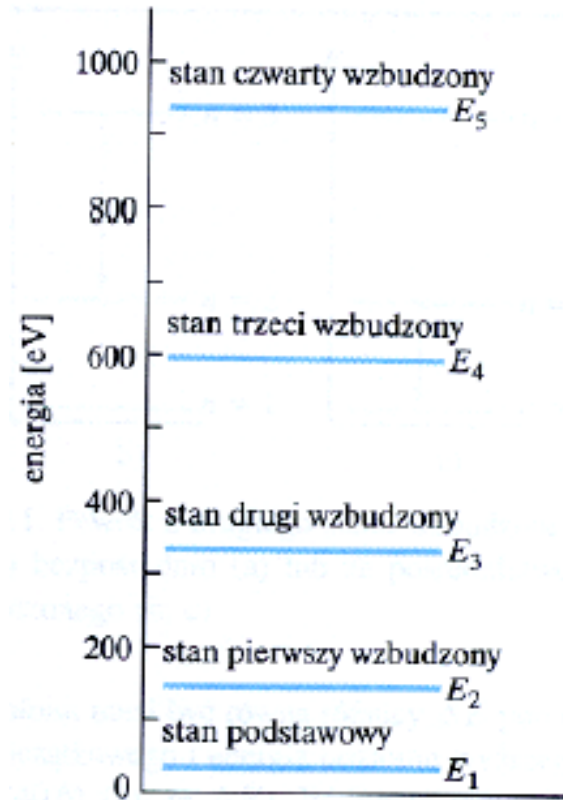
Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Przykład: cząstka w nieskończonej studni:



$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \left(\frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} \right) n^2$$

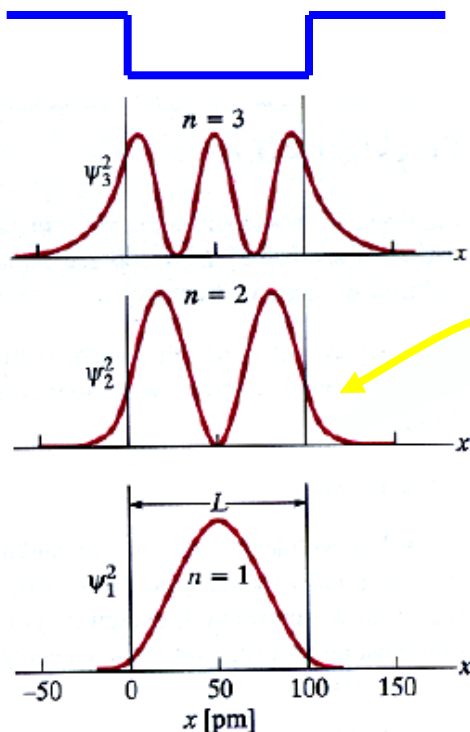


Świat klasyczny i kwantowy

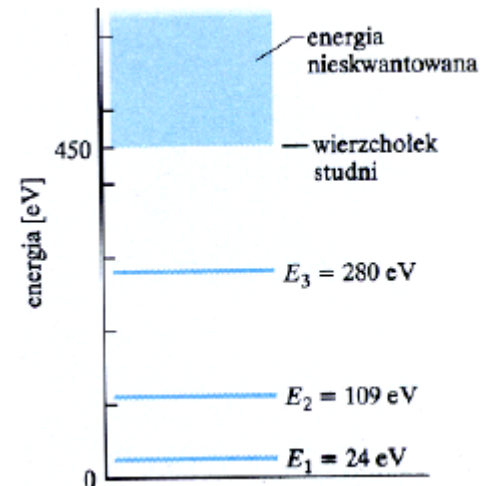
Ewolucja funkcji falowej jest DETERMINISTYCZNA.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

Przykład: cząstka w skończonej studni:



Uwięziona cząstka wnika w barierę potencjału



Świat klasyczny i kwantowy

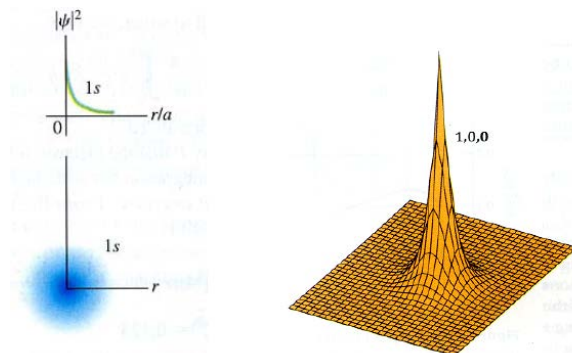
Atom wodoru:

$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

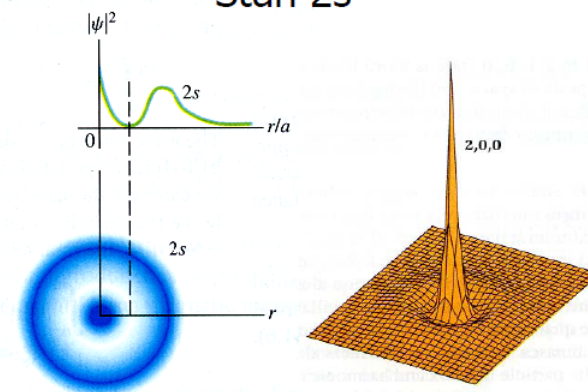
$$\psi_{2s} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \left(2 - \frac{r}{a}\right) \exp\left(-\frac{r}{2a}\right)$$

$$\psi_{2p_0} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \cos \theta$$

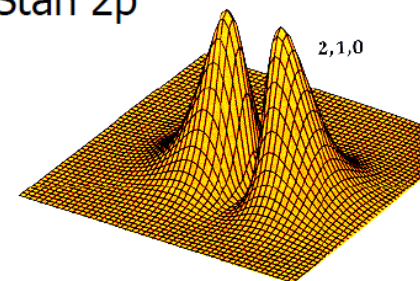
$$\psi_{2p_{\pm}} = \frac{1}{8\sqrt{\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \sin \theta \exp(\pm i\varphi)$$



Stan 2s



Stan 2p



Świat klasyczny i kwantowy

Atom wodoru:

Funkcje własne L :

$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

$$\psi_{2s} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \left(2 - \frac{r}{a}\right) \exp\left(-\frac{r}{2a}\right)$$

$$\psi_{2p_0} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \cos \theta$$

$$\psi_{2p_{\pm}} = \frac{1}{8\sqrt{\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \sin \theta \exp(\pm i\varphi)$$

Harmoniki sferyczne Y_{lm} :

$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$R_{20}(r) = \left(\frac{Z}{2a}\right)^{3/2} 2 \left(1 - \frac{Zr}{2a}\right) \exp\left(-\frac{Zr}{2a}\right)$$

$$R_{21}(r) = \left(\frac{Z}{2a}\right)^{3/2} \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{Zr}{2a}\right) \exp\left(-\frac{Zr}{2a}\right)$$

$$Y_{00}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$$

$$Y_{10}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos(\theta)$$

$$Y_{1\pm 1}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin(\theta) \exp(\pm i\varphi)$$

Świat klasyczny i kwantowy

Atom wodoru:

Funkcje własne L :

$$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$$

$$\hat{L}_z Y_{l,m}(\theta, \varphi) = \dots$$

$$\hat{L}^2 Y_{l,m}(\theta, \varphi) = \dots$$

Harmoniki sferyczne Y_{lm} :

$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$R_{20}(r) = \left(\frac{Z}{2a}\right)^{3/2} 2 \left(1 - \frac{Zr}{2a}\right) \exp\left(-\frac{Zr}{2a}\right)$$

$$R_{21}(r) = \left(\frac{Z}{2a}\right)^{3/2} \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{Zr}{2a}\right) \exp\left(-\frac{Zr}{2a}\right)$$

$$Y_{00}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$$

$$Y_{10}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos(\theta)$$

$$Y_{1\pm 1}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin(\theta) \exp(\pm i\varphi)$$

Świat klasyczny i kwantowy

Atom wodoru:

Funkcje własne L :

$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

$$\psi_{2s} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \left(2 - \frac{r}{a}\right) \exp\left(-\frac{r}{2a}\right)$$

$$\psi_{2p0} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \cos \theta$$

$$\psi_{2p\pm} = \frac{1}{8\sqrt{\pi a^3}} \frac{r}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) \sin \theta \exp(\pm i\varphi)$$

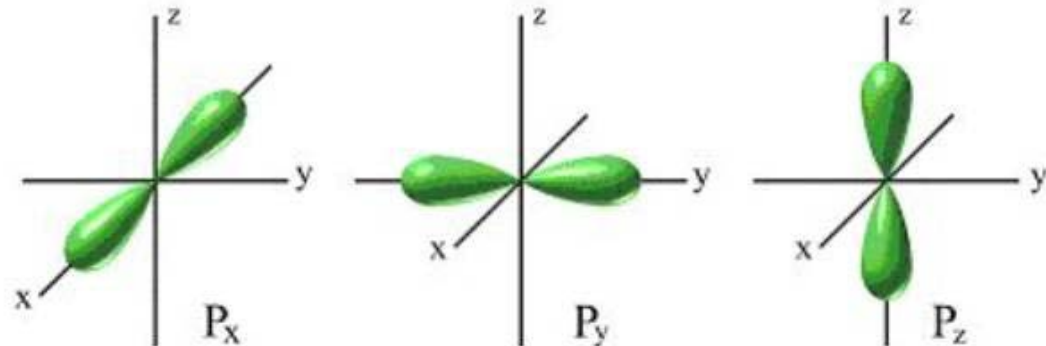
Funkcje rzeczywiste:

$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

$$\psi_{2px} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{x}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{2p+1} + \psi_{2p-1})$$

$$\psi_{2py} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{y}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{2p+1} - \psi_{2p-1})$$

$$\psi_{2pz} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a^3}} \frac{z}{a} \exp\left(-\frac{r}{2a}\right) = \psi_{2p0}$$



Świat klasyczny i kwantowy

Atomy metali alkalicznych (wodoropodobne):

Rachunek zaburzeń: $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$

$$\hat{H}_0 \psi_i = E_i \psi_i$$

Zaburzenie $\hat{H}'_{ij} = \langle \psi_i | \hat{H}' | \psi_j \rangle$

Sposób:

$$\det |\hat{H}' - E\hat{I}| = 0$$

a) $V(r) = -\frac{3e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + A\delta(r-a)$

b) $V(r) = \begin{cases} -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}; r \leq b \\ -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}; r > b \end{cases}$

Świat klasyczny i kwantowy

Atomy metali alkalicznych (wodoropodobne):

Rachunek zaburzeń: $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$

$$\hat{H}_0 \psi_i = E_i \psi_i$$

Zaburzenie $\hat{H}'_{ij} = \langle \psi_i | \hat{H}' | \psi_j \rangle$

Sposób:

$$\det |\hat{H}' - E\hat{I}| = 0$$

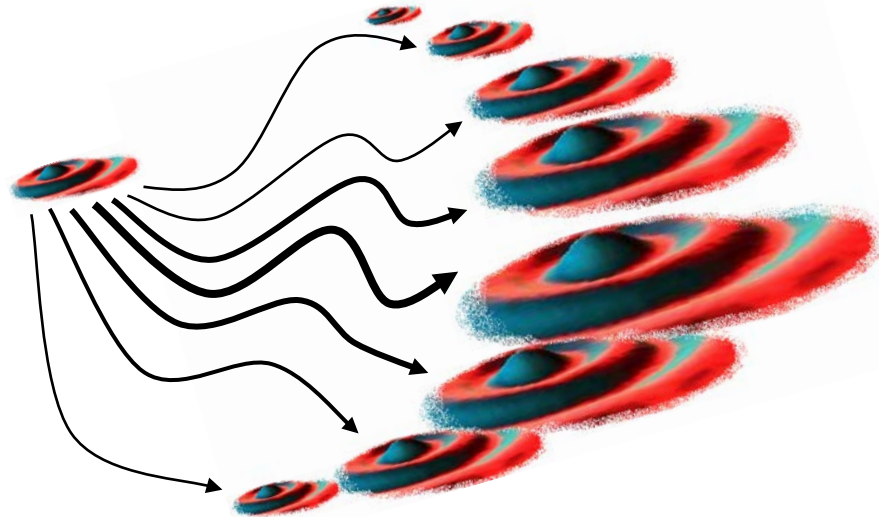
a) $V(r) = -\frac{3e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + A\delta(r-a)$

b) $V(r) = \begin{cases} -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}; & r \leq b \\ -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}; & r > b \end{cases}$

a) $V'(r) = A\delta(r-a)$

b) $V'(r) = \begin{cases} 0 & ; r \leq b \\ -\frac{(Z-1)e^2}{4\pi\epsilon_0 r}; & r > b \end{cases}$

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

Uwaga 3: funkcja falowa jest określona w całej przestrzeni, w tym sensie jej ewolucja opisuje wszystkie możliwe historie cząstki:

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 NIEROZRÓŻNIALNE

Świat klasyczny i kwantowy

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

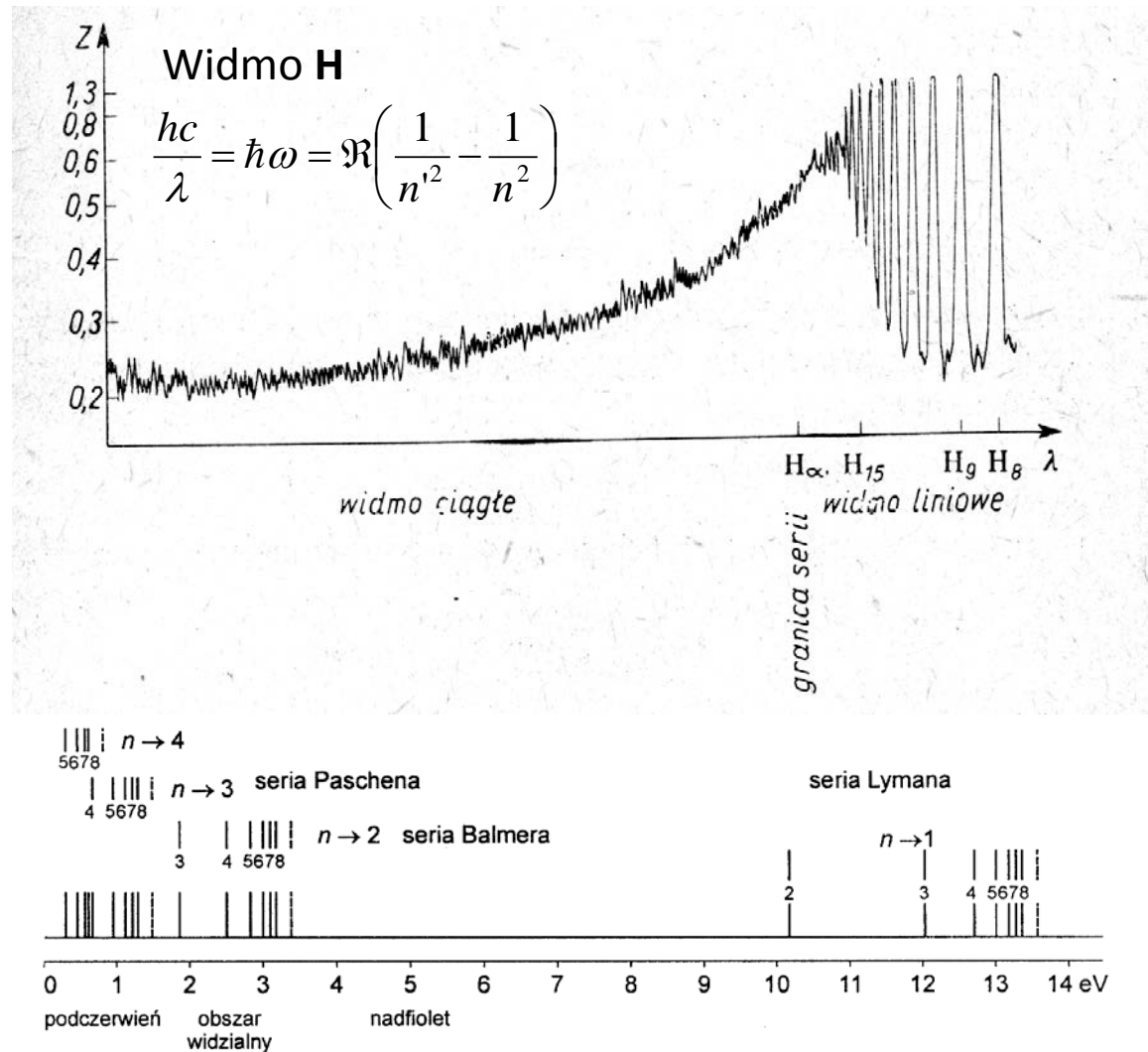
$$\Psi_n(\vec{r}, t)$$



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...



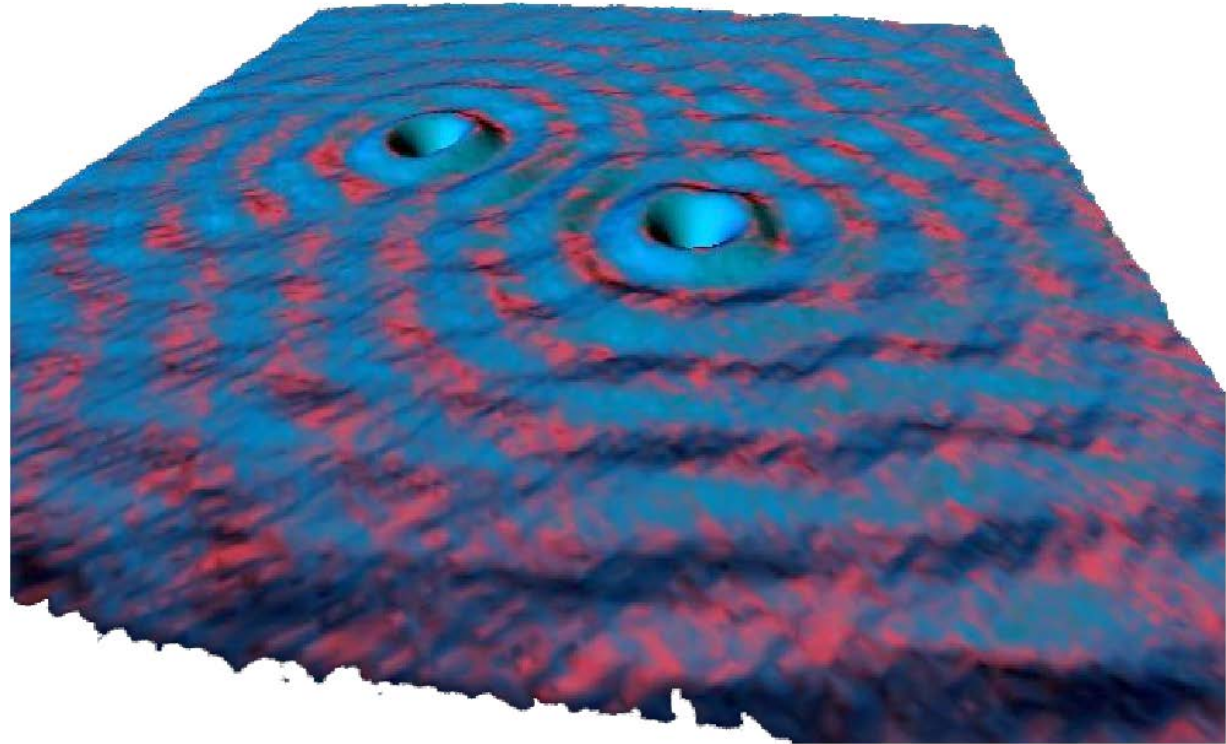
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 2: liniowa kombinacja funkcji falowych też jest funkcją falową (zasada superpozycji)

$$\psi(\vec{r}, t) \in \mathbb{C}$$

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

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



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.

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

Człon interferencyjny

Świat klasyczny i kwantowy

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

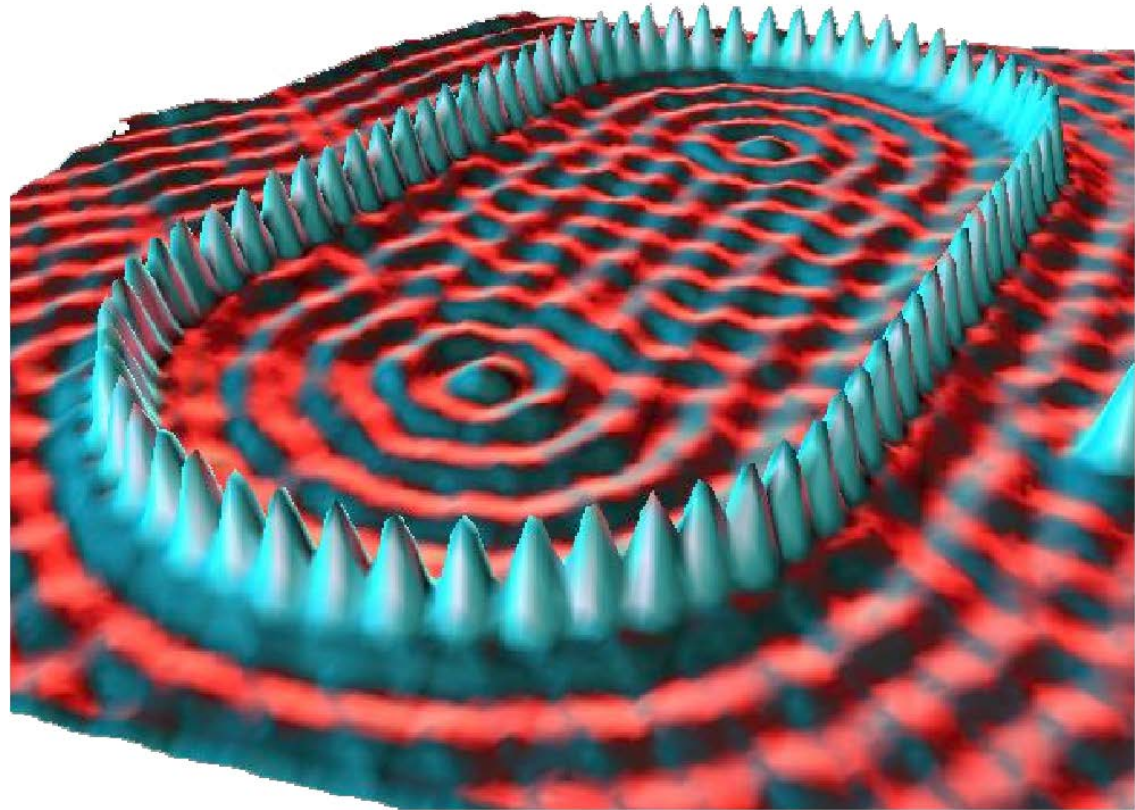
$$\psi(\vec{r}, t) \in \mathbb{C}$$

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

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

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

Człon interferencyjny



A quantum corral

Scanning tunnelling 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)

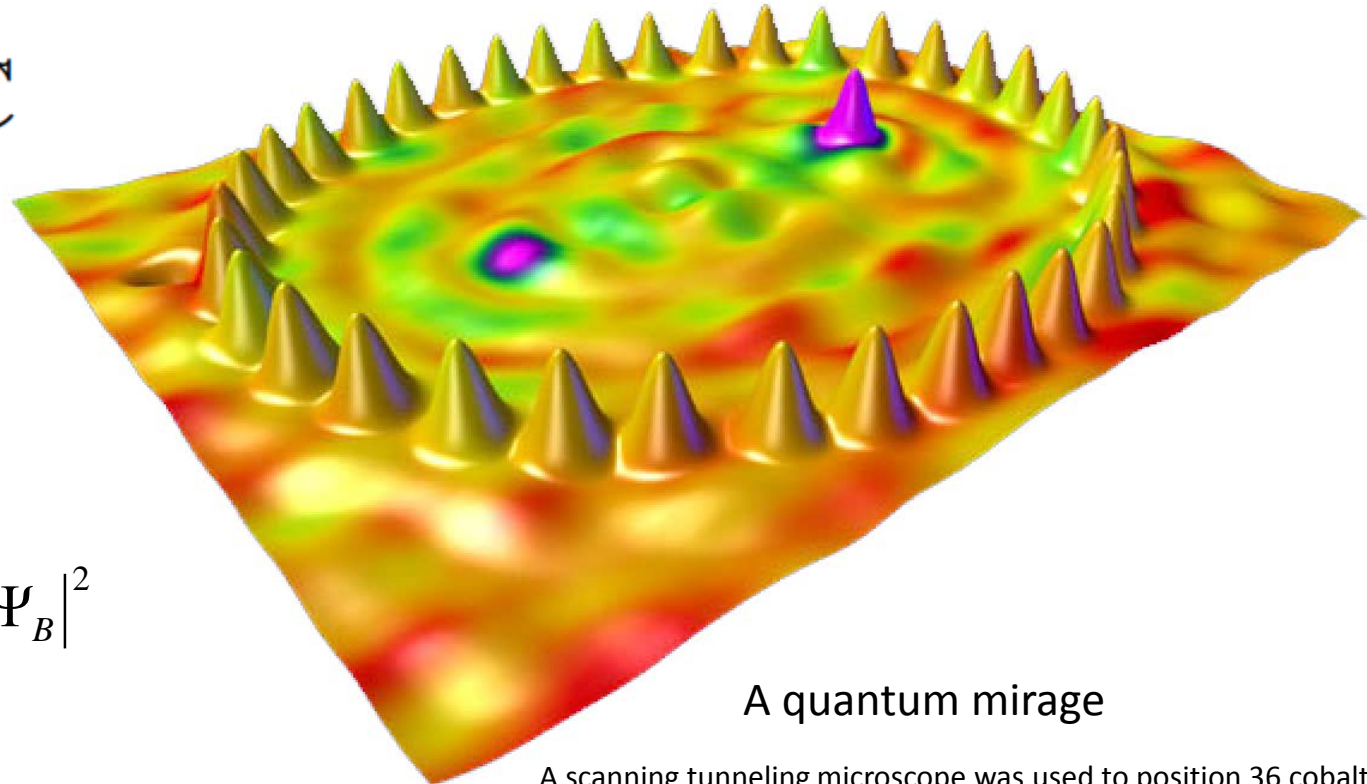
$$\psi(\vec{r}, t) \in \mathbb{C}$$

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

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

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

Człon interferencyjny



A quantum mirage

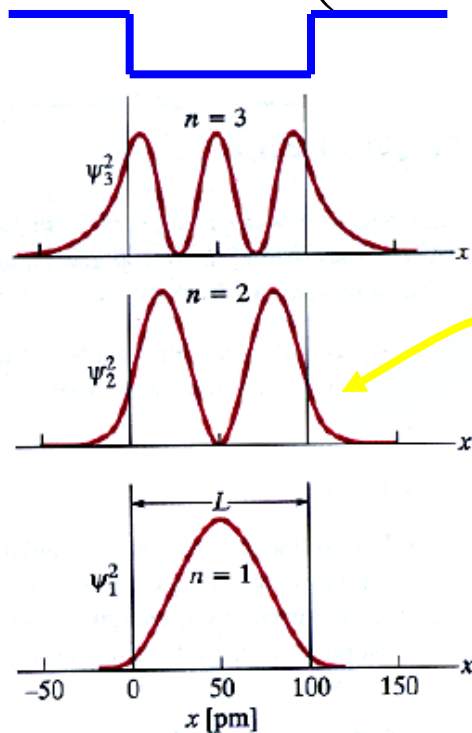
A scanning tunneling microscope was used to position 36 cobalt atoms in an elliptical structure known as a "quantum corral." Electron waves moving in the copper substrate interact both with a magnetic cobalt atom carefully positioned at one of the foci of the ellipse and apparently with a "mirage" of 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

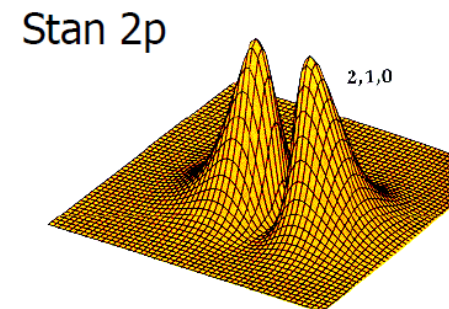
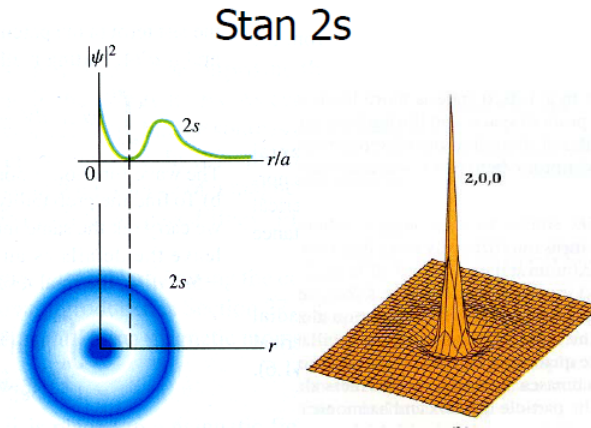
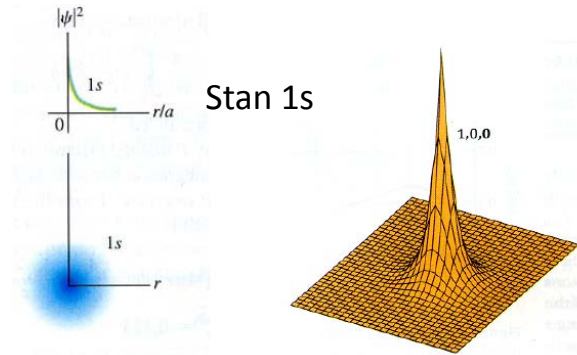
Uwaga 2: funkcja falowa jest określona w całej przestrzeni, w tym sensie jej ewolucja opisuje wszystkie możliwe historie cząstki:

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

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



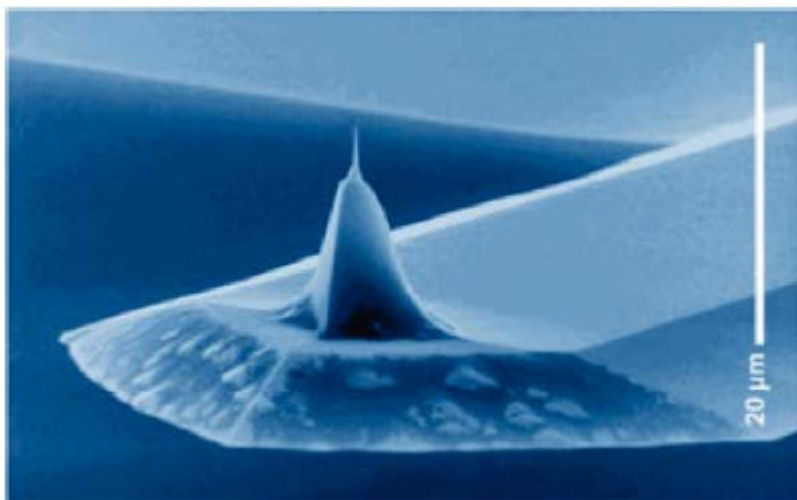
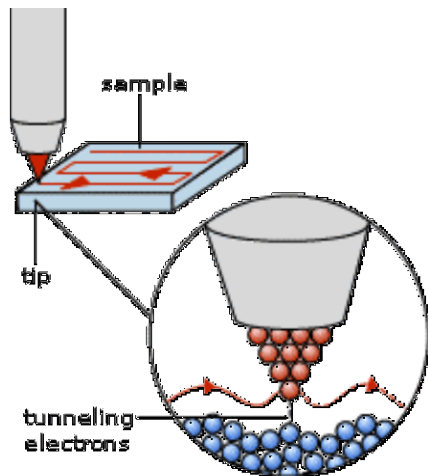
Uwięziona cząstka wnika w barierę potencjału



Świat klasyczny i kwantowy

STM – Scanning Tunnelling Microscope

Nobel 1986 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer



www.nanosensors.com

Regulacja położenia dźwigni
w płaszczyźnie

Przewody

Podstawa

Skaner

Mikroskop optyczny
z kamerą

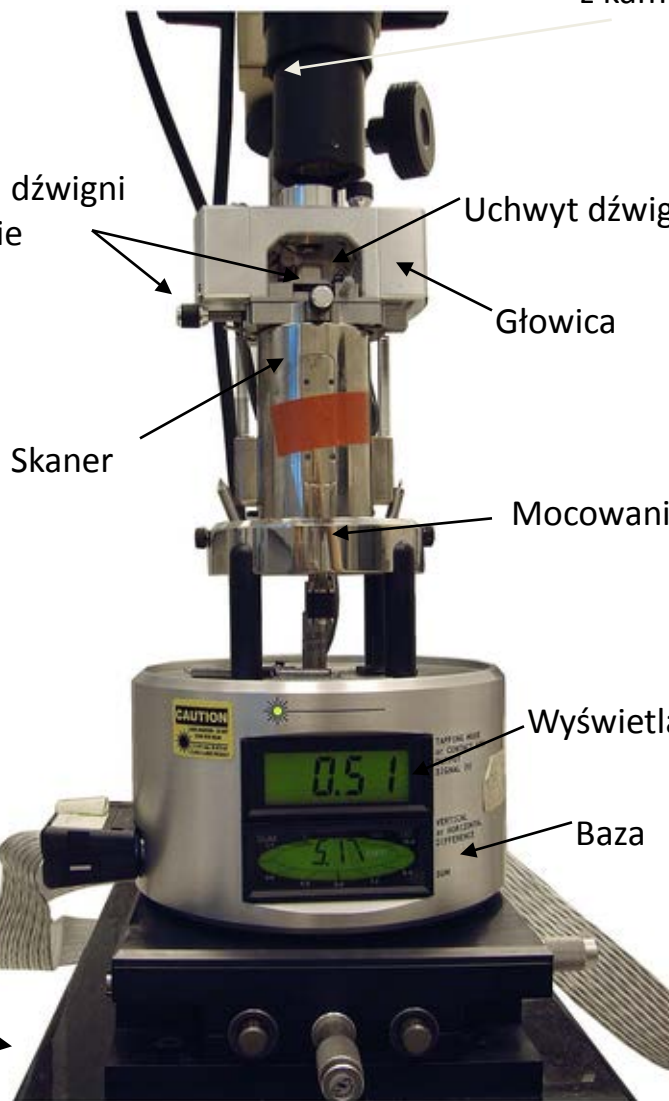
Uchwyt dźwigni

Głowica

Mocowanie skanera

Wyświetlacz

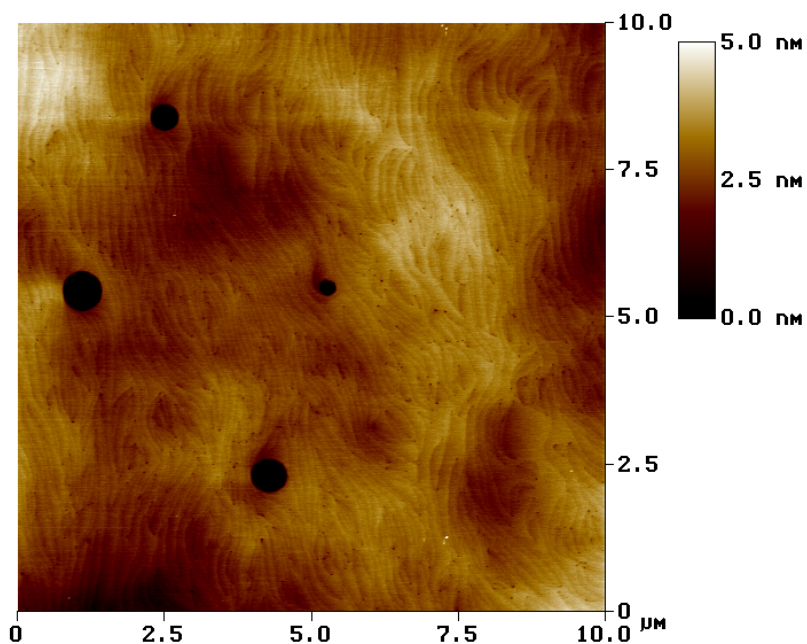
Baza



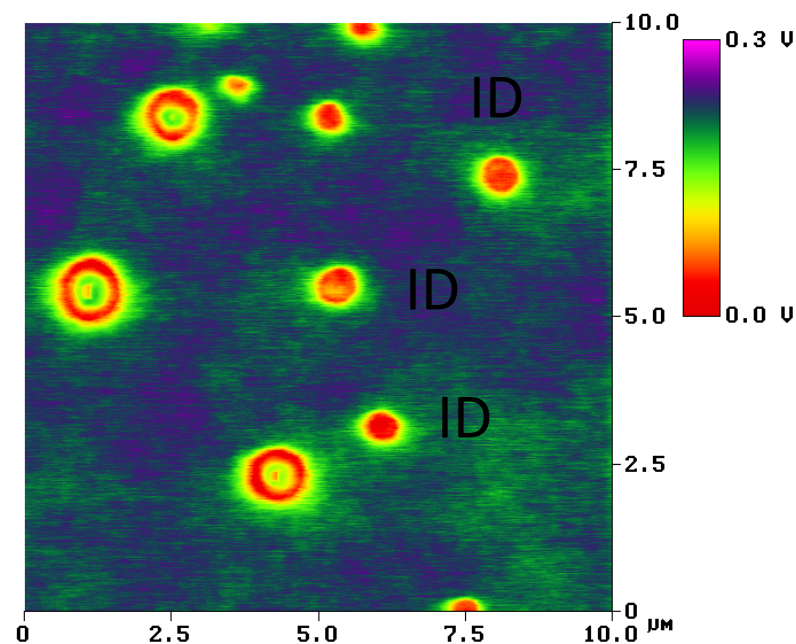
Rafał Bożek, FUW

Świat klasyczny i kwantowy

GaN polarność galowa - „pinholes” i domeny inwersyjne



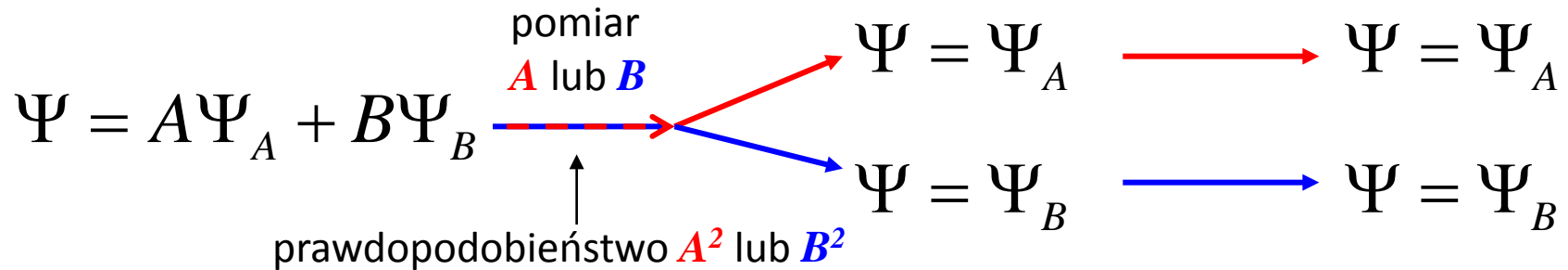
Topografia (AFM)



Potencjał (KPFM)

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*)



Czasami ważna jest KOLEJNOŚĆ pomiaru:

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

Pomiar = obserwabla = operatory = reguły komutacji

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

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

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

Zasada superpozycji stanów. Stany splątane

Synteza kropek kwantowych

Zasada nieoznaczoności Heisenberga



Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



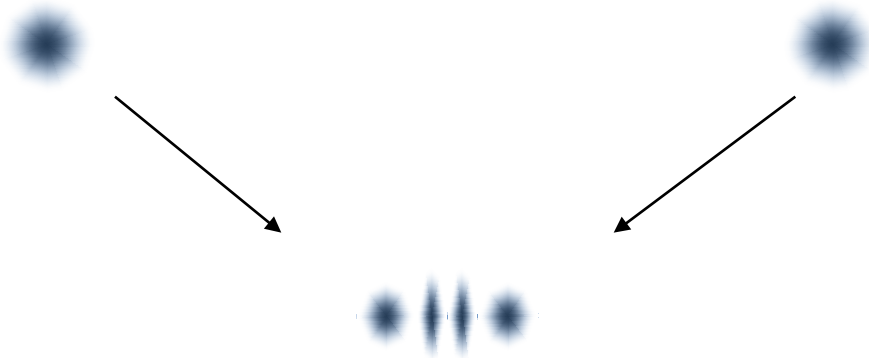
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



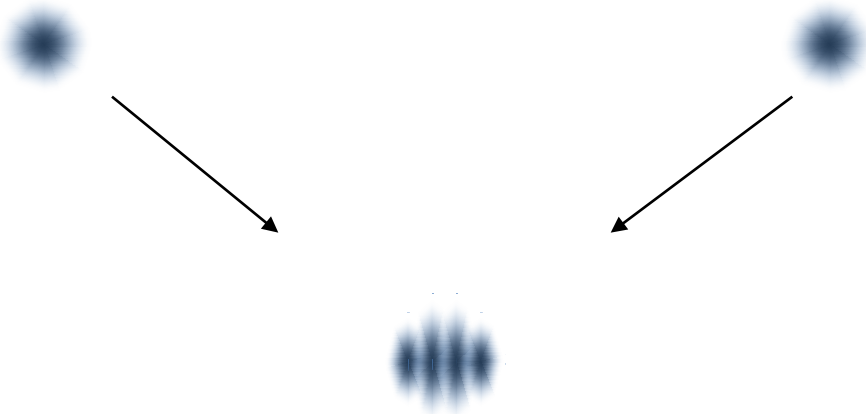
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



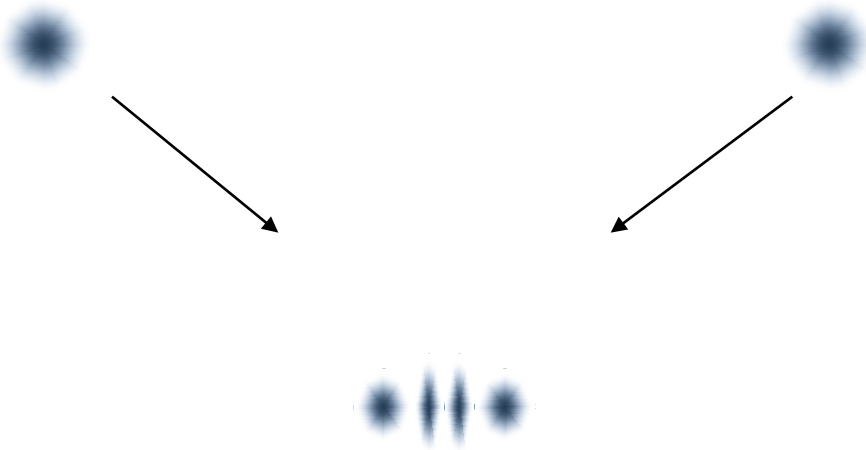
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



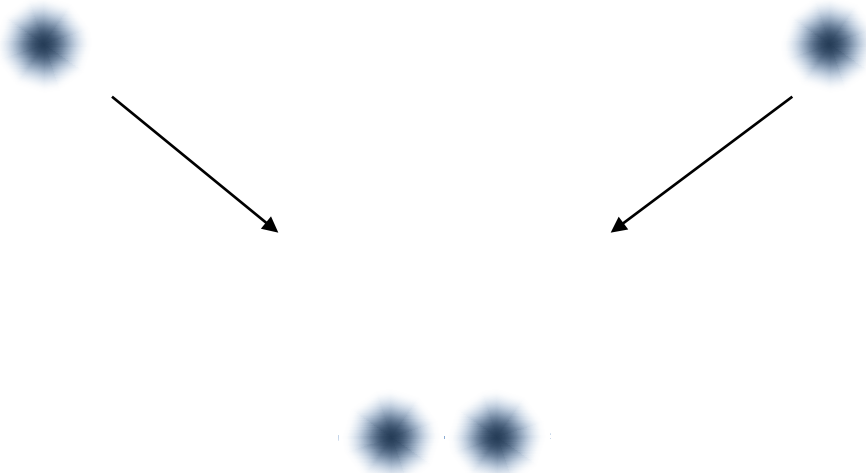
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



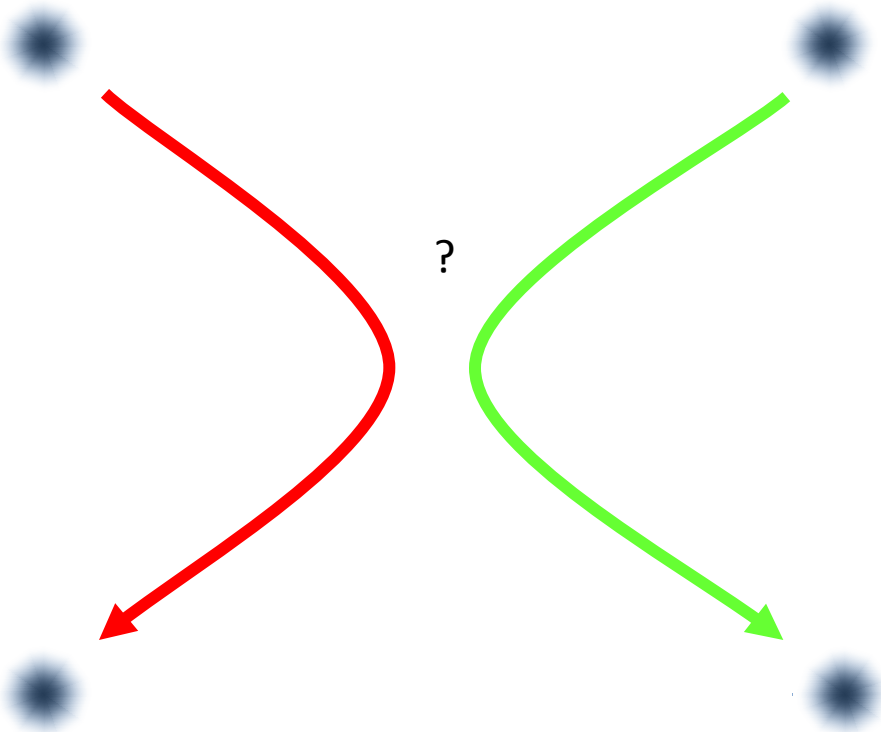
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



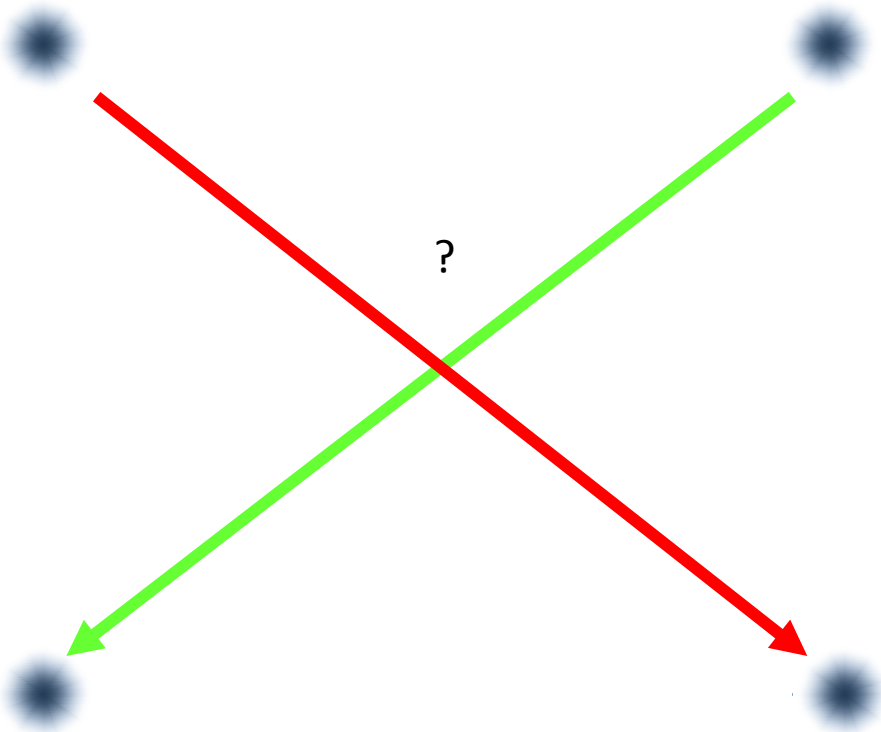
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



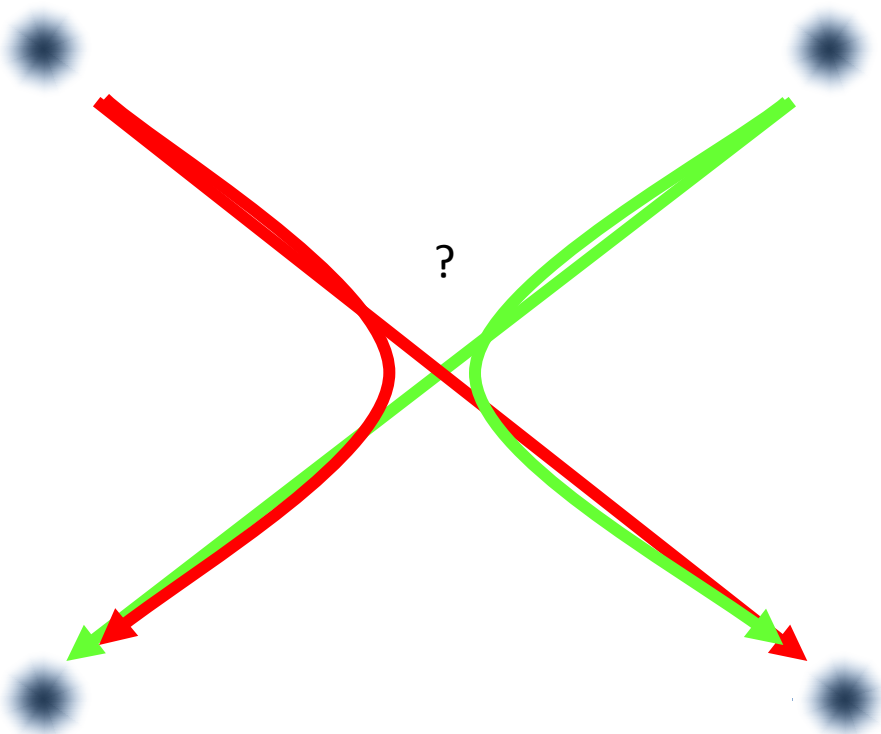
Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



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

Wnioski (niektóre)

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

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

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

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

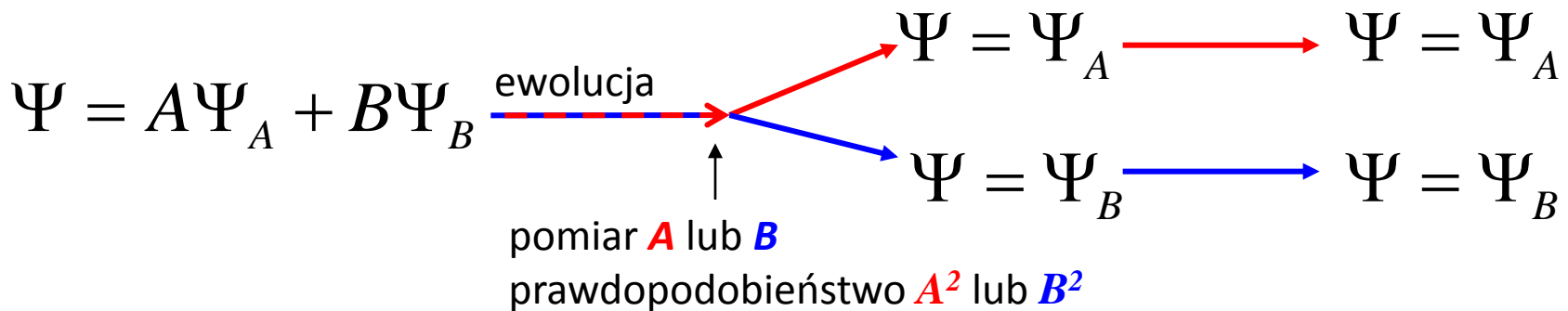
$$\{|\circlearrowleft\rangle, |\circlearrowright\rangle\}$$

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*)!

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

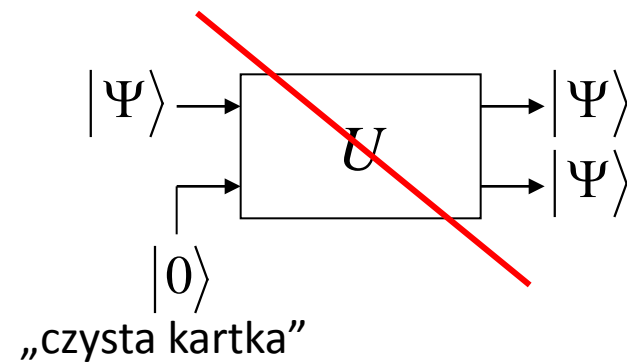


Zakaz klonowania




Źródło: Lucas Film

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



GryPlan

- 4.10 Mechanika kwantowa. Stany. Studnia kwantowa, Stany atomu wodoru. Symetrie stanów.
 - 11.10 Pole magnetyczne, sprzężenie spin orbita, J, L, S
 - 18.10 Dipolowe przejścia optyczne. Reguły wyboru, czas życia
 - 25.10 Lasery – współczynniki Einsteina
 - 8.11 Optyka – powtórzenie, klasyczny współczynnik załamania
 - 14.11 **PONIEDZIAŁEK RANO - KOLOKWIUM**
 - 15.11 Wiązania chemiczne i cząsteczki, hybrydyzacje
 - 22.11 Przejścia optyczne w cząsteczkach, widma oscylacyjno-rotacyjne
 - 29.11 Ciało stałe, kryształy, krystalografia, sieci Bravais
 - 6.12 Pasma, tw. Blocha, masa efektywna, przybliżenie kp
 - 13.12 **KOLOKWIUM**
 - 20.12 Elektrony i dziury cz. 1
 - 3.01 Elektrony i dziury cz. 2 Nanotechnologia
 - 10.01 Urządzenia półprzewodnikowe. Diody, tranzystory, komputery
 - 17.01 Fizyka subatomowa
- 

Dziękuję za uwagę

