

Kvantové počítání

Pavel Cejnar

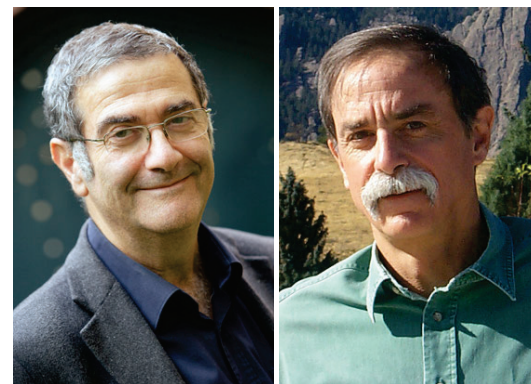
ÚČJF MFF UK Praha
pavel.cejnar@mff.cuni.cz



MFF UK, Praha, říjen 2013

Motivace

Serge Haroche David J. Wineland



Zaprvé:

The **Nobel Prize in Physics 2012** was awarded jointly to Serge Haroche and David J. Wineland "for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

Zadruhé:

Základ rodících se „kvantových technologií“ – „**manybody**“ **kvantová fyzika**

Zatřetí:

Je to prostě **zajímavé**
a zábavné!



Louis Emile Adan
(1839-1937)
An amusing story





Historie

1960-70s: Analýzy fyzikálních omezení klasických počítačů
„Vratné počítače“ (počítání založené na reverzibilních procesech)

1959: Feynman pronesl řeč „*There's Plenty of Room at the Bottom*”

1960: První úvahy o fyzikálních mezích miniaturizace výpočetních procesů

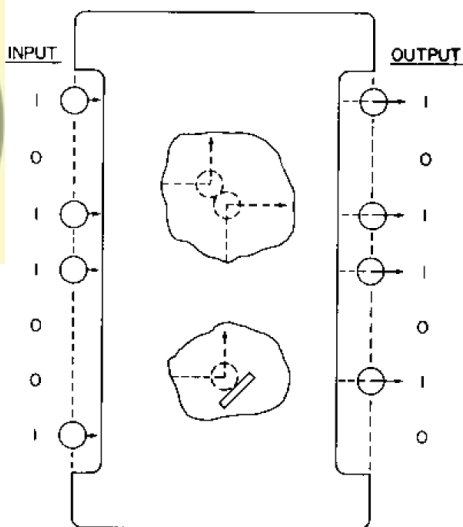
1961: Landauer ukázal, že každý ireverzibilní krok výpočtu produkuje entropii-teplo

1969: První návrh „spinového počítače“ (kvantové vlastnosti chápány spíš jako omezení)

1973: Bennett předkládá koncept univerzálního reverzibilního počítače

1981: Fredkin & Toffoli demonstrují výpočetní reverzibilitu na “*billiard ball computer*”

Edward Fredkin



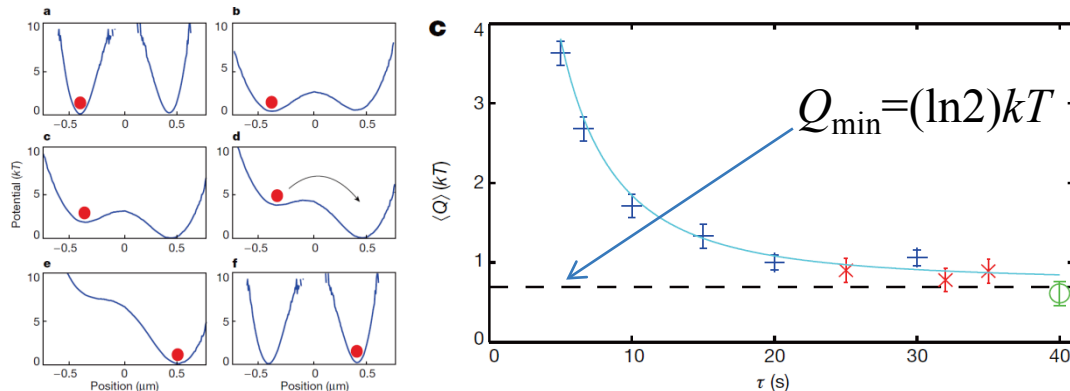
LETTER

8 MARCH 2012 | VOL 483 | NATURE | 187

doi:10.1038/nature10872

Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics

Antoine Bérut¹, Artak Arakelyan¹, Artyom Petrosyan¹, Sergio Ciliberto¹, Raoul Dillenschneider² & Eric Lutz^{3†}



Historie

1960-70s: Analýzy fyzikálních omezení klasických počítačů

1980-81: První úvahy o prospěšnosti QM pro teorii počítání

Richard Feynman, Jurij Manin, ...



4. QUANTUM COMPUTERS—UNIVERSAL QUANTUM SIMULATORS

program that Fredkin is always pushing, about trying to find a computer simulation of physics, seem to me to be an excellent program to follow out. He and I have had wonderful, intense, and interminable arguments, and my argument is always that the real use of it would be with quantum mechanics, and therefore full attention and acceptance of the quantum mechanical phenomena—the challenge of explaining quantum mechanical phenomena—has to be put into the argument, and therefore these phenomena have to be understood very well in analyzing the situation. And I'm not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because **nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical**, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy. Thank you.

International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

1. INTRODUCTION

On the program it says this is a keynote speech—and I don't know what a keynote speech is. I do not intend in any way to suggest what should be in this meeting as a keynote of the subjects or anything like that. I have my own things to say and to talk about and there's no implication that anybody needs to talk about the same thing or anything like it. So what I want to talk about is what Mike Dertouzos suggested that nobody would talk about. I want to talk about the problem of simulating physics with computers and I mean that in a specific way which I am going to explain.



Historie

1960-70s: Analýzy fyzikálních omezení klasických počítačů

1980-81: První úvahy o prospěšnosti QM pro teorii počítání

Richard Feynman, Jurij Manin, ...

1985: Kvantový Turingův stroj

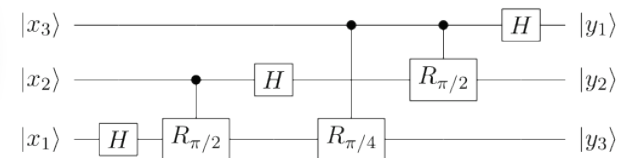
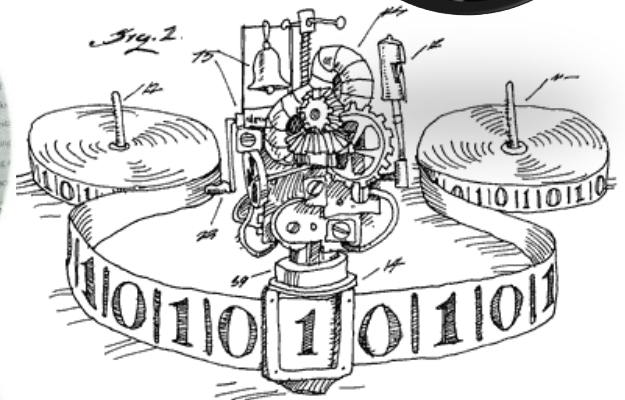
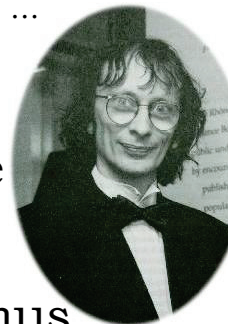
1989: Elementární kvantové operace

David Deutsch

1994: Kvantový faktorizační algoritmus

Peter Shor

$$N = P_1 \cdot P_2 \begin{cases} P_1, P_2 \Rightarrow N \quad \checkmark \\ N \Rightarrow P_1, P_2 \quad \times \end{cases}$$



1992: Deutsch-Joszuův algoritmus

1994: Simonův algoritmus

zjišťování vlastností neznámé funkce

pomocí konečného (co nejmenšího) počtu volání

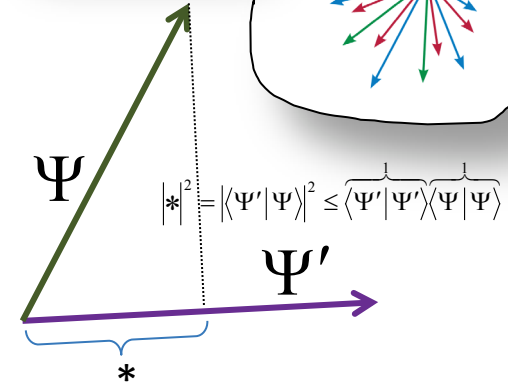
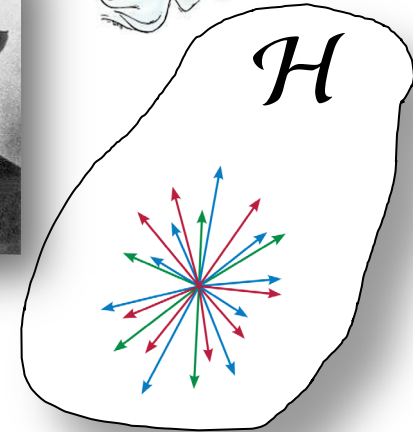
1996: Groverův algoritmus

prohledávání neseříděné databáze





Tři zdroje



$$|*|^2 = |\langle \Psi' | \Psi \rangle|^2 \leq \overbrace{|\langle \Psi' | \Psi' \rangle|}^1 \overbrace{|\langle \Psi | \Psi \rangle|}^1$$

☺ 1) Linearita kvantové mechaniky

Stavy kvantových systémů = vektory v Hilbertově prostoru $\mathcal{H}$

„superpozice“ $|\Psi\rangle = \alpha|\Psi'\rangle + \beta|\Psi''\rangle$

Stavy částečně nerozlišitelné $\Rightarrow$ kvantová neurčitost
míra nerozlišitelnosti daná skalárním součinem

☺ 2) Kvantová provázanost

Stavy složených systémů = vektory v součinném prostoru $\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$

Např. $|\Psi\rangle = \alpha|\Psi'_1\rangle \otimes |\Psi'_2\rangle + \beta|\Psi''_1\rangle \otimes |\Psi''_2\rangle \neq |\Psi_1\rangle \otimes |\Psi_2\rangle$

Provázaný stav $\Rightarrow$ podsystémy nemají své vlastní stavové vektory
nedají se popsat odděleně, nýbrž vykazují kvantové korelace
(bez ohledu na vzdálenost)

☹ 3) Vlastnosti kvantových měření

Výsledky měření mají pravděpodobnostní charakter

Měření mění stav systému

$$|\Psi\rangle \rightarrow |a\rangle$$

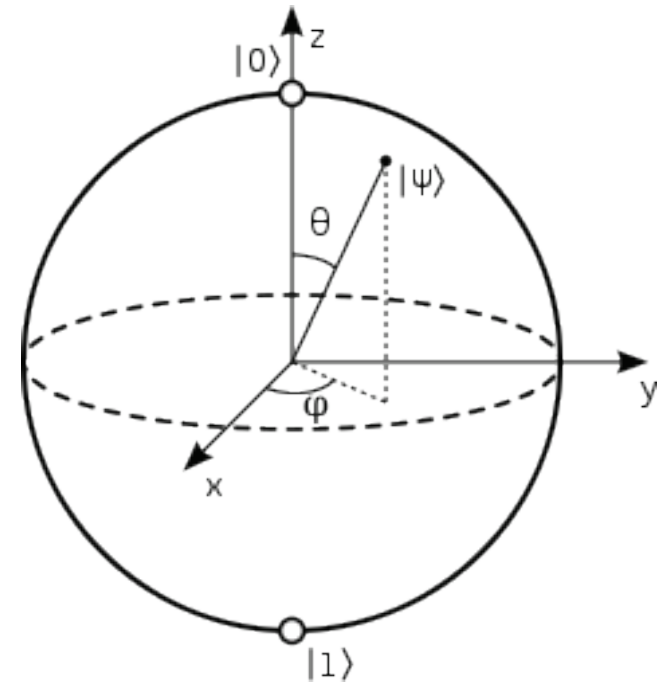
$$P_\Psi(a) = |\langle a | \Psi \rangle|^2$$

Kvantový bit = qubit, Q-bit, „kvabit“ ...

$$|\psi\rangle = \underbrace{\alpha}_{\cos\frac{\theta}{2}} |0\rangle + \underbrace{\beta}_{e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}} |1\rangle$$

Fyzikální realizace

- Spinové projekce fermionu $s=1/2$
(elektron, proton, liché jádro...)
- Lineární/kruhové polarizační stavy fotonu
- Dva vybrané energetické stavy atomu
- Proudové stavy supravodivého prstence....



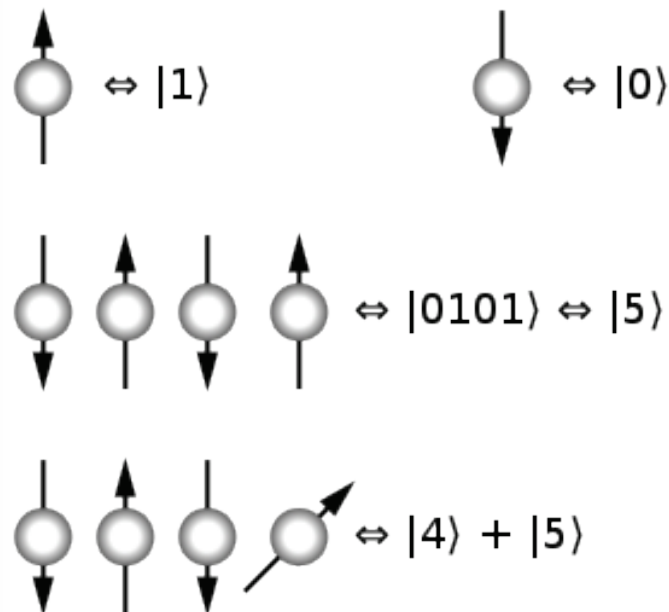
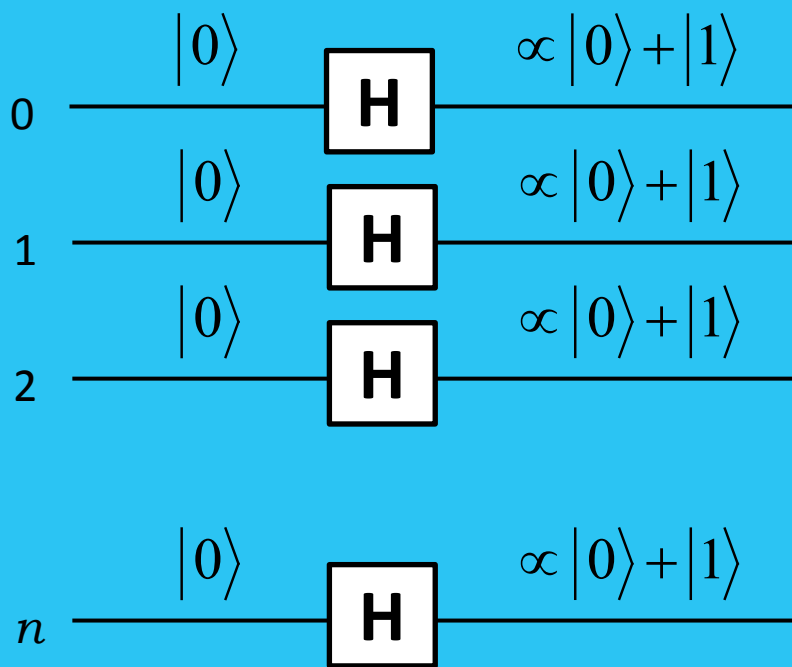
Kvantový registr

Obecný stav n -tice Q-bitů = superpozice všech číselných hodnot

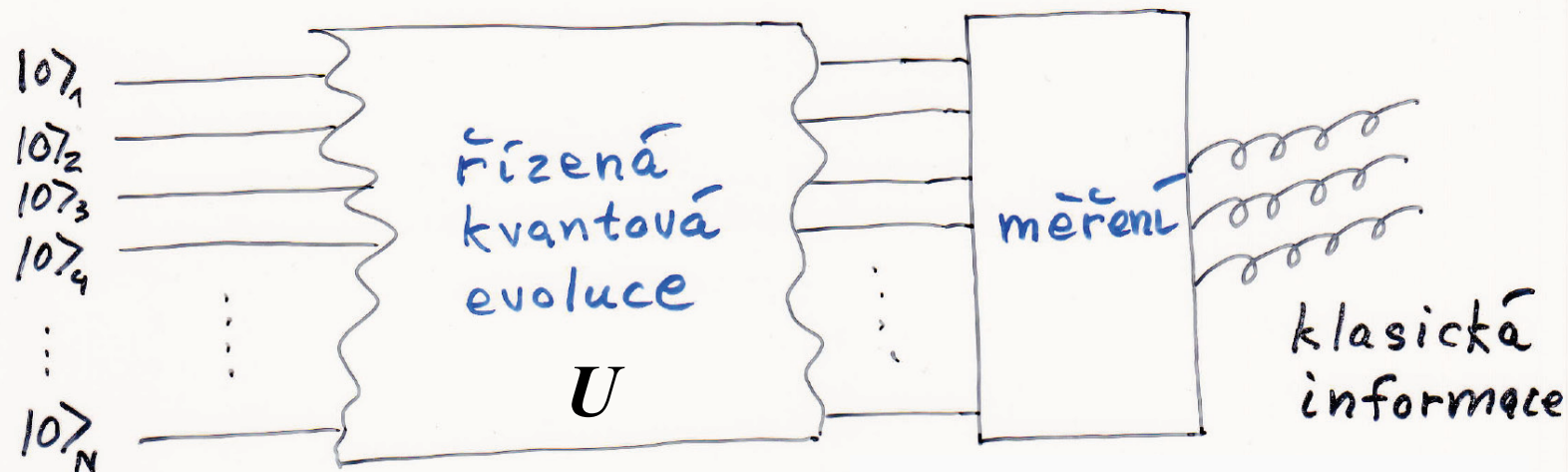
$$|\Psi\rangle = \alpha_0 \underbrace{|0\dots 00\rangle}_{|0\rangle} + \alpha_1 \underbrace{|0\dots 01\rangle}_{|1\rangle} + \alpha_2 \underbrace{|0\dots 10\rangle}_{|2\rangle} + \dots + \alpha_{2^n-1} \underbrace{|11\dots 1\rangle}_{|2^n-1\rangle}$$

Příprava homogenní superpozice:

čas t →

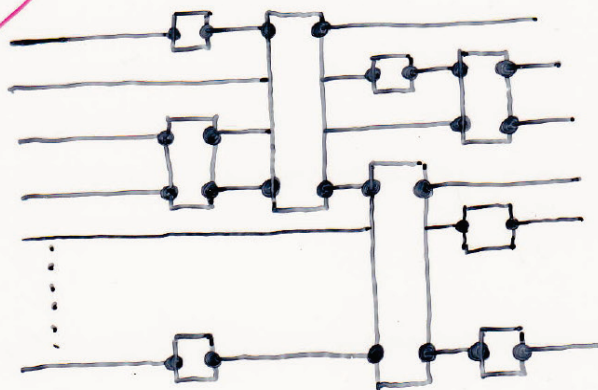


Kvantový výpočet



opakování
výpočtu
K-krát

$$U = U_{nm} U_l \dots U_{kj} U_i$$



**KVANTOVÝ
ALGORITMUS
(program)**

posloupnost 1- a 2-qubitových operací

„Kvantové programování“

Rozložení kvantového výpočtu na **základní operace**:

1) Operace na **jednom Q-bitu**

Hademard transform.



$$\begin{array}{l} |0\rangle \\ |1\rangle \end{array} \mapsto \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \end{array}$$

Phase shift

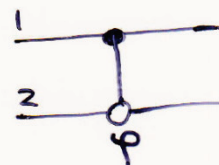


$$\begin{array}{l} |0\rangle \\ |1\rangle \end{array} \mapsto \begin{array}{l} |0\rangle \\ e^{i\varphi} |1\rangle \end{array}$$

2) Operace na **dvou Q-bitech**

Controlled phase shift

$$\begin{array}{l} |0\rangle_1 |0\rangle_2 \\ |0\rangle_1 |1\rangle_2 \\ |1\rangle_1 |0\rangle_2 \\ |1\rangle_1 |1\rangle_2 \end{array} \mapsto \begin{array}{l} |0\rangle_1 |0\rangle_2 \\ |0\rangle_1 |1\rangle_2 \\ |1\rangle_1 |0\rangle_2 \\ e^{i\varphi} |1\rangle_1 |1\rangle_2 \end{array}$$



Controlled NOT

$$\begin{array}{l} |0\rangle |0\rangle \\ |0\rangle |1\rangle \\ |1\rangle |0\rangle \\ |1\rangle |1\rangle \end{array} \mapsto \begin{array}{l} |0\rangle |0\rangle \\ |0\rangle |1\rangle \\ |1\rangle |1\rangle \\ |1\rangle |0\rangle \end{array}$$



„Kvantové programování“

příklady

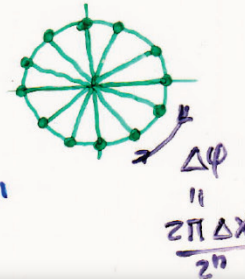
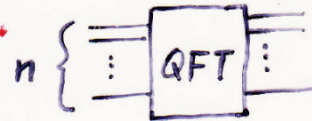
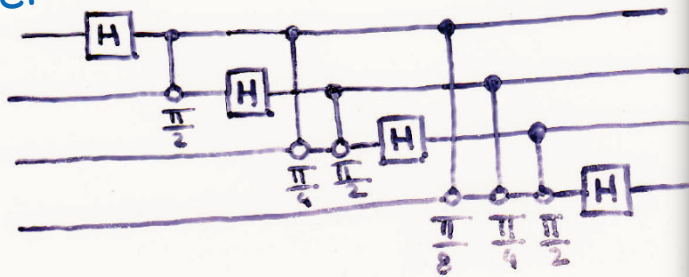
Quantum Fourier transform.

$$|x\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{\frac{2\pi i xy}{2^n}} |y\rangle$$

Unitarita:

$$\langle \text{QFT } x | \text{QFT } x' \rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{\frac{2\pi i (x'-x)y}{2^n}} = \delta_{xx'}$$

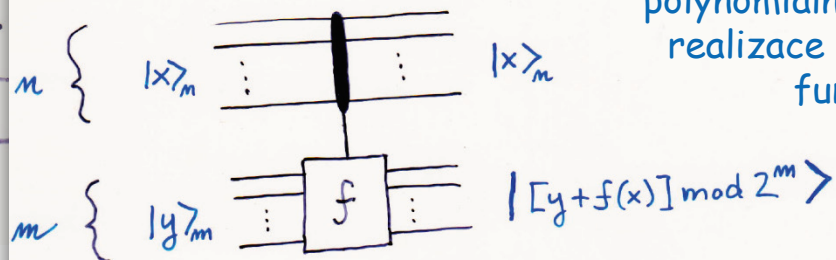
Polynomiálně rychlá realizace existuje:



**Kvantová
Fourierova
transformace**

Function evaluation

Existence/neexistence
polynomiálně rychlé
realizace závisí na
funkci $f(x)$



**Výpočet hodnoty dané
diskrétní funkce**

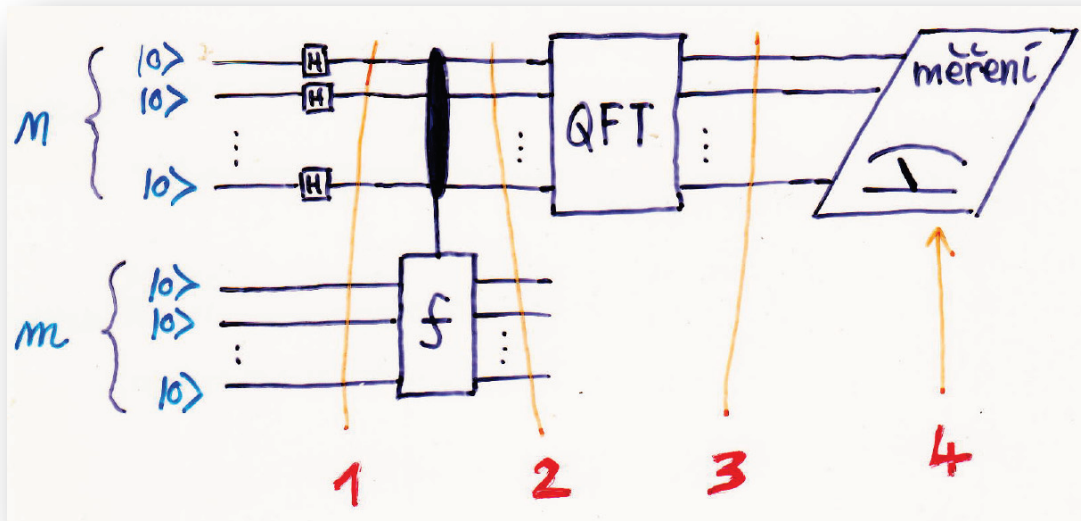
Operace musí být reverzibilní => pro
neprostou funkci $f(x)$ je třeba na
výstupu uchovat hodnotu argumentu

unitarita:

$$\begin{aligned} \langle F x' y' | F x y \rangle &= \underbrace{\langle x' | x \rangle}_{\substack{\emptyset \\ \text{pro } x \neq x'}} \underbrace{\langle [y' + f(x')] \bmod 2^m | [y + f(x)] \bmod 2^m \rangle}_{\substack{\emptyset \\ \text{pro } x=x' \text{ \& } y \neq y'}} = \\ &= \begin{cases} 1 & \text{pro } x=x' \text{ a } y=y' \\ \emptyset & \text{jindy} \end{cases} \end{aligned}$$

$(y' - y) + [f(x') - f(x)] \neq k 2^m$
 $0 < \dots < 2^m$ $0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Příklad určení periody r diskrétní funkce $f(x)$



Tento výpočet
pro jistou funkci $f(x)$
je srdcem Shorova
algoritmu, který vede
k polynomiálně rychlé
v počtu cifer n rozkládaného čísla
faktorizaci zadaného
čísla $N = P_1 \cdot P_2$

1 $|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_x |x\rangle_m |0\rangle_m$

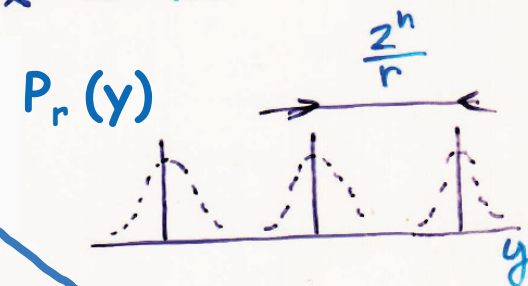
2 $|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_x |x\rangle_m |f(x)\rangle_m$

3 $|\Psi_3\rangle = \frac{1}{2^m} \sum_x \sum_y e^{\frac{2\pi i x y}{2^n}} |y\rangle_n |f(x)\rangle_m$

4 Pravděpodobnost výsledku y při periodě r

$$P_r(y) = \langle \Psi_3 | y \rangle_m \langle y | \Psi_3 \rangle = \frac{1}{2^{2m}} \sum_{x, x'} e^{\frac{2\pi i (x-x')y}{2^n}} \underbrace{\langle f(x') | f(x) \rangle}_{\neq 0 \text{ jen pro } f(x')=f(x)}$$

$\langle f(x') | f(x) \rangle \neq 0$ jen pro $f(x')=f(x)$
tj. $x-x'=kr$



Překážky

DEKOHERENCE !!!

(a) koherentní superpozice

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Pokud uskutečnění libovolné z alternativ *nelze* principiálně zjistit měřením na jiném objektu => **interference**

amplitudy



(b) statistická směs

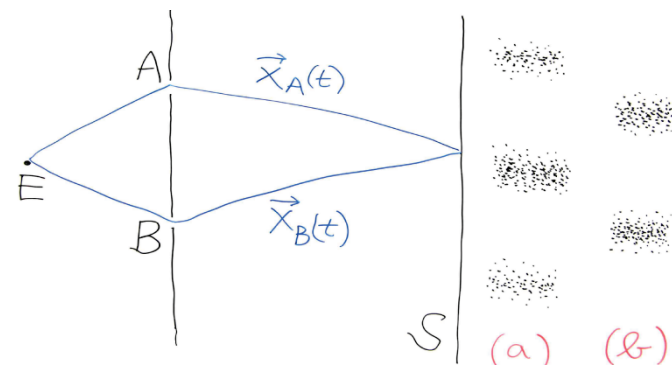
pravděpodobnosti

$$p_0 = |\alpha|^2 \quad p_1 = |\beta|^2$$

Pokud uskutečnění některé z alternativ *lze*, byť i jen v principu, zjistit měřením na jiném objektu => ~~interference~~

► Interferenční experiment

Zánik interference při možnosti zjištění dráhy částice:



► Interakce Q-bitu s prostředím

=> vznik provázanosti:

$$|0\rangle \otimes |\Phi_i\rangle \xrightarrow{t} |0\rangle \otimes |\Phi_i^{(0)}(t)\rangle$$

$$|1\rangle \otimes |\Phi_i\rangle \xrightarrow{t} |1\rangle \otimes |\Phi_i^{(1)}(t)\rangle$$

stav Q-bitu stav prostředí

$$(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes |\Phi_i\rangle \xrightarrow{t} \alpha|0\rangle \otimes |\Phi_i^{(0)}(t)\rangle + \beta|1\rangle \otimes |\Phi_i^{(1)}(t)\rangle$$

Pro $\langle \Phi_i^{(0)}(t) | \Phi_i^{(1)}(t) \rangle \xrightarrow{t} 0$ se obě alternativy $|0\rangle$ a $|1\rangle$ stávají principiálně rozlišitelné vhodným měřením na prostředí

=> koherentní superpozice → statistická směs => **konec Q-výpočtu !!!**

Překážky

DEKOHERENCE !!!

AUGUST 1996 PHYSICS TODAY

QUANTUM COMPUTING: DREAM OR NIGHTMARE?

ples of quantum
ig were laid out
ars ago by com-
sts applying the
on principle of
chanics to com-
tion. Quantum
as recently be-
topic in physics,
ognition that a
tem can be pre-

Recent experiments have deepened our insight into the wonderfully counterintuitive quantum theory. But are they really harbingers of quantum computing? We doubt it.

Serge Haroche and Jean-Michel Raimond

At this stage we think that some critical reflection is required in a field boiling with excitement. We feel that the enthusiasm is certainly justified, but not necessarily for the reasons generally adduced. Although the idea of quantum computing involves some fascinating new physics that goes far beyond the rather mundane problem of merely computing faster, we believe that performing large-scale calculations will remain an impossible dream for the foreseeable future.

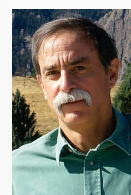
Even if quantum computing remains a dream, the physics of quantum information processing at the level of a few qubits is fascinating. Experiments on entangled particles with ions in a trap or atoms in a cavity will help us understand the fundamental aspects of quantum measurement theory, and they may lead to major improvements in the precision spectroscopy of simple quantum systems.

two interacting q
trol" bit and a
The control re
changed, but its
mines the evolu
get: If the co
nothing happens
if it is 1, the targ
a well-defined tra
Quantum m
mits additional



Future of Quantum Computing Proves to Be Debatable

In presenting their opinions in the article "Quantum Computing: Dream or Nightmare?" (August, page 51), Serge Haroche and Jean-Michel Raimond conclude that large-scale quantum computation will remain merely a dream of computer theorists. Their principal argument is that, for a quantum computer to be useful, the ratio R of quantum gate speed to decoherence rate would have to be much higher than what can be obtained in the laboratory. Based on what has been achieved so far, this may be a safe bet. However, the subject is still in its infancy and at this time, its fundamental limits are not understood. Lacking such an understanding, Haroche and Raimond's pessimism about quantum computing is, in our opinion, premature.....



CHRISTOPHER MONROE
DAVID WINELAND
*National Institute of
Standards and Technology
Boulder, Colorado*

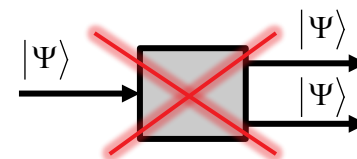
...a jejich překonávání

~~DEKOHERENCE !!!~~

Opravné procedury využívající redundanci

Ne však prosté „namnožení“ Q-bitu – tomu brání **kvantový no-cloning teorém**:

P. Shor, Phys. Rev. A 52, R2493 (1995)
A. Steane, Proc. R. Soc. Lond. A, 452, 2551 (1996)
E. Knill and R. Laflamme, Phys. Rev. A 55, 900 (1997)



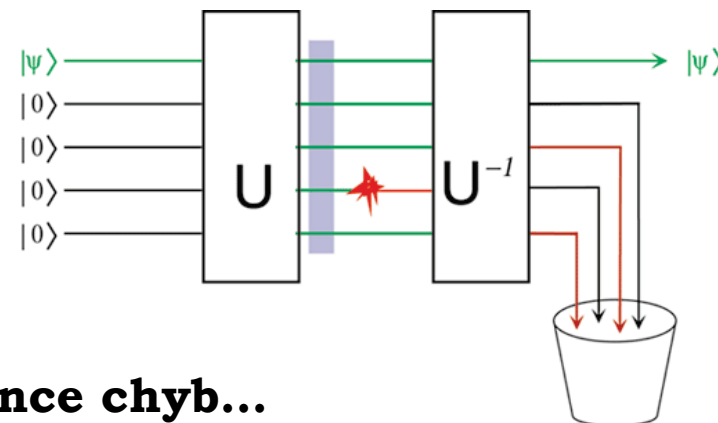
Procedura opravuje chyby, pokud se objeví jen na 1 (libovolném) Q-bitu (předpoklad potlačení pravděpodobnosti současné chyby na více Q-bitech)

Klasifikace chyb založená na obecném rozkladu evolučního operátoru v prostoru Q-bit prostředí:

$$U^{q+e} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_I^q \otimes O_0^e + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\sigma_1}^q \otimes O_1^e + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}}_{i\sigma_2 = \frac{1}{2}[\sigma_3, \sigma_1]}^q \otimes O_2^e + \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}}_{\sigma_3}^q \otimes O_3^e$$

Notace: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \equiv \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$

Oprava obecné chyby: **1 Q-bit → 5 Q-bitů**
minimálně



Byly navrženy i jiné metody prevence chyb...

Adiabatické kvantové počítání

Farhi, Goldstone, Gutmann, Lapa, Lundgren, Preda, Science 292, 472 (2001)
Aharonov, van Dam, Kempe, Landau, Lloyd, Regev, SIAM J.Comput. 37, 166 (2007)

Příklad: **problém splnitelnosti** pro N bitů $z_\alpha \in \{0,1\}$ a m klauzulí typu

$$\alpha=1,2,\dots,N$$

$$z_\alpha + z_\beta + z_\gamma = 1$$

$$\alpha, \beta, \gamma \in \{1, 2, \dots, N\}$$

Realizace pomocí spinových Q-bitů

$$\dots \uparrow \Leftrightarrow |1\rangle \dots \downarrow \Leftrightarrow |0\rangle \dots$$

$$s_\alpha^z = +\frac{1}{2} \quad s_\beta^z = -\frac{1}{2}$$

Předpokládejme, že problém má právě jedno řešení. Toto řešení je zakódováno v základním stavu Hamiltoniánu:

$$H_{\text{out}} = \frac{1}{2} \sum_{(\alpha, \beta, \gamma)} \left(s_\alpha^z + s_\beta^z + s_\gamma^z - \frac{1}{2} \right)^2 - \frac{m}{2}$$

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \\ g_0=0 \\ H(0)=H_{\text{in}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} t=T \\ g_T=1 \\ H(1)=H_{\text{out}} \end{array} \right.$$

$$H(g_t) = (1-g_t) \left[-\sum_{\alpha} s_\alpha^x \right] + g_t \left[\sum_{\alpha\beta} M_{\alpha\beta} s_\alpha^z s_\beta^z - \frac{1}{2} \sum_{\alpha} N_{\alpha} s_\alpha^z \right]$$

počet klauzulí
týkajících se
bitů z_α a z_β

počet klauzulí
týkajících se
bitu z_α

$t=0$

$0 < t < T$

$t=T$

in

out

základní stav

$$|\rightarrow \rightarrow \dots \rightarrow\rangle$$

plně **separabilní**
 $\Rightarrow$ „jednoduše“
připravitelný

základní stav

$$|\uparrow \downarrow \dots \uparrow\rangle$$

**splňující zadanou
soustavu klauzulí !!!**



Adiabatické kvantové počítání

Farhi, Goldstone, Gutmann, Lapa, Lundgren, Preda, Science 292, 472 (2001)
Aharonov, van Dam, Kempe, Landau, Lloyd, Regev, SIAM J.Comput. 37, 166 (2007)

Příklad: **problém splnitelnosti** pro N bitů $z_\alpha \in \{0,1\}$ a m klauzulí typu

$$\alpha=1,2,\dots,N$$

$$z_\alpha + z_\beta + z_\gamma = 1$$

$$\alpha, \beta, \gamma \in \{1, 2, \dots, N\}$$

Realizace pomocí spinových Q-bitů

$$\dots \uparrow \Leftrightarrow |1\rangle \dots \downarrow \Leftrightarrow |0\rangle \dots$$

$$s_\alpha^z = +\frac{1}{2} \quad s_\beta^z = -\frac{1}{2}$$

Předpokládejme, že problém má právě jedno řešení. Toto řešení je zakódováno v základním stavu Hamiltoniánu:

$$H_{\text{out}} = \frac{1}{2} \sum_{(\alpha, \beta, \gamma)} \left(s_\alpha^z + s_\beta^z + s_\gamma^z - \frac{1}{2} \right)^2 - \frac{m}{2}$$

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \\ g_0=0 \\ H(0)=H_{\text{in}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} t=T \\ g_T=1 \\ H(1)=H_{\text{out}} \end{array} \right.$$

$$H(g_t) = (1-g_t) \left[-\sum_{\alpha} s_\alpha^x \right] + g_t \left[\sum_{\alpha\beta} M_{\alpha\beta} s_\alpha^z s_\beta^z - \frac{1}{2} \sum_{\alpha} N_{\alpha} s_\alpha^z \right]$$

počet klauzulí
týkajících se
bitů z_α a z_β

počet klauzulí
týkajících se
bitu z_α

Adiabatický teorém QM

Hamiltonián $H(g)$ závisející na externím parametru g , který se explicitně mění s časem: $g=g_t$
Počáteční stav systému = základní stav počátečního Hamiltoniánu $H(g_0)$, tj.: $|\Psi(t=0)\rangle = |\Psi_0(g_{t=0})\rangle$

Otázka: Jak se bude vyvíjet stav systému s časem?

Parciální odpověď: Bude kopírovat základní stav Hamiltoniánu $H(g_t)$, ale jen pokud je splněna podmínka adiabaticity:

$$\left| \frac{dg}{dt} \right|^{-1} \gg \frac{|\langle \Psi_1(g) | \frac{d}{dg} H(g) | \Psi_0(g) \rangle|}{[E_1(g) - E_0(g)]^2}$$

základní stav

$$|\rightarrow \rightarrow \dots \rightarrow\rangle$$

plně **separabilní**
 $\Rightarrow$ „jednoduše“
připravitelný

základní stav

$$|\uparrow \downarrow \dots \uparrow\rangle$$

**splňující zadanou
soustavu klauzulí !!!**

Adiabatické kvantové počítání

Farhi, Goldstone, Gutmann, Lapa, Lundgren, Preda, Science 292, 472 (2001)

Aharonov, van Dam, Kempe, Landau, Lloyd, Regev, SIAM J.Comput. 37, 166 (2007)

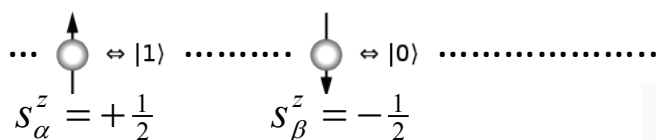
Příklad: problém splnitelnosti pro N bitů $z_\alpha \in \{0,1\}$ a m klauzulí typu

$$\alpha=1,2,\dots,N$$

$$z_\alpha + z_\beta + z_\gamma = 1$$

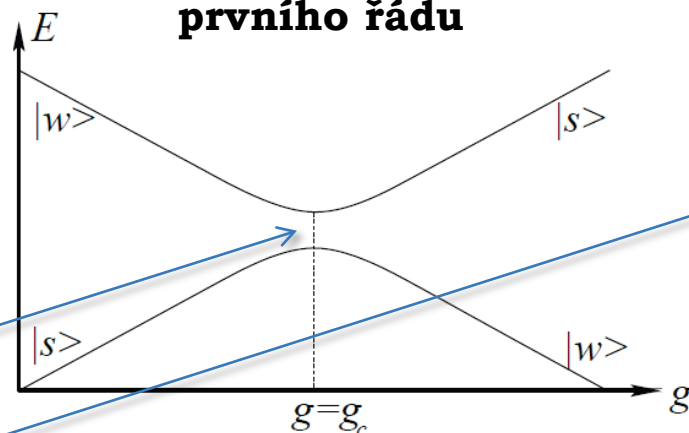
$$\alpha, \beta, \gamma \in \{1, 2, \dots, N\}$$

Realizace pomocí spinových Q-bitů



Schützhold, Schaller, Phys.Rev. A 74, 060304 (2006)

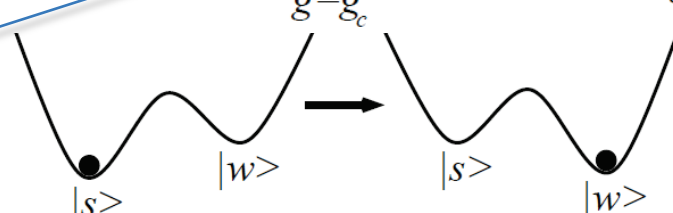
Průchod **kvantovým fázovým přechodem**
prvního řádu



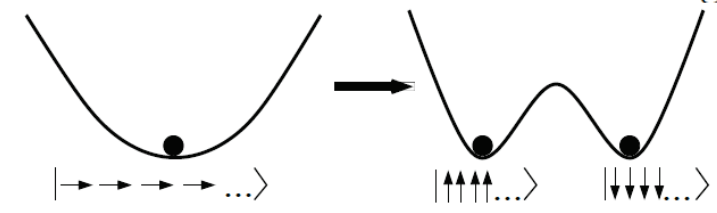
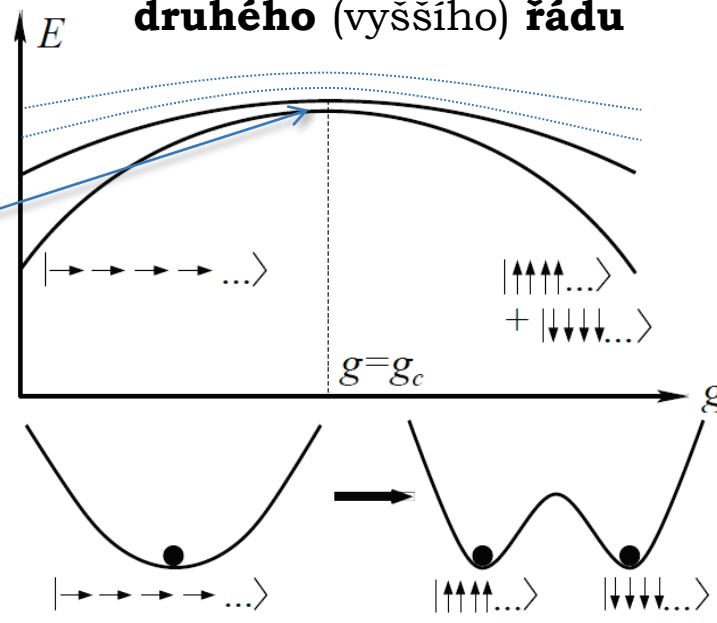
$$\Delta E \approx e^{-cN}$$

$$\Delta E \approx cN^{-k}$$

... ale účastní se velký počet hladin



druhého (vyššího) řádu



Další algoritmy

- Prohledávání databází
- Problém splnitelnosti
- Úlohy optimalizace ?
- Rozpoznávání obrazců ??
- Umělá inteligence ???

• Simulace fyzikálních a chemických (biologických) systémů

Mnohočasticový problém (jaderná fyzika, chemie)

Cvičení: N_F nerozlišitelných fermionů na $\Omega \geq N_F$ jednočasticových stavech. Dimenze Hilbertova prostoru:

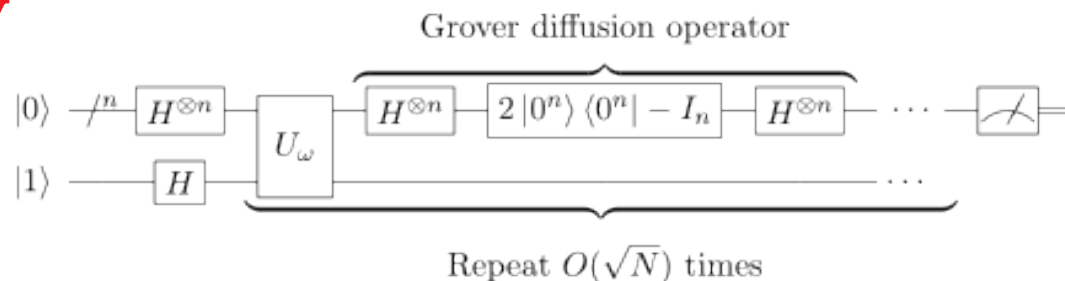
$$d = \frac{\Omega(\Omega-1)\cdots(\Omega-N_F+1)}{N_F!} = \binom{\Omega}{N_F} \approx e^{N_F \left(\ln \frac{\Omega}{N_F} - 1 \right)}$$

Např. pro jádro uhlíku ^{12}C (6 p + 6 n) můžeme použít bázi energetických vlastních stavů harmonického oscilátoru, kterou shora omezíme slupkou $N\hbar\omega$. Uvažme $N = 4$:

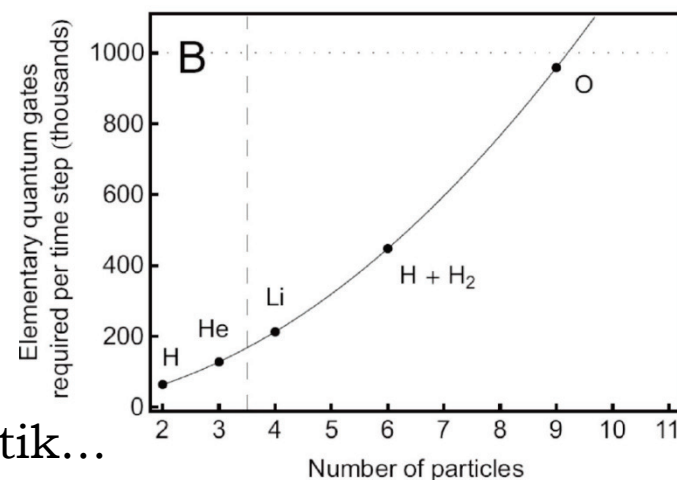
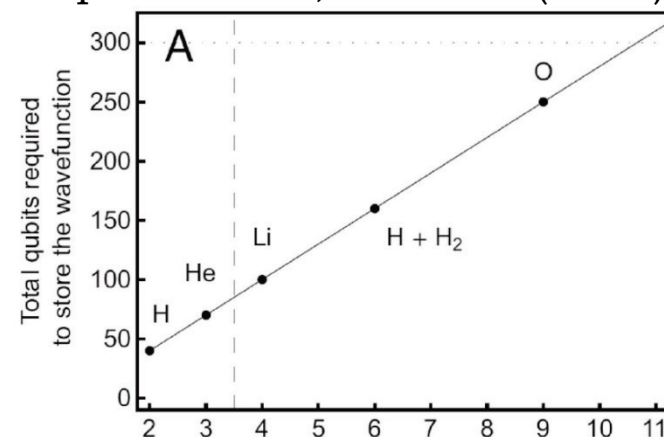
$$d = d_\pi \cdot d_\nu = \binom{70}{6}^2 = 17191401522520225 \approx 1.7 \cdot 10^{16}$$

Důvtipnější ořezání báze (podle celkové energie N_F -časticové konfigurace) vede ke zmenšení dimenze na „pouhých“ $d \approx 10^9$

Možné aplikace při navrhování nových materiálů, chemicky/biologicky aktivních molekul, farmaceutik...



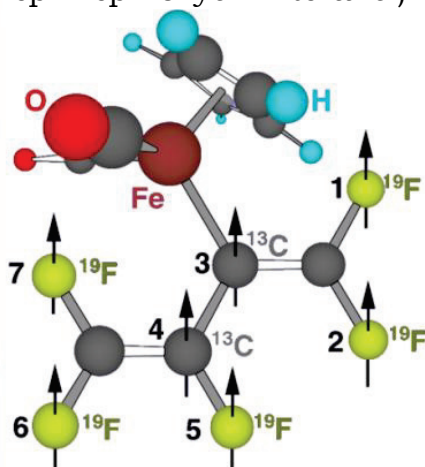
Asparu-Guzik, Kassal... (2008)



Možné realizace

- a) Uvězněné ochlazené ionty
- b) Kvantová elektrodynamika v dutině
- c) Jaderná magnetická rezonance
- d) Spinotronika v křemíku
- e)

- c)** NMR v kapalně fázi (manipulace se spiny pomocí pulsů mag. pole s využitím spin-spinových interakcí)



Molekula se 7 Q-bity
tvořenými jádry ^{13}C , ^{19}F

(pracuje se se statistickým souborem těchto jader)

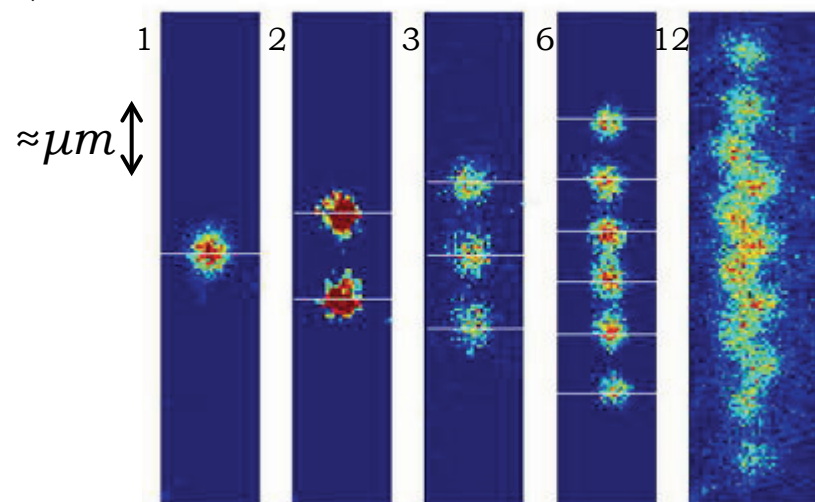
V roce 2001 proveden kvantový výpočet faktorizace

$$15 = 5 \times 3$$

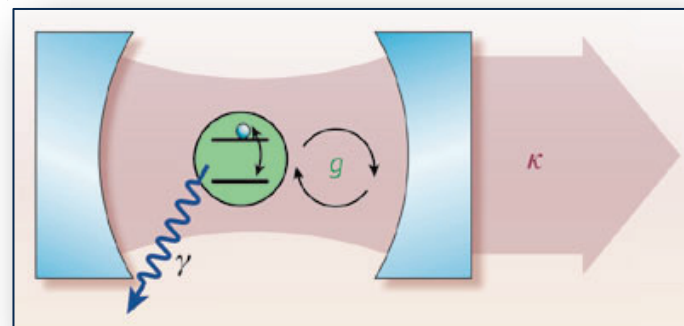
V roce 2011 pomocí NMR implementace adiabatického kvantového výpočtu dosaženo:

$$143 = 13 \times 11$$

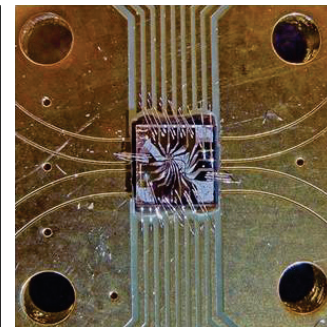
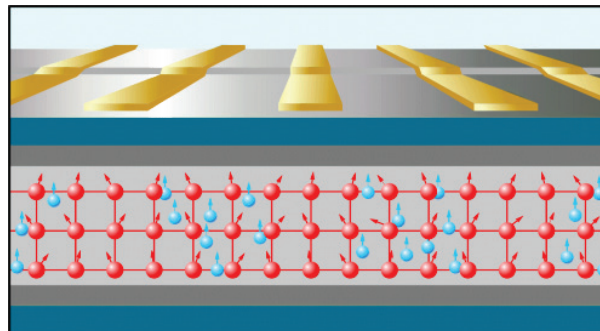
- a)** Uvězněné ionizované atomy (de)excitované laserem



- b)** Interakce atomů a záření v dutinovém rezonátoru



- d)** Manipulace se spiny elektronů (jader) v polovodičové mříži



Možné realizace

e) Makroskopické proudy v supravodivých smyčkách

1911: Experimentální objev **supravodivosti** [Kamerlingh Onnes]

1957: Mikroskopická teorie => makroskopický kvantový jev

[Bardeen, Cooper, Schrieffer]

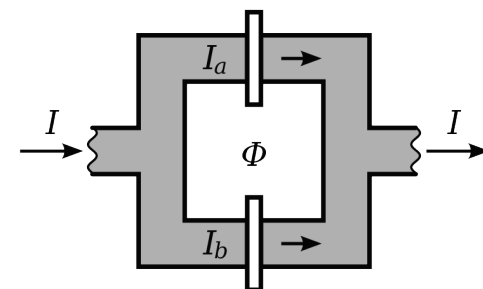
1962: předpovězen (1963 potvrzen) **Josephsonův jev**:

kvantové tunelování na spoji supravodič-izolátor-supravodič

1964: Sestaven první **SQUID** = **S**uperconducting **Q**Uantum **I**nterference **D**evice

aplikace: měření slabých magnetických polí ($\sim 5 \times 10^{-18}$ Tesla) např. v lékařství

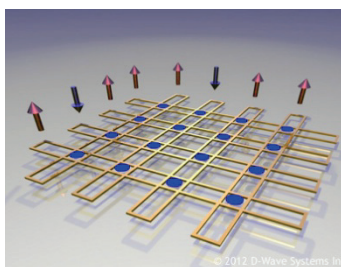
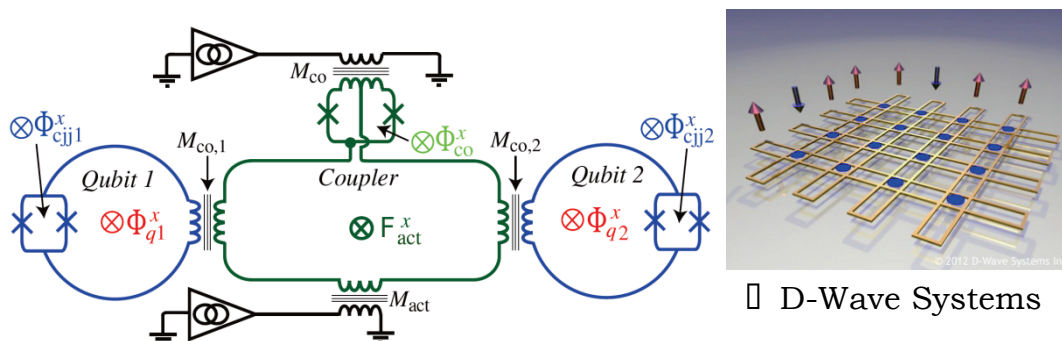
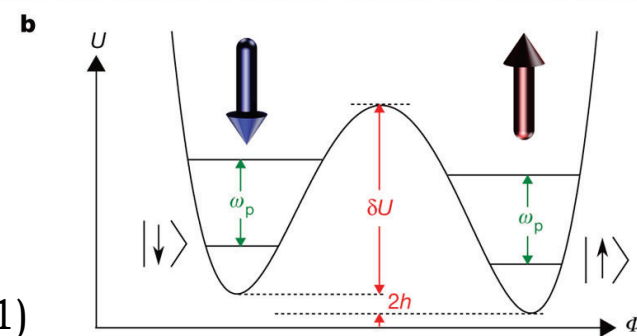
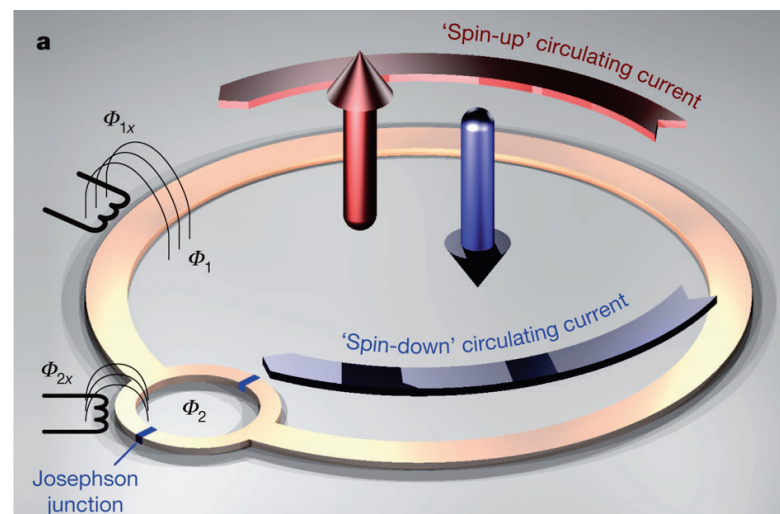
1999: koncepce supravodivého Q-bitu [Mooij, Orlando, Levitov, Tian, van der Wal, Lloyd, Science 285, 1036]



$\Phi_i \equiv$ magnetický tok smyčkou, $U \equiv$ celk. energie smyčky
 $\Phi_{1x}, \Phi_{2x} \equiv$ externí magnetické toky – umožňují měnit
 vzájemné uspořádání dvojice potenciálových jam v grafu
 pro U . V blízkosti degenerace je základní a 1. exc. stav
 vyjádřen jako superpozice
 proudových stavů: $|g\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$ $|e\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)$

Při ochlazení na teploty $T \sim 20$ mK je počáteční stav
 smyčky definovanou superpozicí proudových stavů.

Interakce mezi Q-bity => 2 Q-bitové operace



□ D-Wave Systems

Johnson *et al.*, Nature 473, 194 (2011)

Quantum computing has arrived.

D-Wave offers the first commercial quantum computing system on the market. If you are looking for a next-generation solution to difficult computational problems, we've got a pretty cool option for you.



The D-Wave Two™ system is a high performance computing system designed for industrial problems encountered by Fortune 500 companies, government and academia. Our latest superconducting 512-qubit processor chip is housed inside a cryogenics system within a 10 square meter shielded room. If you are interested in finding out if this quantum computing system meets your needs please contact us for more information: sales@dwavesys.com

Partnership opportunities



Yes, you can have one.

No, you're not dreaming. D-Wave offer the first commercial quantum computing system on the market. We believe in building great things that are as inspiring as they are powerful.

If you're passionate and curious about the future of computation, and you'd like to take a different approach to solving problems, then take a look at our products.

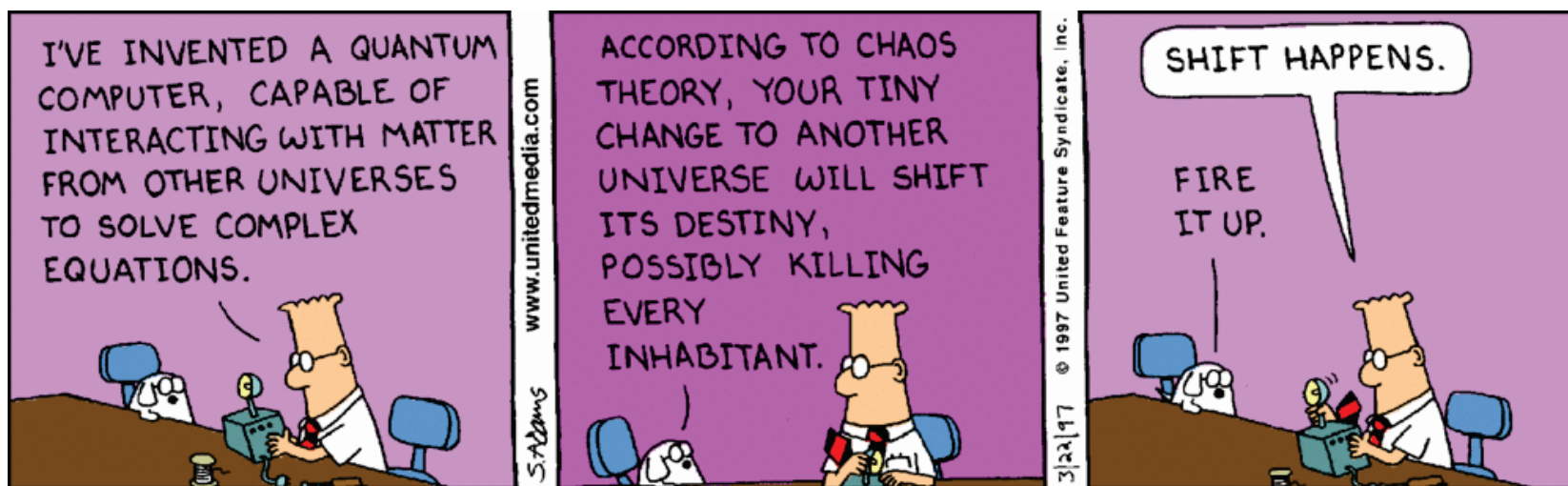


D-Wave One™
information

Hardware

All hardware components in the D-Wave Two™ are fully tested and calibrated and undergo a factory acceptance test in our facility prior to shipping. All tests and calibration

Co na to Dilbert?



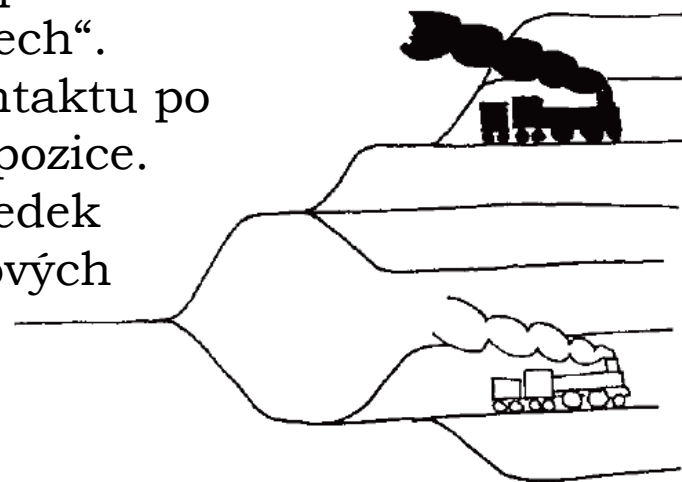
Vysvětlení:

Podle **Everettovy mnohosvětové interpretace**

QM jsou jednotlivé členy kvantové superpozice „realizovány“ v různých „světech-vesmírech“.

Paralelní vesmíry jsou ve vzájemném kontaktu po dobu udržení koherence kvantové superpozice.

Vyšší efektivita kvantové počítání = důsledek paralelismu výpočtů probíhajících v takových provázaných vesmírech.



MFF UK, laboratoře Troja, rok 3046

SHIFT HAPPENS.

