

# Mechanika kwantowa dla początkujących.



# Jak TO działa? <http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/>



Firefox

Jacek Szczytko homepage

www.fuw.edu.pl/~szczytko/index\_JTD.html

Google

Jacek Szczytko Faculty of Physics, University of Warsaw

home research publications **teaching** students career

## Jak TO działa? Urządzenia kwantowe. 1100-3JTD (3 ECTS)

Teaching in Polish

- [Jak TO działa?](#)
- [Nowe technologie](#)
- [Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej R](#)
- [Fizyka materii skondensowanej](#)
- [Fizyka materii skondensowanej II](#)
- [Fizyka we współczesnym świecie](#)

W semestrze zimowym 2013/14 serdecznie zapraszam na wykład z doświadczeniami pt. "Jak TO działa? Urządzenia kwantowe."

Atutem Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego jest nie tylko wysokiej klasy kadra naukowa, ale także unikatowe możliwości demonstrowania różnego rodzaju zjawisk fizycznych. Kontakt studentów z prawdziwym eksperymentem przeprowadzonym na ich oczach w czasie wykładu pozwala zrozumieć sens praw fizyki zapisanych w języku matematyki, wyrabia intuicję, ćwiczy zdrowy rozsądek i zapada w pamięć.

wykład będący uzupełnieniem wykładu z fizyki kwantowej, Elektrodynamika materii skondensowanej itp. o pokazywanie zjawisk i III roku Wydziału Fizyki. Wykłady z tej specjalności mogłyby na własnych oczach zobaczyć studentów kwantowe będące podstawą nauki. Jest to o tyle ważne, że w urządzeniach działających dzięki fizyce kwantowej (diody półprzewodnikowe, pamięci półprzewodnikowe, baterie, detektory promieniowania itp.) wielu dziedzinach techniki jesteśmy blisko osiągnięcia

limitu kwantowego miniaturyzacji ( tranzystory w procesorach, rozmiar bitów na dysku twardym), wraz z rozwojem nanotechnologii

Students Scientific Society

Google: Jacek Szczytko  
Login: student  
Hasło: lomtjjz

# Jak TO działa? <http://www.fuw.edu.pl/~szczytko/>

The screenshot shows a web interface for a course. At the top left is the logo of the University of Warsaw (UNIWERSYTET WARSZAWSKI) and a stylized 'K2' logo. The top right shows a language dropdown set to 'Polski (pl)' and a user profile 'Jacek Szczytko'. Below the header is a navigation bar with a 'Włącz tryb edycji' button and a grid of 16 icons representing various educational and technological concepts. The main content area features a dark blue banner with the course title 'Jak TO działa? Urządzenia kwantowe (1100-JTD-OG, 1100-3JTD) (semestr zimowy 2020/21)'. Below this is a 'Forum aktualności' section with a Zoom meeting link and ID. A grey box highlights the current lecture: 'Wykład 1 - Technologie 'disruptive', czyli ciężkie życie futurologa'. A list of resources follows, including a document icon for the lecture, a list icon for a test, a speech bubble icon for a chat, and a document icon for a recording. On the right side, there is an 'ADMINISTRACJA' sidebar with a list of management options like 'Włącz tryb edycji', 'Edytuj ustawienia', 'Użytkownicy', 'Filtry', 'Raporty', 'Oceny', 'Efekty kształcenia', 'Odnaki', 'Import', 'Reset', 'Baza pytań', 'Repozytoria', 'Kosz', and 'Ustawienia dodatkowe'. At the bottom right, a 'NAJNOWSZE WIADOMOŚCI' section shows a 'Zoom do wykładu' event on '21 paź, 00:35' by 'Jacek Szczytko' and a lecture event on '21 paź, 00:34' by 'Jacek Szczytko'.

Strona główna » 1100-JTD-OG, 1100-3JTD\_2020/21Z Włącz tryb edycji

## Jak TO działa? Urządzenia kwantowe (1100-JTD-OG, 1100-3JTD) (semestr zimowy 2020/21)

Forum aktualności

Wykłady środy 17:15-18:45 na platformie Zoom

<https://us02web.zoom.us/j/83742912392?pwd=SEhySm5ZbU1nTUU5QmNNW9UVEp4UT09>

Meeting ID: 837 4291 2392

hasło: jtd

### Wykład 1 - Technologie 'disruptive', czyli ciężkie życie futurologa

- Wykład 1 - Technologie 'disruptive', czyli ciężkie życie futurologa
- Test 1 - Disruptive technologies
- Wykład 1 - Czat
- Wykład 1 - Nagranie

#### ADMINISTRACJA

- Administracja kursem
  - Włącz tryb edycji
  - Edytuj ustawienia
  - Użytkownicy
  - Filtry
  - Raporty
  - Oceny
  - Efekty kształcenia
  - Odnaki
  - Import
  - Reset
  - Baza pytań
  - Repozytoria
  - Kosz
  - Ustawienia dodatkowe
- Zmień rolę na...

#### NAJNOWSZE WIADOMOŚCI

Dodaj nowy temat...

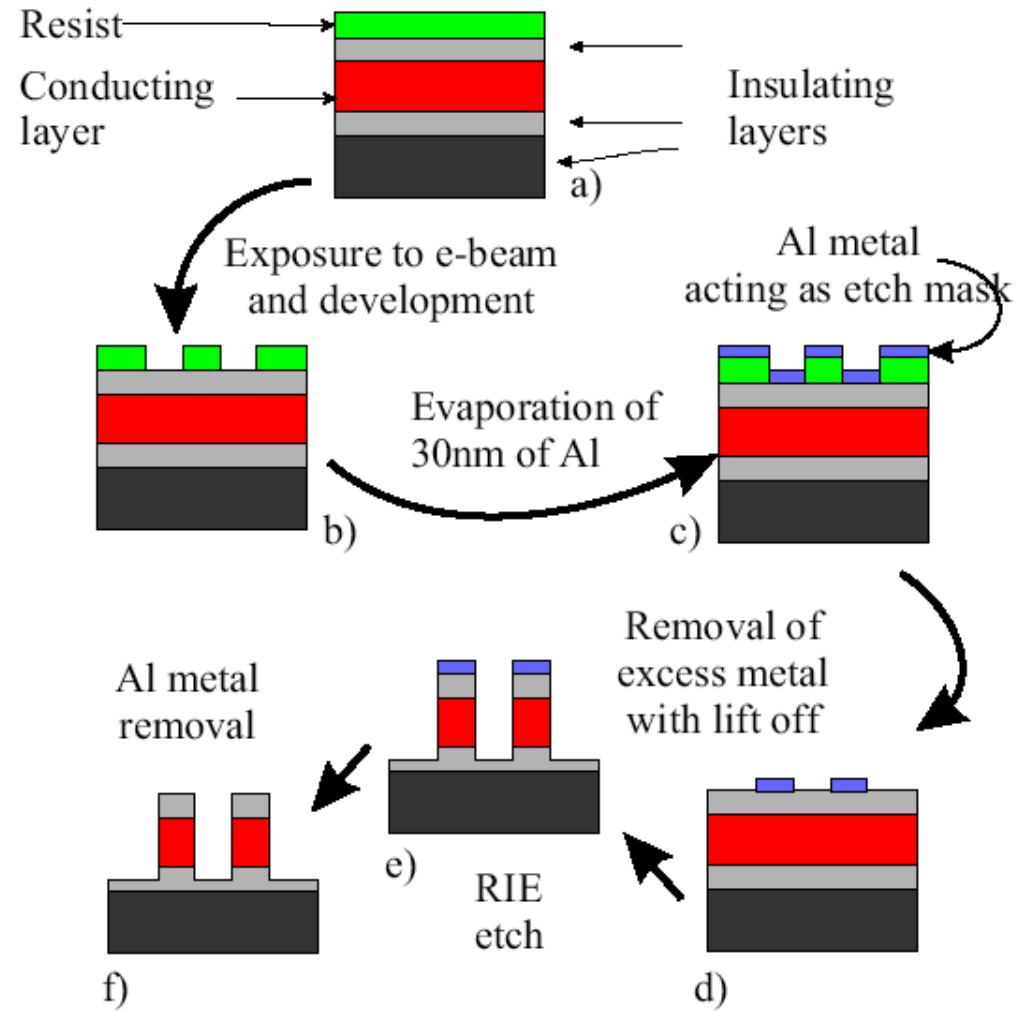
Zoom do wykładu  
21 paź, 00:35 Jacek Szczytko

Wykład 1 - Technologie 'disruptive', czyli ciężkie życie futurologa  
21 paź, 00:34 Jacek Szczytko

Starsze tematy ...

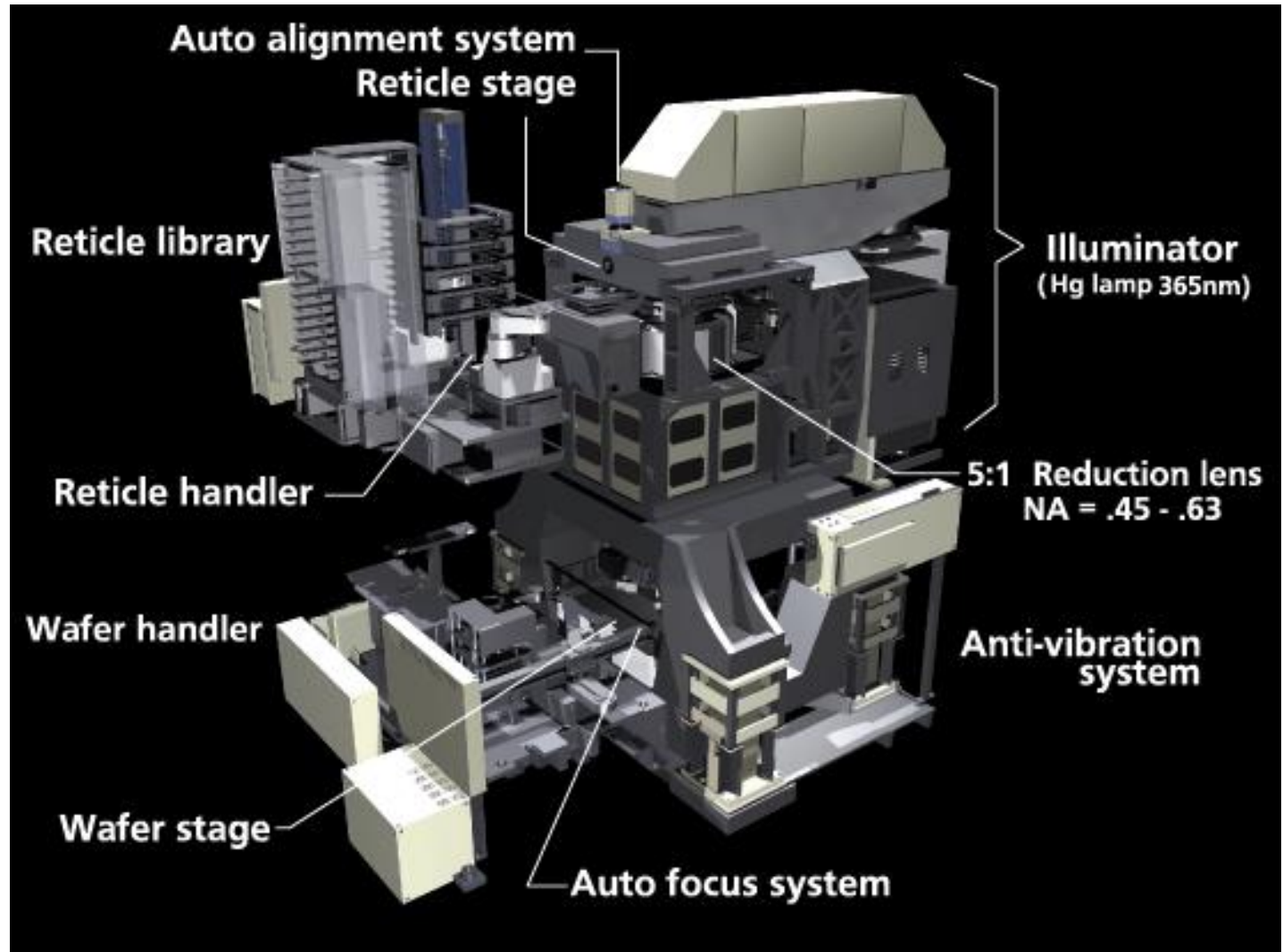
# Jak To jest zrobione?

1. **Dominuje technologia krzemowa**
2. **Obecne układy  $\sim 10^9 - 10^{10}$  tranzystorów**
3. **Podłoża - 300mm,  $\sim 10^3$  chipów**
4. **Fotolitografia, naświetlanie, trawienie etc**
5. **Typowo  $\sim 20$  masek, 150 - 200 kroków procesów**



# Nanotechnologia

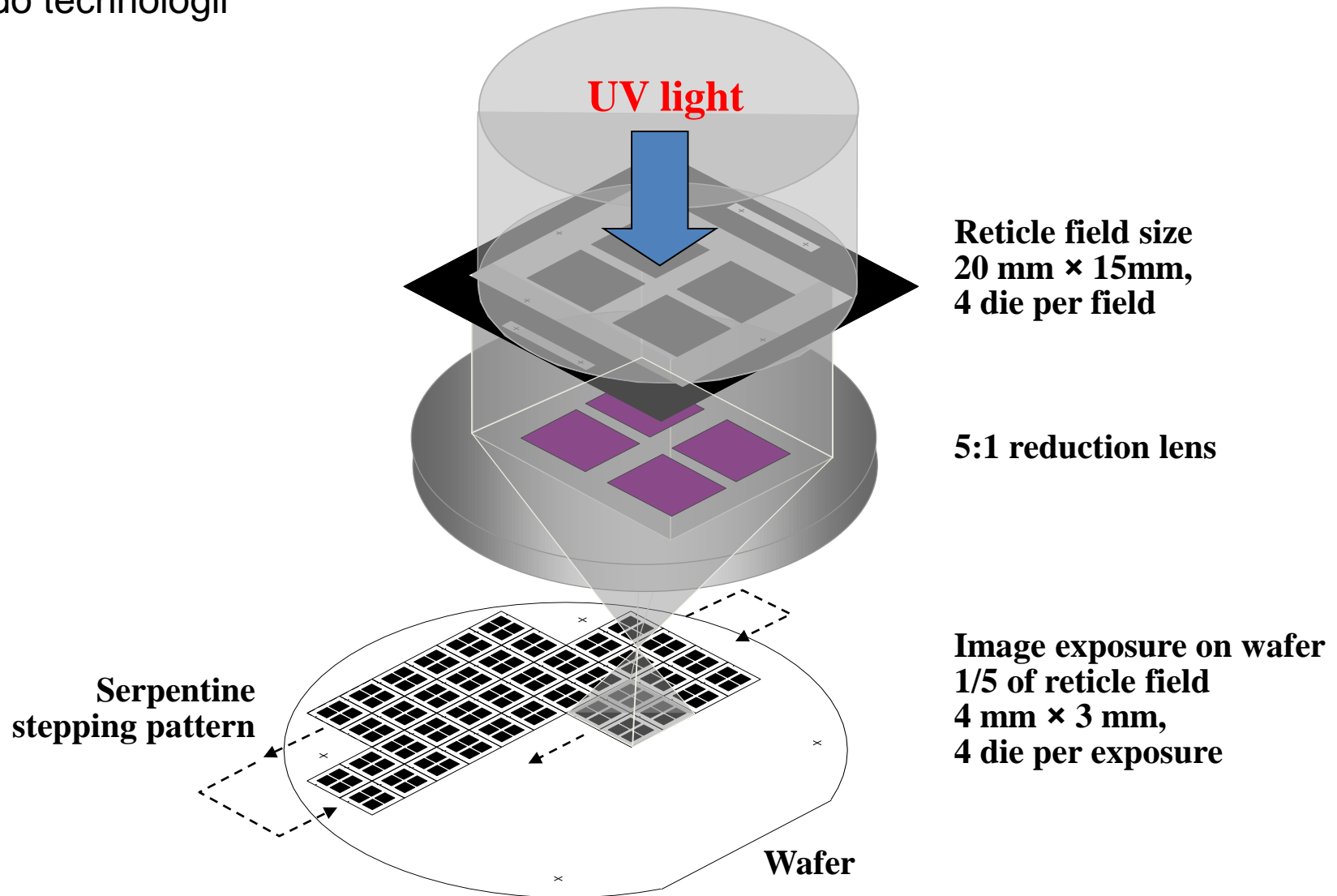
## Maszyna do technologii Step-and-Repeat Aligner (Stepper)



Źródło: [www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing\\_Technology](http://www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing_Technology)

# Nanotechnologia

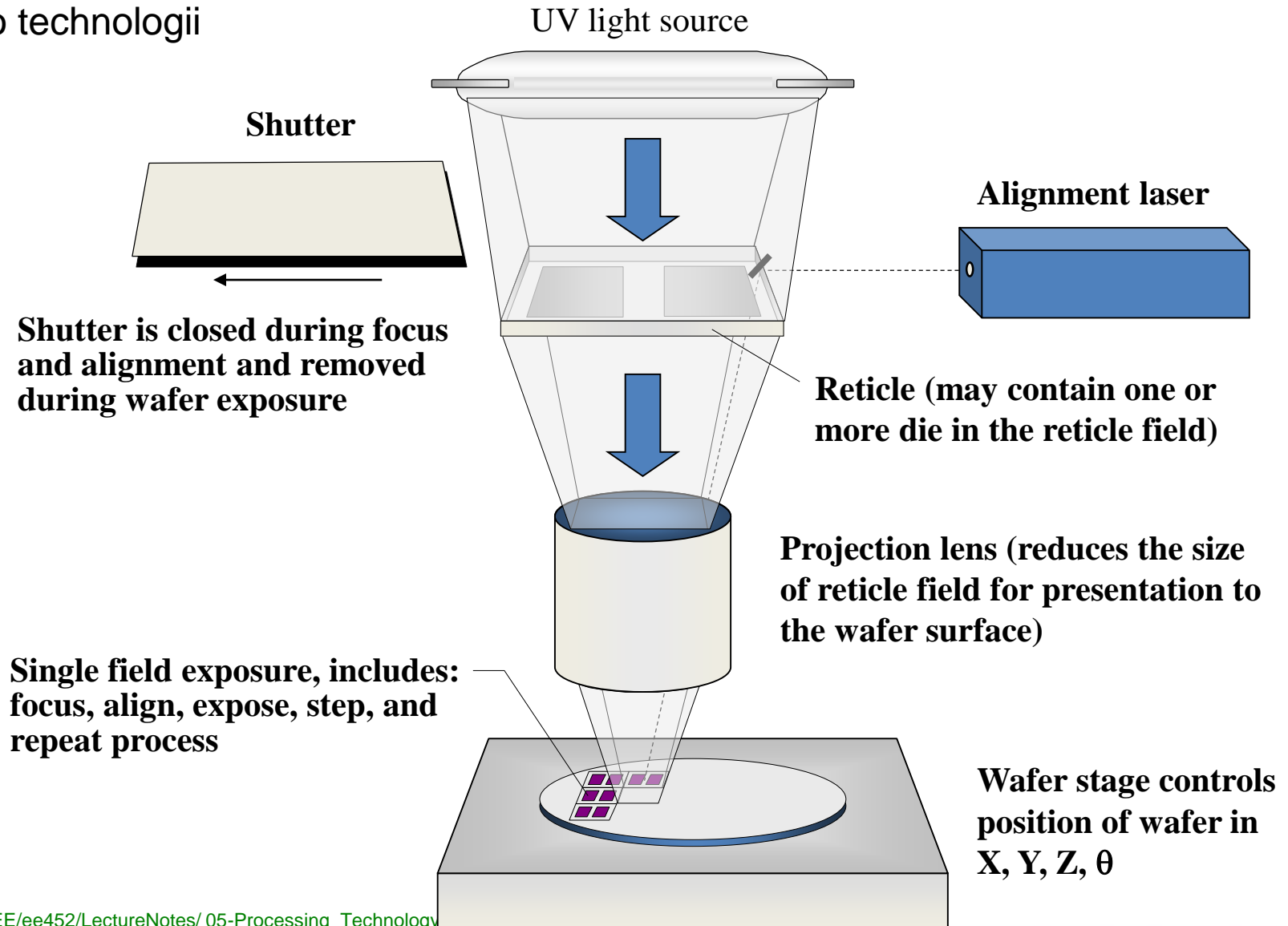
## Maszyna do technologii



Źródło: [www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing\\_Technology](http://www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing_Technology)

# Nanotechnologia

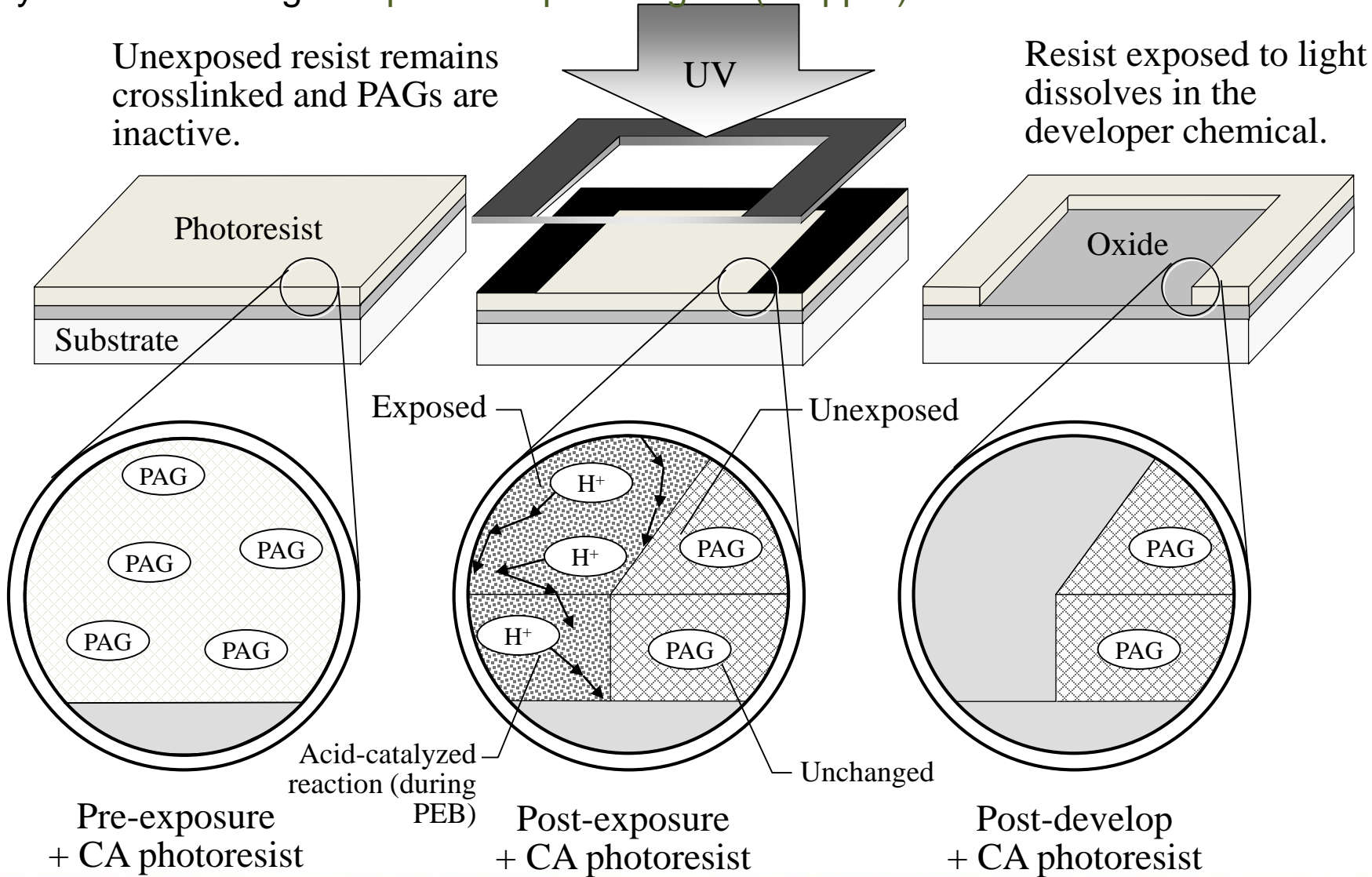
Maszyna do technologii



Źródło: [www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing\\_Technology](http://www.usna.edu/EE/ee452/LectureNotes/05-Processing_Technology)

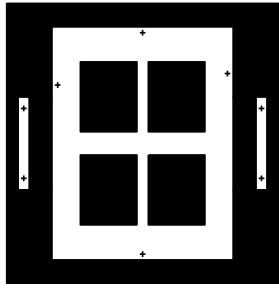
# Nanotechnologia

## Maszyna do technologii Step-and-Repeat Aligner (Stepper)

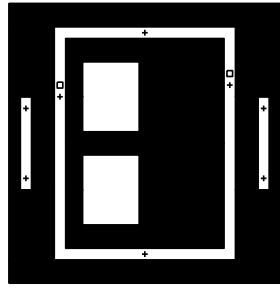




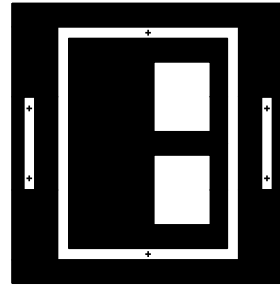
# Nanotechnology



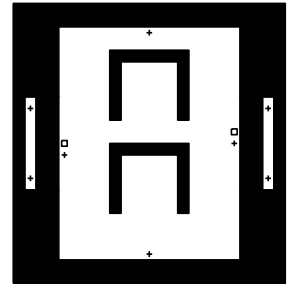
1) STI etch



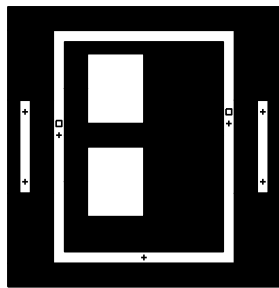
2) P-well implant



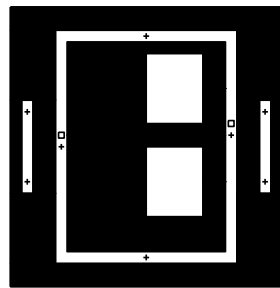
3) N-well implant



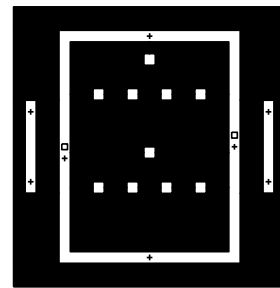
4) Poly gate etch



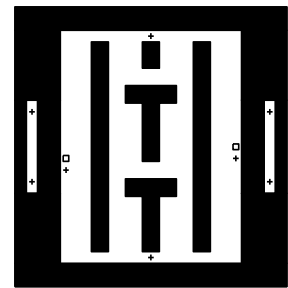
5) N<sup>+</sup> S/D implant



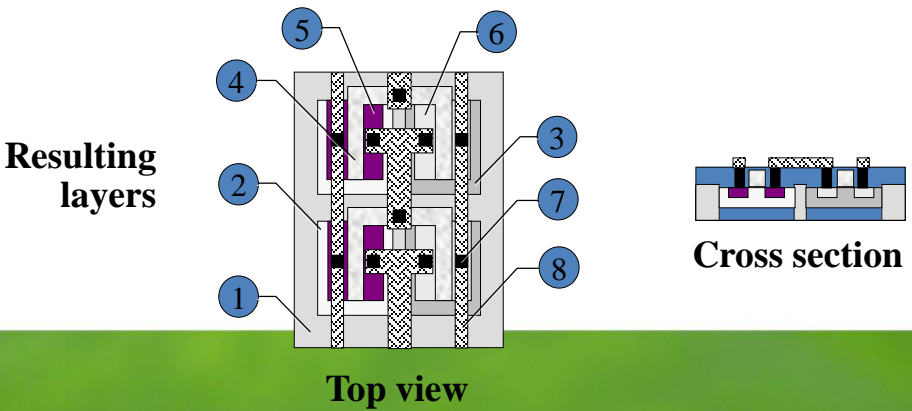
6) P<sup>+</sup> S/D implant



7) Oxide contact etch



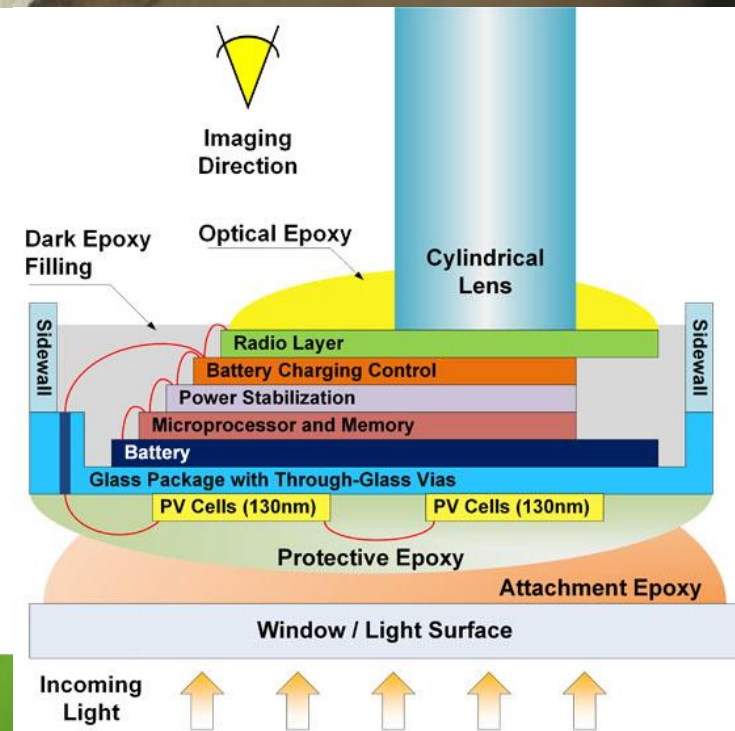
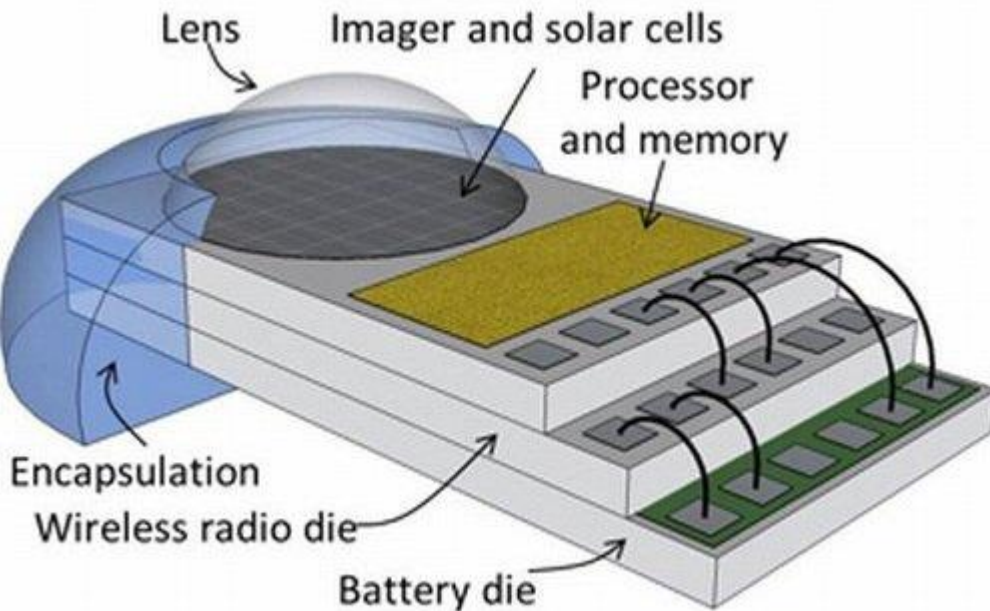
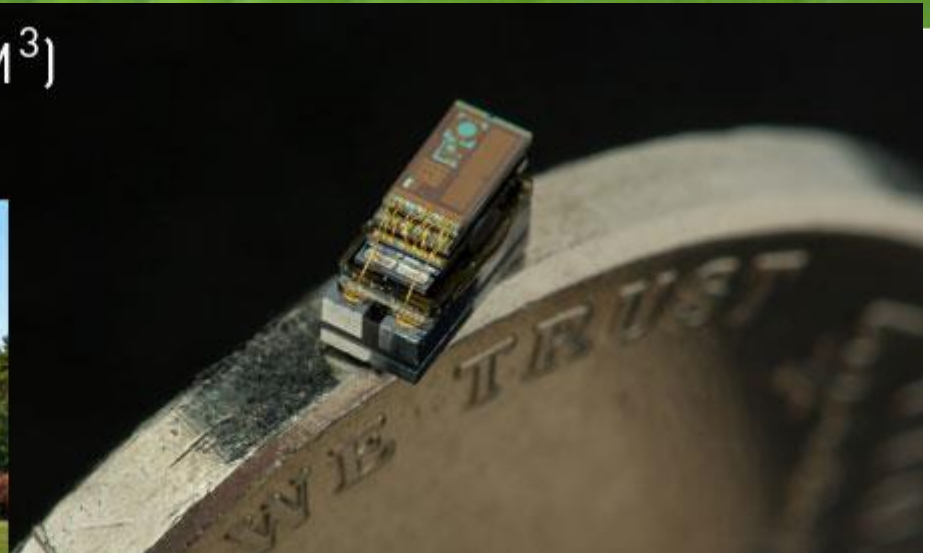
8) Metal etch





# TRENDY: Prawo Moore'a

## Michigan Micro Mote (M<sup>3</sup>) Makes History



## THE WALL STREET JOURNAL

Subscribe Now | Sign In  
SPECIAL OFFER: JOIN NOW

Home World U.S. Politics Economy Business Tech Markets Opinion Arts Life Real Estate

Search 🔍



New Intel Storage Drives Feature Faster Memory Technology



Yahoo's Mayer Gets Reprieve From Hacking Criticism



Apple Plans New China Centers as Cook Addresses Beijing Conference



Google Vows More Control for Brands Over Online Ads



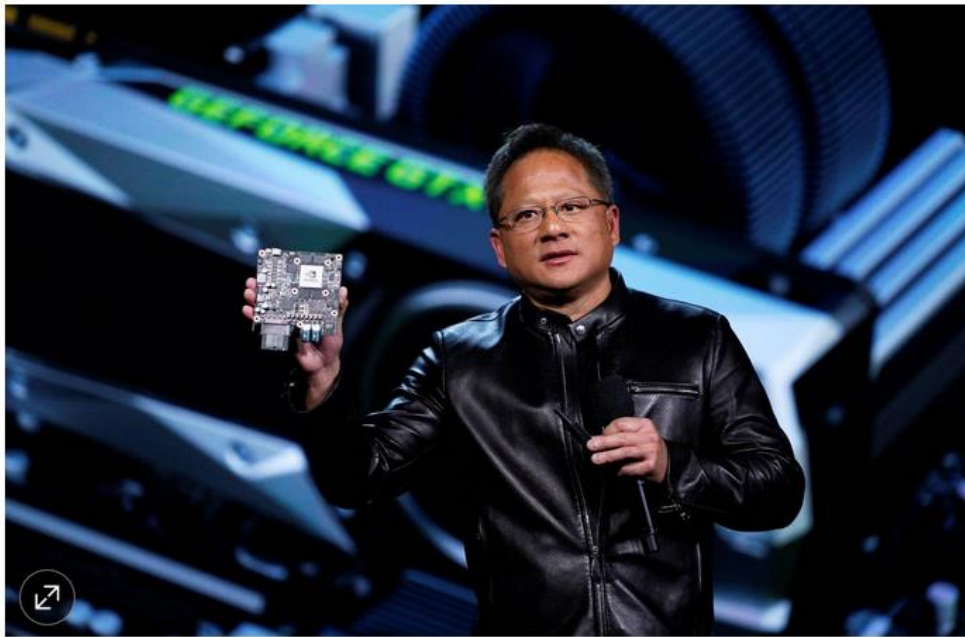
PERSONALIZED Google Parents Powers

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

TECH | KEYWORDS

### How Chip Designers Are Breaking Moore's Law

Microprocessors got smaller, faster and more power-efficient, but as they reach their physical limitations, chip architecture is driving performance gains



Jen-Hsun Huang, founder and chief executive of Nvidia, held up a Nvidia Xavier AI car supercomputer while delivering his January 4 keynote address at CES, the consumer electronics show in Las Vegas. PHOTO: RICK WILKING/REUTERS



By CHRISTOPHER MIMS

Updated March 19, 2017 11:54 a.m. ET

44 COMMENTS

#### Recommended Videos

1. Tips to Secure Your Family's Financial Future
2. Trump's Cuts Shows Priorities, but Many Won't Happen
3. Fly International on the Cheap
4. Spicer, Brit Spies, and Trump's Tweets —Decoded
5. WSJ Opinion Picks of the Week

#### Most Popular Articles

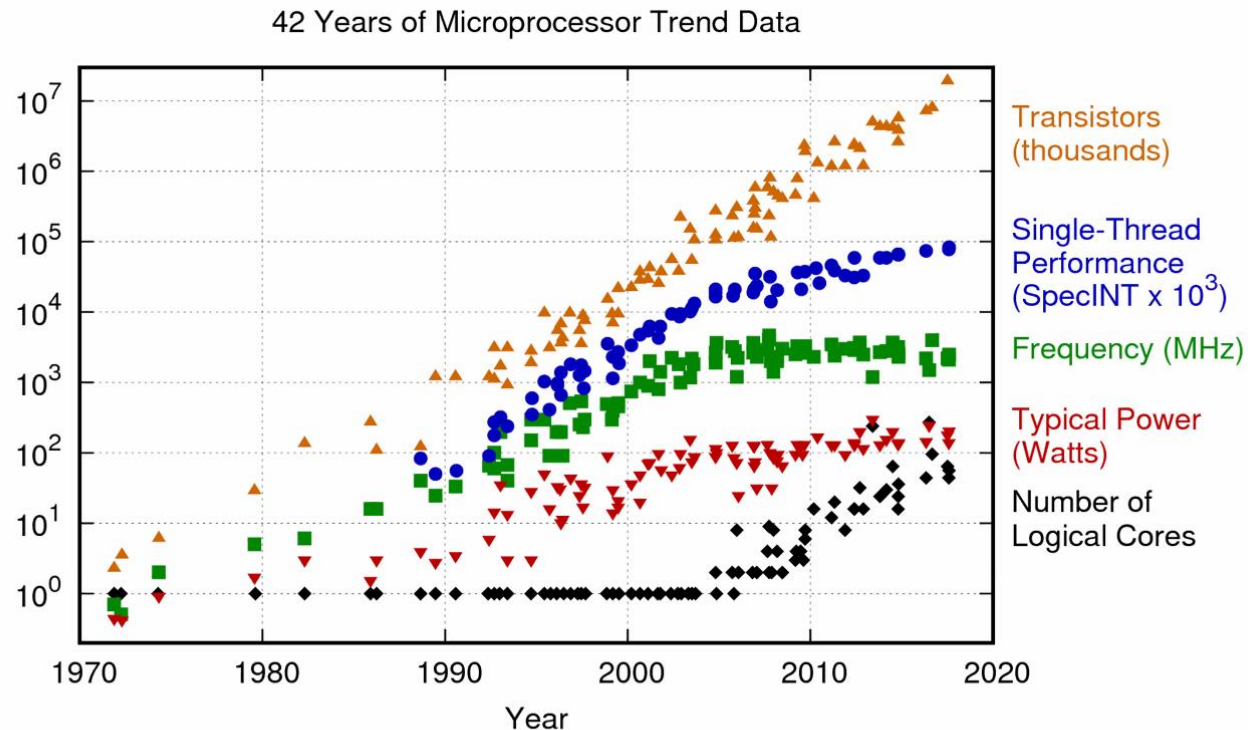
1. Kellyanne Conway's Husband Is Set to Lead Justice Department Division
2. Marines Take Vigilante-Style Action Amid Photo Scandal
3. One Beneficiary of GOP's Tax Bill: President Trump

Two of the biggest semiconductor companies made announcements last week that might

# TRENDY: Prawo Moore'a



## Breakdown of Dennard scaling

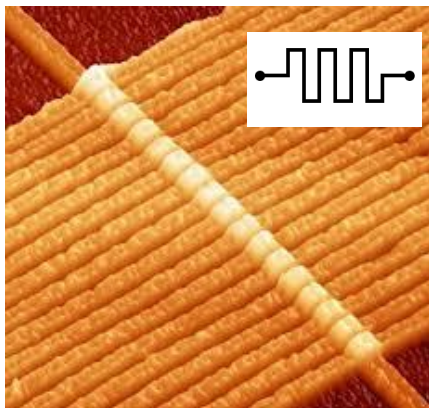


Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten  
New plot and data collected for 2010-2017 by K. Rupp





# TRENDY: Prawo Moore'a

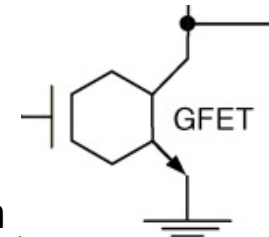


nanotechnologia,  
memrystory  
komputery kwantowe

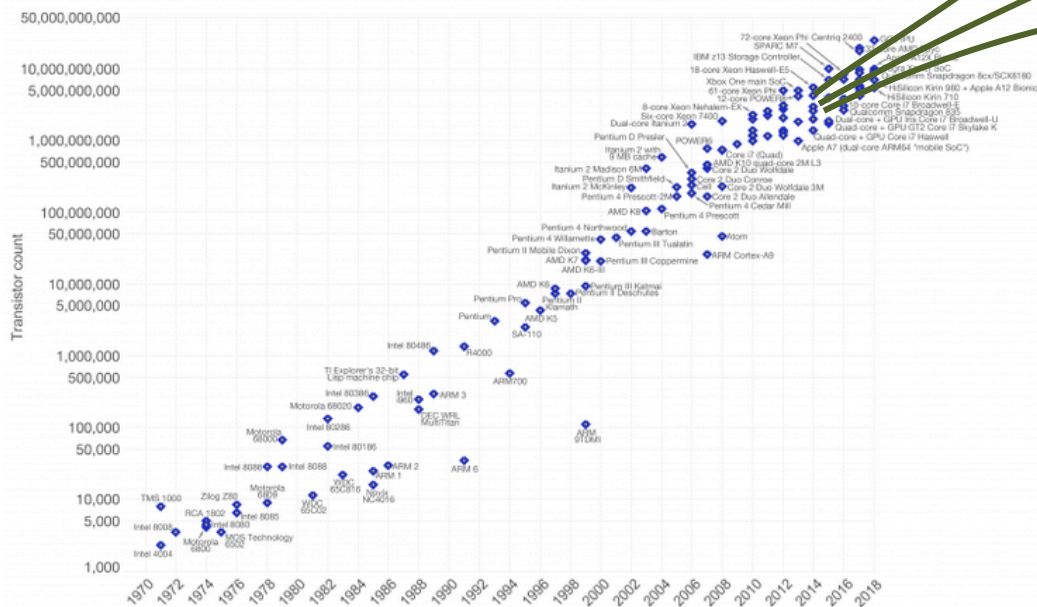
HP

nanotechnologia  
grafen

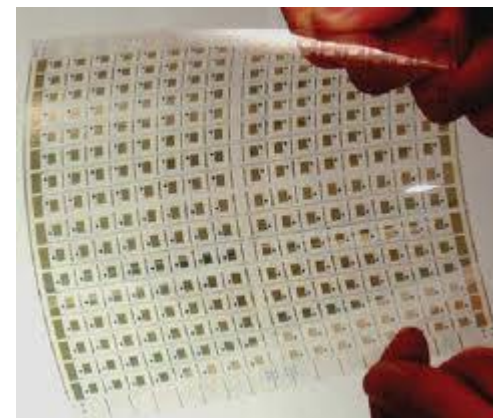
materiały organiczne



koniec prawa Moore'a



Źródło: World of Data

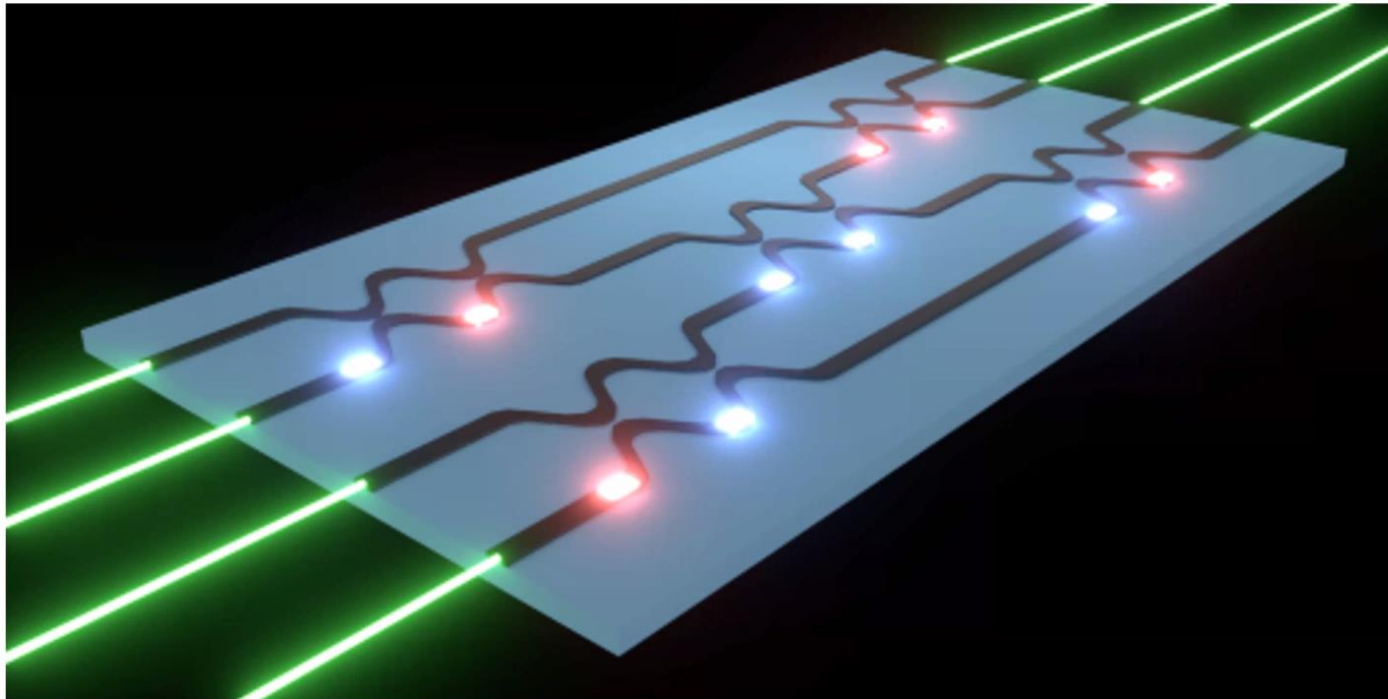




# TRENDY: Prawo Moore'a



## Breakdown of Dennard scaling



Are optical transistors the logical next step?

David A. B. Miller

NATURE PHOTONICS | VOL 4 | JANUARY 2010 |

© 2019 IBM Corporation

2

# Obliczenia kwantowe

## IBM Puts a Quantum Processor in the Cloud

By [Rachel Courtland](#)

Posted 4 May 2016 | 4:02 GMT

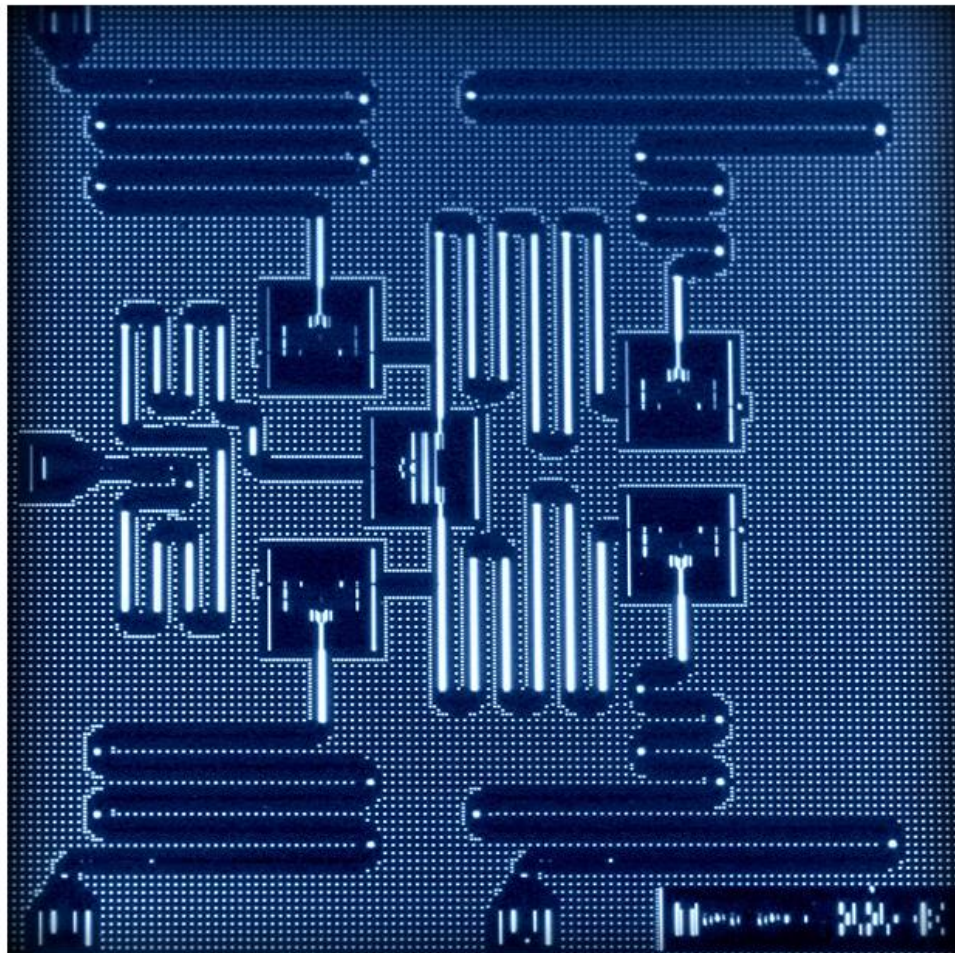


Photo: IBM Research

IBM Puts a Quantum Processor in the Cloud

By Rachel Courtland

Posted 4 May 2016 | 4:02 GMT

Photo: IBM Research

IBM announced today that it is making one of its superconducting quantum processors accessible over the Internet. Those itching to try out such hardware will be able to get hands-on experience through a new quantum computing platform—at least, the experience will be as hands-on as it can be with hardware sealed inside a remote dilution refrigerator and cooled to a fraction of a degree above absolute zero.

With just five qubits, the chip won't let you rapidly factor large numbers in order to break encryption. In fact, a classical simulation of this system takes less time to run, says Jay Gambetta, manager of the Theory of Quantum Computing and Information Group at IBM's Thomas J. Watson Research Center in Yorktown Heights, N.Y.

img

Photo: IBM Research

IBM is offering software that will let people run a five-qubit quantum processor from any computer or mobile device. Proximity to a dilution refrigerator not required.

But the goal of this tool, says Gambetta, “is to get people to start thinking quantum, to start thinking in terms of how a quantum computer works. Most people think quantum is hard or it's spooky or it's different. And yes it's different, but it's actually not hard.”

<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/ibm-puts-a-quantum-processor-in-the-cloud>



## CES 2018: IBM przywiózł do Las Vegas 50-kubitowy komputer kwantowy



Wintermute

10 stycznia 2018

5 komentarzy



**Kwantowe maszyny przestają być tylko laboratoryjną, futurystyczną osobliwością. Najpierw Intel, a teraz IBM pokazują swoje urządzenia, oparte o tę nowoczesną i zapowiadaną od dawna technologię. Komputer skonstruowany przez IBM potrzebuje do pracy temperatury 10 milikelwinów.**

Komputery kwantowe z klasycznymi komputerami łączy tylko jedno – nazwa. Pod względem konstrukcyjnym, zasady działania, architektury czy wreszcie wzornictwa to zupełnie inne urządzenia. Swoją 49-kubitową procesor kwantowy na Consumer Electronics Show pokazał już Intel – [pisał o tym Jacek Tomczyk](#). Teraz IBM demonstruje nie tylko QPU (Quantum Processing Unit), ale cały komputer kwantowy.

<http://www.chip.pl/2018/01/ces-2018-ibm-przywiozl-las-vegas-50-kubitowy-komputer-kwantowy/>

### CZYTAJ RÓWNIEŻ



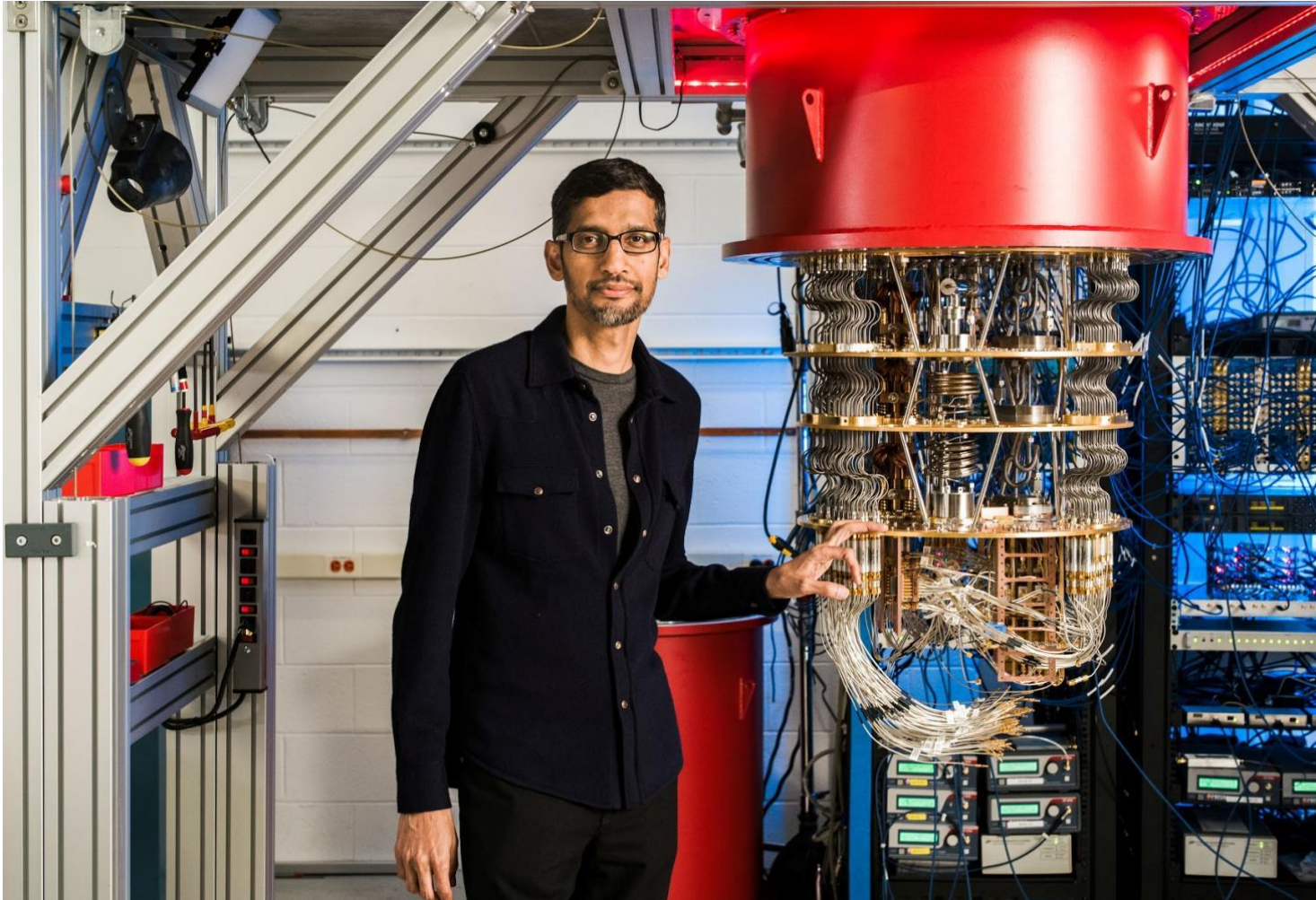
**CES 2018: Razer Linda** czyli smartfon, który zmienia się w laptopa



**Ewakuacja Apple Store, straż pożarna, policja i karetki – z powodu baterii**

12

# Quantum supremacy



<https://www.wired.com/story/alphabet-second-secretive-quantum-computing-team/>

# Quantum supremacy

## Article

# Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

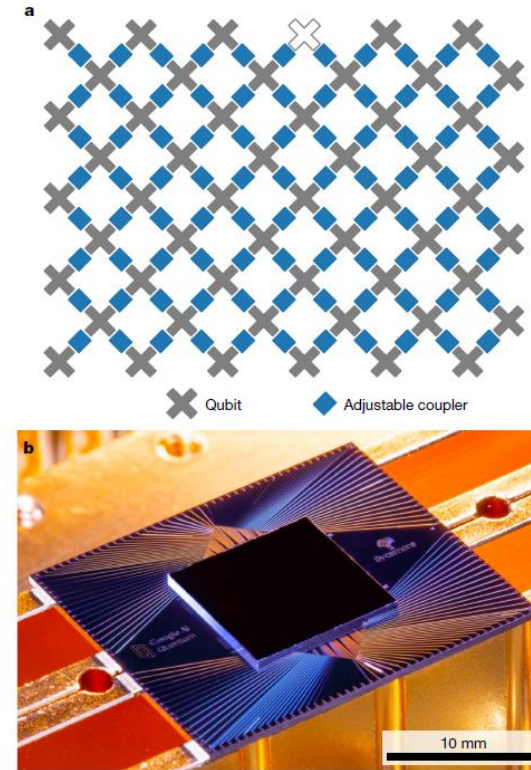
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

Accepted: 20 September 2019

Published online: 23 October 2019

Frank Arute<sup>1</sup>, Kunal Arya<sup>1</sup>, Ryan Babbush<sup>1</sup>, Dave Bacon<sup>1</sup>, Joseph C. Bardin<sup>1,2</sup>, Rami Barends<sup>1</sup>, Rupak Biswas<sup>3</sup>, Sergio Boixo<sup>1</sup>, Fernando G. S. L. Brandao<sup>1,4</sup>, David A. Buell<sup>1</sup>, Brian Burkett<sup>1</sup>, Yu Chen<sup>1</sup>, Zijun Chen<sup>1</sup>, Ben Chiaro<sup>5</sup>, Roberto Collins<sup>1</sup>, William Courtney<sup>1</sup>, Andrew Dunsworth<sup>1</sup>, Edward Farhi<sup>1</sup>, Brooks Foxen<sup>1,5</sup>, Austin Fowler<sup>1</sup>, Craig Gidney<sup>1</sup>, Marissa Giustina<sup>1</sup>, Rob Graff<sup>1</sup>, Keith Guerin<sup>1</sup>, Steve Habegger<sup>1</sup>, Matthew P. Harrigan<sup>1</sup>, Michael J. Hartmann<sup>1,6</sup>, Alan Ho<sup>1</sup>, Markus Hoffmann<sup>1</sup>, Trent Huang<sup>1</sup>, Travis S. Humble<sup>7</sup>, Sergei V. Isakov<sup>1</sup>, Evan Jeffrey<sup>1</sup>, Zhang Jiang<sup>1</sup>, Dvir Kafri<sup>1</sup>, Kostyantyn Kechedzhi<sup>1</sup>, Julian Kelly<sup>1</sup>, Paul V. Klimov<sup>1</sup>, Sergey Knysh<sup>1</sup>, Alexander Korotkov<sup>1,8</sup>, Fedor Kostritsa<sup>1</sup>, David Landhuis<sup>1</sup>, Mike Lindmark<sup>1</sup>, Erik Lucero<sup>1</sup>, Dmitry Lyakh<sup>9</sup>, Salvatore Mandrà<sup>3,10</sup>, Jarrod R. McClean<sup>1</sup>, Matthew McEwen<sup>5</sup>, Anthony Megrant<sup>1</sup>, Xiao Mi<sup>1</sup>, Kristel Michielsen<sup>11,12</sup>, Masoud Mohseni<sup>1</sup>, Josh Mutus<sup>1</sup>, Ofer Naaman<sup>1</sup>, Matthew Neeley<sup>1</sup>, Charles Neill<sup>1</sup>, Murphy Yuezhen Niu<sup>1</sup>, Eric Ostby<sup>1</sup>, Andre Petukhov<sup>1</sup>, John C. Platt<sup>1</sup>, Chris Quintana<sup>1</sup>, Eleanor G. Rieffel<sup>3</sup>, Pedram Roushan<sup>1</sup>, Nicholas C. Rubin<sup>1</sup>, Daniel Sank<sup>1</sup>, Kevin J. Satzinger<sup>1</sup>, Vadim Smelyanskiy<sup>1</sup>, Kevin J. Sung<sup>1,13</sup>, Matthew D. Trevithick<sup>1</sup>, Amit Vainsencher<sup>1</sup>, Benjamin Villalonga<sup>1,14</sup>, Theodore White<sup>1</sup>, Z. Jamie Yao<sup>1</sup>, Ping Yeh<sup>1</sup>, Adam Zalcman<sup>1</sup>, Hartmut Neven<sup>1</sup> & John M. Martinis<sup>1,5\*</sup>



**Fig. 1 | The Sycamore processor.** **a**, Layout of processor, showing a rectangular array of 54 qubits (grey), each connected to its four nearest neighbours with couplers (blue). The inoperable qubit is outlined. **b**, Photograph of the Sycamore chip.

*Nature* volume 574, pages 505–510 (2019)

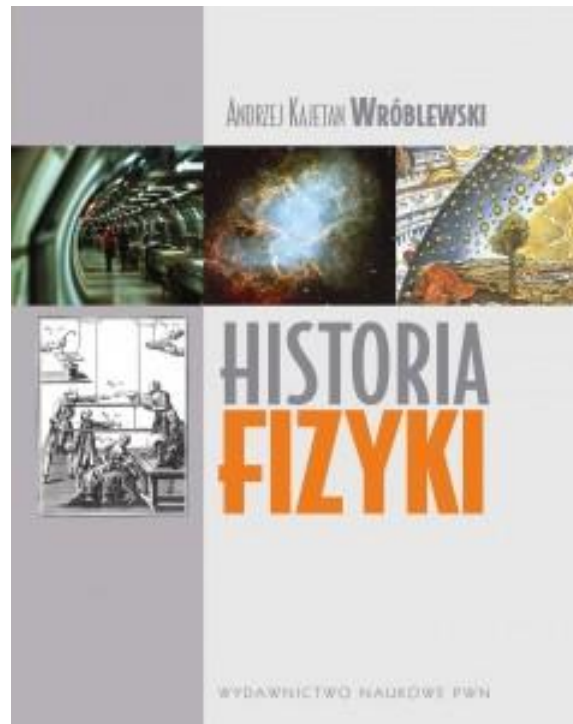
# Jak TO działa?

- Przeprojektowanie CMOS (np. wertykalne, FIN, MOSFET z podwójną bramką)
- Urządzenia alternatywne (np. na pojedynczych elektronach)
- Urządzenia hybrydowe (np. FET z nanorurek)
- Nowe architektury (np. samonaprawiające się, defect-tolerance, automaty komórkowe)
- Zupełnie nowe architektury (np. komputery molekularne, komputery kwantowe)



## 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)

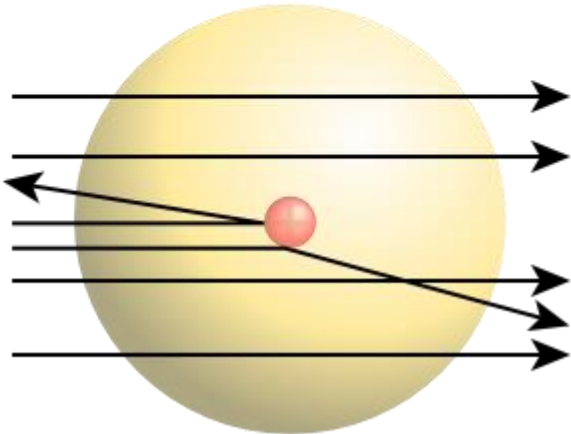
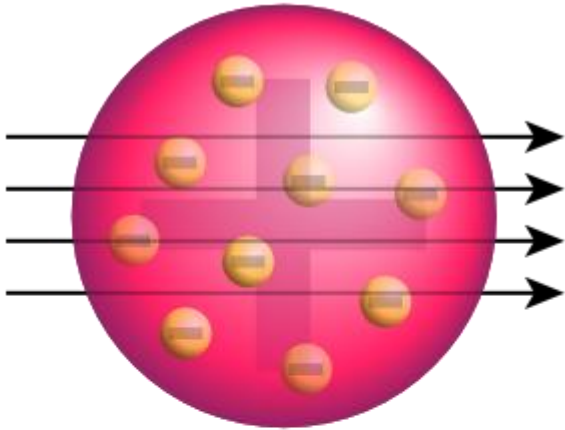


James Clerk Maxwell (13 June 1831 – 5 November 1879)

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

# Trochę historii

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



Sir Ernest Rutherford (1871 -1937)

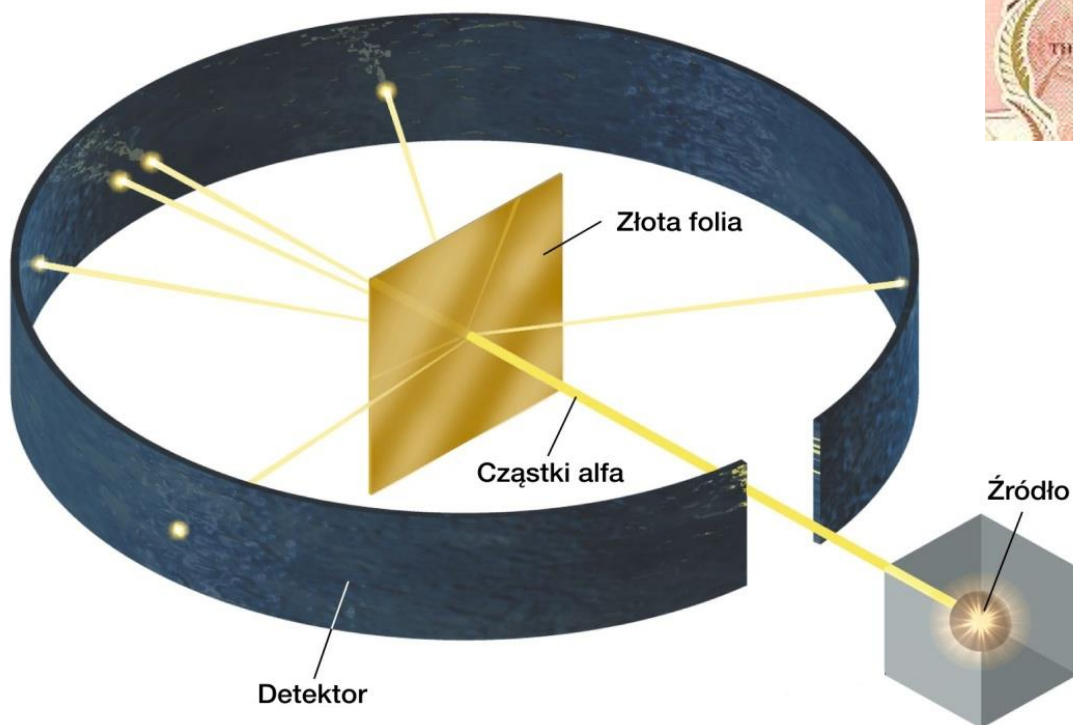
<http://rutherford.pl/informacje/doswiadczenie-rutherforda/>

# Trochę historii

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



Sir Ernest Rutherford (1871 -1937)



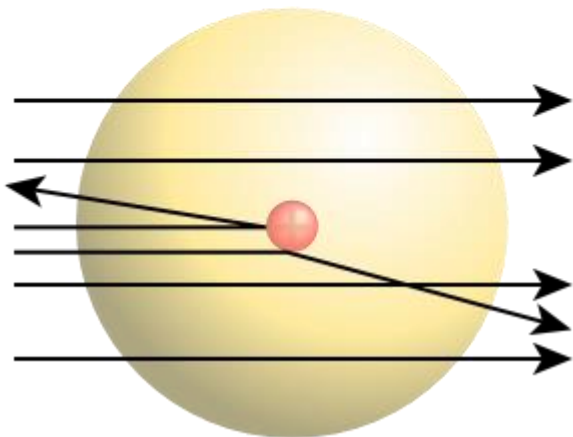
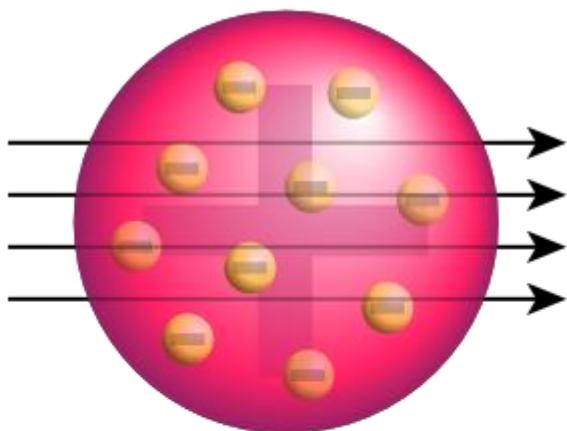
Atomy	→ $10^{-10}$ m
Jądra atomowe	→ $10^{-14}$ m
Protony, neutrony	→ $10^{-15}$ m

<http://rutherford.pl/informacje/doswiadczenie-rutherforda/>



# Trochę historii

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



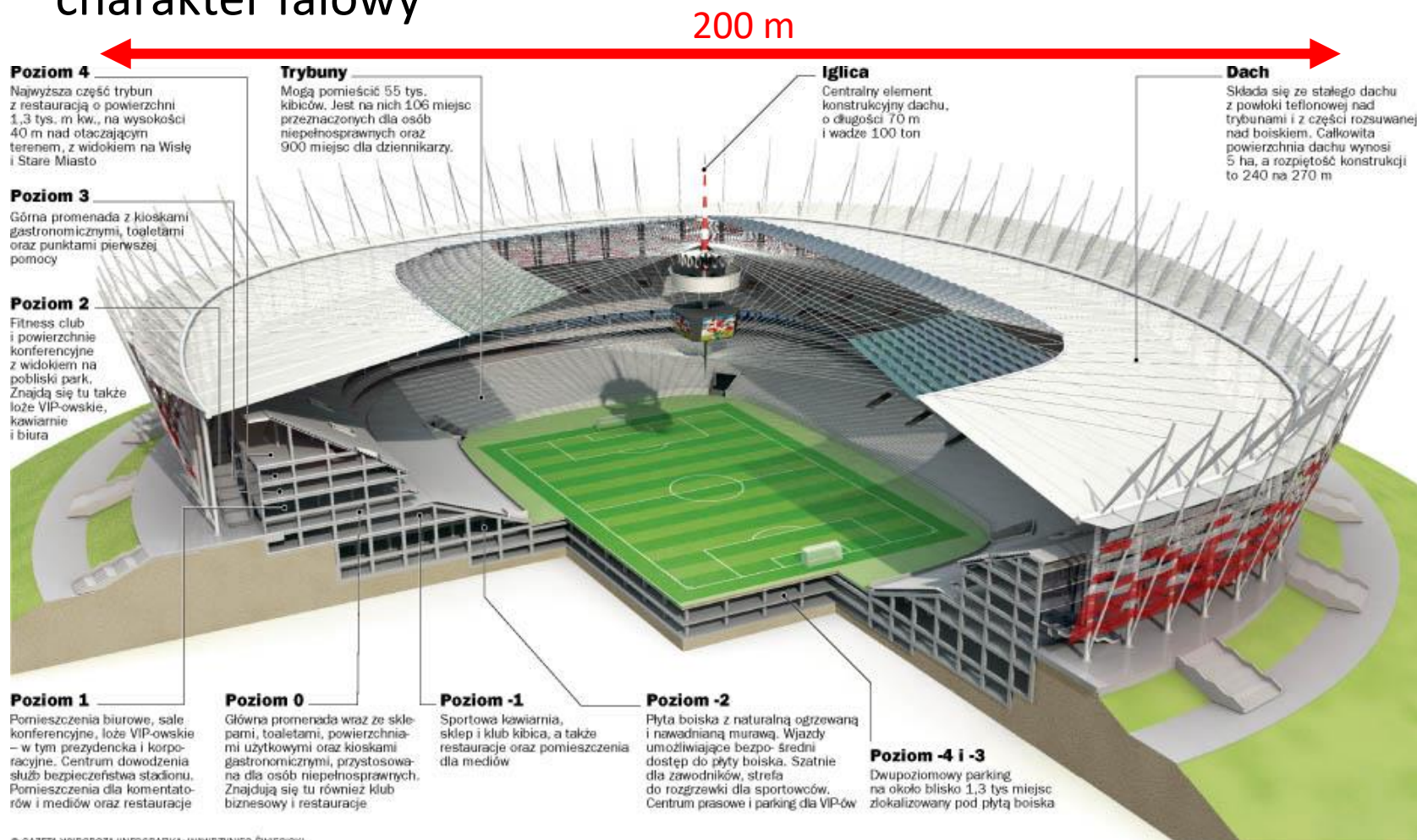
Sir Ernest Rutherford (1871 -1937)

Atomy	→ $10^{-10}$ m
Jądra atomowe	→ $10^{-14}$ m
Protony, neutrony	→ $10^{-15}$ m

<http://rutherford.pl/informacje/doswiadczenie-rutherforda/>

# Trochę historii

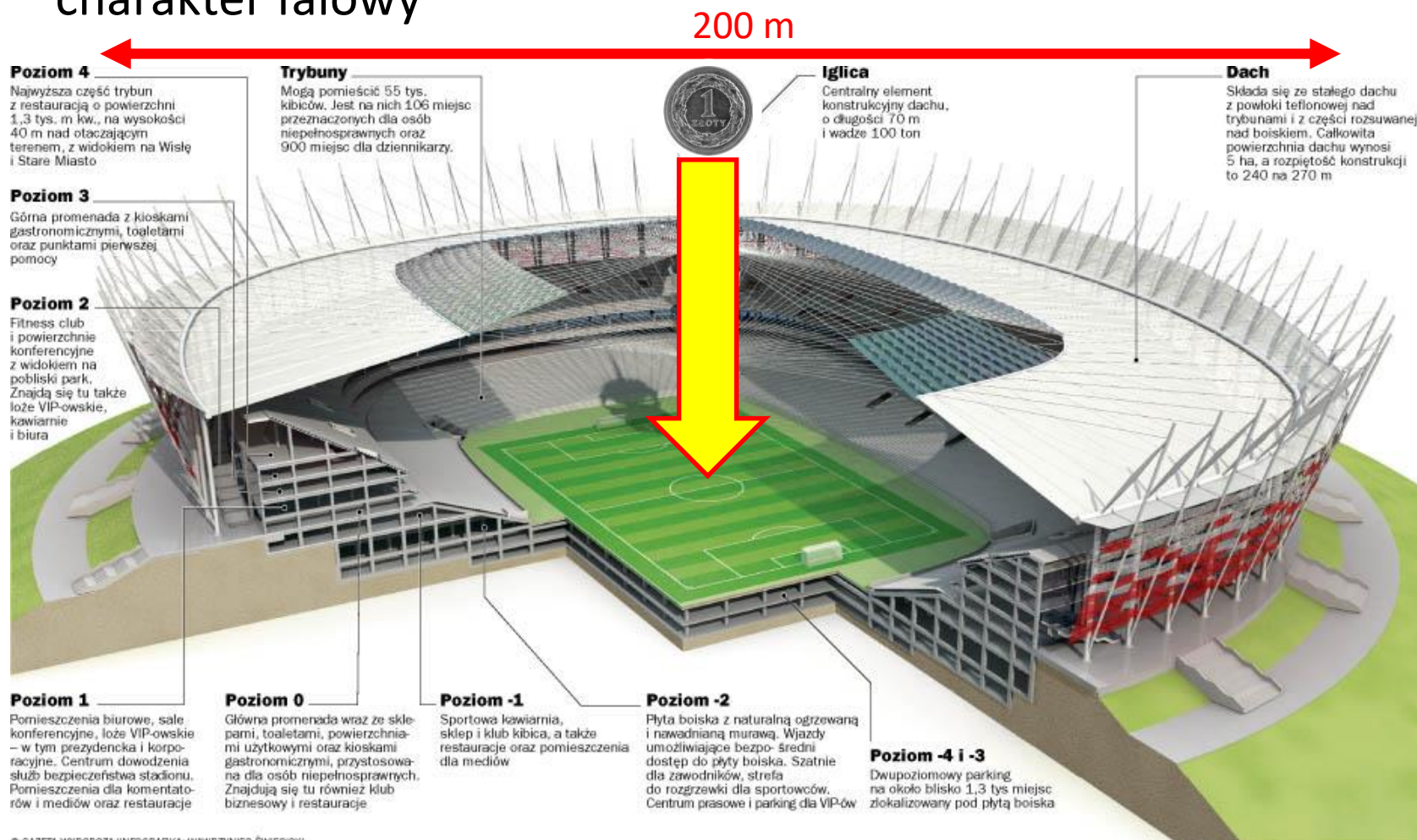
- XIX w: materia ma budowę ziarnistą, energia (gł. fale e-m) ma charakter falowy



© GAZETA WYBORCZA/INFOGRARKA: WAWRZYNIEC ŚWIĘCICKI

# Trochę historii

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



© GAZETA WYBORCZA/INFOGRARKA: WAWRZYNIEC ŚWIĘCICKI



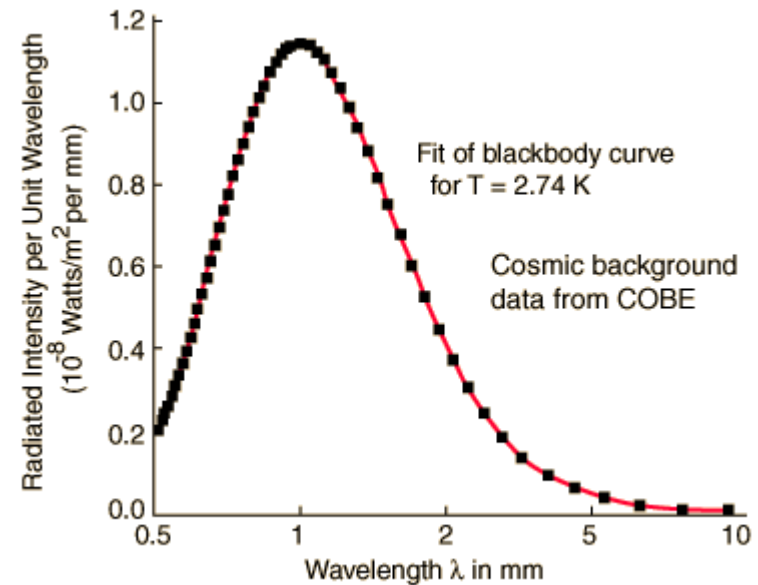
# Trochę historii

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



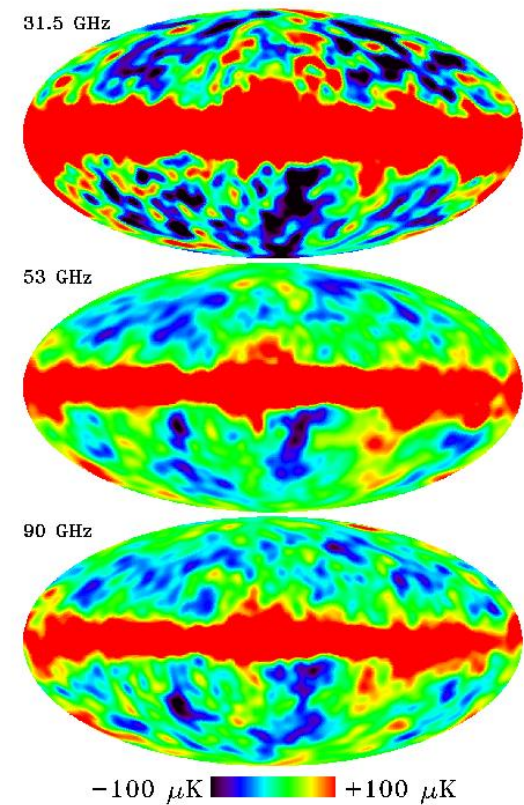
# Trochę historii

- 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



# 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





# 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

# 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)

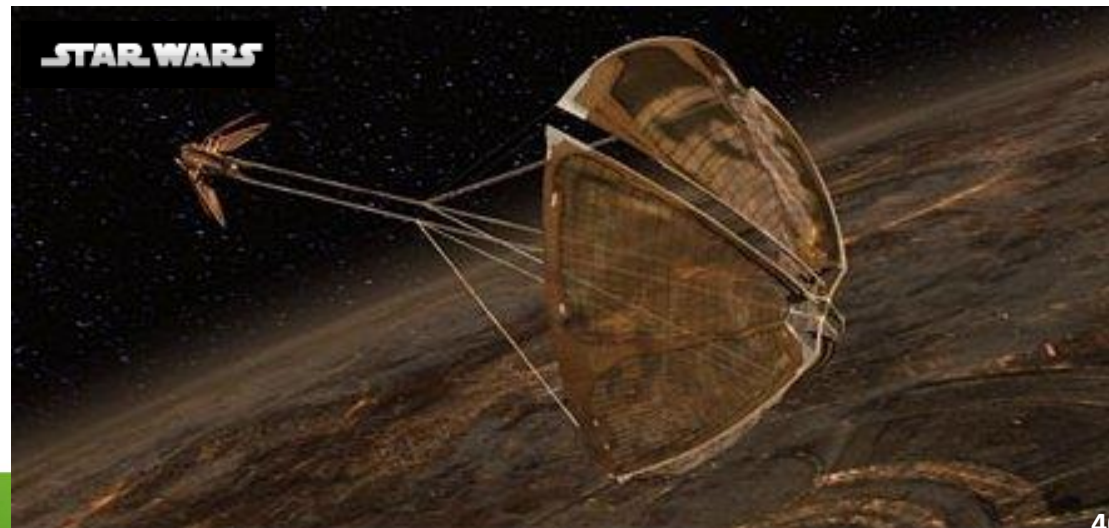
- **Rozwiązane** problemy:

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

$$p = h / \lambda$$

- **Fotony**
  - *energia*:  $E = h \nu$  ( $h = 6.626 \times 10^{-32} \text{ J s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$ )
  - *pęd*:  $p = E / c = h / \lambda$

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)

$$\lambda = h / p$$

$$p = h / \lambda$$

klasycznie



# 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)

$$\lambda = h / p$$

$$p = h / \lambda$$

klasycznie



kwantowo

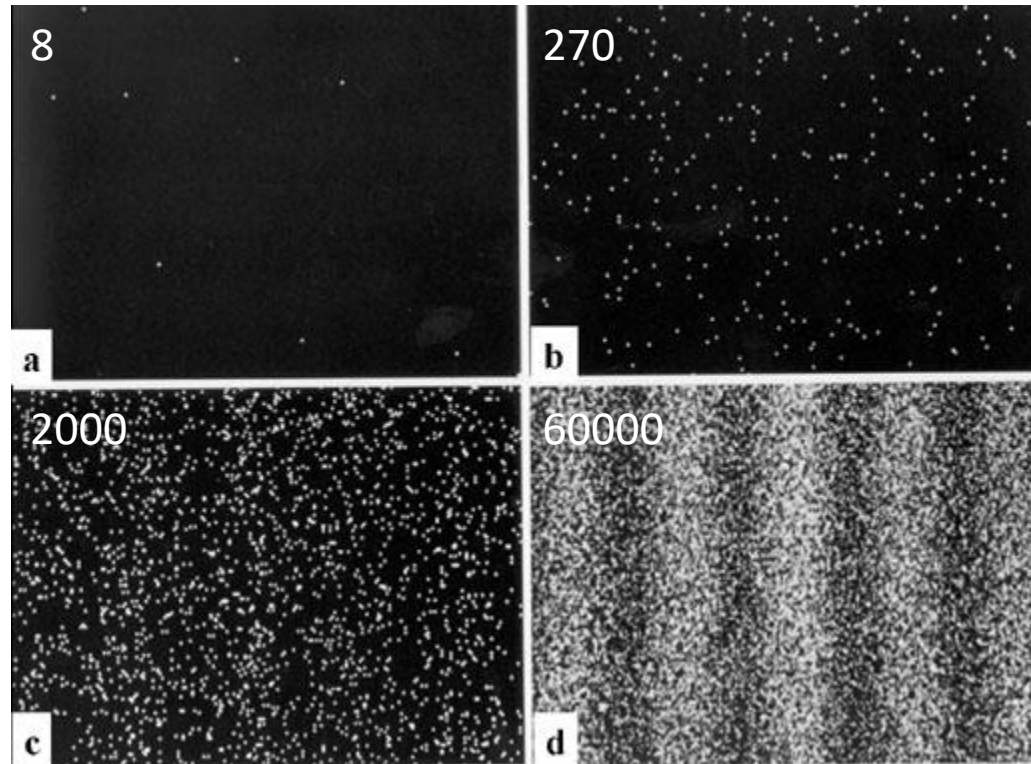


# Trochę historii

## 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

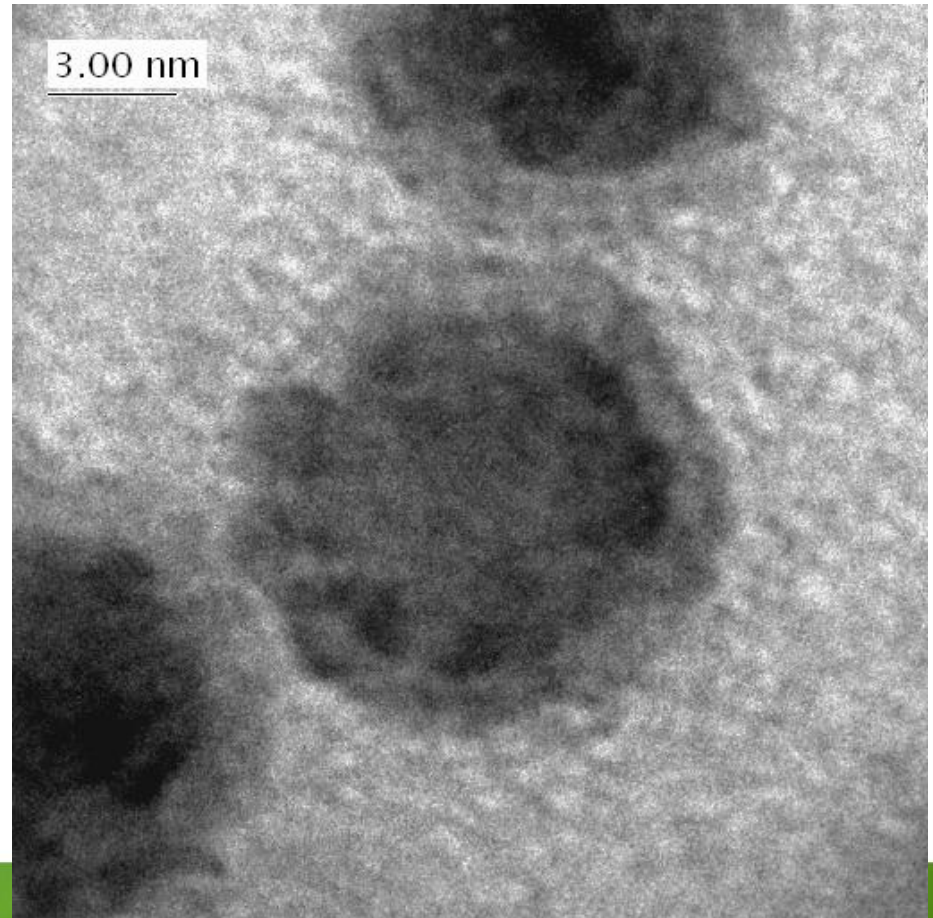
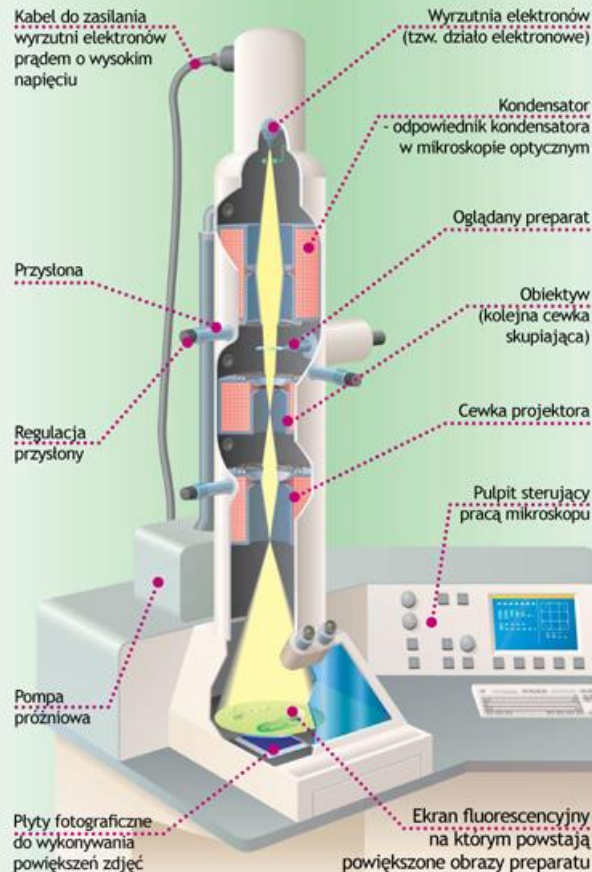
[www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.html](http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.html).

# Trochę historii

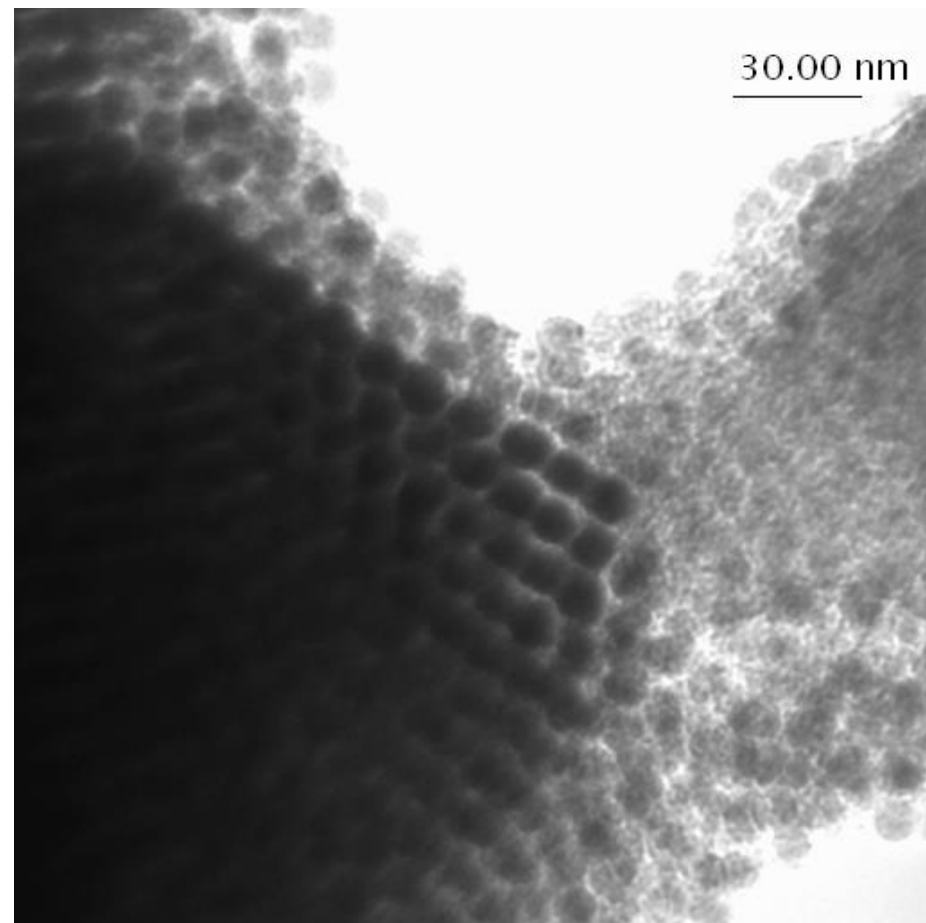
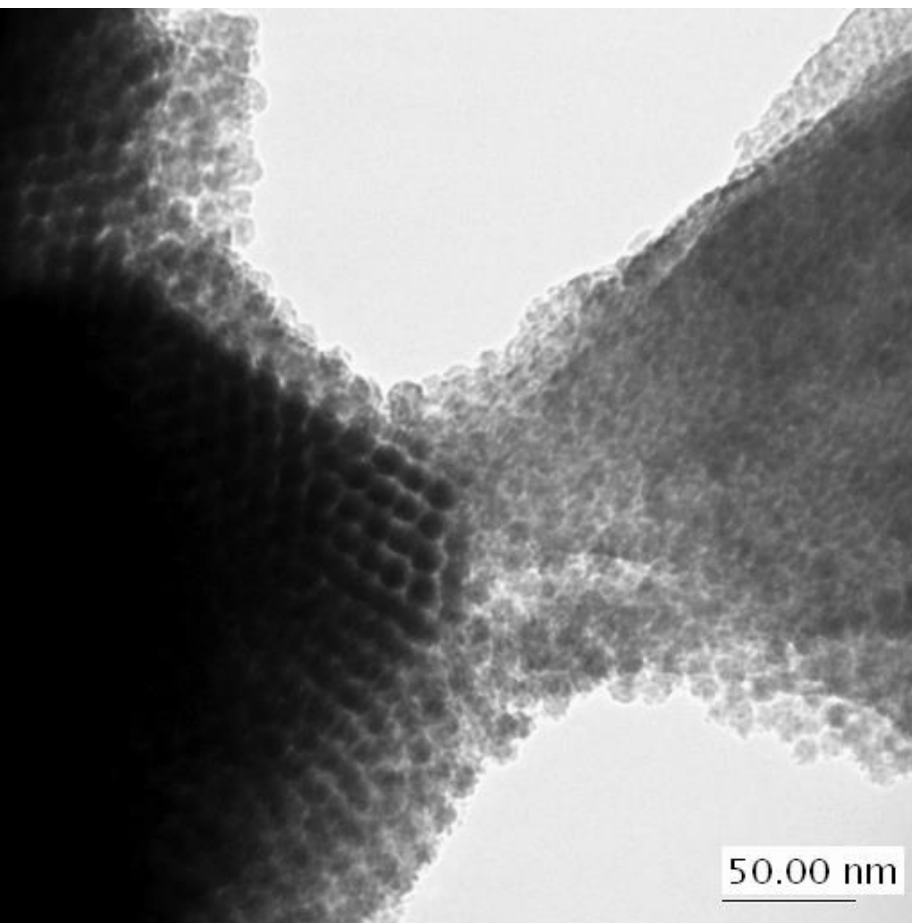
## XX w: materia ma (również) charakter falowy

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

$$\lambda = h / p$$



# Magnetyczne QD's



Synteza: Paweł Majewski, TEM: Jolanta Borysiuk

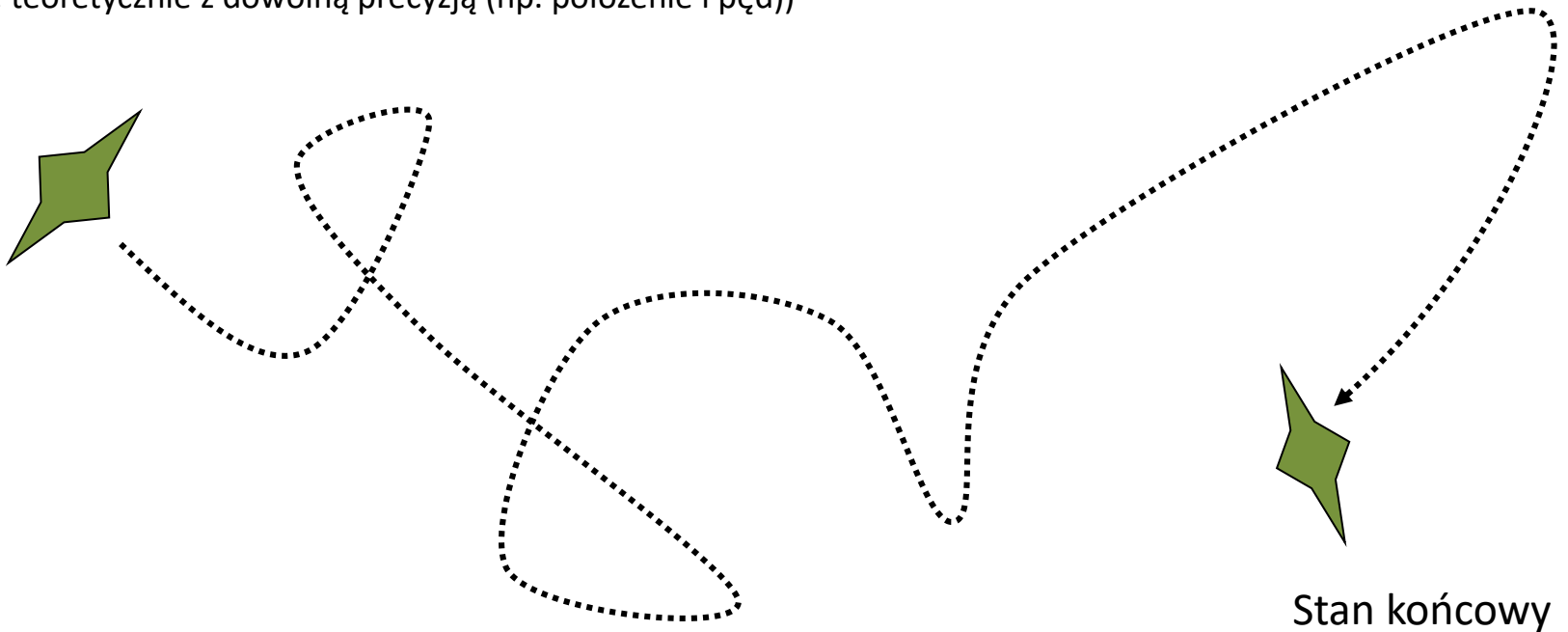


# Świat klasyczny i kwantowy

## 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))

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

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

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



Stan końcowy

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



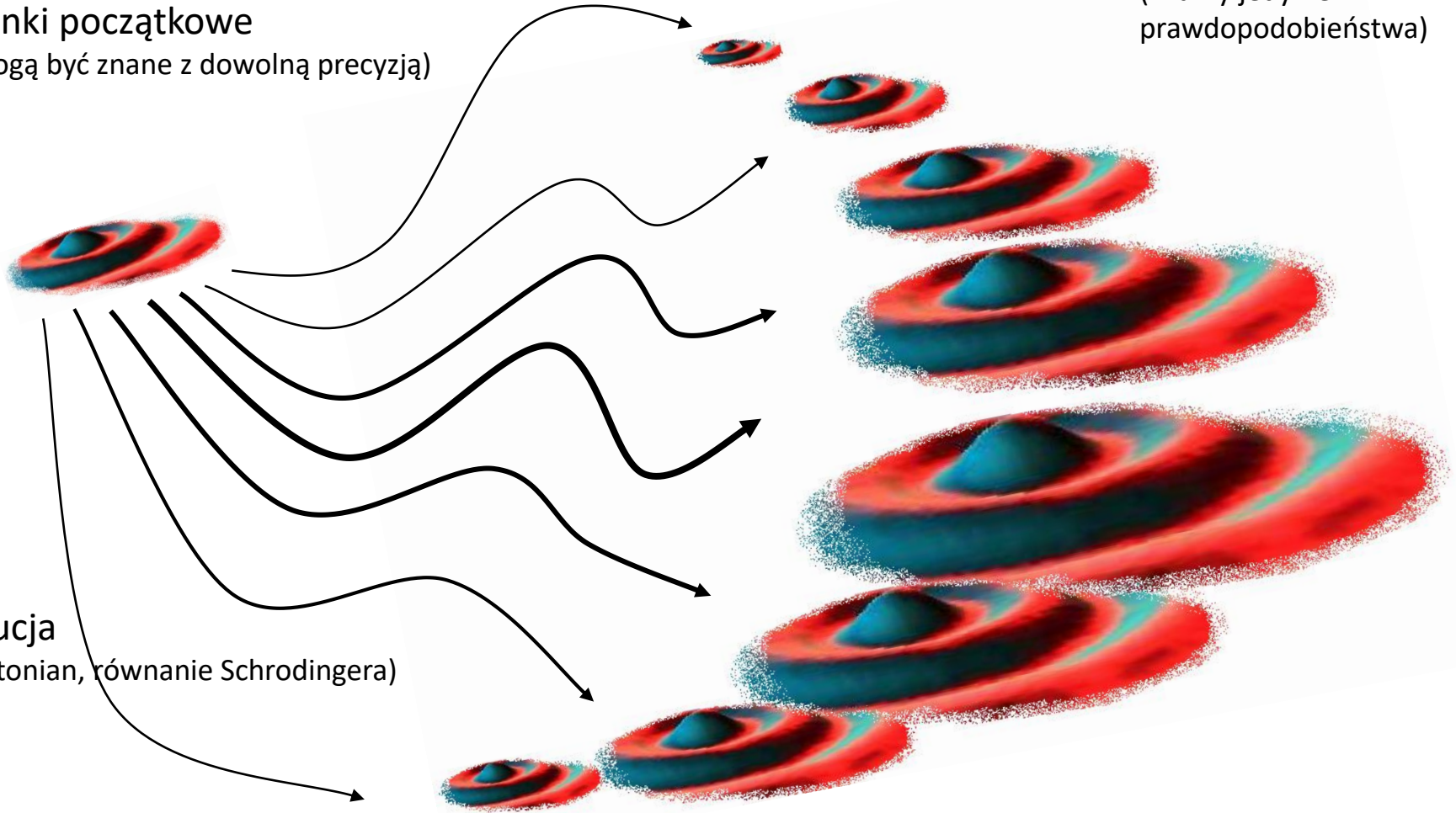
# Świat klasyczny i kwantowy

## Mechanika kwantowa:

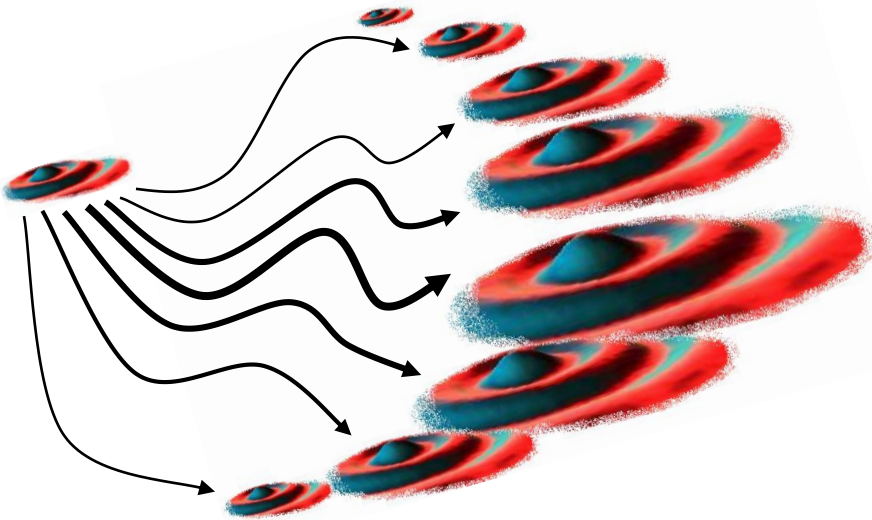
Warunki początkowe  
(nie mogą być znane z dowolną precyzją)

Ewolucja  
(Hamiltonian, równanie Schrodingera)

Stan końcowy  
(znamy jedynie  
prawdopodobieństwa)



# 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 NIEROZRÓŻNIALNE

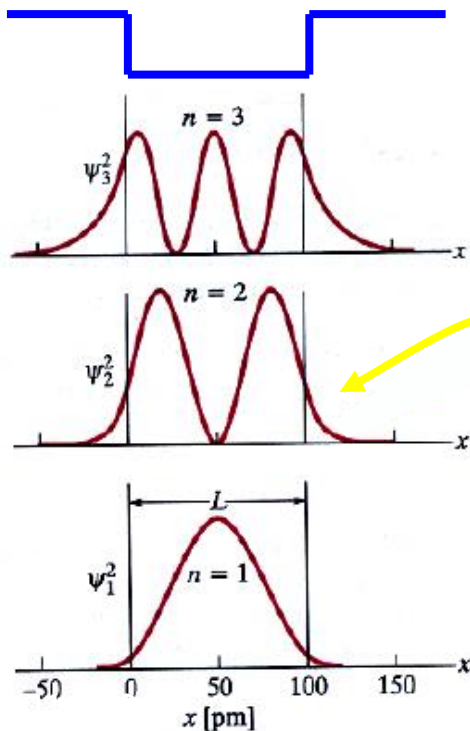


# Świat klasyczny i kwantowy

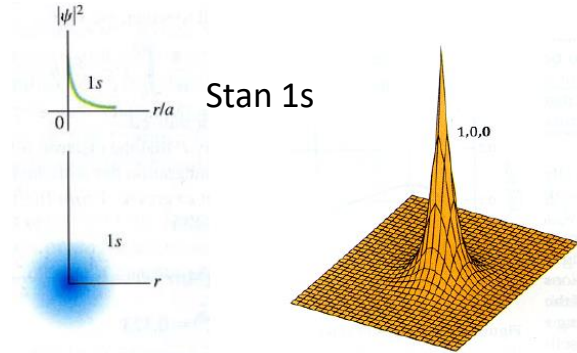
Uwaga 2: funkcja falowa jest określona w całej przestrzeni, w tym sensie jej ewolucja opisuje wszystkie możliwe historie cząstki:

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

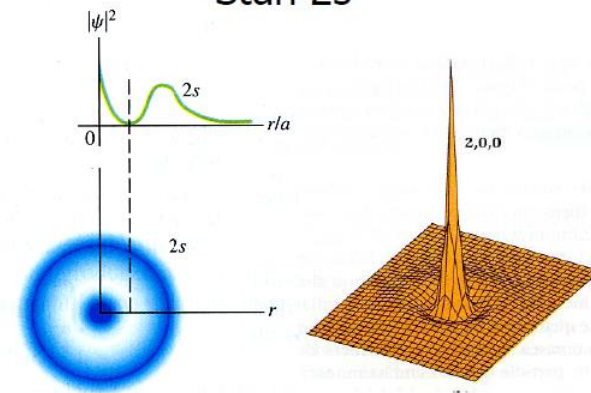
$$\hat{H}\Psi_n(\vec{r}) = \left( \frac{\vec{p}^2}{2m_0} + V(\vec{r}) \right) \Psi_n(\vec{r}) = E\Psi_n(\vec{r})$$



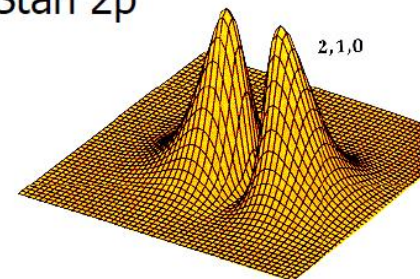
Uwięziona cząstka wnika w barierę potencjału



Stan 1s



Stan 2s

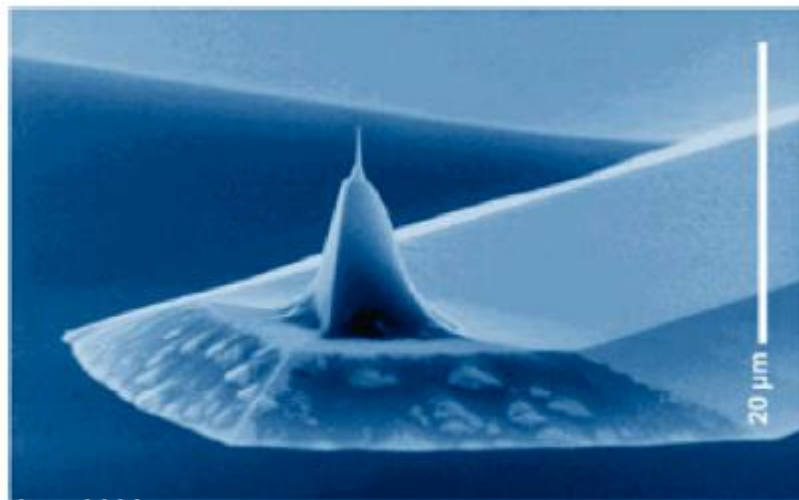
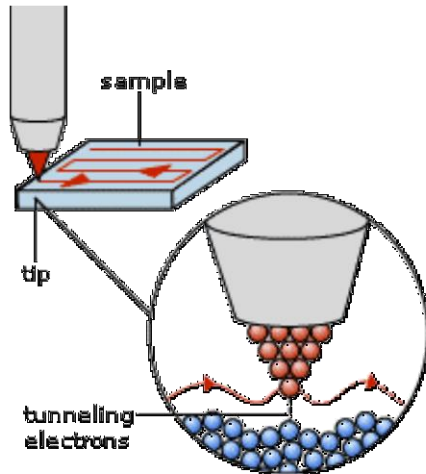


Stan 2p

# Świat klasyczny i kwantowy

## STM – Scanning Tunnelling Microscope

Nobel 1986 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer



[www.nanosensors.com](http://www.nanosensors.com)

Regulacja położenia dźwigni  
w płaszczyźnie

Podstawka

Przewody

Skaner

Mikroskop optyczny  
z kamerą

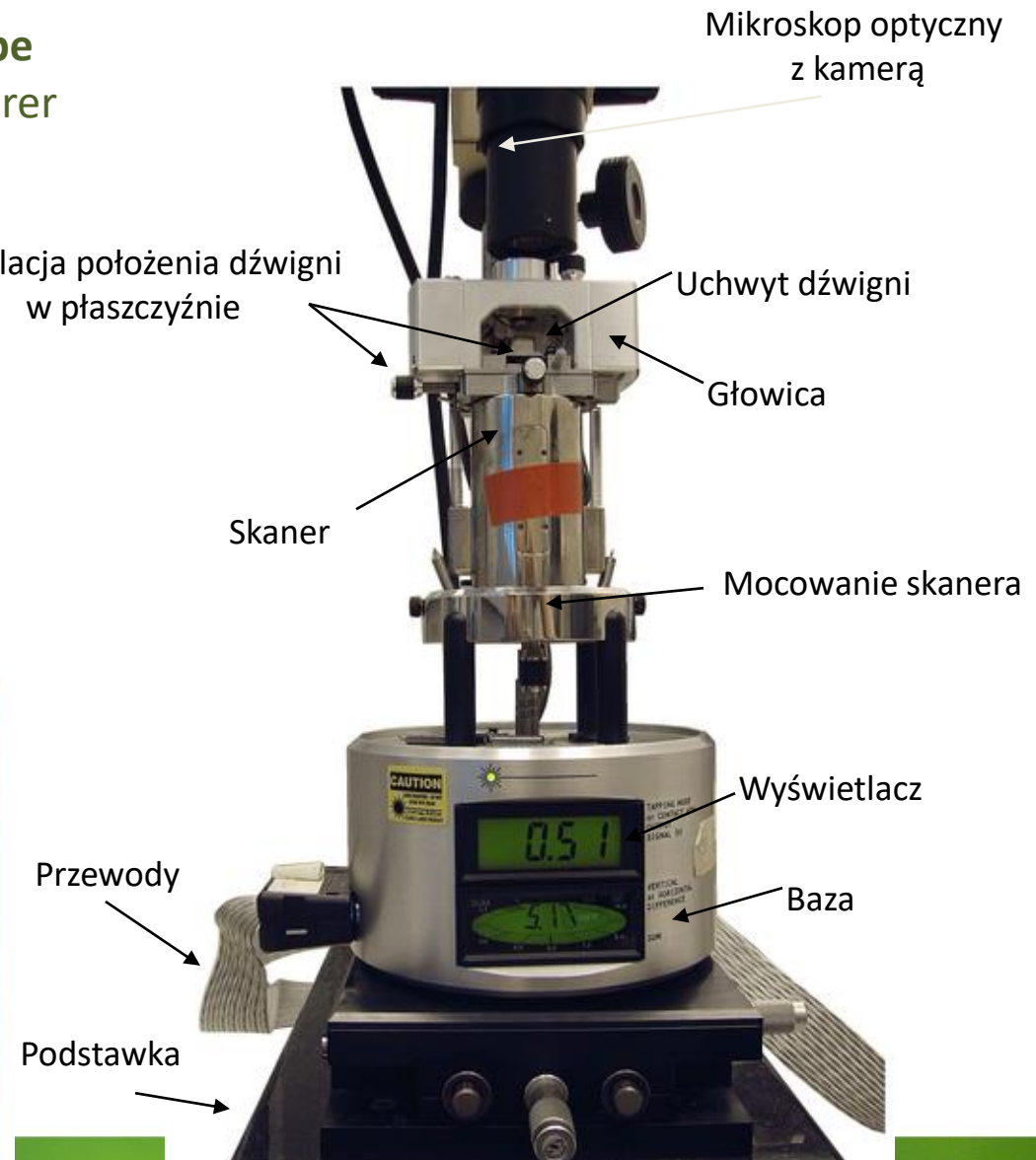
Uchwyt dźwigni

Głowica

Mocowanie skanera

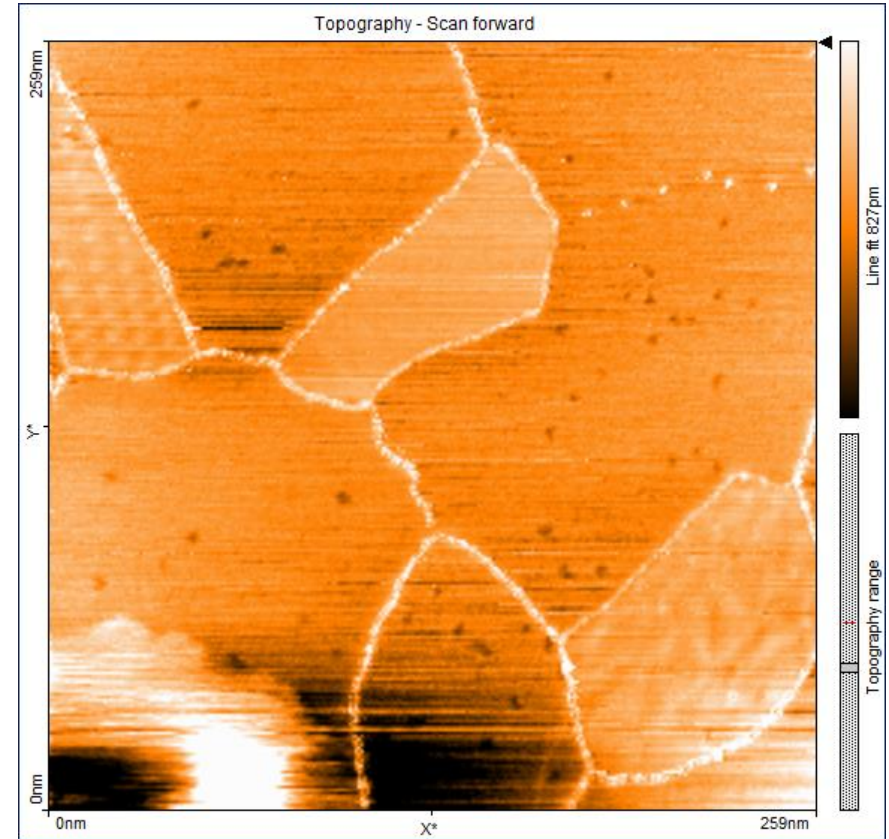
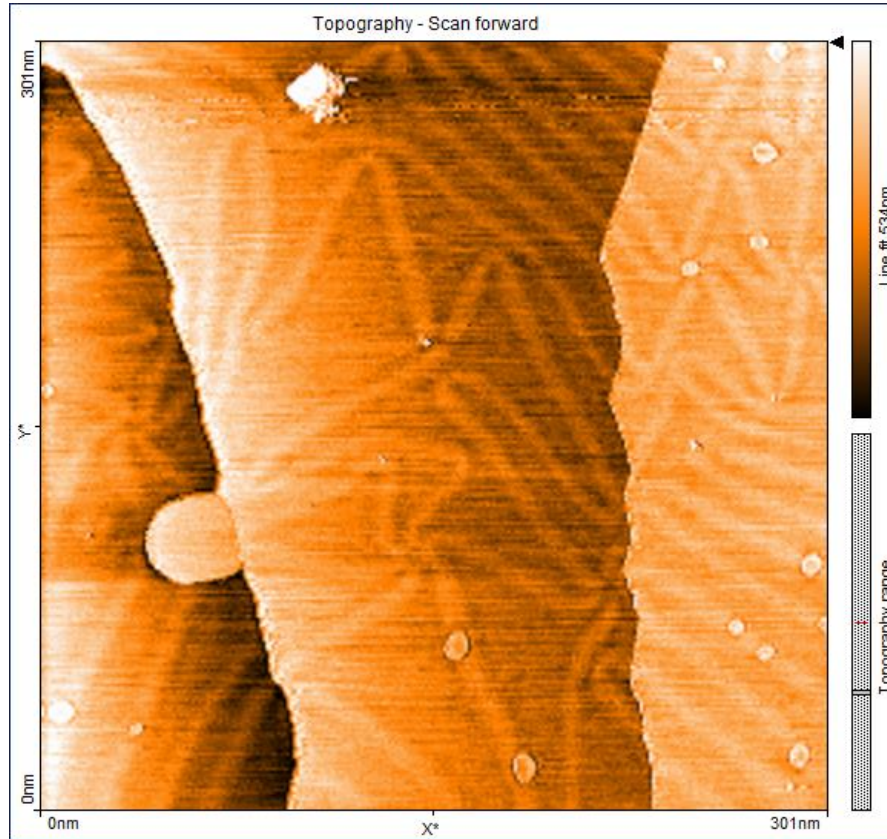
Wyświetlacz

Baza



# Świat klasyczny i kwantowy

## Polski grafen



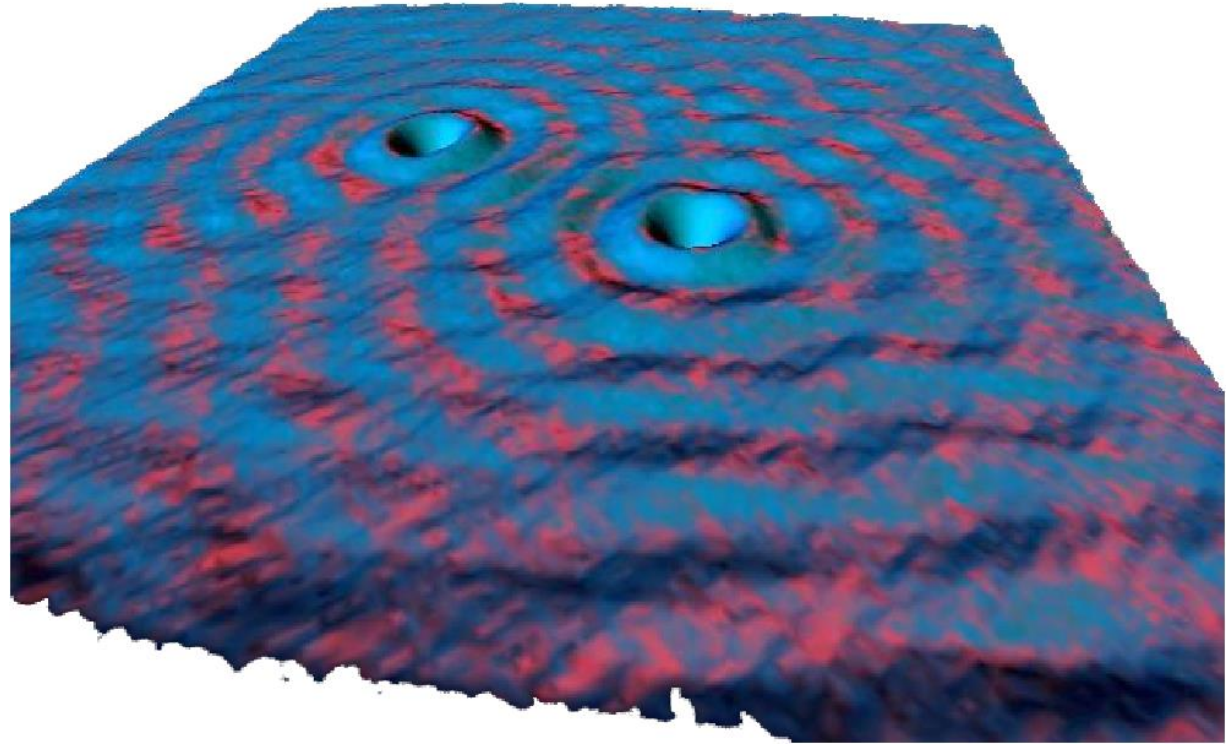


# Świat klasyczny i kwantowy

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

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

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



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

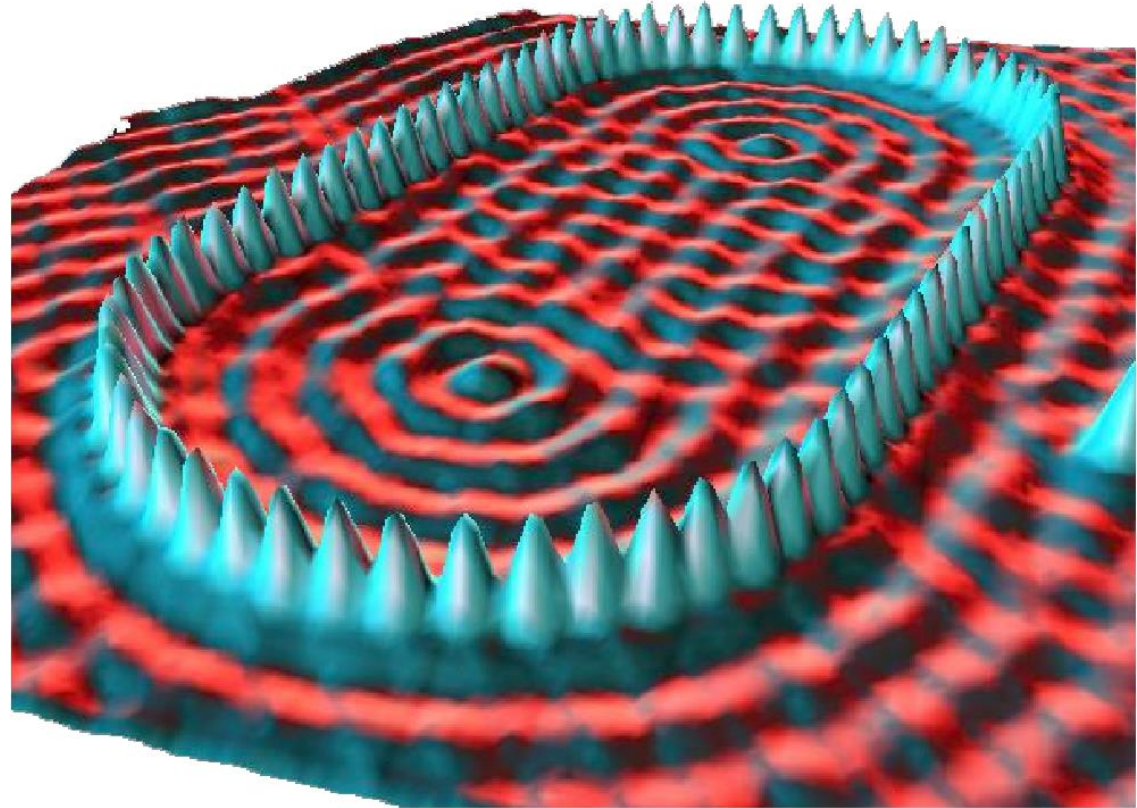


# Świat klasyczny i kwantowy

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

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

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



A quantum corral

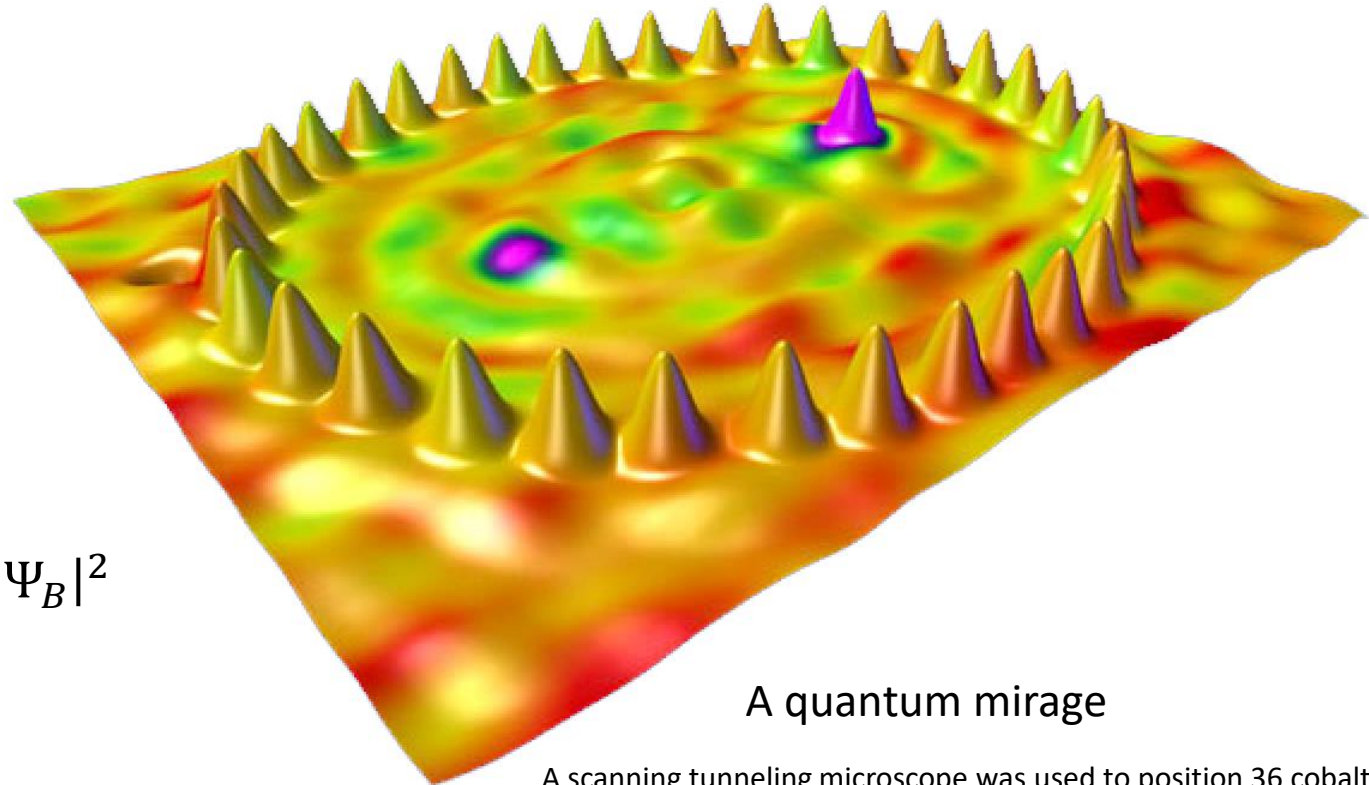
Scanning tunnelling microscope (STM) picture of a stadium-shaped "quantum corral" made by positioning iron atoms on a copper surface. This structure was designed for studying what happens when surface electron waves in a confined region. Courtesy, Don Eigler, IBM.

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

↑  
Człon interferencyjny

# Świat klasyczny i kwantowy

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



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

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

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

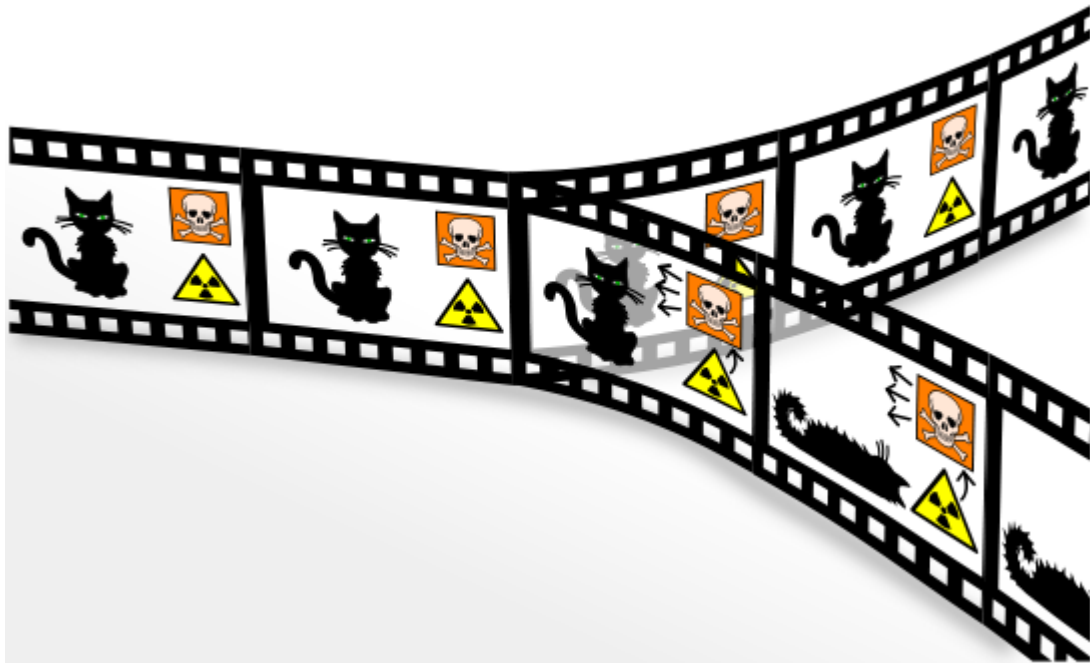
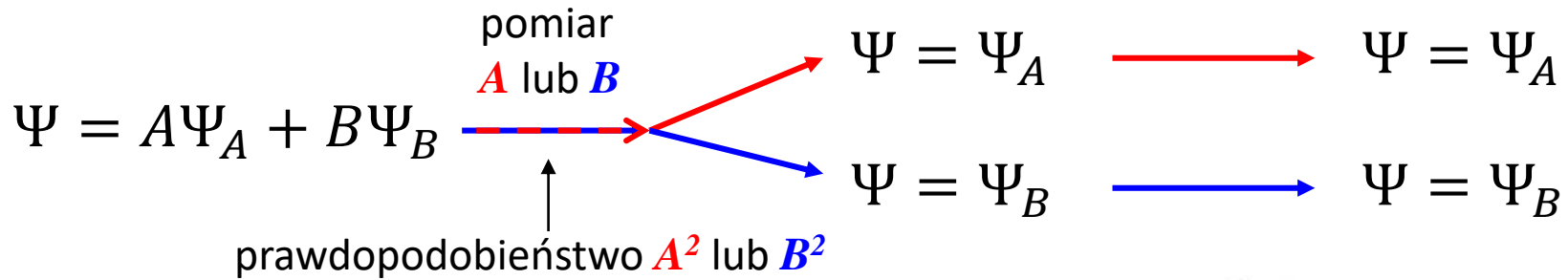
$$|\Psi|^2 = A^2|\Psi_A|^2 + B^2|\Psi_B|^2 + 2AB\Psi_A\Psi_B$$

Człon interferencyjny



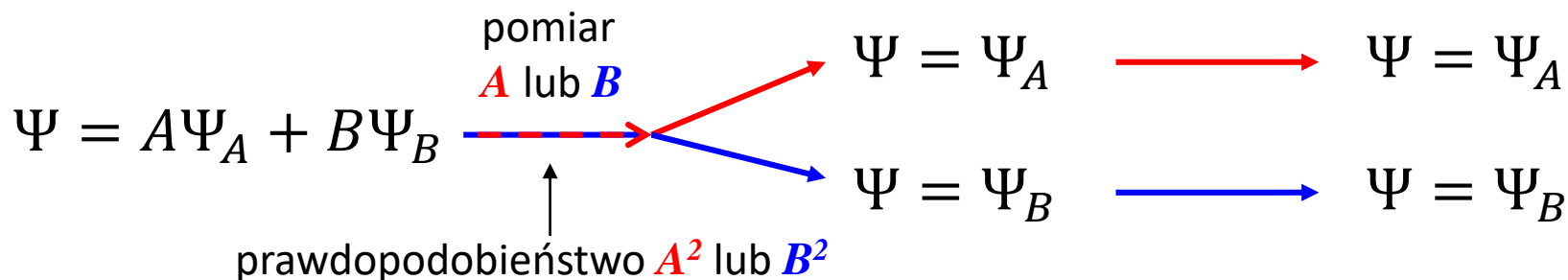
# Świat klasyczny i kwantowy

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



# 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:

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



CdSe/ZnS 1-10 nm

<http://www.nanopicoftoday.org/2003Pics/QDRainbow.htm>



# Świat klasyczny i kwantowy

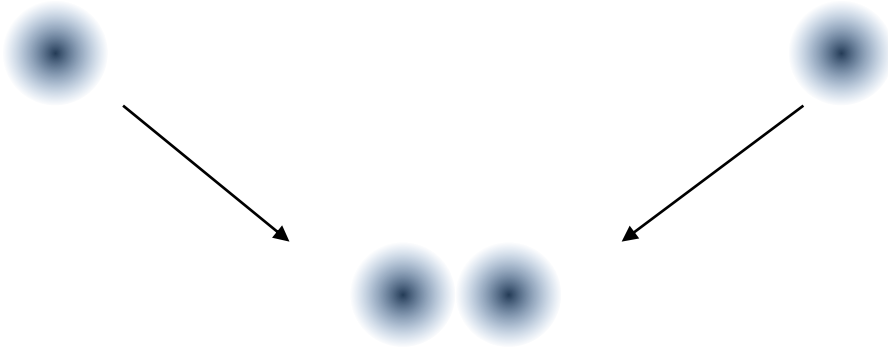
Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE





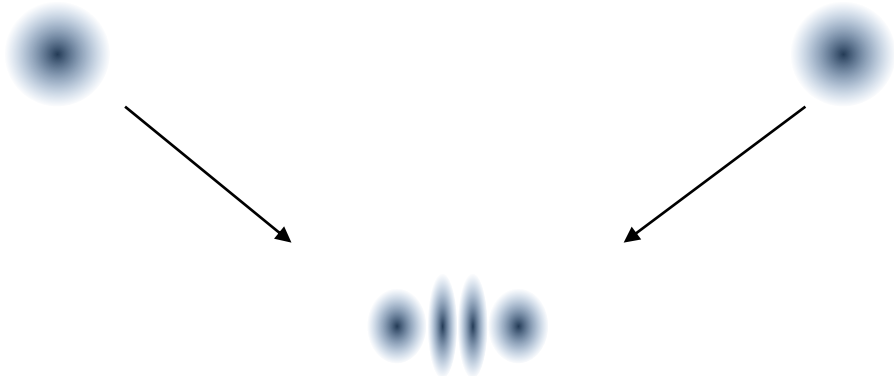
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



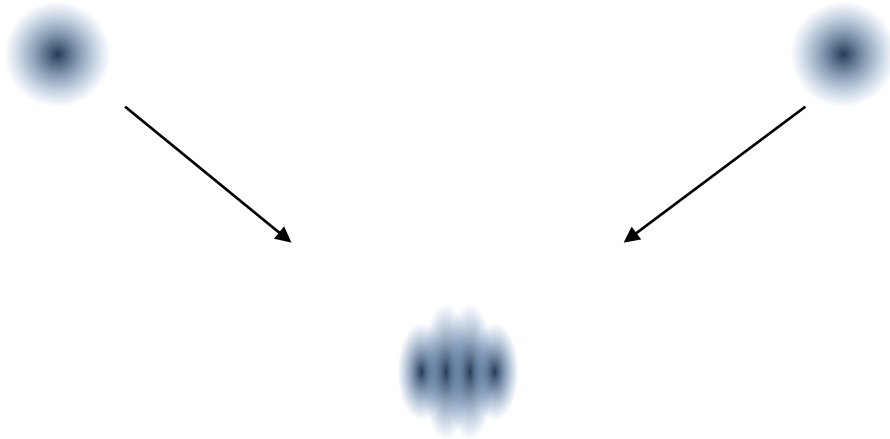
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



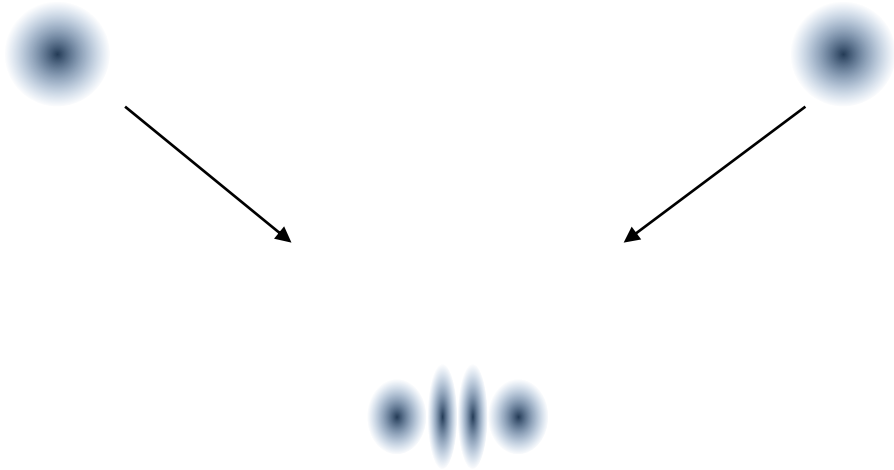
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



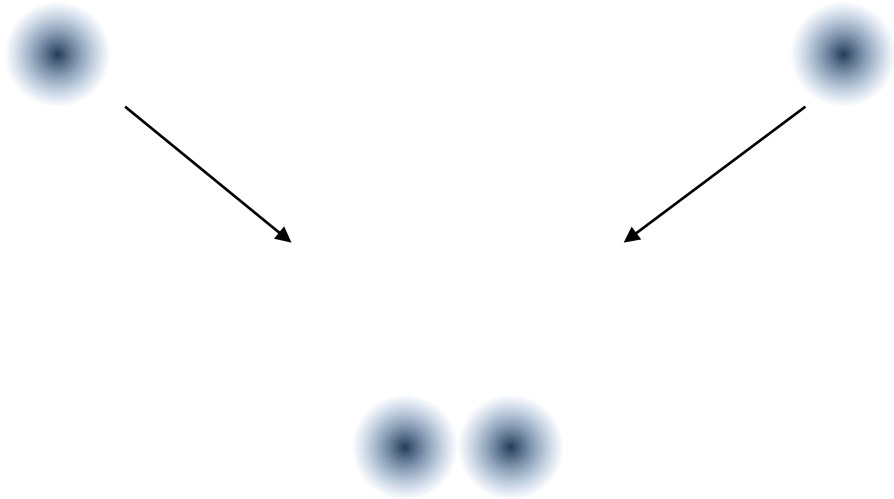
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



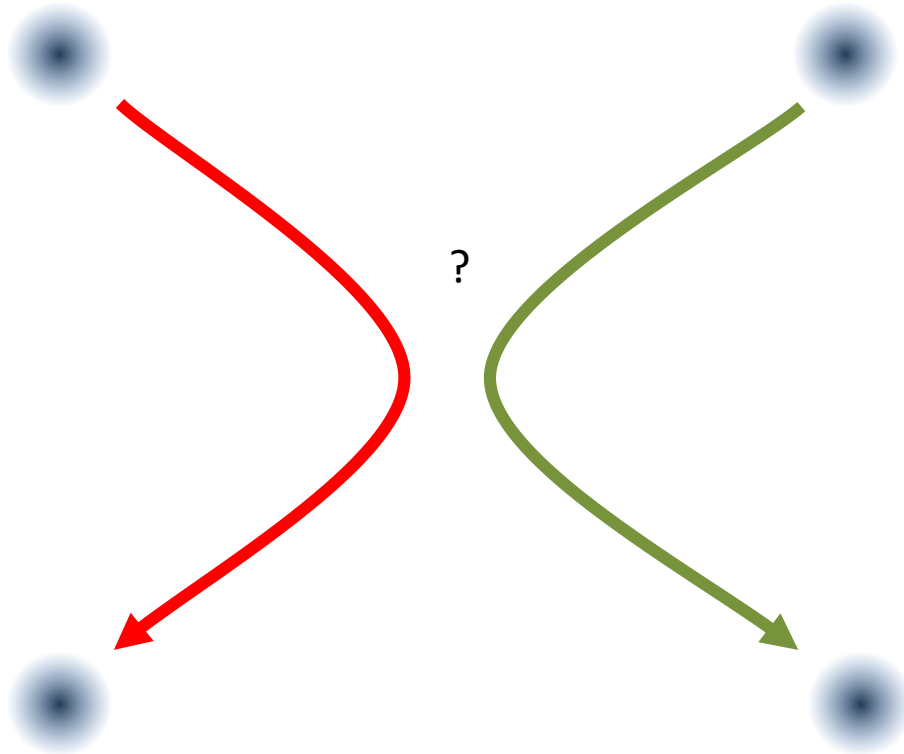
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



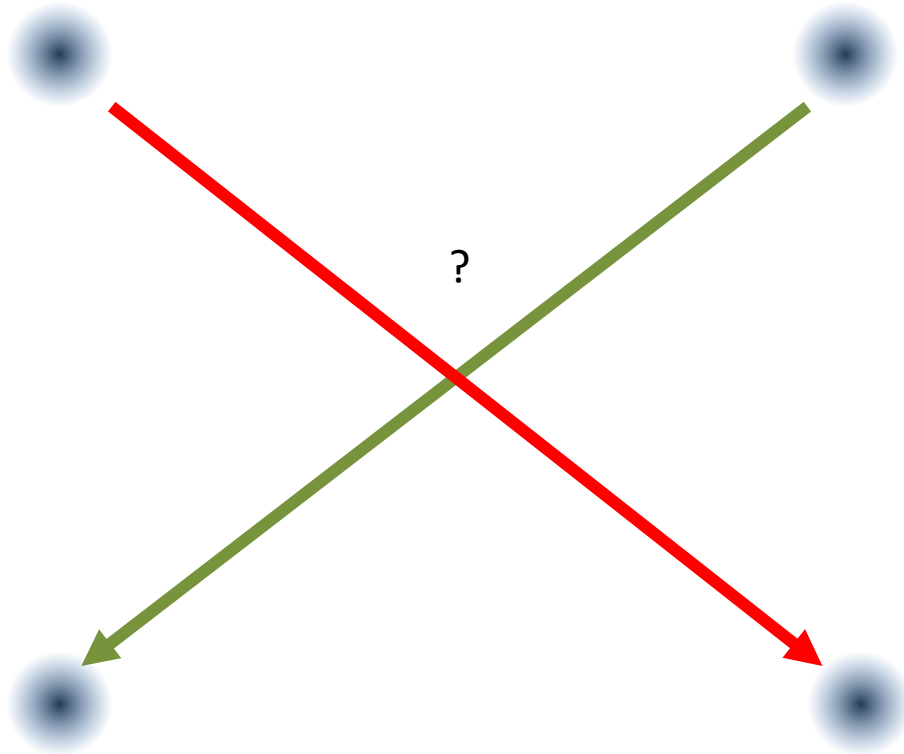
# Świat klasyczny i kwantowy

Uwaga 5: cząstki kwantowe są NIEROZRÓŻNIALNE



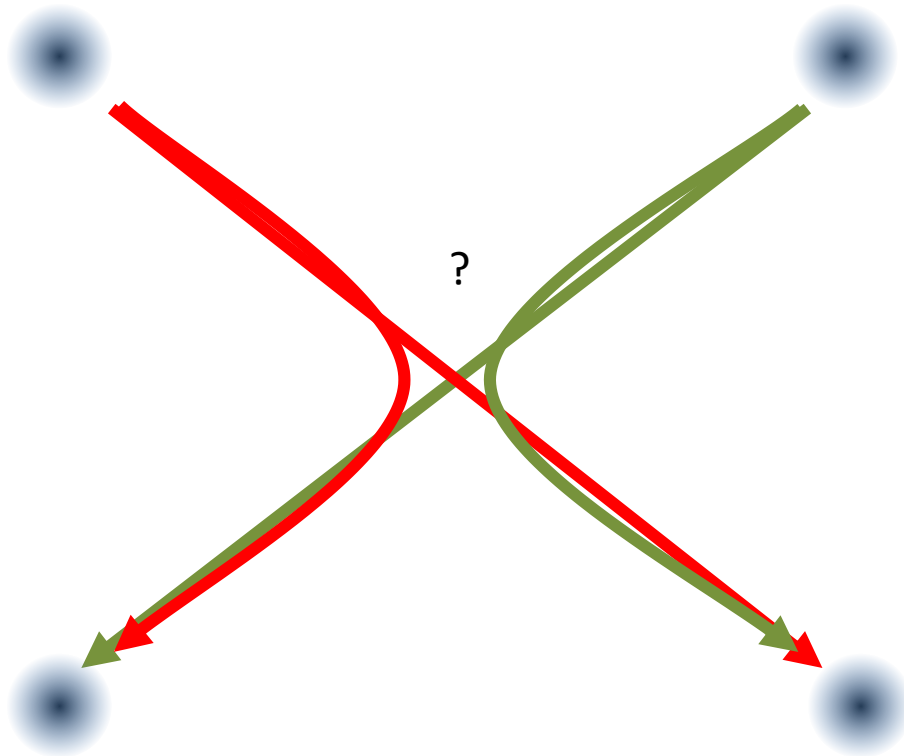
# Świat klasyczny i kwantowy

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

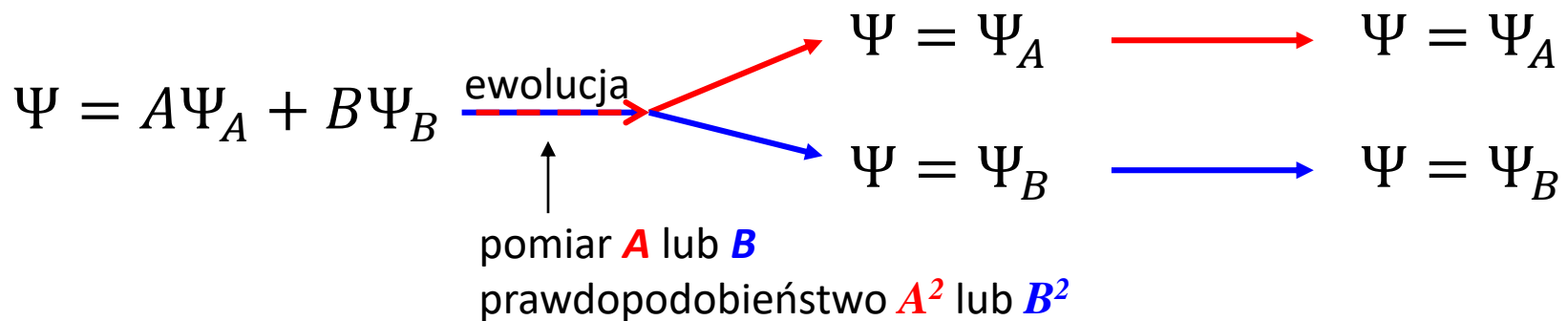
dwa poziomy atomu  $\{|e\rangle, |g\rangle\}$  np.  $g = 1s, e = 2s$

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

foton o dwóch wzajemnie ortogonalnych stanach polaryzacji  $\{|\rightarrow\rangle, |\uparrow\rangle\}$   $\{|\curvearrowright\rangle, |\curvearrowleft\rangle\}$

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

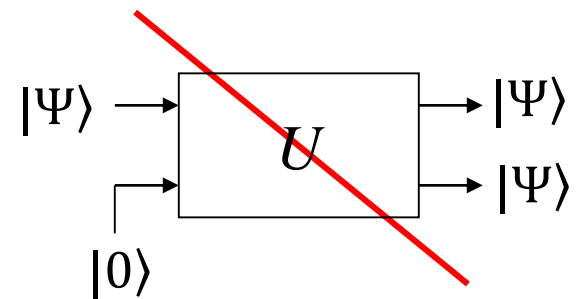
$$\Psi = A\Psi_A + B\Psi_B$$



# Zakaz klonowania



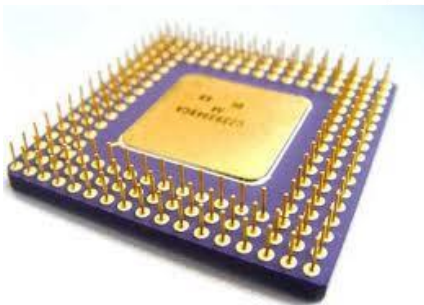
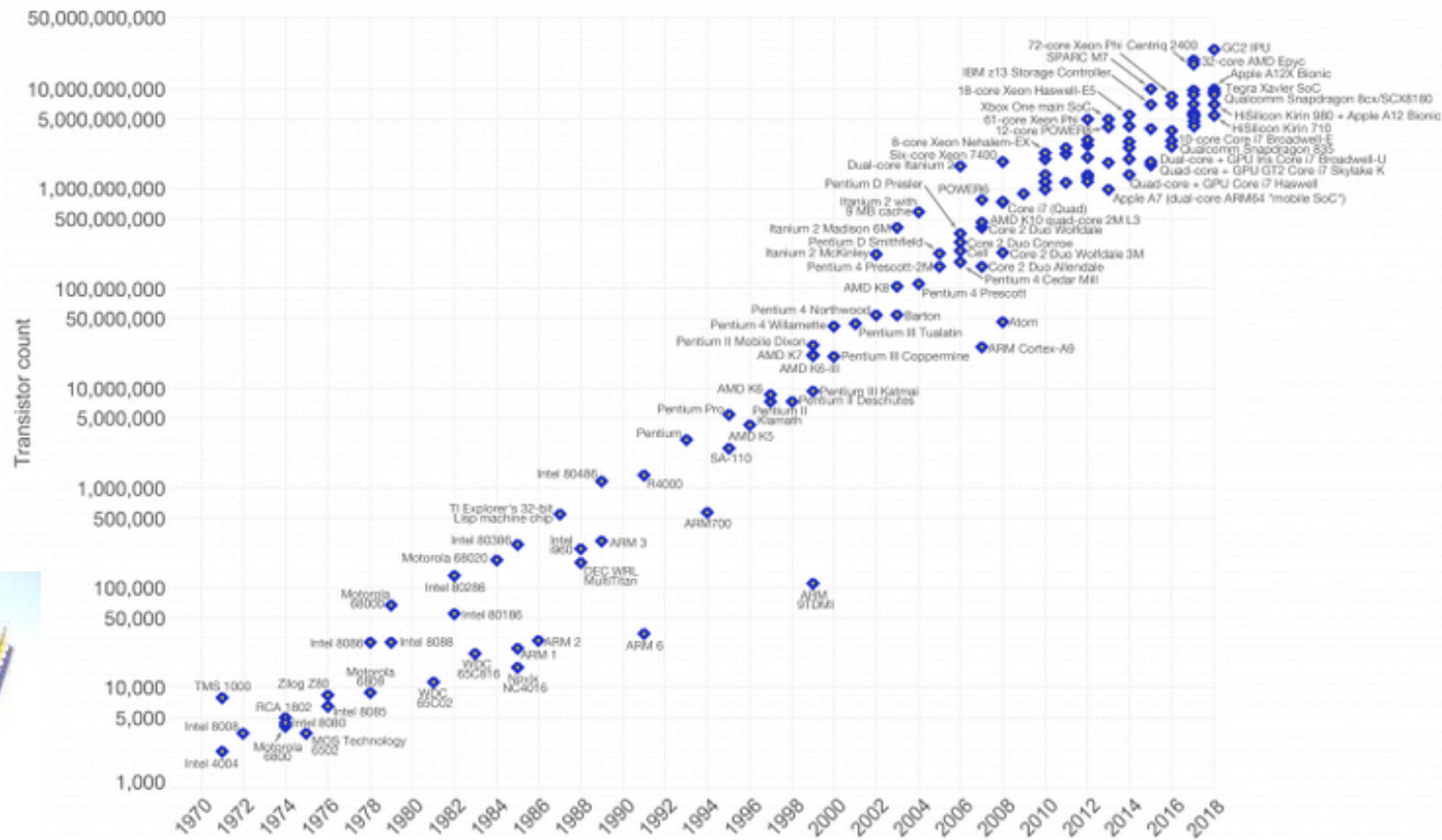
$$|\Psi\rangle \rightarrow |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle, |\Psi\rangle \dots$$



„czysta kartka”

# TRENDY: Prawo Moore'a

Ilość komponentów ( tranzystory, połączenia, izolacje itd.) w IC podwaja się co około 18 miesięcy.



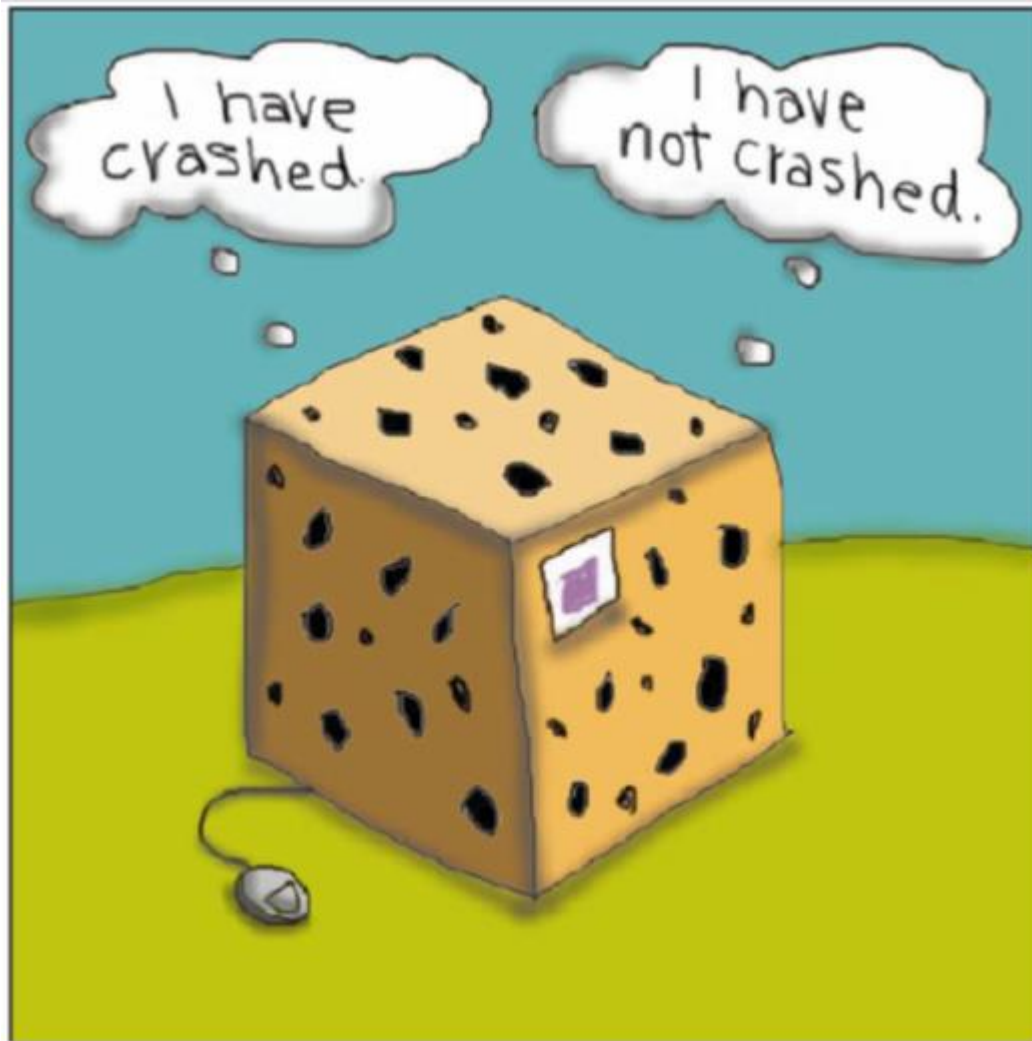
Źródło: World of Data



# Dziękuję za uwagę



# QWindows



Schrödinger's computer.

—Sally O. Lee



**"Mr. Osborne, may I be excused? My brain is full."**



