

Kvantové zpracování informace s jednotlivými fotony

Miroslav Ježek



Katedra optiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci

Slezská Univerzita v Opavě, 20. 6. 2013



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Laboratoř kvantové optiky a informatiky v Olomouci

Miroslav Ježek
postdoc



Michal Mičuda
postdoc



Martina Miková
doktorandka



Ivo Straka
doktorand



Miloslav Dušek
profesor



Radim Filip
docent

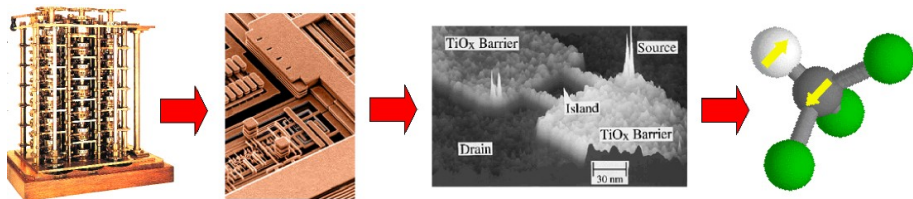


Jaromír Fiurášek
docent



Počítače. . . a fyzika mikrosvětla

- Charles Babbage (1791-1871)
- 32 nm technologie (2006-2010), Intel Core iX a další
- Výraznému zmenšení struktur brání kvantové jevy
- Dalším krokem je přímo využít kvantové efekty



Nový koncept zpracování informace

- Využití zákonů kvantové fyziky
- Informace uložena do stavů kvantových systémů

Nový koncept zpracování informace

- Využití zákonů kvantové fyziky
- Informace uložena do stavů kvantových systémů

klasický bit: 0, 1



Nový koncept zpracování informace

- Využití zákonů kvantové fyziky
- Informace uložena do stavů kvantových systémů

klasický bit: 0, 1



kvantový bit: $|0\rangle$, $|1\rangle$



$$x|0\rangle + y|1\rangle$$

- Princip superpozice → kvantový paralelismus

Obsah

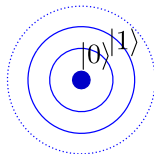
- 1 Kvantové počítače
 - Kvantové bity
 - Kvantové logické obvody
 - Kvantové algoritmy
 - Architektura a fyzikální realizace
- 2 Kvantové optické procesory s jednotlivými fotony
 - Architektura optického kvantového počítače
 - Optické kódování kvantových bitů
 - Interference a interakce
 - Optická realizace logických kvantových obvodů
- 3 Závěr

Obsah

- 1 Kvantové počítače
 - Kvantové bity
 - Kvantové logické obvody
 - Kvantové algoritmy
 - Architektura a fyzikální realizace
- 2 Kvantové optické procesory s jednotlivými fotony
 - Architektura optického kvantového počítače
 - Optické kódování kvantových bitů
 - Interference a interakce
 - Optická realizace logických kvantových obvodů
- 3 Závěr

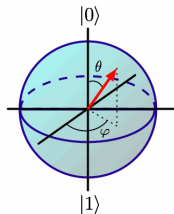
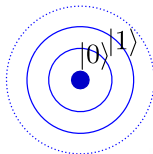
Kvantové bity

- Dvouhladinový kvantový systém
- Bázové stavy: $0 \rightarrow |0\rangle$, $1 \rightarrow |1\rangle$



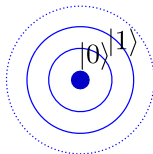
Kvantové bity

- Dvouhladinový kvantový systém
- Bázové stavy: $0 \rightarrow |0\rangle, 1 \rightarrow |1\rangle$
- Superpozice bázových stavů: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \in \mathbb{C}^2$
 $\alpha = \cos \theta, \beta = e^{i\varphi} \sin \theta, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

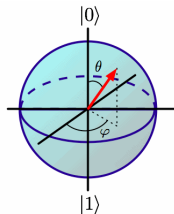


Kvantové bity

- Dvouhladinový kvantový systém
- Bázové stavy: $0 \rightarrow |0\rangle$, $1 \rightarrow |1\rangle$

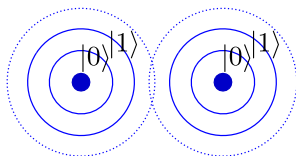


- Superpozice bázových stavů: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \in \mathbb{C}^2$
 $\alpha = \cos \theta$, $\beta = e^{i\varphi} \sin \theta$, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$



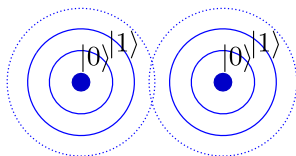
- Realizace kvantového bitu:
 - dvě hladiny atomu, spin elektronu, jaderný spin

Systemy s více kvantovými bity



- Dva klasické bity: 00, 01, 10, 11 – dva parametry

Systemy s více kvantovými bity

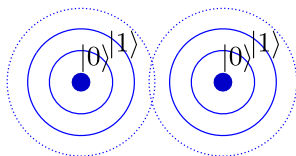


- Dva klasické bity: 00, 01, 10, 11 – dva parametry

- Dva kvantové bity: – čtyři komplexní parametry

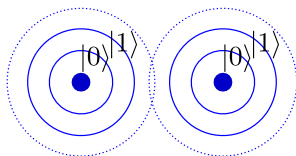
$$|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \in \mathbb{C}^4 = \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$$

Systemy s více kvantovými bity



- Dva klasické bity: 00, 01, 10, 11 – dva parametry
- Dva kvantové bity: – čtyři komplexní parametry
 $|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \in \mathbb{C}^4 = \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$
- Entanglované stavy: $|\psi\rangle \neq |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$

Systemy s více kvantovými bity

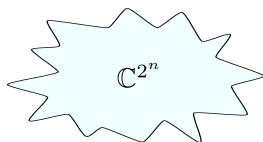


- Dva klasické bity: 00, 01, 10, 11 – dva parametry
- Dva kvantové bity: – čtyři komplexní parametry
 $|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \in \mathbb{C}^4 = \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$
- Entanglované stavy: $|\psi\rangle \neq |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$
- n kvantových bitů: $|\psi\rangle = \sum_x \alpha_x |x\rangle \in \mathbb{C}^{2^n}$ – exponenciální růst

Evoluce a měření kvantového systému

- Unitární vývoj kvantového stavu transformuje 2^n parametrů

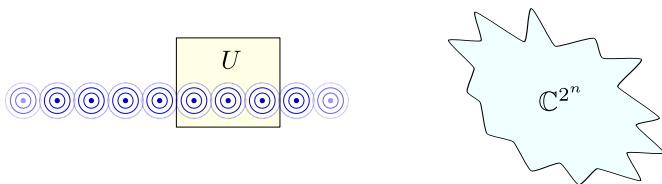
$$|\psi\rangle_{out} = U|\psi\rangle_{in} = \sum_{\{x\}} \alpha_{\{x\}} (U_{\{y\}} \otimes I_{\{z\}}) |x_1, x_2, \dots, x_n\rangle$$



Evoluce a měření kvantového systému

- Unitární vývoj kvantového stavu transformuje 2^n parametrů

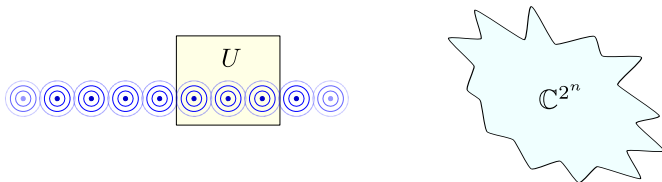
$$|\psi\rangle_{out} = U|\psi\rangle_{in} = \sum_{\{x\}} \alpha_{\{x\}} (U_{\{y\}} \otimes I_{\{z\}}) |x_1, x_2, \dots, x_n\rangle$$



Evoluce a měření kvantového systému

- Unitární vývoj kvantového stavu transformuje 2^n parametrů

$$|\psi\rangle_{out} = U|\psi\rangle_{in} = \sum_{\{x\}} \alpha_{\{x\}} (U_{\{y\}} \otimes I_{\{z\}}) |x_1, x_2, \dots, x_n\rangle$$

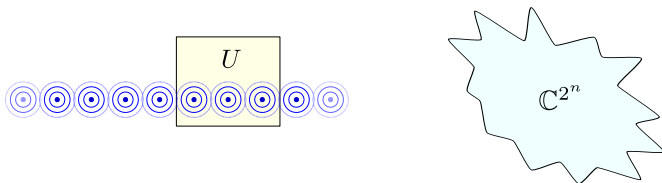


- Klasická logická funkce $f(x) : f(0), f(1)$
 Kvantová logická funkce $f(x) : f(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha f(|0\rangle) + \beta f(|1\rangle)$
Paralelní výpočet hodnoty funkce pro obě hodnoty argumentu

Evoluce a měření kvantového systému

- Unitární vývoj kvantového stavu transformuje 2^n parametrů

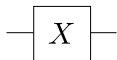
$$|\psi\rangle_{out} = U|\psi\rangle_{in} = \sum_{\{x\}} \alpha_{\{x\}} (U_{\{y\}} \otimes I_{\{z\}}) |x_1, x_2, \dots, x_n\rangle$$



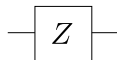
- Klasická logická funkce $f(x) : f(0), f(1)$
Kvantová logická funkce $f(x) : f(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha f(|0\rangle) + \beta f(|1\rangle)$
Paralelní výpočet hodnoty funkce pro obě hodnoty argumentu
- Výsledkem měření:
stav $|x_1, x_2, \dots, x_n\rangle$ s pravděpodobností $|\alpha_{\{x\},out}|^2$

Kvantová logická hradla – jednoqubitová

- Bit-flip X , sign-flip Z



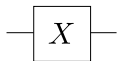
$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$



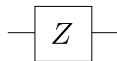
$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Kvantová logická hradla – jednoqubitová

- Bit-flip X , sign-flip Z

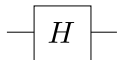


$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

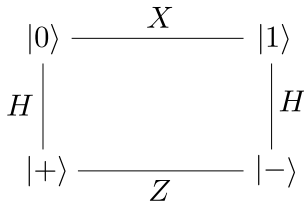


$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- Hadamardovo hradlo – změna výpočetní a znaménkové báze



$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$



Kvantová logická hradla – vícequbitová

- Unitární vývoj dvou kvantových bitů

$$\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ U \\ \text{---} \end{array} \right] \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \alpha'_{00}|00\rangle + \alpha'_{01}|01\rangle + \alpha'_{10}|10\rangle + \alpha'_{11}|11\rangle$$
$$UU^\dagger = U^\dagger U = I$$

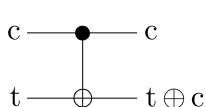
Kvantová logická hradla – vícequbitová

- Unitární vývoj dvou kvantových bitů

$$\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \boxed{U} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \alpha'_{00}|00\rangle + \alpha'_{01}|01\rangle + \alpha'_{10}|10\rangle + \alpha'_{11}|11\rangle$$

$$UU^\dagger = U^\dagger U = I$$

- CNOT hradlo



$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} |00\rangle \rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle \rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle \rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle \rightarrow |10\rangle \end{array}$$

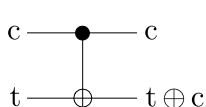
Kvantová logická hradla – vícequbitová

• Unitární vývoj dvou kvantových bitů

$$\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \boxed{U} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \alpha'_{00}|00\rangle + \alpha'_{01}|01\rangle + \alpha'_{10}|10\rangle + \alpha'_{11}|11\rangle$$

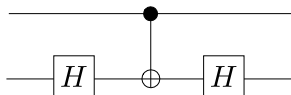
$$UU^\dagger = U^\dagger U = I$$

• CNOT hradlo



$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{array}{l} |00\rangle \rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle \rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle \rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle \rightarrow |10\rangle \end{array}$$

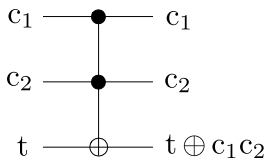
$$\text{CZ} = (I_c \otimes H_t) \cdot \text{CNOT} \cdot (I_c \otimes H_t)$$



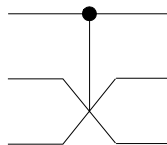
Kvantová logická hradla – vícequbitová

- Tříqubitová hradla

Toffoliho hradlo (CCNOT)



Fredkinovo hradlo (CSWAP)



Kvantové logické obvody

- Univerzální sada hradel

[klasické procesory: NAND hradlo je univerzální]

- CNOT, H, $\frac{\pi}{8}$
- Toffoli

Kvantové logické obvody

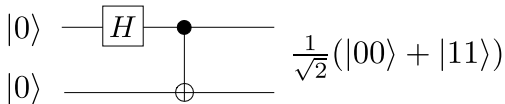
- Univerzální sada hradel

[klasické procesory: NAND hradlo je univerzální]

– CNOT, H, $\frac{\pi}{8}$

– Toffoli

- Příklad kvantového obvodu: Hadamard + CNOT



Kvantové logické obvody

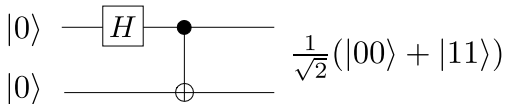
- Univerzální sada hradel

[klasické procesory: NAND hradlo je univerzální]

– CNOT, H, $\frac{\pi}{8}$

– Toffoli

- Příklad kvantového obvodu: Hadamard + CNOT



- Příprava a analýza Bellových stavů
Unitární vývoj \implies vratný výpočet

Vratnost výpočtu

- Klasické logické obvody nevyžadují vratnost, např. AND hradlo



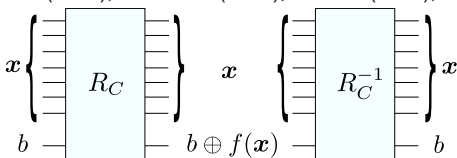
Vratnost výpočtu

- Klasické logické obvody nevyžadují vratnost, např. AND hradlo



- Omezuje kvantová mechanika možnosti výpočtu?
Lze klasický výpočet realizovat vratně?

[R.Landauer (1961), C.Bennett (1973), T.Toffoli (1980), R.Feynman (1983-86)]



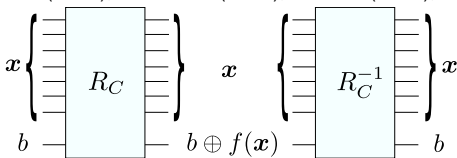
Vratnost výpočtu

- Klasické logické obvody nevyžadují vratnost, např. AND hradlo

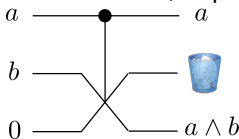


- Omezuje kvantová mechanika možnosti výpočtu?
Lze klasický výpočet realizovat vratně?

[R.Landauer (1961), C.Bennett (1973), T.Toffoli (1980), R.Feynman (1983-86)]

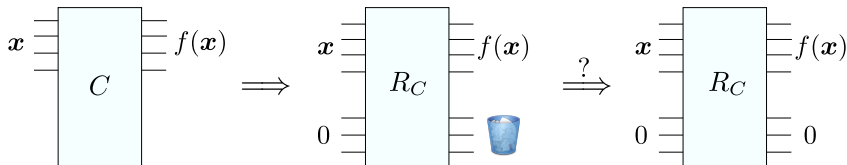


- Klasická vratná hradla, např. CSWAP

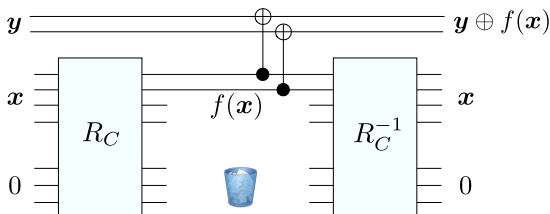


Obecná konstrukce kvantového hradla

- Klasický obvod \rightarrow klasický vratný obvod



- Odstranění závislosti pomocných qubitů

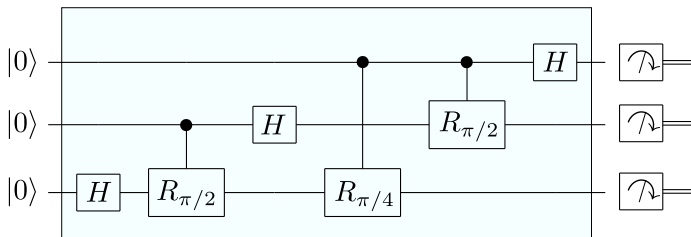


Kvantové algoritmy

Efektivní řešení specifických výpočetních úloh

- Exponenciální urychlení:
Deutschův-Jozsův algoritmus (1992,1998)
Simonův algoritmus (1994)
Shorův algoritmus (1994,2007-)
simulace kvantových systémů (1982,1997,2008-)
první výpočet (H_2) na optickém kvantovém počítači
[B.P. Lanyon et al., Nature Chemistry 2, 106 (2010)]
- Polynomiální urychlení:
Groverův algoritmus (1996)
problém jednoznačných položek v seznamu (2004,2007)
identifikace elementů grafů (2007)

Architektura kvantového procesoru

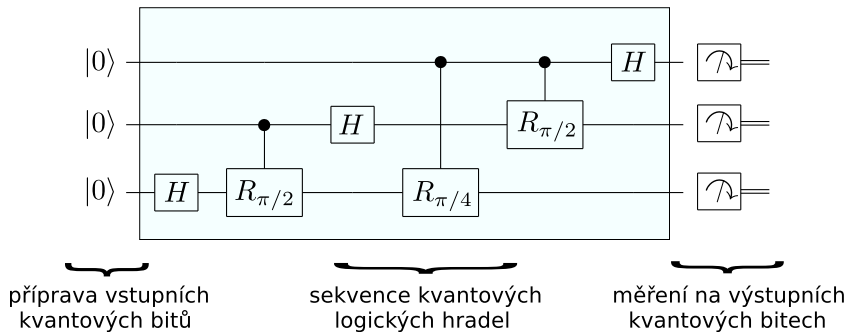


příprava vstupních
kvantových bitů

sekvence kvantových
logických hradel

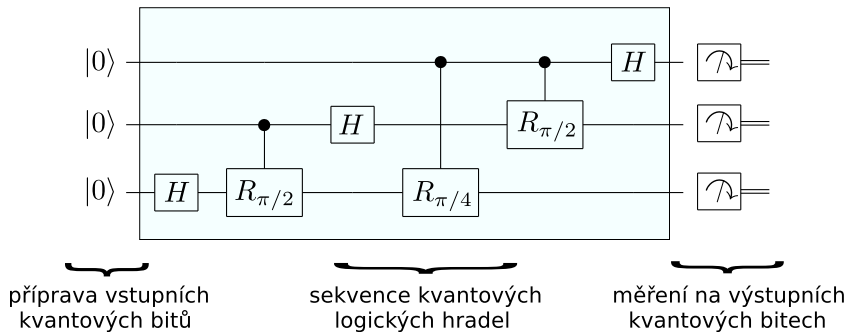
měření na výstupních
kvantových bitech

Architektura kvantového procesoru



Škálovatelnost? pravděpodobnost úspěchu
Koherence? čisté stavy po celou dobu výpočtu

Architektura kvantového procesoru



Škálovatelnost? pravděpodobnost úspěchu
Koherence? čisté stavy po celou dobu výpočtu

Vhodná fyzikální implementace?

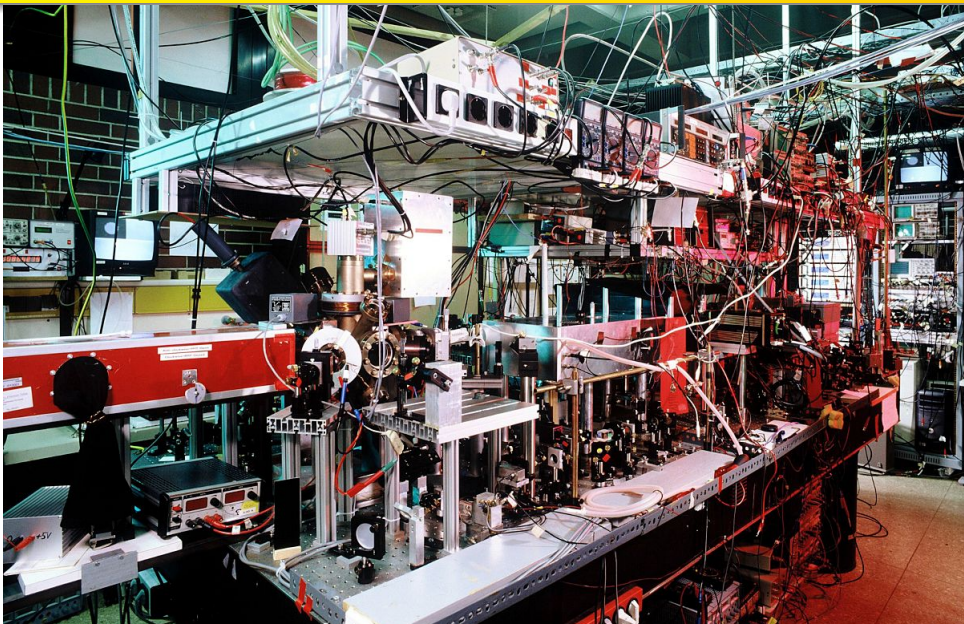
Fyzikální realizace kvantového procesoru

DiVincenzova kritéria

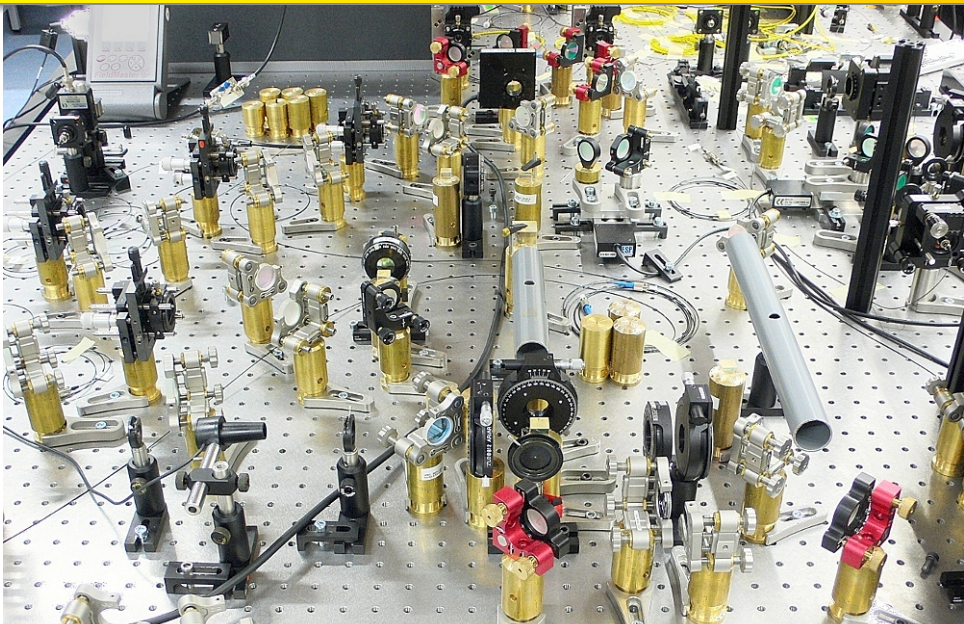
[in Mesoscopic Electron Transport Vol.345 of NATO Adv. Study Inst. (1997)]

- Dobře definované kvantové bity
- Inicializace kvantových bitů v čistých stavech
- Dlouhá koherenční doba
- Univerzální sada kvantových hradel
- Měření na kvantových bitech s vysokou účinností

Atomy a ionty v pasti



Optické kvantové počítače



Obsah

- 1 Kvantové počítače
 - Kvantové bity
 - Kvantové logické obvody
 - Kvantové algoritmy
 - Architektura a fyzikální realizace
- 2 Kvantové optické procesory s jednotlivými fotony
 - Architektura optického kvantového počítače
 - Optické kódování kvantových bitů
 - Interference a interakce
 - Optická realizace logických kvantových obvodů
- 3 Závěr

Architektura optického kvantového počítače

- Jednotlivé fotony
- Lineární optické komponenty
- Interakce fotonů (více-qubitová hradla)
- Měření jednofotonovými detektory

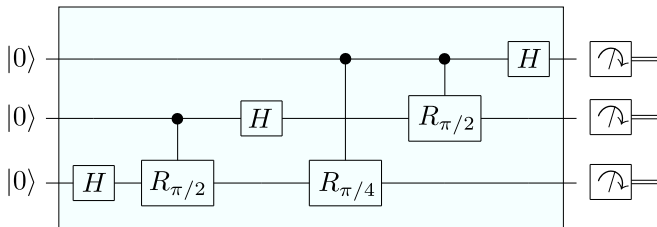
Architektura optického kvantového počítače

- Jednotlivé fotony
 - Lineární optické komponenty
 - Interakce fotonů (více-qubitová hradla)
 - Měření jednofotonovými detektory
-
- Často pravděpodobnostní – úspěch podmíněn výsledkem měření
pravděpodobnost lze zvýšit užitím pomocných fotonů a komplexnějších schémat
 - Škálovatelnost vyžaduje jistou minimální (neznámou) účinnost

Architektura optického kvantového počítače

- Jednotlivé fotony
 - Lineární optické komponenty
 - **Interference více fotonů**
 - Měření jednofotonovými detektory
-
- Často pravděpodobnostní – úspěch podmíněn výsledkem měření
pravděpodobnost lze zvýšit užitím pomocných fotonů a komplexnějších schémat
 - Škálovatelnost vyžaduje jistou minimální (neznámou) účinnost

Architektura optického kvantového počítače



příprava vstupních
kvantových bitů

sekvence kvantových
logických hradel

měření na výstupních
kvantových bitech

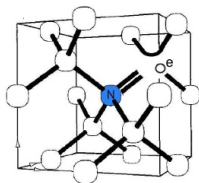
příprava jednotlivých
korelovaných fotonů

interferometrický
obvod

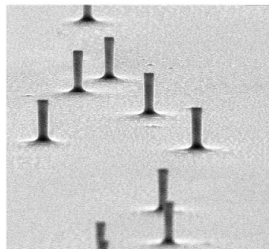
detekce
jednotlivých fotonů

Zdroje jednotlivých fotonů

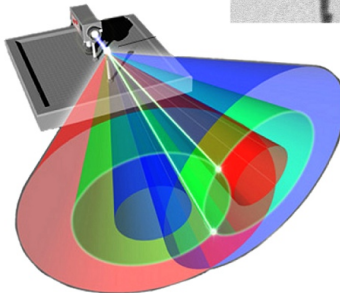
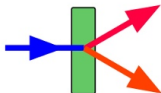
NV centra v diamantu



Kvantové tečky



Frekvenční konverze



Jednofotonové detektory

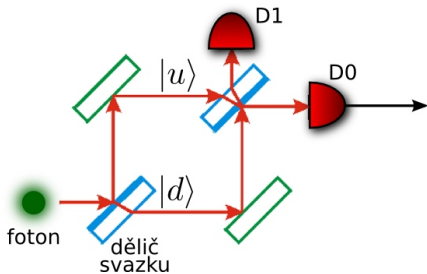
- **Fotonásobič**
 - detekční účinnost max 40%, <5% v NIR
 - lineární detektor
- **Lavinová dioda v Geigerově režimu (SPAD)**
 - detekční účinnost 50-70% Si, 10-20% InGaAs
 - pasivní vs. aktivní zhášení [S. Cova et al. Applied Optics 35, 1956 (1996)]
 - neschopnost rozlišit počet fotonů
 - jitter <300 ps, mrtvá doba 30 ns
- **Supravodivý bolometr (TES), 100 mK**
 - detekční účinnost 10-20% vis-NIR, až 95% pro 1550 nm
 - částečné rozlišení počtu fotonů
 - jitter 100 ns, mrtvá doba cca μs

[R.H. Hadfield, Single-photon detectors for optical quantum information applications, Nature Photonics 3, 696 (2009)]

[M.D. Eisaman et al., Single-photon sources and detectors, Review of Scientific Instruments 82, 071101 (2011)]

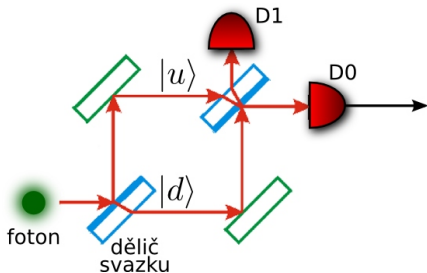
Jednofotonová interference

- Machův-Zehnderův interferometr



Jednofotonová interference

- Machův-Zehnderův interferometr

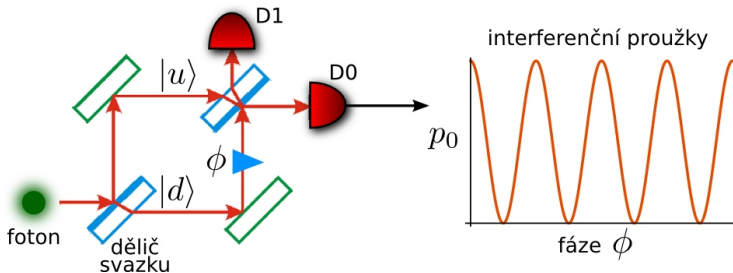


- Foton se současně šíří oběma rameny interferometru

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\rangle + |d\rangle)$$

Jednofotonová interference

- Machův-Zehnderův interferometr



- Foton se současně šíří oběma rameny interferometru

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\rangle + e^{i\phi} |d\rangle)$$

Optické kódování kvantových bitů

- Kódování do dráhy fotonu: dělič svazku a fázový posuv



Optické kódování kvantových bitů

- Kódování do dráhy fotonu: dělič svazku a fázový posuv



- Kódování do polarizačního stavu fotonu:
polarizátor, polarizační retardéry (půlvlnná a čtvrtvlnná deska)



Hyper-kódování

- Současná kontrola polarizace a dráhy



Hyper-kódování

- Současná kontrola polarizace a dráhy

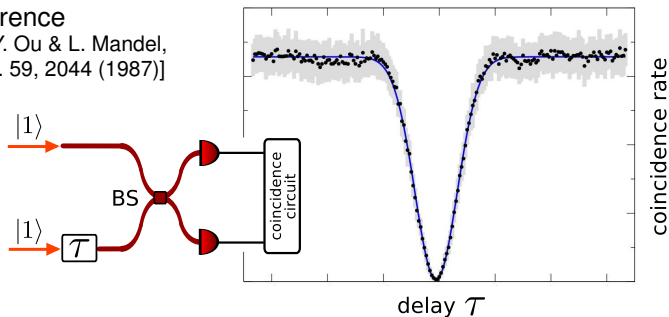


- Inherentně stabilní interferometr: dvojlomné kalcitové hranoly



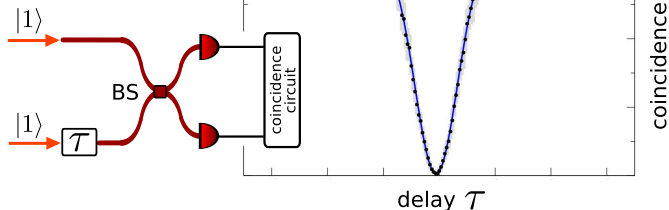
Interference dvou fotonů

- HOM interference
[C.K. Hong, Z.Y. Ou & L. Mandel,
Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)]

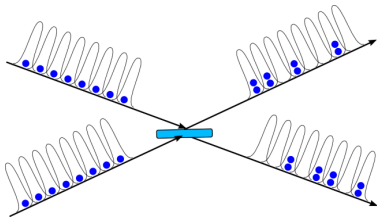


Interference dvou fotonů

- HOM interference
[C.K. Hong, Z.Y. Ou & L. Mandel,
Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)]



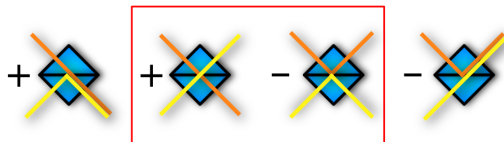
- Shlukování fotonů na vyváženém děliči



Interference dvou fotonů

- Superpozice všech možných kombinací drah na děliči 50:50

$$|1, 1\rangle \rightarrow |0, 2\rangle + |1, 1\rangle - |1, 1\rangle - |2, 0\rangle$$

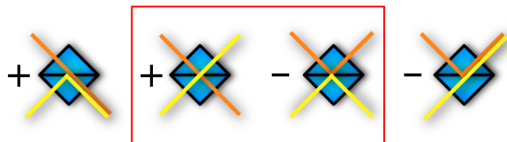


interference

Interference dvou fotonů

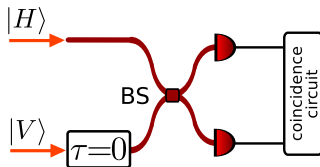
- Superpozice všech možných kombinací drah na děliči 50:50

$$|1, 1\rangle \rightarrow |0, 2\rangle + |1, 1\rangle - |1, 1\rangle - |2, 0\rangle$$



interference

- Kolmo polarizované fotony na děliči 50:50 $\rightarrow (|HV\rangle - |VH\rangle)/\sqrt{2}$



$$U_{\text{BS}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Interference dvou fotonů

- Dělič s odlišným dělicím poměrem pro H/V polarizaci

koincidenční prostor: po jednom fotonu na obou výstupech

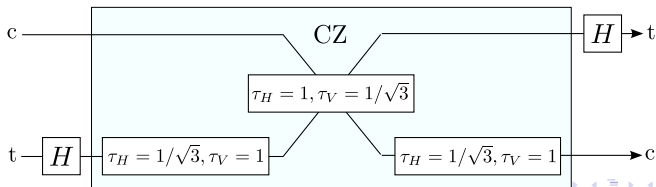
$$U_{\text{BS}}(\tau_H, \tau_V) = \begin{pmatrix} 2\tau_H^2 - 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_H\tau_V & -\sqrt{1-\tau_H^2}\sqrt{1-\tau_V^2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{1-\tau_H^2}\sqrt{1-\tau_V^2} & \tau_H\tau_V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\tau_V^2 - 1 \end{pmatrix}$$

Interference dvou fotonů

- Dělič s odlišným dělicím poměrem pro H/V polarizaci
koincidenční prostor: po jednom fotonu na obou výstupech

$$U_{BS}(\tau_H, \tau_V) = \begin{pmatrix} 2\tau_H^2 - 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_H\tau_V & -\sqrt{1-\tau_H^2}\sqrt{1-\tau_V^2} & 0 \\ 0 & -\sqrt{1-\tau_H^2}\sqrt{1-\tau_V^2} & \tau_H\tau_V & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\tau_V^2 - 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{BS}(\tau_H = 1, \tau_V = 1/\sqrt{3}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \sim CZ$$



Optická realizace logických kvantových obvodů

- Hadamardovo hradlo v polarizačním kódování – půlvlnná deska
 $|H\rangle \rightarrow |D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$

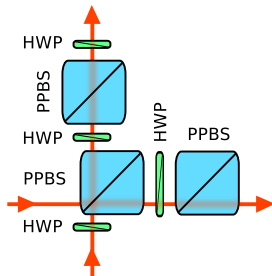
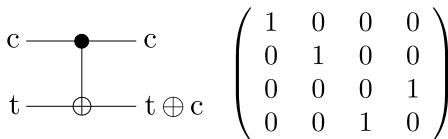


Optická realizace logických kvantových obvodů

- Hadamardovo hradlo v polarizačním kódování – půlvlnná deska
 $|H\rangle \rightarrow |D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$

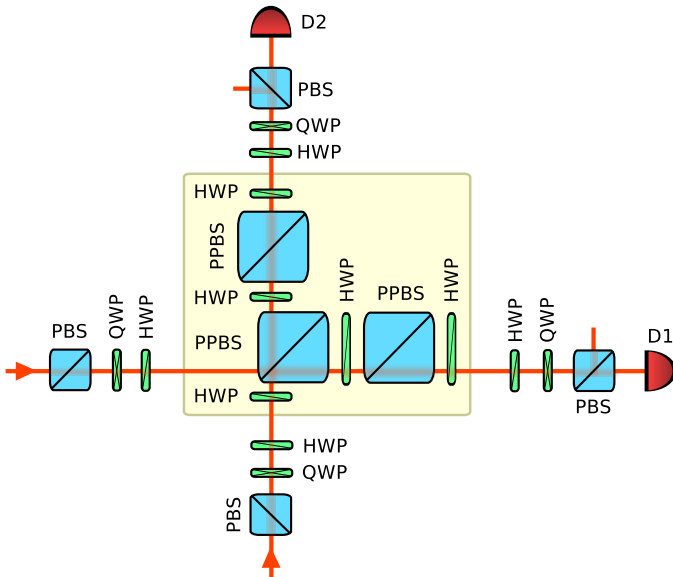


- CNOT hradlo

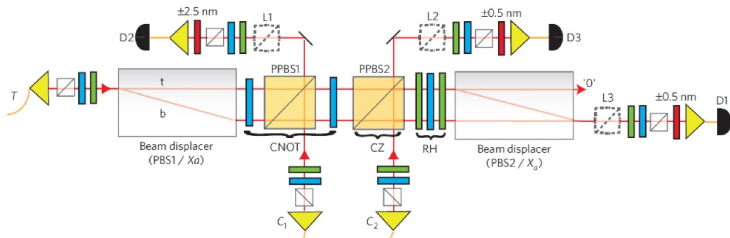
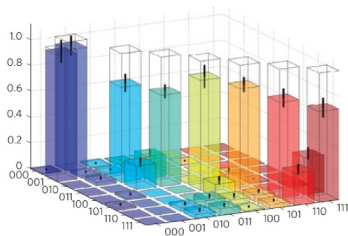
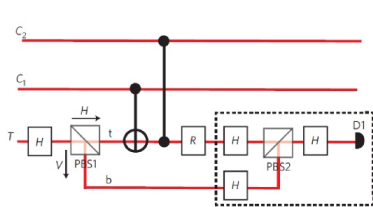


[R. Okamoto et al., Phys. Rev. Lett. 95, 210506 (2005); N. Kiesel et al., Phys. Rev. Lett. 95, 210505 (2005); C. Schmid, New J. Phys. 11, 033008 (2009)]

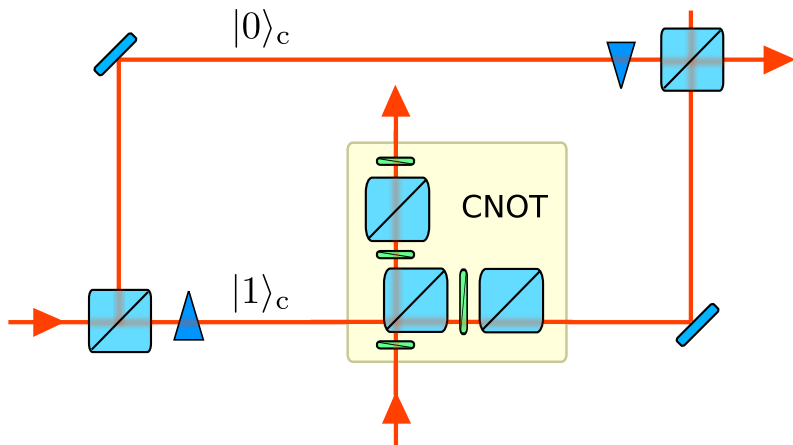
CNOT hradlo – 2 fotony, 2 polarizační qubity



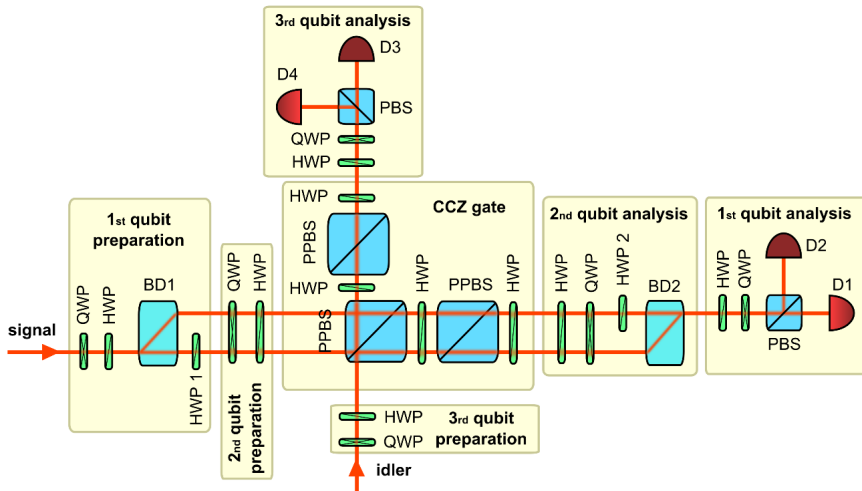
Toffoliho hradlo – 4 fotony, $2 \times \text{CNOT}$



[B.P. Lanyon et al., Nature Physics 5, 134 (2009)]

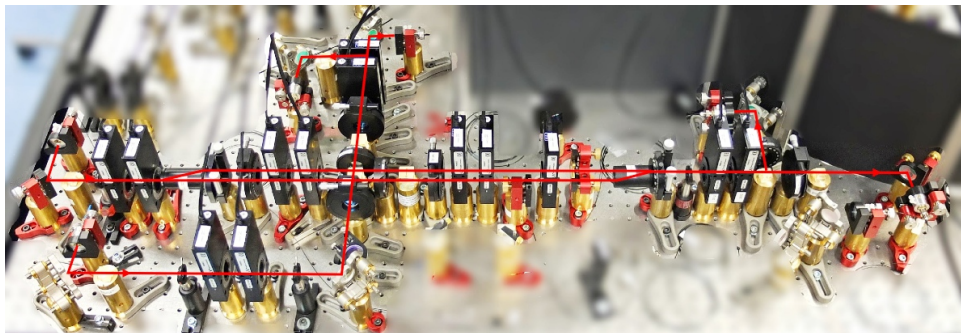
Toffoliho hradlo (Olomouc) – 2 fotony, $1 \times$ CNOT

Toffoliho hradlo (Olomouc) – schéma



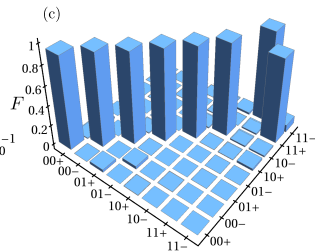
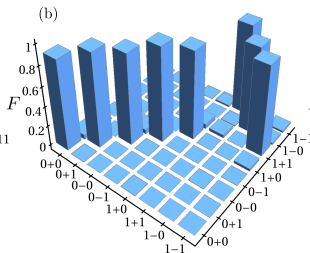
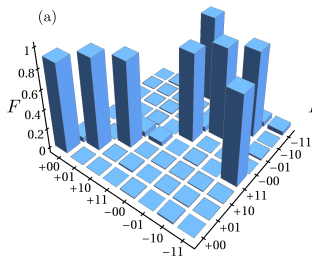
[M. Mičuda et al., arXiv:1306.1141 (2013)]

Toffoliho hradlo (Olomouc) – experimentální realizace



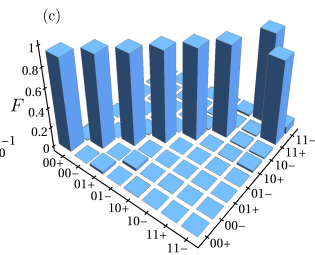
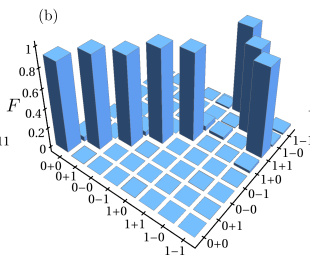
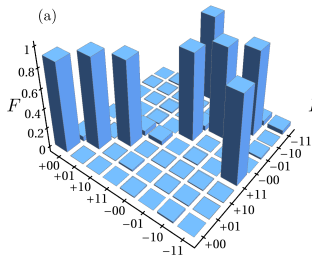
Toffoliho hradlo (Olomouc) – fidelita hradla

- Pravdivostní tabulky
- Fidelita kvantového procesu $F_{\chi} \geq F_1 + F_2 + F_3 - 2$
 $F_{\chi} \geq 0,928 + 0,947 + 0,955 - 2 = 0.830(2)$
 počet potřebných in/out měření: $n2^n$ vs. 2^{4n} pro tomografii



Toffoliho hradlo (Olomouc) – fidelita hradla

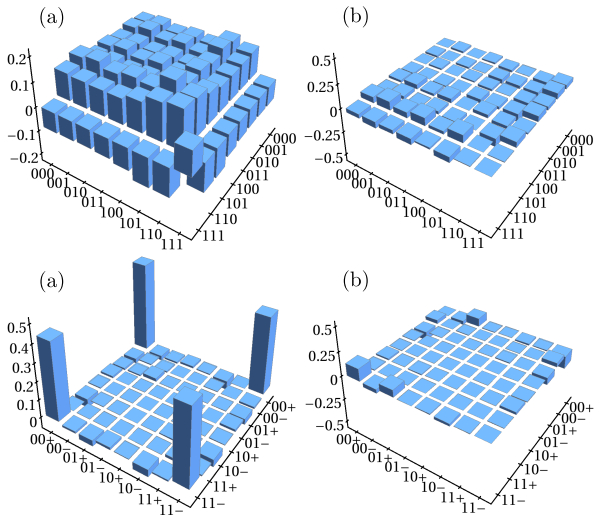
- Pravdivostní tabulky
- Fidelita kvantového procesu $F_\chi \geq F_1 + F_2 + F_3 - 2$
 $F_\chi \geq 0,928 + 0,947 + 0,955 - 2 = 0.830(2)$
 počet potřebných in/out měření: $n2^n$ vs. 2^{4n} pro tomografii



- S projekcí na entanglované stavy: $F_\chi \geq 0,876(2)$
 Fidelita kvantového procesu $87\% < F_\chi < 92\%$
 [M. Mičuda et al., arXiv:1306.1141 (2013)]

Toffoliho hradlo (Olomouc) – generace entanglementu

- Fidelita 3-qubitových stavů $F \approx 96\%$



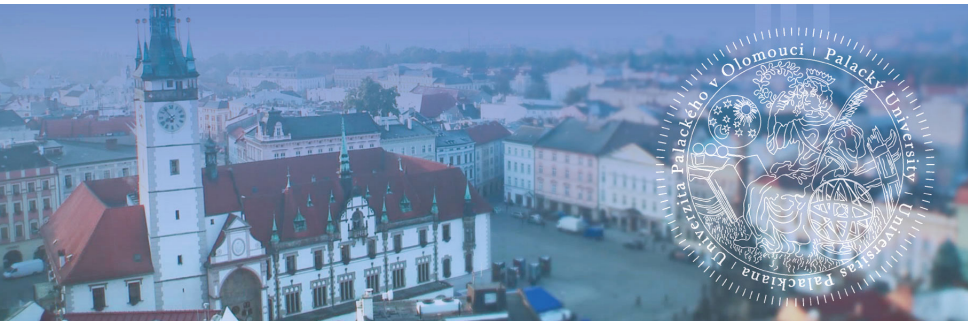
Obsah

- 1 Kvantové počítače
 - Kvantové bity
 - Kvantové logické obvody
 - Kvantové algoritmy
 - Architektura a fyzikální realizace
- 2 Kvantové optické procesory s jednotlivými fotony
 - Architektura optického kvantového počítače
 - Optické kódování kvantových bitů
 - Interference a interakce
 - Optická realizace logických kvantových obvodů
- 3 Závěr

Shrnutí

- Kvantové bity a logická hradla
Kvantové algoritmy nabízející exponenciální zrychlení
- Architektura optických kvantových počítačů
Problém škálovatelnosti: pravděpodobnostní charakter
Koherence a stabilita
- Optická realizace CNOT a Toffoliho hradla
Efektivní odhad fidelity procesu (hradla)
Generace entanglovaných stavů

Děkuji Vám za pozornost!



optics.upol.cz

opticsolomouc.org