

Quantum Computer II (QC)

Jacek Szczytko, Wydział Fizyki UW

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

HARDWARE



Świat Nauki 08.1998

Bity, P-bity, Q-bity

Kwantowym odpowiednikiem klasycznego bitu jest dowolny układ dwustanowy:

dwa poziomy atomu

$$\{|g\rangle, |e\rangle\} \quad \text{np. } g = 1s, e = 2s$$

spin elektronu

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

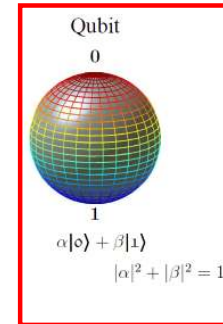
foton o dwóch wzajemnie ortogonalnych stanach

polaryzacji

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

tp.

Taki układ to qubit (quantum bit); po polsku kubit.



Dwa stany układu, które możemy nazwać $|0\rangle$ i $|1\rangle$ przez analogię do klasycznego bitu, $\{0, 1\}$, tworzą bazę standardową albo obliczeniową — $\{|0\rangle, |1\rangle\}$

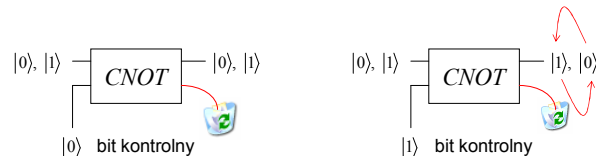
<http://zon8.physd.amu.edu.pl/~tanasi/>

Bramki kubitowe

$$\sqrt{NOT} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{pmatrix}$$

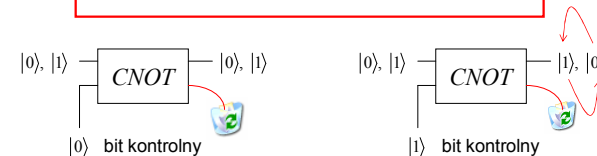
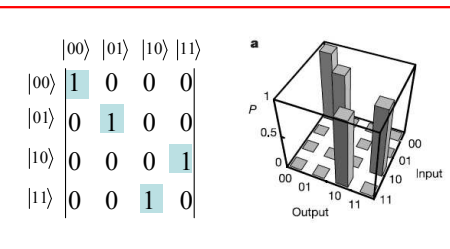
$$NOT = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |1\rangle \\ |0\rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \langle 0| \\ \langle 1| \end{pmatrix}$$

Bramki kwantowe muszą być odwracalne!



Bramki CNOT są bramkami „uniwersalnymi” – można za ich pomocą zbudować dowolny obwód logiczny.

Bramki kubitowe



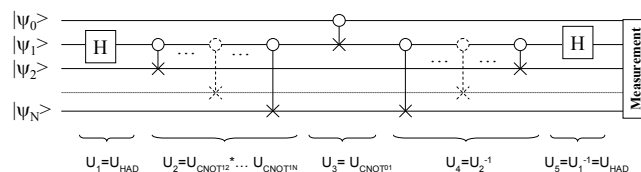
Bramki CNOT są bramkami „uniwersalnymi” – można za ich pomocą zbudować dowolny obwód logiczny.

Komputery kwantowe

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl



Świat Nauki 08.1998

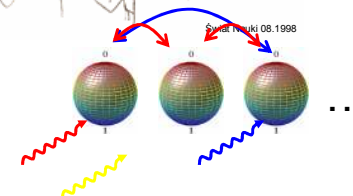


Komputery kwantowe



Świat Nauki 08.1998

1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytacji
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe



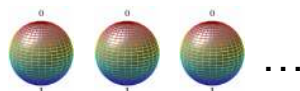
- Dostęp do każdego kubit z osobna (adresowanie)
- Kontrolowane oddziaływanie między kubitami (wykonanie procedury)

Komputery kwantowe

Pięć kryteriów DiVincenzo (*Science* **270**, 255 (1995)) na zbudowanie działającego komputera kwantowego:

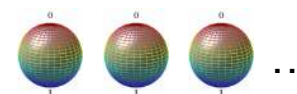
- (i) Skalowalny i kontrolowalny układ fizyczny z dobrze zdefiniowanymi kubitami
- (ii) Kubity można przygotować w postaci prostego stanu (np. $|000\rangle$) na początku obliczeń (inicjalizacja).
- (iii) Kubity mają odpowiednio długi czas dekoherencji.
- (iv) Można wykonać uniwersalny zestaw kwantowych bramek logicznych.
- (v) Każdy kubit daje się mierzyć z dużą wydajnością kwantową.

1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytacji
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe



- Dostęp do każdego kubit z osobna (adresowanie)
- Kontrolowane oddziaływanie między kubitami (wykonanie procedury)

Różne pomysły



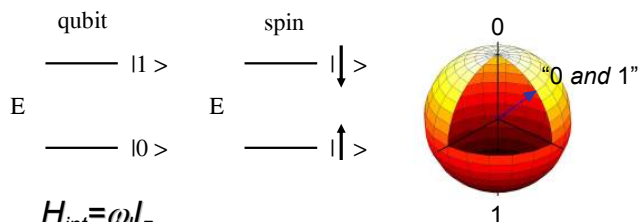
1. Kubity ze spinów

2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytacji
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Komputery kwantowe

- Kubit: spin w polu magnetycznym

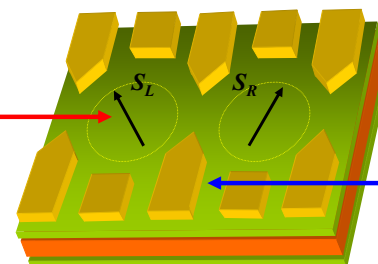


$$H_{int} = \omega I_z$$

Oddziaływanie z polem magnetycznym B: $\omega = g\mu_B B$

David G. Cory Department of Nuclear Engineering MIT

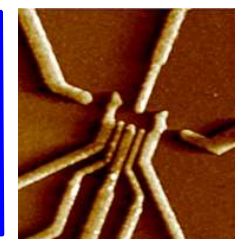
Electron Spin QuBITs



Różne pole magnetyczne dla każdego kubit z osobna

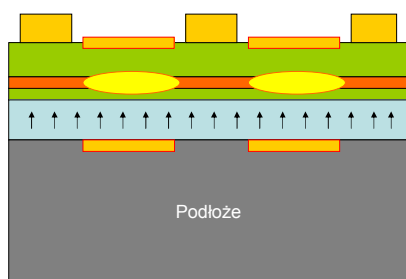
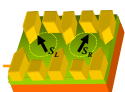
Proposal by D. Loss and D. D. Di Vincenzo
PRA 57, 120 (1998)

Single spins in each QD
Exchange-interaction tuned by gate electrodes



Hubert J. Kenner

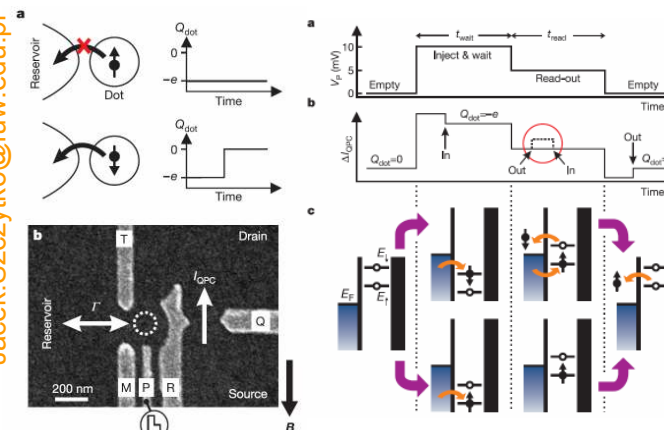
Electron Spin QuBITs



2DEG
Półprzewodnik magnetyczny

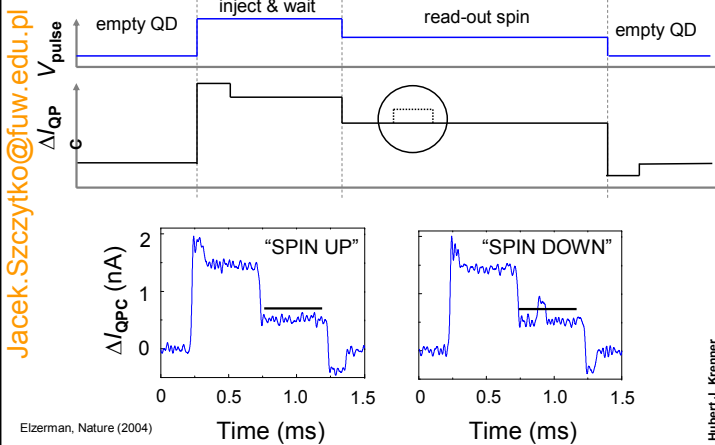
Podłoże

Pojedynczy odczyt pojedynczego spinu

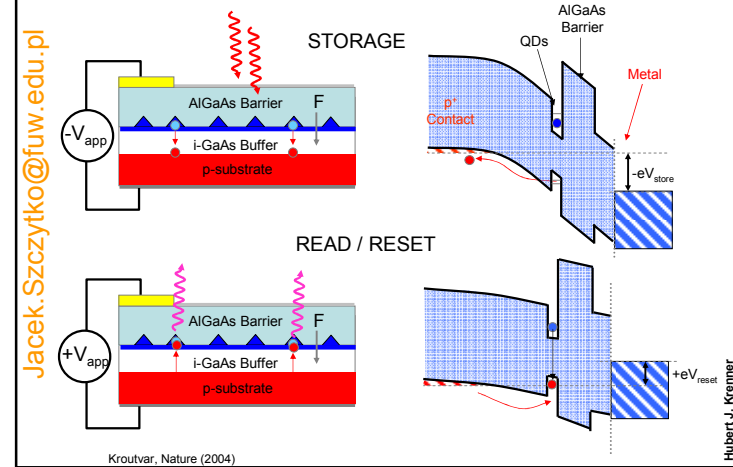


Elzerman, Nature (2004)

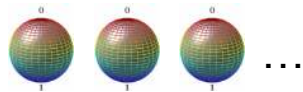
Pojedynczy odczyt pojedynczego spinu



Spin storage



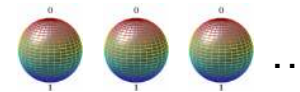
Problemy



1. Kubity ze spinów

Kontrola rozmiaru QD
Dekoherencja (e – ms, h – ps)
Oddziaływanie z otoczeniem
Fonony w kryształach

Różne pomysły

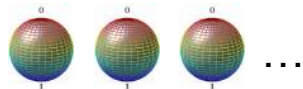


1. Kubity ze spinów

2. Kubity z atomów

3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytonów
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe

QC ze spółapkowanych atomów



VOLUME 74, NUMBER 20

PHYSICAL REVIEW LETTERS

15 MAY 1995

Quantum Computations with Cold Trapped Ions

J. I. Cirac and P. Zoller*

Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 25, A-6020 Innsbruck, Austria
(Received 30 November 1994)

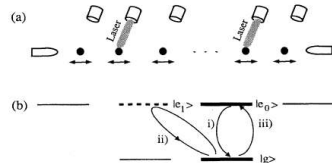
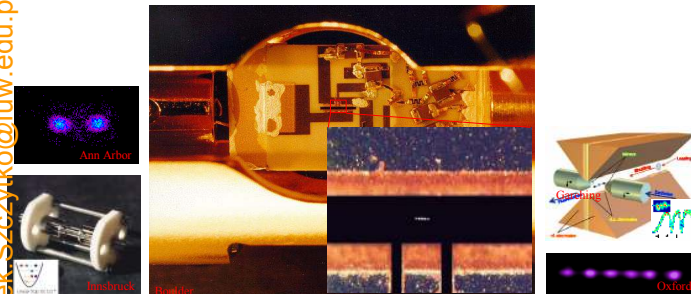


FIG. 1. (a) N ions in a linear trap interacting with N different laser beams; (b) atomic level scheme.

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

QC ze spółapkowanych atomów

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl



APS March Meeting - Montréal: March 21, 2004

Brian King

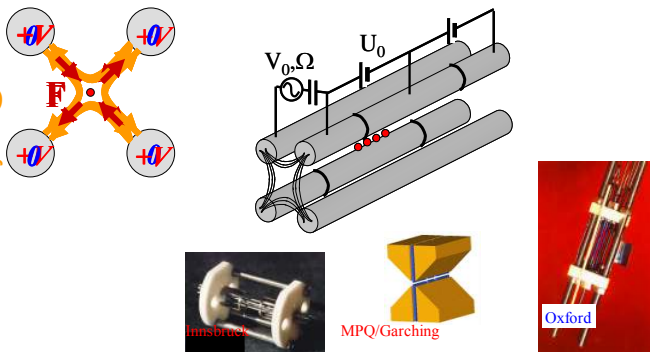
Dept. Physics and Astronomy, McMaster University

http://physserv.mcmaster.ca/~kingb/King_B_h.html

Dynamiczna pułapka jonowa RF:

- Ograniczyć przestrzennie naładowane atomy $\Rightarrow$ pole $\mathbf{E}!$
- Ehrenfest/Gauss $\Rightarrow$ trzeba użyć oscylujących pól!

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

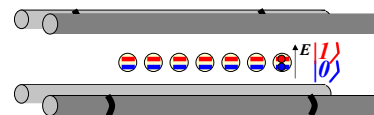


http://physserv.mcmaster.ca/~kingb/King_B_h.html

QC ze spółapkowanych atomów

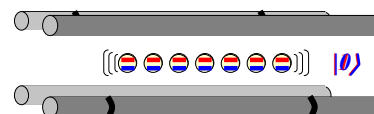
zbiór (łańcuch) schwytych jonów:

- kubity: (1) wewnętrzne stany atomowe



- Pamięć kwantowa**
 - $t_{\text{decoh}} > t_{\text{gate}}$
 - $T_2 > 10 \text{ min.}$
 - zegary
 - dokładność, stabilność $> 1/10^{15}$

- “data bus:” (2) wspólny mod ruchu łańcucha



- Przekaz**
 - $t_{\text{decoh}} > t_{\text{gate}}$
 - $10^{-2} - 10^{-3}$

http://physserv.mcmaster.ca/~kingb/King_B_h.html

QC ze spletkowanych atomów

Kwantowa bramka logiczna między 2 dowolnymi jonami:

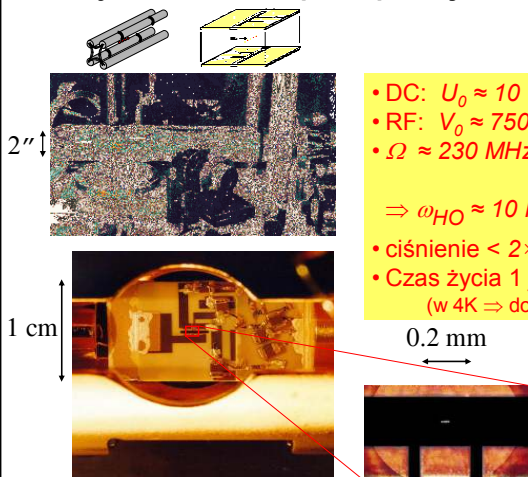
1. Przygotować kubity używając pojedynczych bramek kwantowych
2. Zamapować laserem stan i kubit na ruch całego łańcucha
3. 2-kubitowa bramka kwantowa między ruchem łańcucha a jonom j
4. Przesłać informację z powrotem do jonu i za pomocą ruchów łańcucha



http://physserv.mcmaster.ca/~kingb/King_B_h.html

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Dynamiczna pułapka jonowa RF:



- DC: $U_0 \approx 10 \text{ V}$
- RF: $V_0 \approx 750 \text{ V}$
- $\Omega \approx 230 \text{ MHz}$

$\Rightarrow \omega_{HO} \approx 10 \text{ MHz}$

- ciśnienie $< 2 \times 10^{-11} \text{ torr}$
- Czas życia 1 jonu: $> 10 \text{ h.}$
(w 4K $\Rightarrow$ do 100 dni...)

2''

1 cm

0.2 mm

QC ze spletkowanych atomów

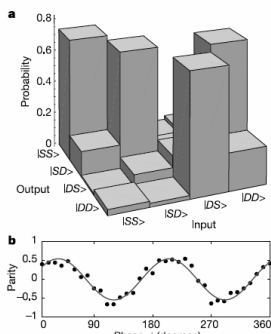
Realization of the Cirac-Zoller controlled-NOT quantum gate

Ferdinand Schmidt-Kaler, Hartmut Häffner, Mark Riebe, Stephan Gulde, Gavin P. T. Lancaster, Thomas Deuschle, Christoph Becher, Christian F. Roos, Jürgen Eschner & Rainer Blatt

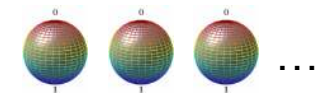
Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstraße 25, A-6020 Innsbruck, Austria

NATURE | VOL 422 | 27 MARCH 2003

	$ 00\rangle$	$ 01\rangle$	$ 10\rangle$	$ 11\rangle$		$ SS\rangle$	$ SD\rangle$	$ DS\rangle$	$ DD\rangle$
$ 00\rangle$	1	0	0	0	$ SS\rangle$	0.74(3)	0.13(3)	0.05(3)	0.08(3)
$ 01\rangle$	0	1	0	0	$ SD\rangle$	0.15(3)	0.71(5)	0.06(1)	0.08(2)
$ 10\rangle$	0	0	0	1	$ DS\rangle$	0.01(2)	0.08(3)	0.14(4)	0.77(3)
$ 11\rangle$	0	0	1	0	$ DD\rangle$	0.03(3)	0.02(1)	0.72(6)	0.22(4)



Problemy



2. Kubity z atomów

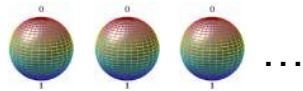
Atomy mają więcej niż tylko 2 stany

Niska skuteczność bramek (oddziaływania z wyższymi stanami)

Dekoherencja

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Różne pomysły

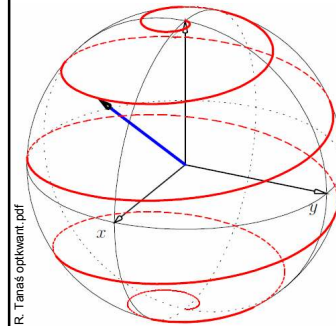


1. Kuby ze spinów
2. Kuby z atomów
3. Kuby jądrowe
4. Kuby krzemowe
5. Kuby z kropek
6. Kuby z ekscytonów
7. Kuby nadprzewodzące
8. Kuby świetlne
9. Kuby domenowe

3. Kuby jądrowe

Komputery kwantowe

- Jądrowy rezonans magnetyczny (MRI - Magnetic Resonance Imaging)

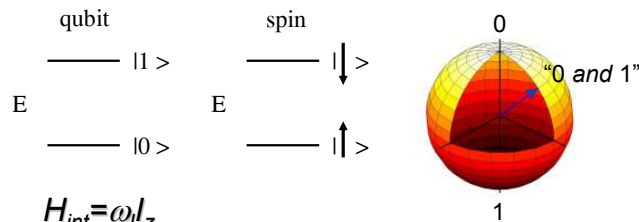


Rysunek 2.4. Ruch końca wektora spinu na sferze Blocha

http://www.radiologyinfo.org/content/mr_of_the_body.htm

Komputery kwantowe

- Kubit: spin w polu magnetycznym



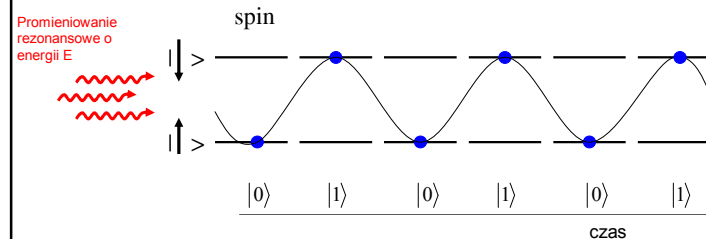
$$H_{int} = \omega I_z$$

Oddziaływanie z polem magnetycznym B: $\omega = g\mu_B B$

David G. Cory Department of Nuclear Engineering MIT

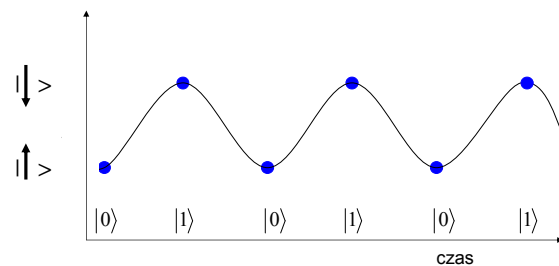
Komputery kwantowe

- Kubit: spin w polu magnetycznym



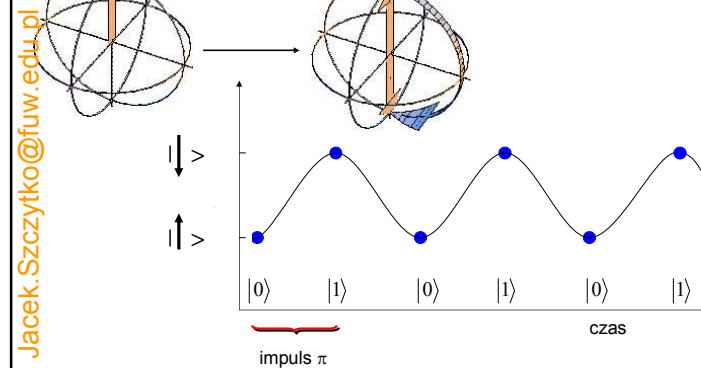
Komputery kwantowe

- Kubit: spin w polu magnetycznym



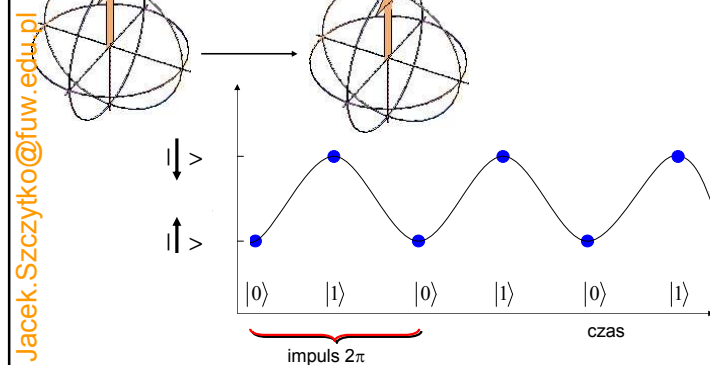
oscylacje Rabiego, spin w poprzecznym polu magnetycznym

Komputery kwantowe



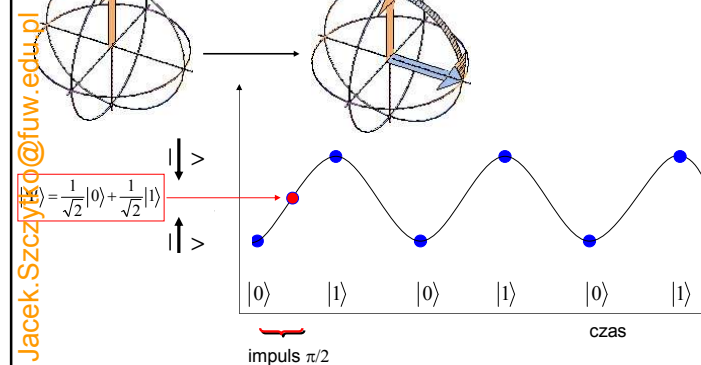
Czyli o energii rezonansowej E
i odpowiednim czasie trwania.

Komputery kwantowe

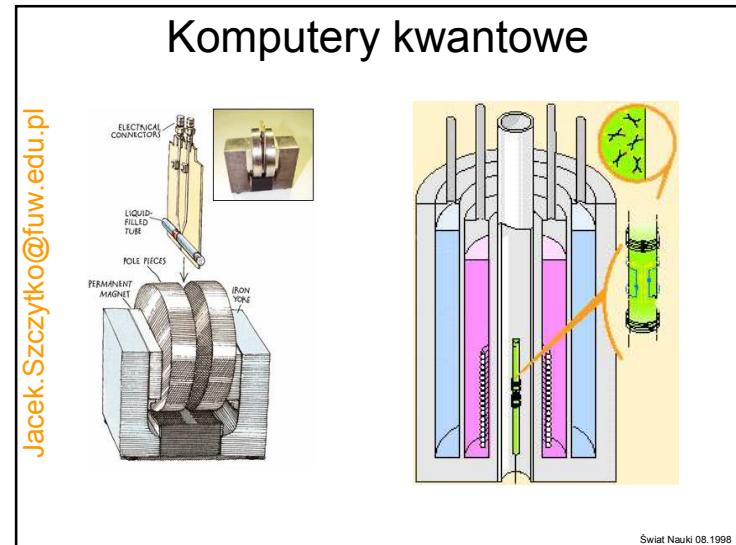
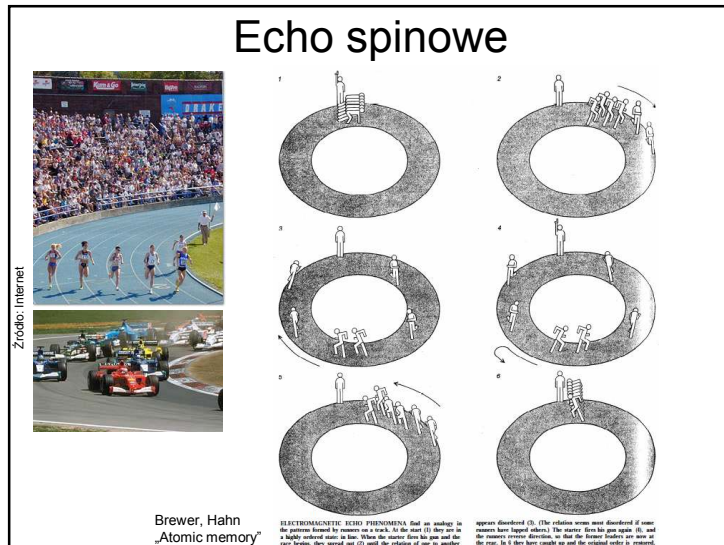
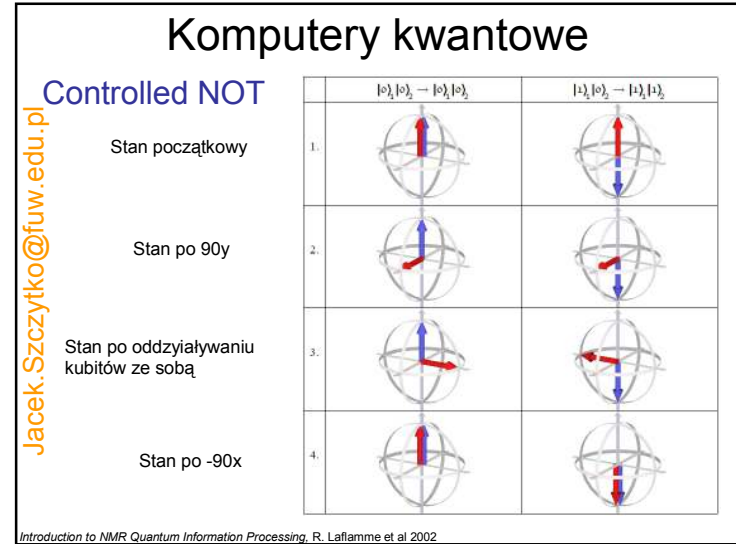
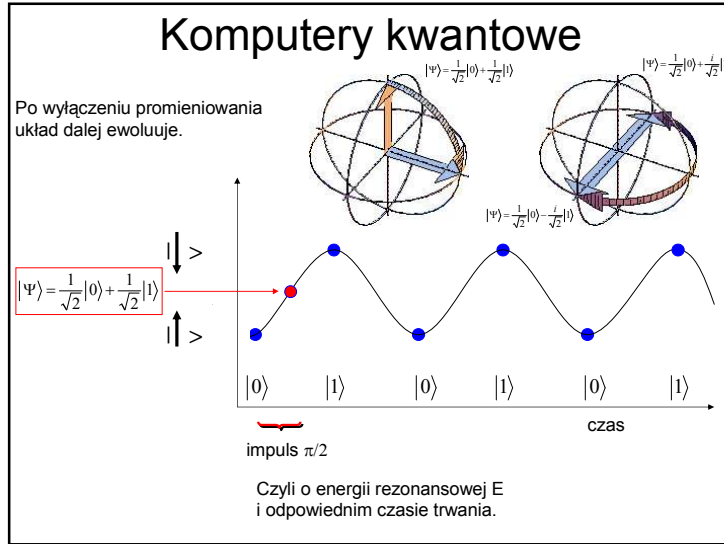


Czyli o energii rezonansowej E
i odpowiednim czasie trwania.

Komputery kwantowe

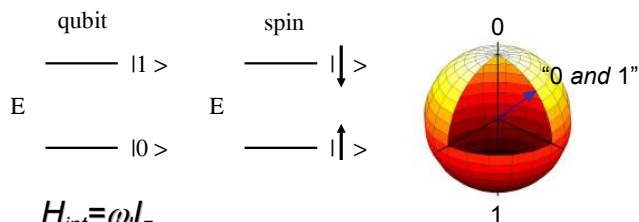


Czyli o energii rezonansowej E
i odpowiednim czasie trwania.



Komputery kwantowe

- Kubit: spin jądrowy w polu magnetycznym

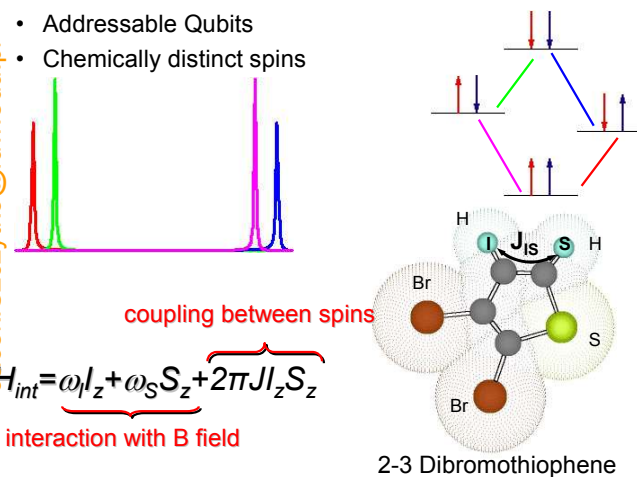


Oddziaływanie z polem magnetycznym B: $\omega = g\mu_B B$

David G. Cory Department of Nuclear Engineering MIT

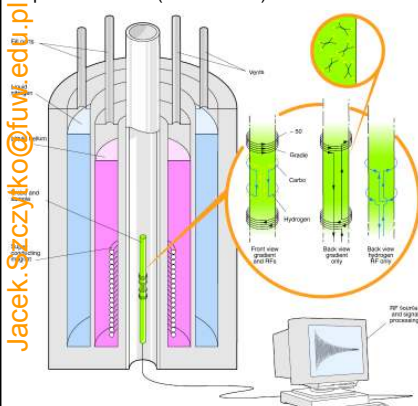
Komputery kwantowe

- Addressable Qubits
- Chemically distinct spins



Komputery kwantowe

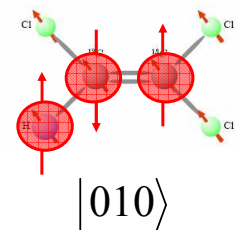
Liquid state NMR (QC 1996/97)



$$|\psi_t\rangle = e^{-i\omega t/2} \alpha |0\rangle + e^{i\omega t/2} \beta |1\rangle$$

$$\omega = 2\pi\nu/h$$

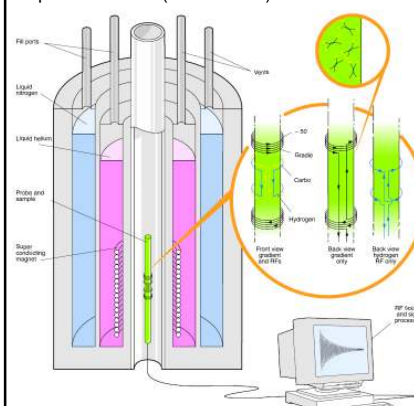
TRÓJCHLOROETYLEN ^{13}C



Introduction to NMR Quantum Information Processing, R. Laflamme et al 2002

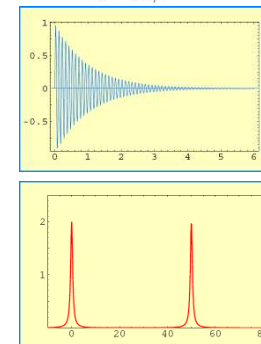
Komputery kwantowe

Liquid state NMR (QC 1996/97)



$$|\psi_t\rangle = e^{-i\omega t/2} \alpha |0\rangle + e^{i\omega t/2} \beta |1\rangle$$

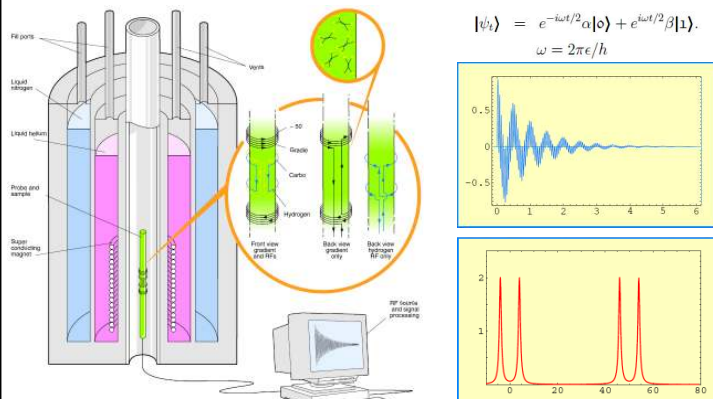
$$\omega = 2\pi\nu/h$$



Introduction to NMR Quantum Information Processing, R. Laflamme et al 2002

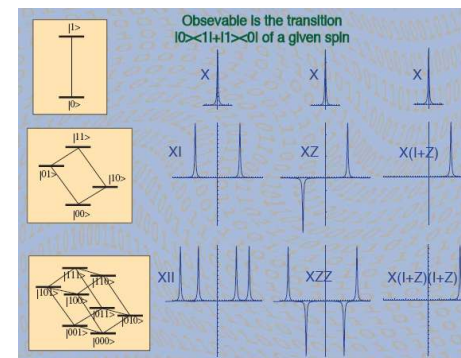
Komputery kwantowe

Liquid state NMR (QC 1996/97)



Introduction to NMR Quantum Information Processing, R. Laflamme et al 2002

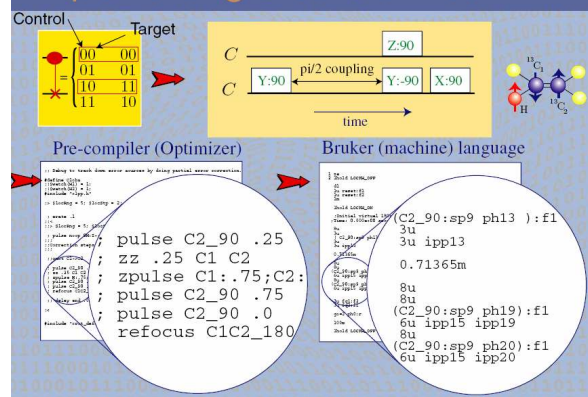
Komputery kwantowe



NMR Quantum Information Processing Raymond Laflamme

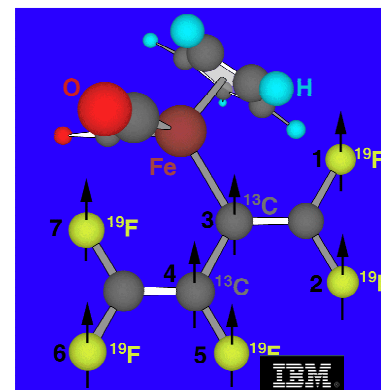
Komputery kwantowe

Implementing a Control-Not



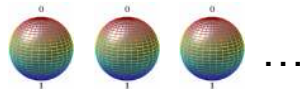
NMR Quantum Information Processing Raymond Laflamme

Komputery kwantowe



Jacek.Szczętko@fuw.edu.pl

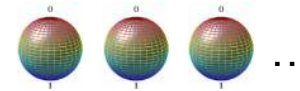
Problemy



3. Kubity jądrowe

Skalowalność
Czułość (duża liczba cząstek)
dekoherencja

Różne pomysły



1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytonów
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe

4. Kubity krzemowe

Kubity krzemowe

VOLUME 89, NUMBER 1 PHYSICAL REVIEW LETTERS 1 JULY 2002

All-Silicon Quantum Computer

T. D. Ladd,^{*} J. R. Goldman, F. Yamaguchi, and Y. Yamamoto¹
Quantum Entanglement Project, ICORP, JST, Edvard L. Gluskin Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4085
E. Abe and K. M. Itoh²
Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, Yokohama 223-8522, Japan
(Received 10 September 2001; published 12 June 2002)

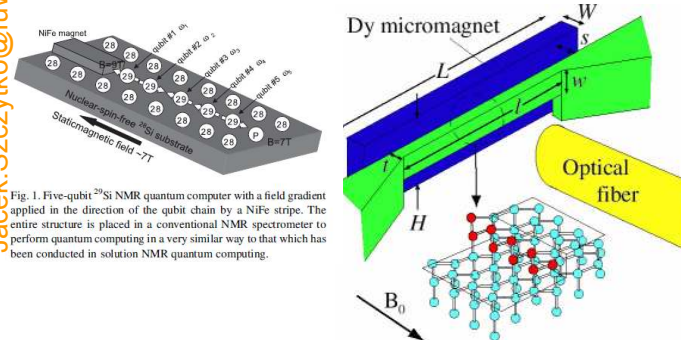


Fig. 1. Five-qubit ^{29}Si NMR quantum computer with a field gradient applied in the direction of the qubit chain by a Nife stripe. The entire structure is placed in a conventional NMR spectrometer to perform quantum computing in a very similar way to that which has been conducted in solution NMR quantum computing.

Kubity krzemowe



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT[®]

solid
state
communications

Solid State Communications 133 (2005) 747–752

www.elsevier.com/locate/ssc

An all-silicon linear chain NMR quantum computer

Kohei M. Itoh^a

Department of Applied Physics and CREST-JST, Keio University, Yokohama 223-8522, Japan

Received 22 October 2004; accepted 29 October 2004 by the guest editors

Available online 25 January 2005

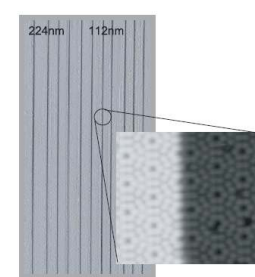
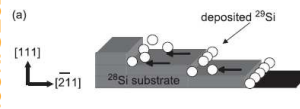


Fig. 2. (a) A schematic of single ^{29}Si wire formation at the straight step edge of the vicinal ^{29}Si (111) surface in the step-flow mode of epitaxial growth. (b) ASTM picture of the straight step edge vicinal Si (111) surface which has been obtained recently. The right figure is a close up of the step-edge structure showing unique atomic configuration.

Kubity krzemowe

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

3. Summary

We have discussed the updated version of a solid-state silicon NMR quantum computer architecture that meets the five criteria of DiVincenzo for construction of operational quantum computers. The decoherence time T_2 of the ^{29}Si qubits in Si single crystals has been extended up to 25 s at room temperature by irradiation with dipolar decoupling pulse sequences. Within $T_2 \sim 25$ s, it is possible to perform 10^6 single qubit and 10^4 two-qubit operations, which are the largest number of performable gates in the solid-state systems. Recent advances in quantum error-correcting codes and fault tolerant quantum computation schemes implies that it is possible to perform large-scale quantum computation even in the presence of decoherence if more than 10^6 single- and two-qubit gates are performable within the coherence time T_2 . We plan to extend our T_2 by two orders of magnitudes in order to allow for practical fault-tolerant quantum computing with solid silicon.

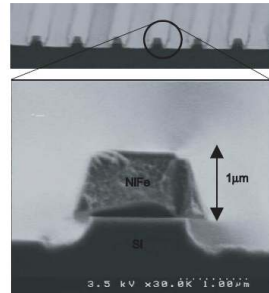
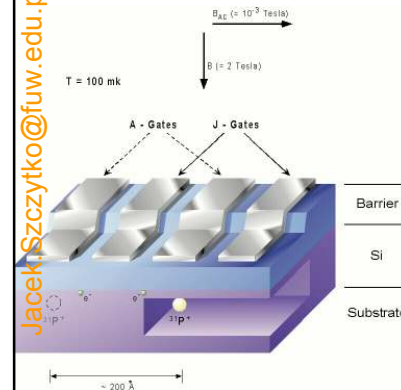


Fig. 3. An array of ferromagnetic strips formed on Si (above) and the cross section of one stripe (below).

Kubity krzemowe

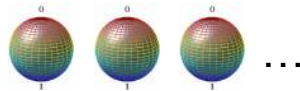
Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl



A design for a nuclear-spin quantum computer in silicon has been developed at the UNSW Semiconductor Nanofabrication Facility by Dr Bruce Kane. This design was published in Nature 393, 133 (1998) [1] and has been reviewed by David DiVincenzo in the same issue [2].

Problemy

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

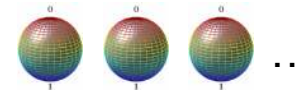


4. Kubity krzemowe

Skalowalność (silne gradienty)
Powtarzalność łańcuchów
Czułość (duża liczba łańcuchów)
Dekoherencja

Różne pomysły

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

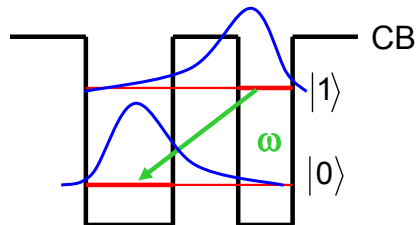


1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe

5. Kubity z kropek

6. Kubity z ekscytonów
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe

Kubity z kropek



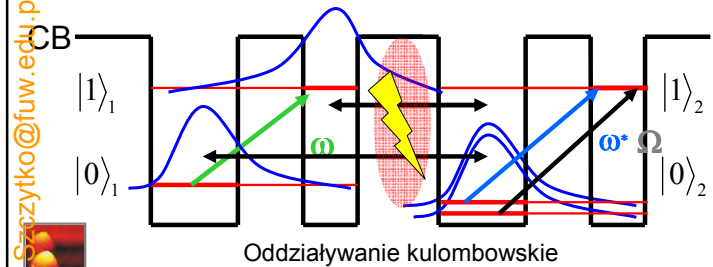
Para oddziaływujących kropek kwantowych

QuBIT: stan podstawowy i stan wzbudzony

Asymetria $\rightarrow$ Częściowa lokalizacja
Logika warunkowa

Hubert J. Krenner

Logika warunkowa

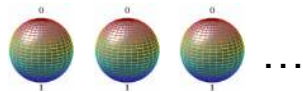


Oddziaływanie kulombowskie

X.-Q. Li and Y. Arakawa, PRA **63**, 012302 (2000)

Hubert J. Krenner

Problemy



5. Kubity z kropek

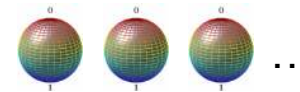
Powtarzalność rozmiarów QD

Ładunek łatwo oddziałuje z otoczeniem
fonony

Szybkie lasery podczerwone (Q Cascade Lasers?)

Odczyt wielo-kubitowych struktur?

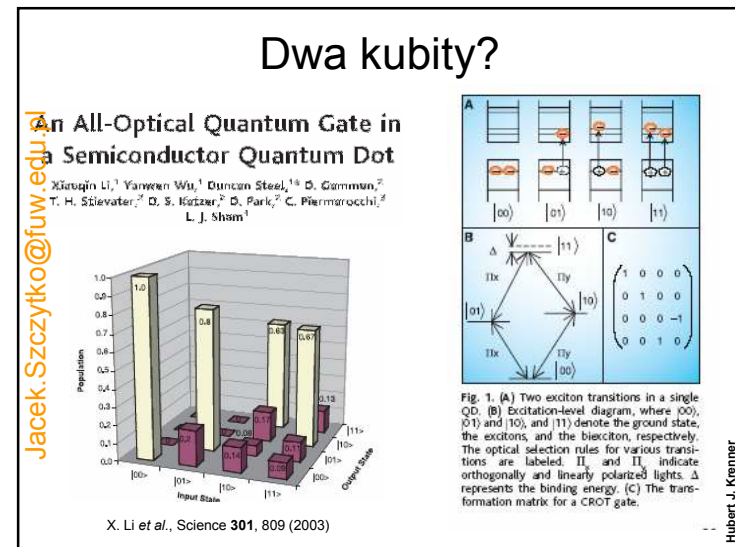
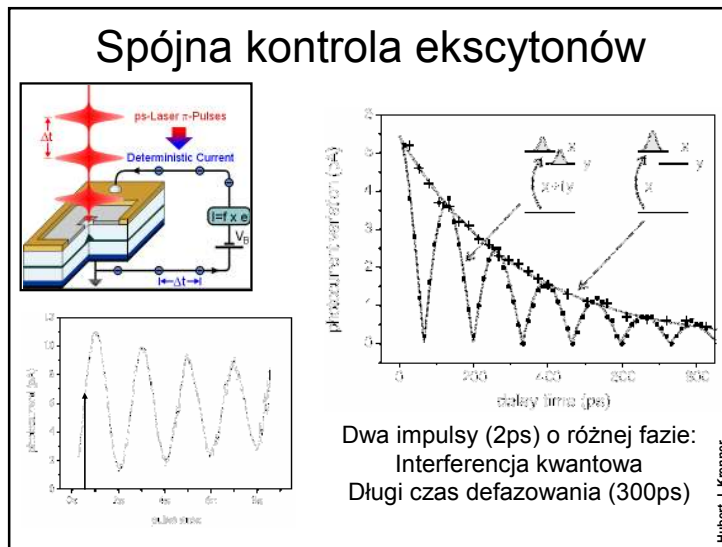
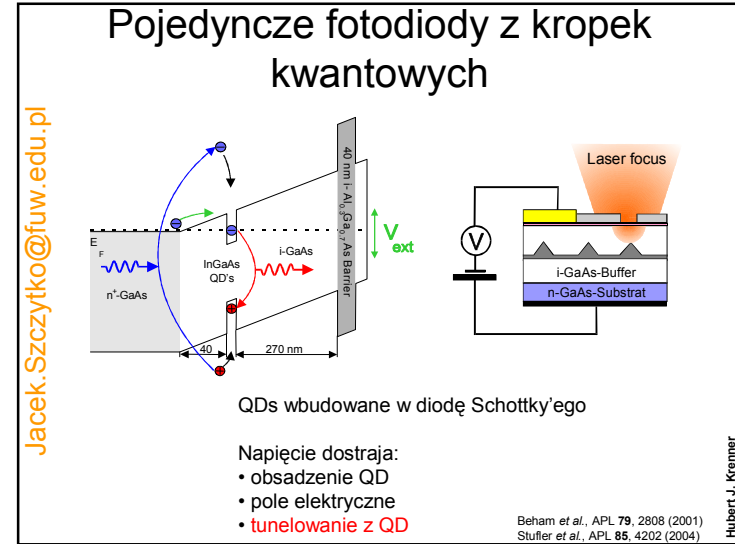
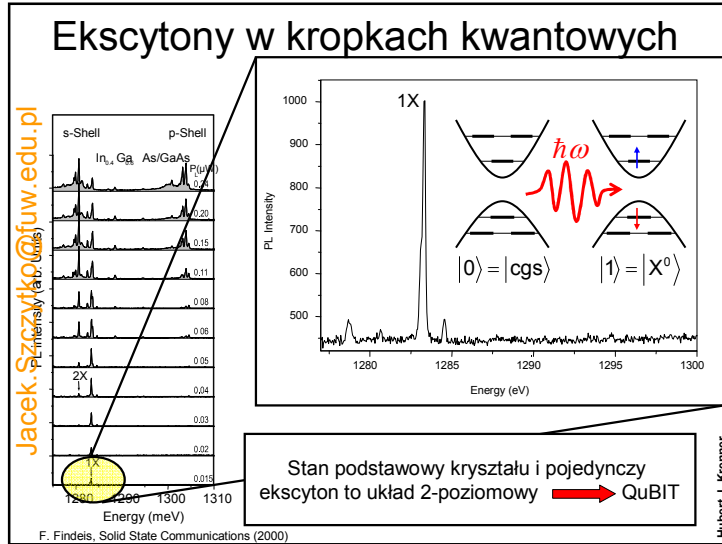
Różne pomysły



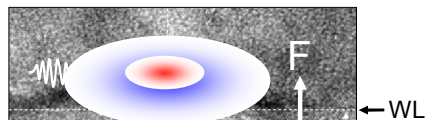
1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek

6. Kubity z ekscytonów

7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe



Kubity ekscytonowe



- Ekscytony reprezentują kubity
- Optyczne generowanie poprzez impulsy światła
- Pole elektryczne reguluje oddziaływanie między kubitami

A. Barenco *et al.*, PRL **74**, 4083 (1995), E. Biolatti *et al.*, PRL **85**, 5647 (2000), F. Troiani *et al.*, PRB **62**, (R)2263 (2000), Zrenner *et al.*, Nature **418**, 612 (2002), M. Bayer *et al.*, Science **291**, 451 (2001), X. Li *et al.*, Science **301**, 809 (2003)

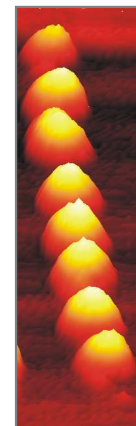
Hubert J. Kenner

Sugerowane rozwiązanie



QDs vertically aligned due to strain field

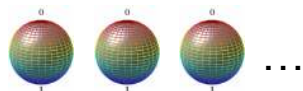
Kontrolowane oddziaływanie kwantowe



J. Bauer

Hubert J. Kenner

Problemy



6. Kubity z ekscytonów

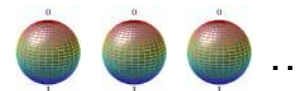
Powtarzalność rozmiarów QD

Krótki czas życia X i biX

Skalowalność

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Różne pomysły



1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytonów

7. Kubity nadprzewodzące

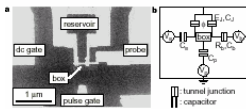
8. Kubity świetlne
9. Kubity domenowe

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

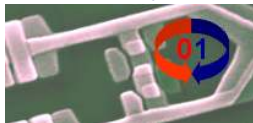
Kubity nadprzewodzące

charge qubit $E_J = 0.1 E_C$



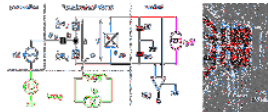
Nakamura, Pashkin, Tsai NEC

flux qubit $E_J = 15 E_C$



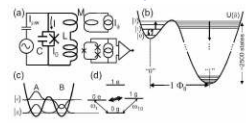
Harmans, Mooij Delft

quantonium $E_J = E_C$



Esteve, Devoret, Vion Saclay

phase qubit $E_J = 100000 E_C$



Martinis NIST

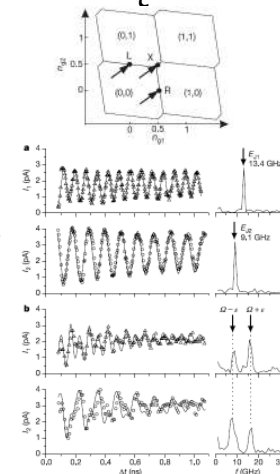
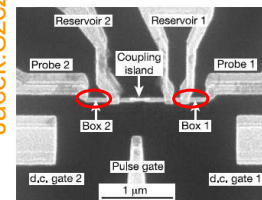
Kubity nadprzewodzące

Quantum oscillations in two coupled charge qubits

Yu. A. Pashkin^{1,2}, T. Yamamoto^{1,2}, O. Astafiev¹, Y. Nakamura^{1,2},
D. V. Averin³ & J. S. Tsai^{1,2}

¹The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama
351-0198, Japan
²NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8501, Japan
³Department of Physics and Astronomy, SUNY Stony Brook, New York
11794-3800, USA

NATURE | VOL 421 | 20 FEBRUARY 2003



Kubity nadprzewodzące

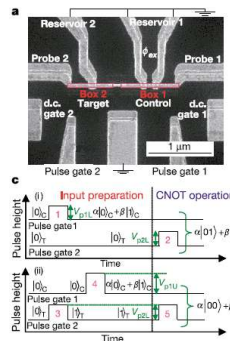
NATURE | VOL 425 | 30 OCTOBER 2003

Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits

Yamamoto^{1,2}, Yu. A. Pashkin^{1,2}, O. Astafiev¹, Y. Nakamura^{1,2},
J. S. Tsai^{1,2}

¹NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8501, Japan
²The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama
351-0198, Japan

Permanent address: Lebedev Physical Institute, Moscow 117924, Russia



Kubity nadprzewodzące

NATURE | VOL 425 | 30 OCTOBER 2003

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Figure 2 Magnetic-flux dependence of the current of the control (top) and target (bottom) qubits under the application of pulses shown in Fig. 1c (i). The lengths of the pulses are $\Delta t_1 = 85$ ps, $\Delta t_2 = 255$ ps and $\Delta t_{12} = 85$ ps, where we define the pulse length of pulse m in Fig. 1c as Δt_m and the interval between pulses l and m as Δt_{lm} .

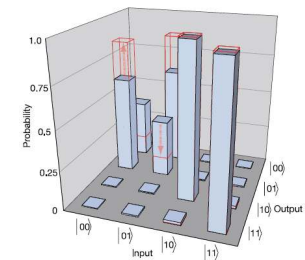


Figure 4 Truth table of the present C-NOT operation estimated by the numerical calculation (solid blue bars). Detailed values of the probabilities are

0.37	0.62	0.004	0.003
0.62	0.37	0.004	0.007
0.004	0.004	0.97	0.018
0.003	0.007	0.018	0.97

Ideally, they should be

0	1	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

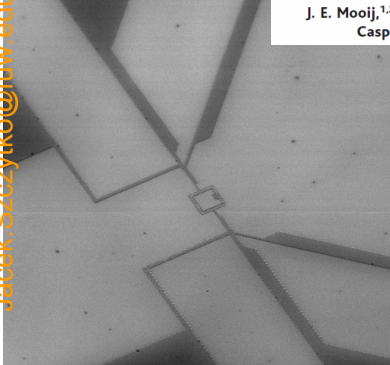
Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Kubity nadprzewodzące

Josephson Persistent-Current Qubit

13 AUGUST 1999 VOL 285 SCIENCE www.sciencemag.org

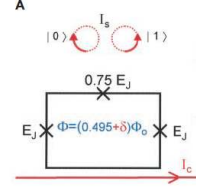
J. E. Mooij,^{1,2*} T. P. Orlando,² L. Levitov,³ Lin Tian,³ Caspar H. van der Wal,¹ Seth Lloyd⁴



qubit16 300nm

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.067833636 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

A



I_s

$|0\rangle$ $|1\rangle$

$0.75 E_J$

E_J $\Phi = (0.495 + \delta) \Phi_0$ E_J

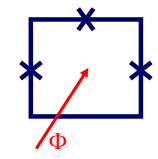
I_c

Delft

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

persistent-current quantum bit

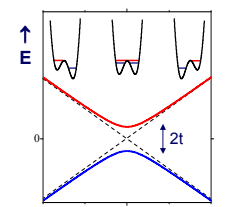
flux qubit with three junctions, small geometric loop inductance



Φ

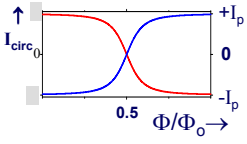
$$H = h\sigma_z + t\sigma_x$$

with $h = (\Phi/\Phi_0 - 0.5) \Phi_0 I_p$



E

$2t$



I_{circ0}

$+I_p$

0

$-I_p$

0.5

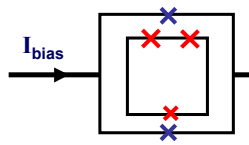
$\Phi/\Phi_0 \rightarrow$

Hans Mooij
Kavli Institute of Nanoscience
Delft University of Technology

Science **285**, 1036 (1999)

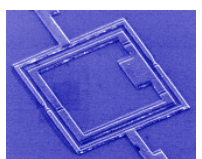
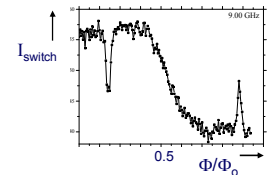
Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

SQUID measurement



I_{bias}

qubit generates flux $\pm LI_p \approx 10^{-3} \Phi_0$
measured with
hysteretic (unshunted) SQUID
maximum supercurrent depends on
flux in the SQUID loop

I_{switch}

9.00 GHz

0.5

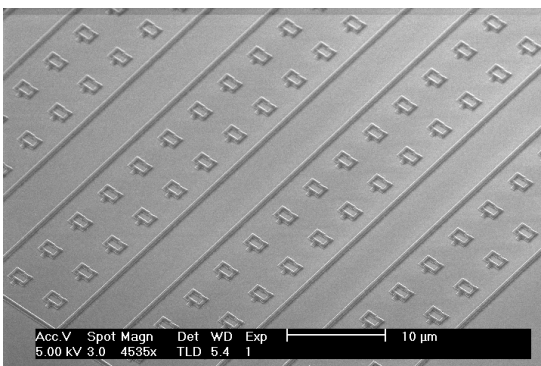
Φ/Φ_0

measurement switching current:
(RF 9 GHz applied)
5000-10000 ramps

Hans Mooij
Kavli Institute of Nanoscience
Delft University of Technology

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Kubity nadprzewodzące

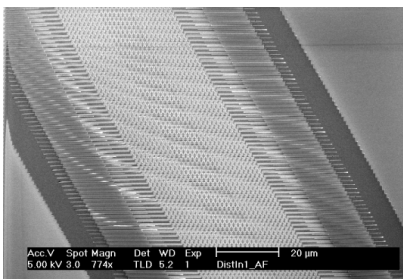


Acc.V Spot Magn Det WD Exp | 10 μm

5.00 kV 3.0 4535x TLD 5.4 1

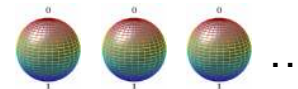
Delft

Kubity nadprzewodzące



Delf

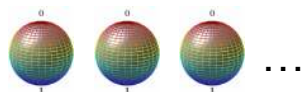
Problemy



7. Kubity nadprzewodzące

Powtarzalność złącz Josephsona
Detekcja fluksów

Różne pomysły



1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytonów
7. Kubity nadprzewodzące

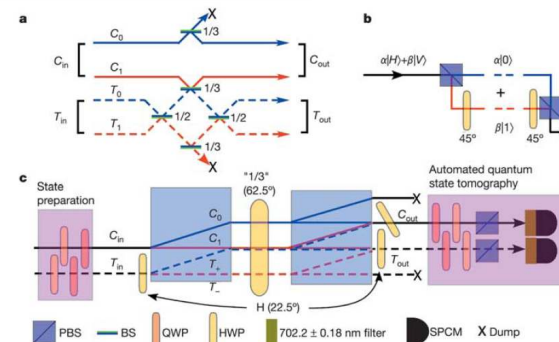
8. Kubity świetlne

9. Kubity domenowe

Bramki kubitowe

Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate

J. L. O'Brien^{1,2}, G. J. Pryde^{1,2}, A. G. White¹, T. C. Ralph¹ & D. Branning^{1,2}



© 2003 Nature Publishing Group

NATURE | VOL 426 | 20 NOVEMBER 2003 | www.nature.com/nature

Bramki kubitowe

Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate

J. L. O'Brien¹*, G. J. Pryde¹, A. G. White¹, T. C. Ralph¹ & D. Brannin²

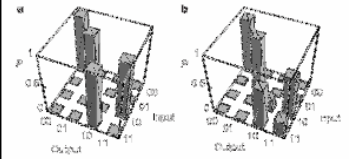
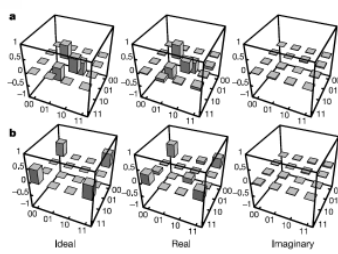



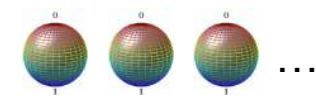
Figure 3 Experimental demonstration of classical CNOT operation—operation by the highest level. **a**, Ideal CNOT operation of a CNOT gate. **b**, Measured operation for the gate parameterized here.

Figure 4 Density matrices for two highly entangled output states. **a**, The real part of the density matrix for the maximally entangled Bell singlet state $|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$ (the imaginary components are all zero), and the real and imaginary parts of the density matrix reconstructed from quantum process tomography for the input state $|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$. **b**, The real part of the $|\Phi^-\rangle$ state, and the real and imaginary parts of the density matrix reconstructed from quantum process tomography for the input state $|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$.

Bramki CNOT są bramkami „uniwersalnymi” – można za ich pomocą zbudować dowolny obwód logiczny.

© 2003 Nature Publishing Group NATURE | VOL 426 | 20 NOVEMBER 2003 | www.nature.com/nature

Problemy

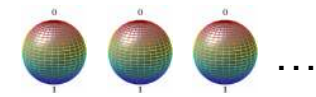


8. Kubity świetlne

Dekoherencja i absorpcja fotonów

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Różne pomysły



1. Kubity ze spinów
2. Kubity z atomów
3. Kubity jądrowe
4. Kubity krzemowe
5. Kubity z kropek
6. Kubity z ekscytonów
7. Kubity nadprzewodzące
8. Kubity świetlne

9. Kubity domenowe

A właściwie nie kubity, ale klasyczne bity... Tylko inne.

Jacek.Szczytko@fuw.edu.pl

Logika Domen Magnetycznych

Magnetic Domain-Wall Logic

D. A. Allwood,¹ G. Xiong,² C. C. Faulkner,³ D. Atkinson,² D. Petit,³ R. P. Cowburn^{3,4*}

9 SEPTEMBER 2005 VOL 309 SCIENCE www.sciencemag.org

Table 1. Symbols for electronic logic, together with the appropriate CMOS circuit element and a schematic drawing of the optimized domain-wall logic element (dimensions shown refer to the design rule used here of 200-nm-wire width connecting logic elements and 1-μm turning radius of corners). The fan-out, cross-over, and logical AND junctions all contain tapered regions to connect the 200-nm-wide wire links. Vdd is the supply voltage.

Symbol	CMOS Circuit	Domain Wall Logic Circuit
Vdd (+5 V)	Charge	Magnetization
0 V	No charge	Magnetization
Fan-out	Input, Output A, Output B	Input, Output A, Output B
Cross-over	Input A, Input B, Output A, Output B	Input A, Input B, Output A, Output B

« kasyczna » logika

Logika Domen Magnetycznych

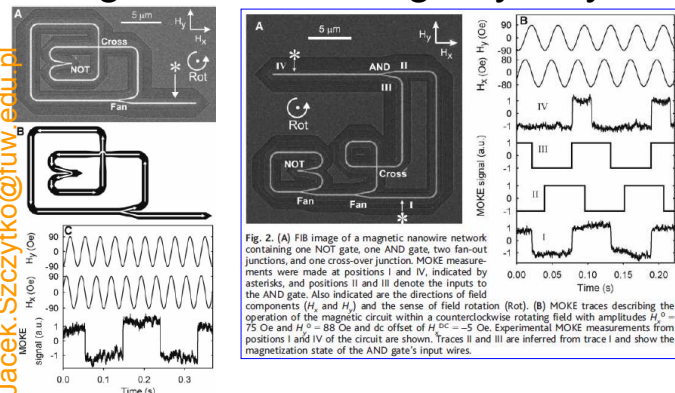


Fig. 1. (A) Focused ion beam (FIB) image of a magnetic nanowire loop containing a NOT gate, fan-out junction, and cross-over junction. Only the bright lines indicate the presence of magnetic material; all other features are artifacts of the fabrication process. The directions of rotating field components (H_x and H_y), and the sense of rotating field (Rot) are indicated, and the asterisk (*) denotes the position of MOKE measurement. (B) Nanowire structure within an applied counter-clockwise rotating field with amplitudes $H_x^0 = 75$ Oe and $H_y^0 = 88$ Oe and dc offset of $H_z^{dc} = -5$ Oe. Experimental MOKE measurements from positions I and IV of the circuit are shown. Traces II and III are inferred from trace I and show the magnetization state of the AND gate's input wires.

W przyszłym tygodniu
Optoelektronika



Zródło: www.gazeta.pl 17-11-2005

Logika Domen Magnetycznych

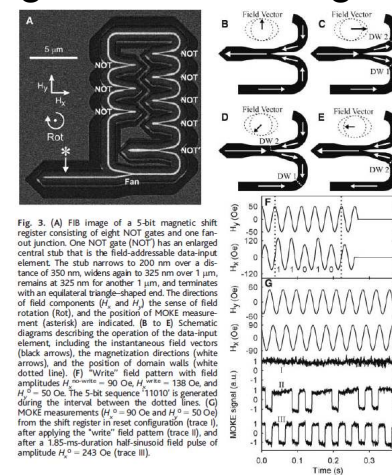


Fig. 3. (A) FIB image of a 5-bit magnetic shift register consisting of eight NOT gates and one fan-out junction. One NOT gate (NOT) has an enlarged central stub that is the field-addressable data-input element. The stub narrows to 200 nm over a distance of 350 nm, widens again to 325 nm over 1 μm, remains at 325 nm for another 1 μm, and terminates with an equilateral triangle-shaped end. The directions of field components (H_x and H_y) and the sense of field rotation (Rot), and the position of MOKE measurement (asterisk) are indicated. (B to F) Schematic diagrams describing the operation of the data-input element, including the instantaneous field vectors (black arrows), the magnetization directions (white arrows), and the position of domain walls (white dotted line). (F) "Write" field pattern with field amplitudes $H_x^{write} = 90$ Oe, $H_y^{write} = 138$ Oe, and $H_z^{write} = 50$ Oe. The 5-bit sequence "11010" is generated during the interval between the dotted lines. (G) MOKE measurements ($H_x^0 = 90$ Oe and $H_y^0 = 50$ Oe) from the shift register in reset configuration (trace I), after applying the "write" field pattern (trace II), and after a 1.85-ms-duration half-sinusoidal field pulse of amplitude $H_x^0 = 243$ Oe (trace III).