

Příprava, detekce a využití jednotlivých fotonů

Miroslav Ježek



Katedra optiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci



Ústí nad Labem, 1. 12. 2011



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Katedra optiky PŘF UP

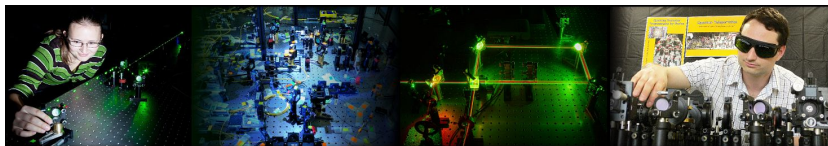
Teoretický tým (kvantová optika a informatika)

- Jan Peřina, Zdeněk Hradil, Jaroslav Řeháček
- Radim Filip, Jaromír Fiurášek
- Miroslav Gavenda, Petr Marek, Ladislav Mišta, Vladyslav Usenko

Katedra optiky PŘF UP

Teoretický tým (kvantová optika a informatika)

- Jan Peřina, Zdeněk Hradil, Jaroslav Řeháček
- Radim Filip, Jaromír Fiurášek
- Miroslav Gavenda, Petr Marek, Ladislav Mišta, Vladyslav Usenko



Experimentální tým (QOLO)

- Helena Fikerová, Ivo Straka, Martina Miková
- Michal Mičuda, Miloslav Dušek, Miroslav Ježek

Laboratoř kvantové optiky a informatiky

Laboratoř kvantové optiky a informatiky

PF 2011



Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

Motivace

- Fundamentální otázky: dualita, neklasické stavy světla
- Kvantová komunikace:
 - distribuce kvantového klíče
 - potlačení ztrát komunikační linky
- Kvantové počítače: kvantové bity a hradla
- Kvantová metrologie: SQL, super-sensitivita

Foton

"I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon."

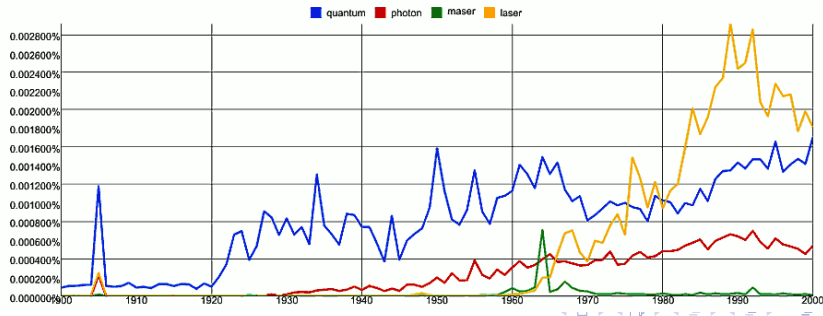
Gilbert N. Lewis, 1926

Kvantum, foton, maser, laser...

Google books Ngram Viewer

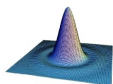
Graph these **case-sensitive** comma-separated phrases:

between and from the corpus with smoothing of



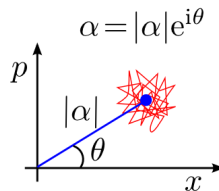
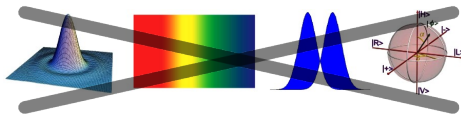
Kvantový popis světla

- Mód světla



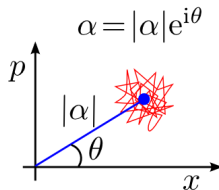
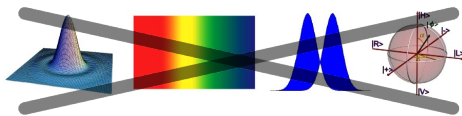
Kvantový popis světla

- Mód světla



Kvantový popis světla

- Mód světla



- Lineární harmonický oscilátor

$$H \sim \frac{1}{2} (X^2 + P^2) \sim \hbar\omega(N + \frac{1}{2})$$

operátor počtu fotonů $N = a^\dagger a$

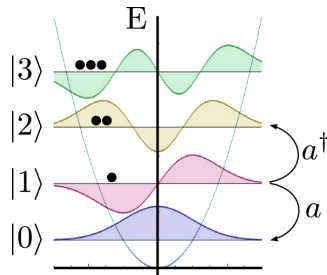
Fockovy stavy: $N|n\rangle = n|n\rangle$

excitace módu $|1\rangle = a^\dagger|0\rangle$

$a|n\rangle \rightarrow |n-1\rangle$

$a^\dagger|n\rangle \rightarrow |n+1\rangle$

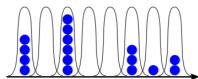
bosony $[a, a^\dagger] = aa^\dagger - a^\dagger a = 1$



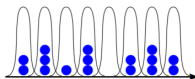
Fotorozdělení

- Princip superpozice: $|\text{obecný stav}\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} c_n |n\rangle$
 fotorozdělení: $p(n) = |c_n|^2$

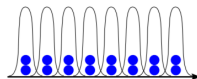
termální zdroj



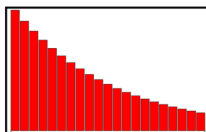
laser



???



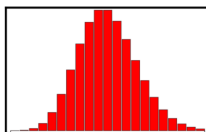
Bose - Einstein



$$\langle N \rangle = 10$$

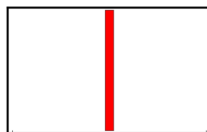
$$\text{Var}[N] = \langle N \rangle (1 + \langle N \rangle)$$

Poisson



$$\text{Var}[N] = \langle N \rangle$$

Fock



$$\text{Var}[N] = 0$$

Popis světla ve fázovém prostoru – kvazi-distribuce

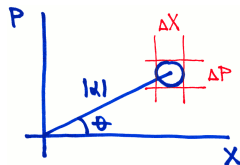
- Intenzita a fáze

$$\alpha = \sqrt{\langle N \rangle} \exp \theta = x + ip$$

- Kvadrurní operátory X, P

$$a = X + iP$$

$$[X, P] = \hbar i \quad \rightarrow \quad \Delta X \Delta P \geq \hbar/2$$



Popis světla ve fázovém prostoru – kvazi-distribuce

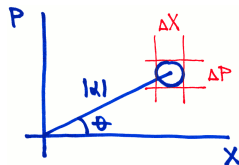
- Intenzita a fáze

$$\alpha = \sqrt{\langle N \rangle} \exp \theta = x + ip$$

- Kvadrurní operátory X, P

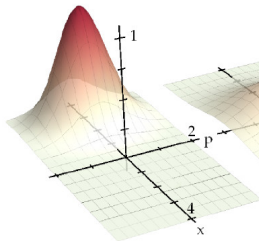
$$a = X + iP$$

$$[X, P] = \hbar i \rightarrow \Delta X \Delta P \geq \hbar/2$$

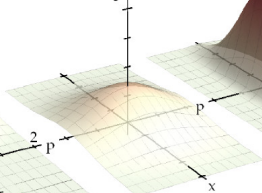


- Wignerova funkce

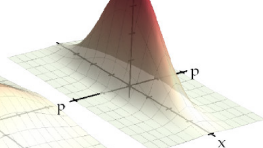
koherentní zdroj (laser)



termální zdroj



stlačené světlo



Popis světla ve fázovém prostoru – kvazi-distribuce

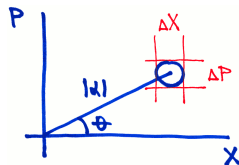
- Intenzita a fáze

$$\alpha = \sqrt{\langle N \rangle} \exp \theta = x + ip$$

- Kvadrurní operátory X, P

$$a = X + iP$$

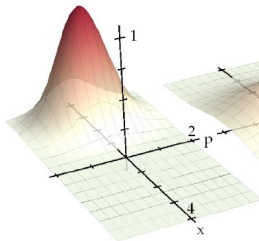
$$[X, P] = \hbar i \rightarrow \Delta X \Delta P \geq \hbar/2$$



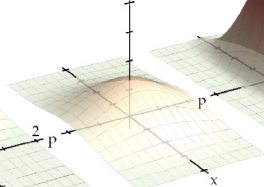
- Wignerova funkce

$$W(x, p) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dy e^{-2ipy} \langle x + y | \rho | x - y \rangle$$

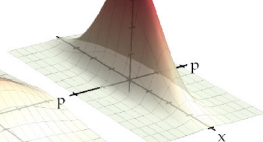
koherentní zdroj (laser)



termální zdroj

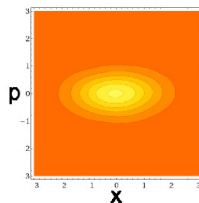
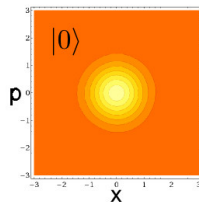
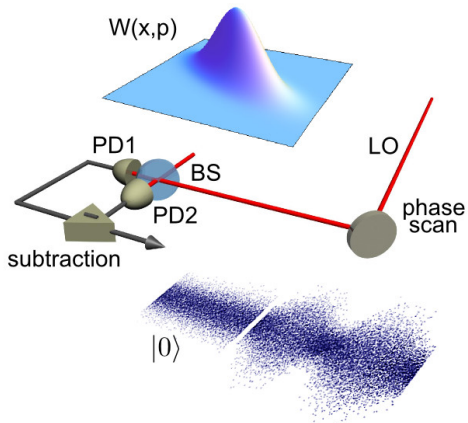


stlačené světlo



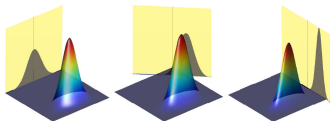
Homodynní detekce

- Interference s referenční vlnou $\sqrt{N_{LO}} e^{i\theta}$ → intenzita i fáze
 $\Delta I \approx \sqrt{N_{LO}} (X \cos \theta + P \sin \theta)$



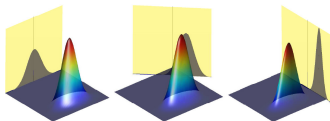
(Kvantová) homodynní tomografie

- Rekonstrukce $W(x, p)$ ze sady měření pro různé fáze LO



(Kvantová) homodynní tomografie

- Rekonstrukce $W(x, p)$ ze sady měření pro různé fáze LO

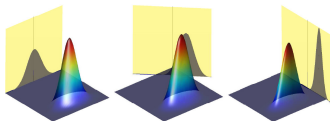


- Kvantové negaussovské stavy...



(Kvantová) homodynní tomografie

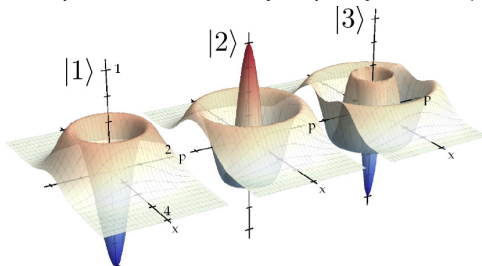
- Rekonstrukce $W(x, p)$ ze sady měření pro různé fáze LO



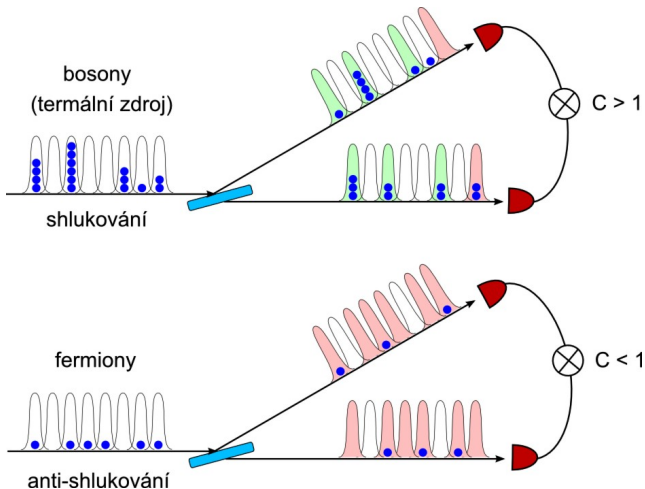
- Kvantové negaussovské stavy...



- Stavy světla s přesně definovanými počty fotonů (Fockovy stavy)

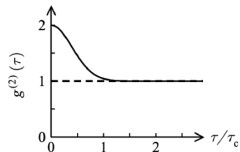
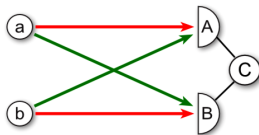


Korelační funkce



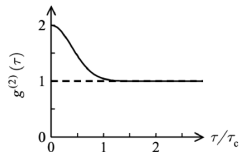
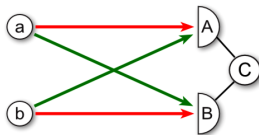
Korelační funkce $g^{(2)}$

- Korelační funkce druhého řádu: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$
 $g^{(2)}(0) > 1$ pro termální zdroje

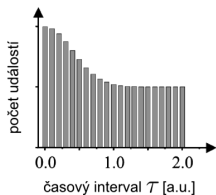
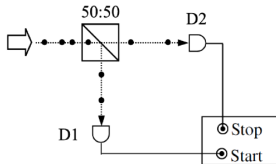


Korelační funkce $g^{(2)}$

- Korelační funkce druhého řádu: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$
 $g^{(2)}(0) > 1$ pro termální zdroje

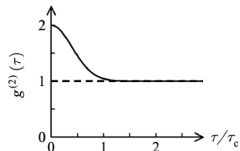
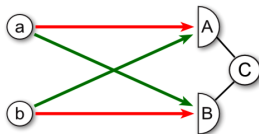


- Intenzita \rightarrow počet fotonů: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle}$

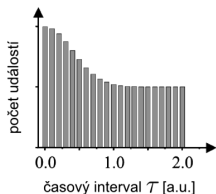
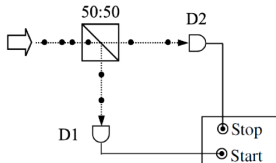


Korelační funkce $g^{(2)}$

- Korelační funkce druhého řádu: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}$
 $g^{(2)}(0) > 1$ pro termální zdroje



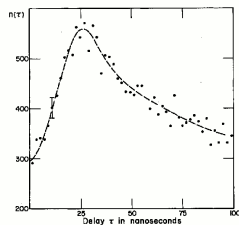
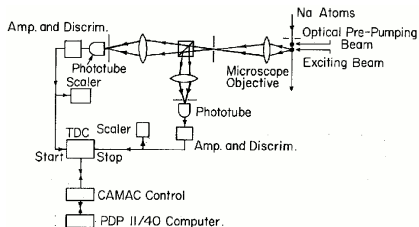
- Intenzita \rightarrow počet fotonů: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle}$



- Robert Hanbury-Brown & Richard Q. Twiss, 1954-1955

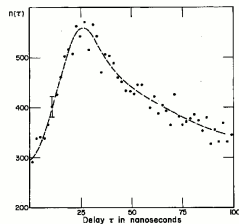
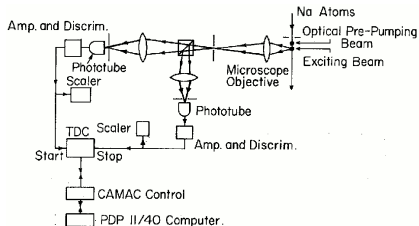
Anti-shlukování fotonů

- Anti-shlukování fotonů generovaných fluorescencí atomů [H.J. Kimble, M. Dagenais & L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)]

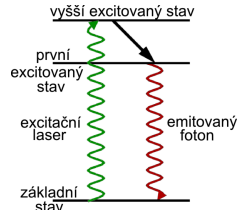


Anti-shlukování fotonů

- Anti-shlukování fotonů generovaných fluorescencí atomů [H.J. Kimble, M. Dagenais & L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)]

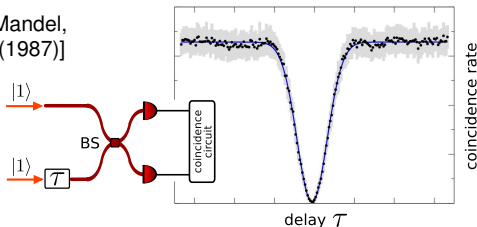


- Neklasické HBT korelace: $g^{(2)}(0) < 1$
nekompatibilní s vlnovou teorií

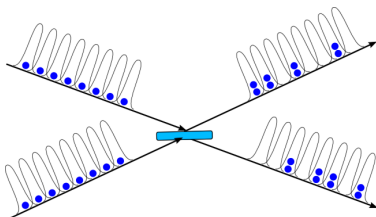


Neklasická interference jednotlivých fotonů

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



- Shlukování fotonů na vyváženém děliči $|1, 1\rangle \rightarrow |0, 2\rangle - |2, 0\rangle$

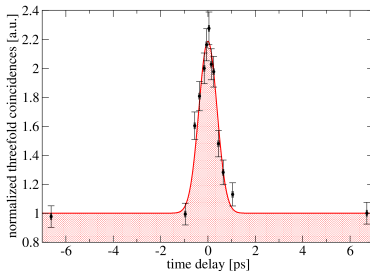
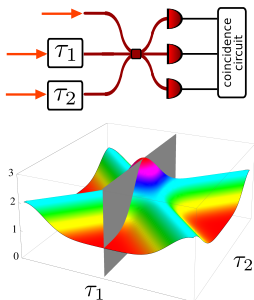


Interference fotonů – obecnější případy

- Fotony rozlišitelné v polarizaci \rightarrow kvantová provázanost
 \perp polarizované fotony na děliči 50:50 \rightarrow Bellovy stavy
 $\Psi^{\pm} \sim |HV\rangle \pm |VH\rangle, \quad \Phi^{\pm} \sim |HH\rangle \pm |VV\rangle$

Interference fotonů – obecnější případy

- Fotony rozlišitelné v polarizaci \rightarrow kvantová provázanost
 \perp polarizované fotony na děliči 50:50 \rightarrow Bellovy stavy
 $\Psi^\pm \sim |HV\rangle \pm |VH\rangle$, $\Phi^\pm \sim |HH\rangle \pm |VV\rangle$
- Anti-shlukování tří fotonů na děliči 3×3

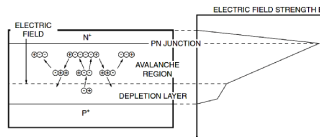
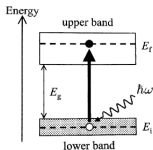


Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 **Detektory fotonů**
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

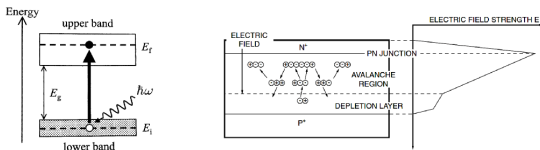
Jednofotonová lavinová fotodioda

- Vnitřní fotoelektrický jev v polovodičích
 Sekundární emise → lavinový jev, lavinová fotodioda (APD)

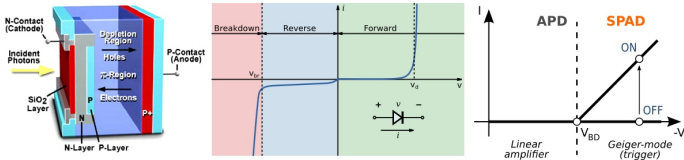


Jednofotonová lavinová fotodioda

- Vnitřní fotoelektrický jev v polovodičích
Sekundární emise → lavinový jev, lavinová fotodioda (APD)

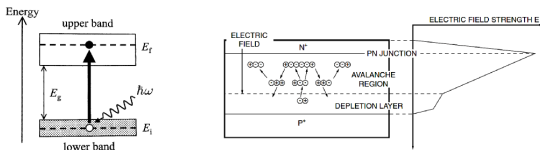


- APD v lineárním módu vs. Geigerův režim (SPAD)
pasivní vs. aktivní zhášení [S. Cova et al. Applied Optics 35, 1956 (1996)]

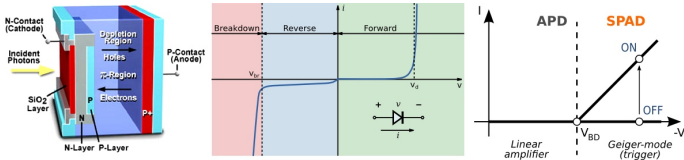


Jednofotonová lavinová fotodioda

- Vnitřní fotoelektrický jev v polovodičích
Sekundární emise → lavinový jev, lavinová fotodioda (APD)



- APD v lineárním módu vs. Geigerův režim (SPAD)
pasivní vs. aktivní zhášení [S. Cova et al. Applied Optics 35, 1956 (1996)]

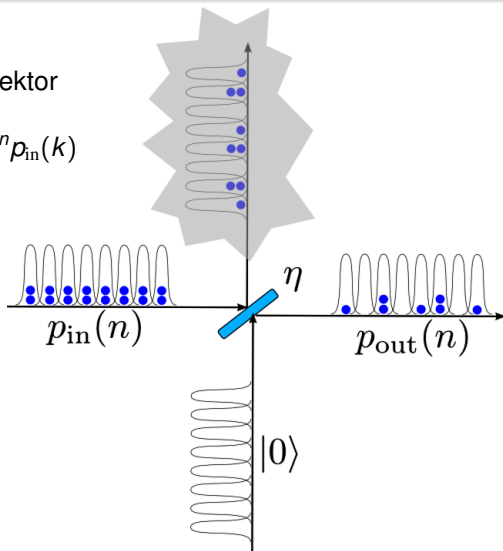


- Relativně nízká účinnost
- Neschopnost rozlišit počet fotonů: N a $N+1$ fotonů
- Malý dynamický rozsah: temné detekce $50-500 \text{ s}^{-1}$, saturace $1-10 \text{ M s}^{-1}$

Účinnost detektoru

- Reálný detektor
→ dělič svazku + ideální detektor

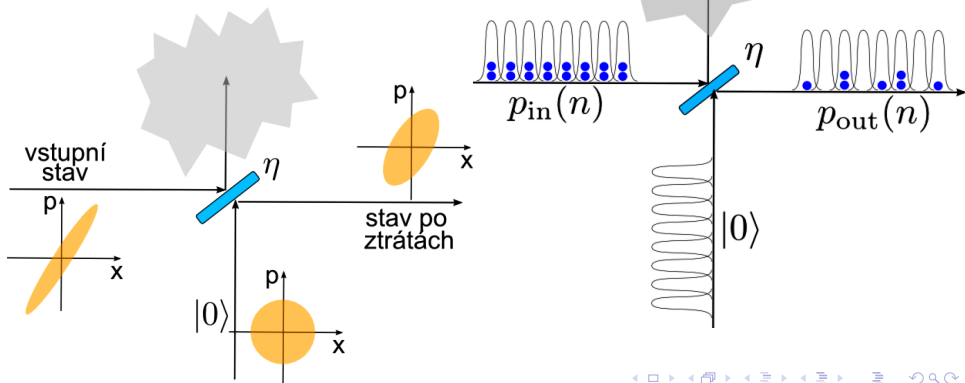
$$p_{\text{out}}(n) = \sum_{k=n}^{\infty} \binom{k}{n} \eta^n (1-\eta)^{k-n} p_{\text{in}}(k)$$



Účinnost detektoru

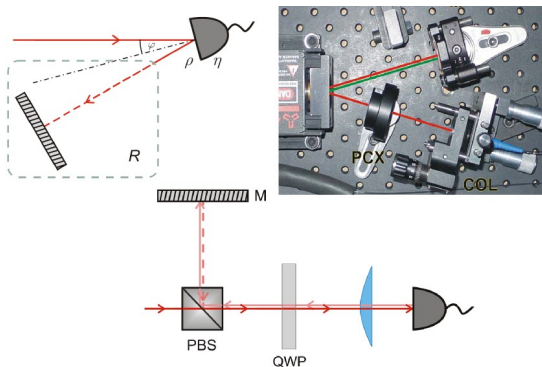
- Reálný detektor
→ dělič svazku + ideální detektor

$$p_{\text{out}}(n) = \sum_{k=n}^{\infty} \binom{k}{n} \eta^n (1-\eta)^{k-n} p_{\text{in}}(k)$$



Geometrie zachycující světlo

- Retro-reflektor zachycuje odražené záření a vrací jej zpět
Zisk v účinnosti $\frac{\eta_{\text{trap}}}{\eta} = 1 + R_{\text{trap}}R_{\text{det}}$
Typicky pro testované detektory: zisk 8-12% pro $0,8 \mu\text{m}$



- Větší zisk pravděpodobně pro kratší vlnové délky nebo v kombinaci s interferenčním filtrem [P. Kwiat et al. J. Mod. Opt. 58, 306 (2011)]

Detekce fotorozdělení

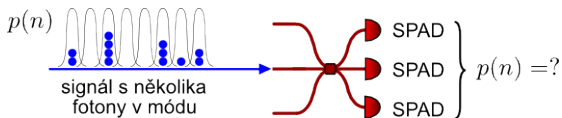
- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

multiplex – časový, prostorový, ...

[první návrh: H. Paul, ... I. Jex, Phys. Rev. Lett. 76, 2464 (1996)]

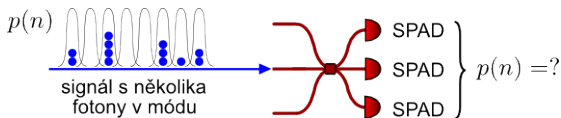


Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

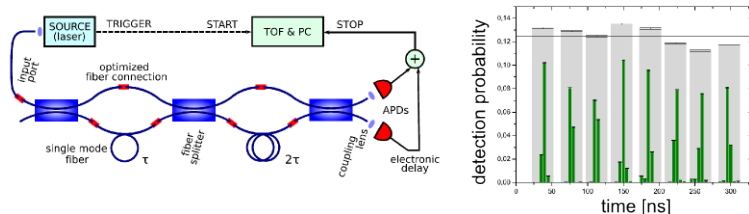
multiplex – časový, prostorový, ...

[první návrh: H. Paul, ... I. Jex, Phys. Rev. Lett. 76, 2464 (1996)]

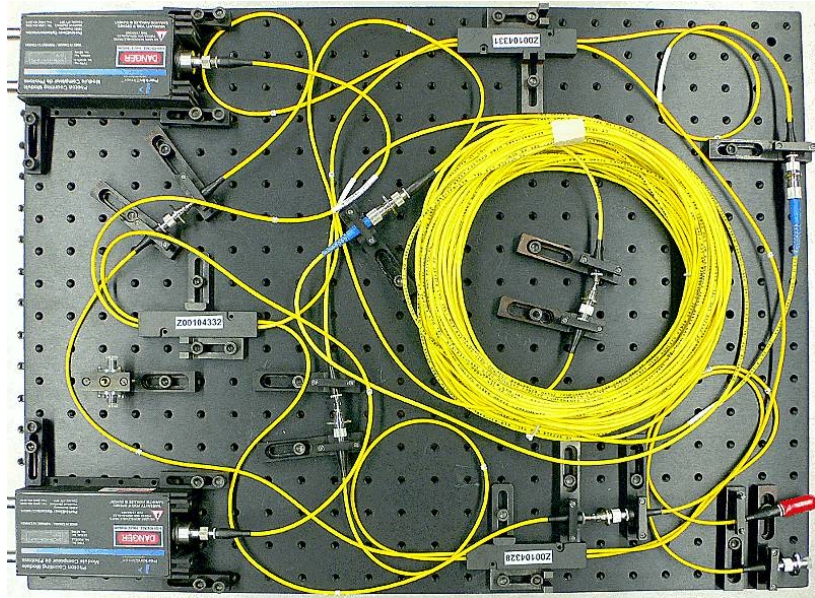


- 8 kanálový PNR detektor s celkovou účinností detekce 53%

[M. Mičuda, O. Haderka & M. Ježek, Phys. Rev. A 78, 025804 (2008)]



Detekce fotorozdělení – časový multiplex



Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

Generace fotonů z jednotlivých emitorů

- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
 - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
 - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
 - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)

Generace fotonů z jednotlivých emitorů

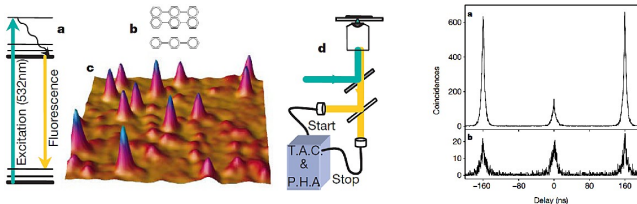
- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
 - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
 - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
 - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)
- Opticky: konfokální mikroskop s diagnostikou
 - excitační a případně testovací laser (CW i pulzní \leq ps)
 - spektrální analyzátor
 - HBT (plná koincidenční analýza se sub-ns rozlišením)

Generace fotonů z jednotlivých emitorů

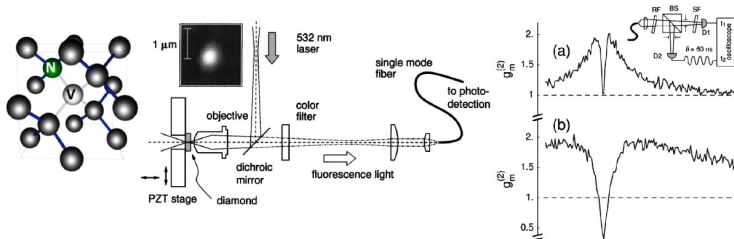
- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
 - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
 - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
 - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)
- Opticky: konfokální mikroskop s diagnostikou
 - excitační a případně testovací laser (CW i pulzní \leq ps)
 - spektrální analyzátor
 - HBT (plná koincidenční analýza se sub-ns rozlišením)
- Všesměrová emise → **nízká účinnost kolekce/navázání**
maximální detekční účinnost řádově 10^{-3}

Generace fotonů z jednotlivých emitorů

- Molekuly: p-terphenyl (10^{-11} mol) v krystalu terrylenu [B. Lounis & W.E. Moerner, Nature 407, 491 (2000)]

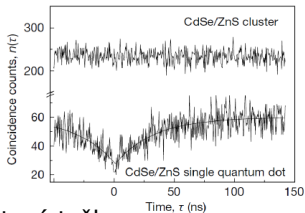
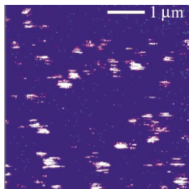


- NV centra v diamantu: luminiscence NV defektů 1990-2000 celistvý materiál či nano částice v nízké koncentraci [C. Kurtsiefer et al. Phys. Rev. Lett. 85, 290 (2000)]

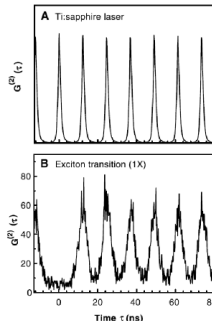
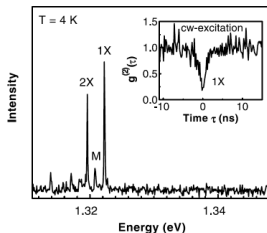
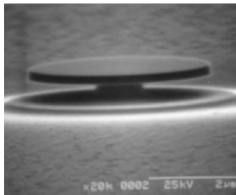


Generace fotonů z jednotlivých emitorů

- CdSe/ZnS (jádro/obal) kvantové tečky při pokojové teplotě UCA [P. Michler et al. Nature 406, 968 (2000)]

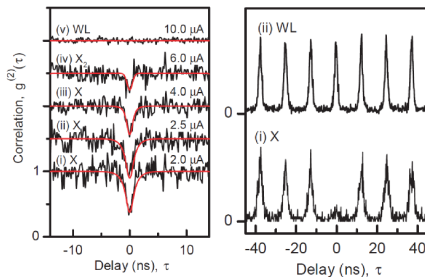
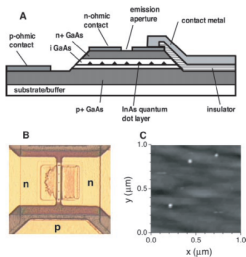


- InAs/GaAs kvantové tečky toroidní WGM mikro-rezonátoru, T=4 K [P. Michler et al. Science 290, 2282 (2000)]



Generace fotonů z jednotlivých emitorů

- Elektro-luminescence z kvantové tečky v ochuzené vrstvě PIN přechodu (jednofotonová LED) Cambridge [Z. Yuan et al. Science 295, 102 (2002)]



Generace párů fotonů parametrickou interakcí

- Spontánní parametrická sestupná frekvenční konverze
 - inverzní proces generace druhé harmonické
- Generace náhodná
 - detekce jednoho fotonu z páru podmiňuje jednofotonový stav
 - pulzní generace také náhodná, ale lokalizovaná (SPDC)

Generace párů fotonů parametrickou interakcí

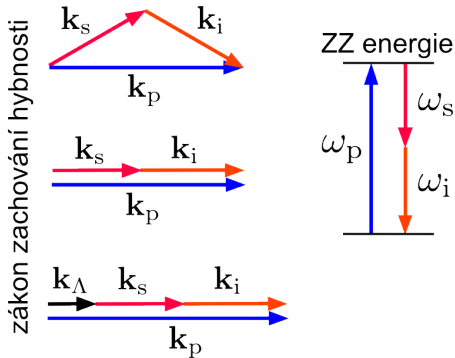
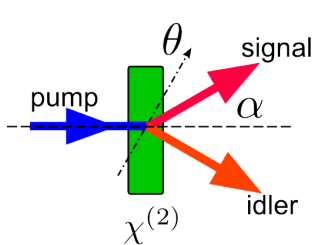
- Spontánní parametrická sestupná frekvenční konverze
 - inverzní proces generace druhé harmonické
- Generace náhodná
 - detekce jednoho fotonu z páru podmiňuje jednofotonový stav
 - pulzní generace také náhodná, ale lokalizovaná (SPDC)
- Experimentálně:
 - nelineární materiál čerpaný CW nebo pulzně
 - frekvenční a prostorová selekce generovaných modů

Generace párů fotonů parametrickou interakcí

- Spontánní parametrická sestupná frekvenční konverze
 - inverzní proces generace druhé harmonické
- Generace náhodná
 - detekce jednoho fotonu z páru podmiňuje jednofotonový stav
 - pulzní generace také náhodná, ale lokalizovaná (SPDC)
- Experimentálně:
 - nelineární materiál čerpaný CW nebo pulzně
 - frekvenční a prostorová selekce generovaných modů
- Celková účinnost detekce až 40% (kolekční až 80%)
Dosud nejúspěšnější způsob generace fotonů

Parametrická sestupná frekvenční konverze

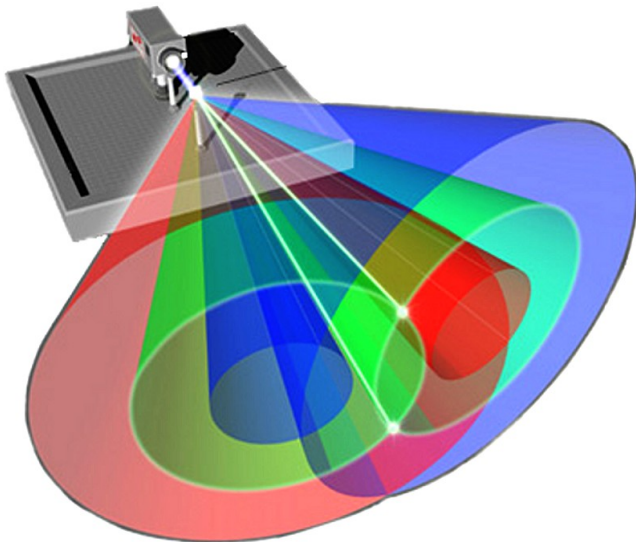
- Nelineární optický proces 2. řádu, třívlňové směšování
- Fázové sladění: zákon zachování energie a hybnosti
 - techniky f.s.: úhlové, teplotní, periodické polování



- Klasifikace:
 - degenerovaná vs. nedegenerovaná
 - kolineární vs. nekolineární
 - typ I, II, 0 atd.

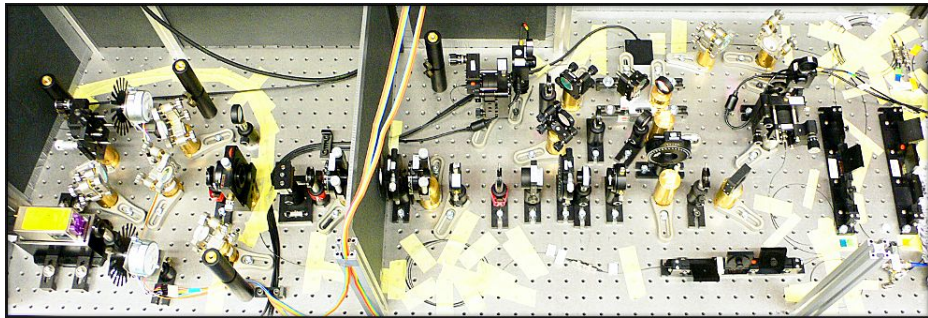
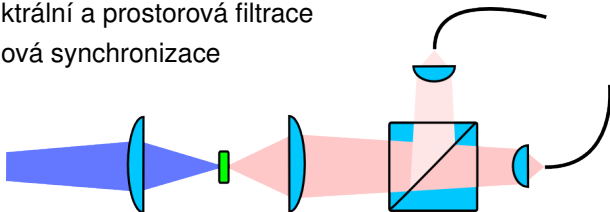
PDC typ II – 3D geometrie

- Jednoosý BBO krystal, typ II, $\theta = 44$ deg, čerpání 405 nm



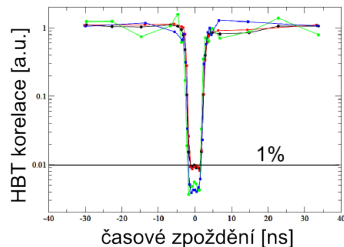
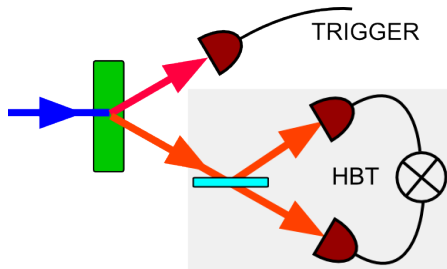
PDC typ II – selekce a navazování módů

- Spektrální a prostorová filtrace
- Časová synchronizace



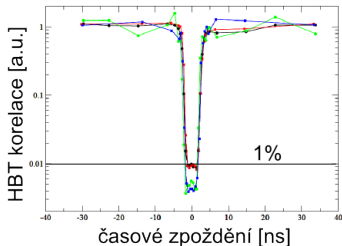
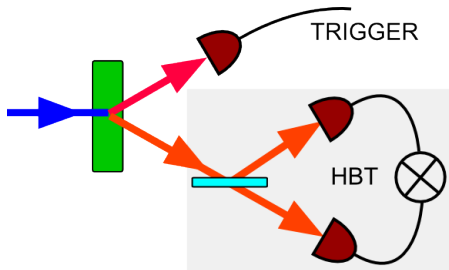
PDC podmíněná generace jediného fotonu

- Náhodná generace s oznámením (heralded source)



PDC podmíněná generace jediného fotonu

- Náhodná generace s oznámením (heralded source)



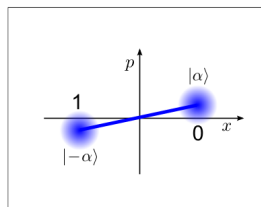
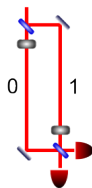
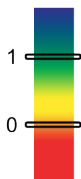
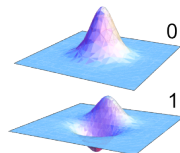
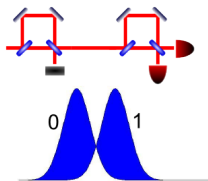
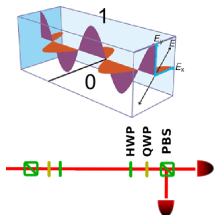
- Hodnocení neklasického charakteru produkovaných stavů světla
Kritérium negaussovského charakteru
[R. Filip, L. Mišta, Physical Review Letters 106, 200401 (2011)]
- Experimentální test – porušení 10^3 standardních odchylek
[M. Ježek et al., Physical Review Letters 107, 213602 (2011)]

Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

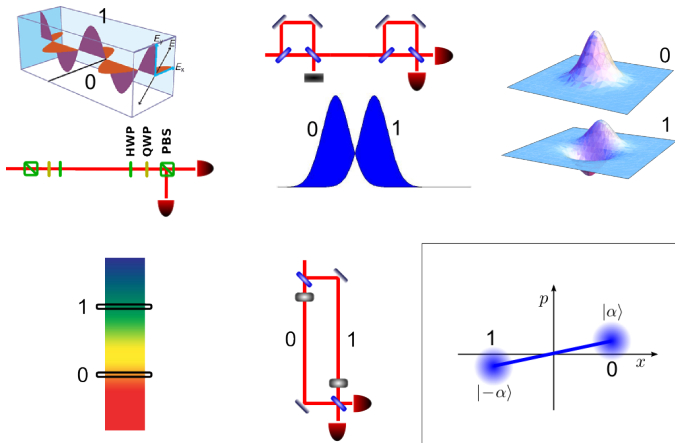
Kódování kvantových bitů (qubitů)

- Dvumódové vs. jednomódové kódování



Kódování kvantových bitů (qubitů)

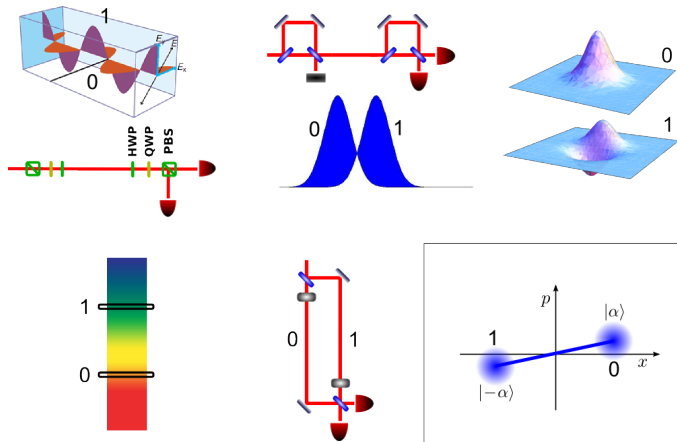
- Dvumódové vs. jednomódové kódování



- Princip superpozice $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

Kódování kvantových bitů (qubitů)

- Dvumódové vs. jednomódové kódování



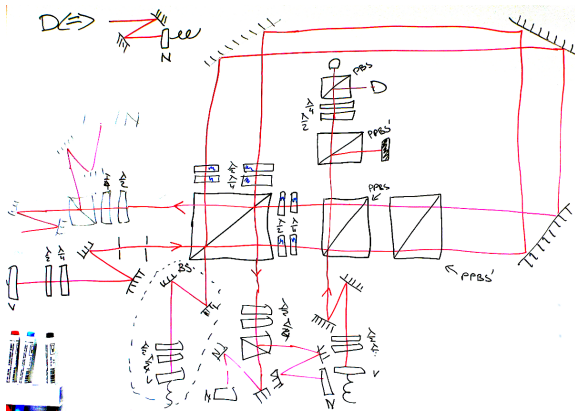
- Princip superpozice $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
- Kvantové počítače s fotony a lineární optikou

Hyperkódování a hyper-entanglement

- Více (kvantových) bitů nesených jediným fotonem

Hyperkódování a hyper-entanglement

- Více (kvantových) bitů nesených jediným fotonem
- **Toffoliho kvantové logické hradlo (CCNOT)**
 [A.White group, Nature Phys.5, 134 (2009)] truth table with overlap 81%
 [R.Blatt group, PRL 102, 040501 (2009)] full tomo, mean fidelity 71%



Optická realizace Toffoliho hradla



Programovatelná kvantová hradla

- Datový a programový registr – kvantový software

Programovatelná kvantová hradla

- Datový a programový registr – kvantový software

- **Programovatelné fázové hradlo**

[Vidal, Masanes & Cirac, Physical Review Letters 88, 047905 (2002)]

[Mičuda, Ježek et al., Physical Review A 78, 062311 (2008)]

- $|\psi_d\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\psi_p\rangle = (|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle)/\sqrt{2}$
 $|\psi_d\rangle_{\text{OUT}} = \alpha|0\rangle \pm \beta e^{i\phi}|1\rangle$

Programovatelná kvantová hradla

- Datový a programový registr – kvantový software

- **Programovatelné fázové hradlo**

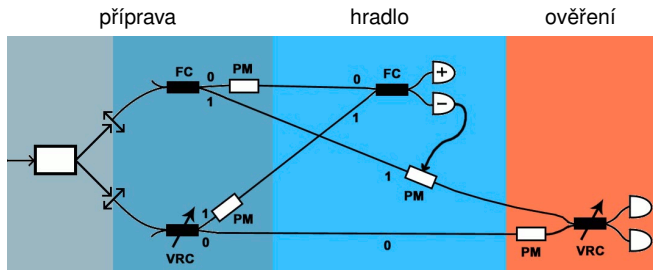
[Vidal, Masanes & Cirac, Physical Review Letters 88, 047905 (2002)]

[Mičuda, Ježek et al., Physical Review A 78, 062311 (2008)]

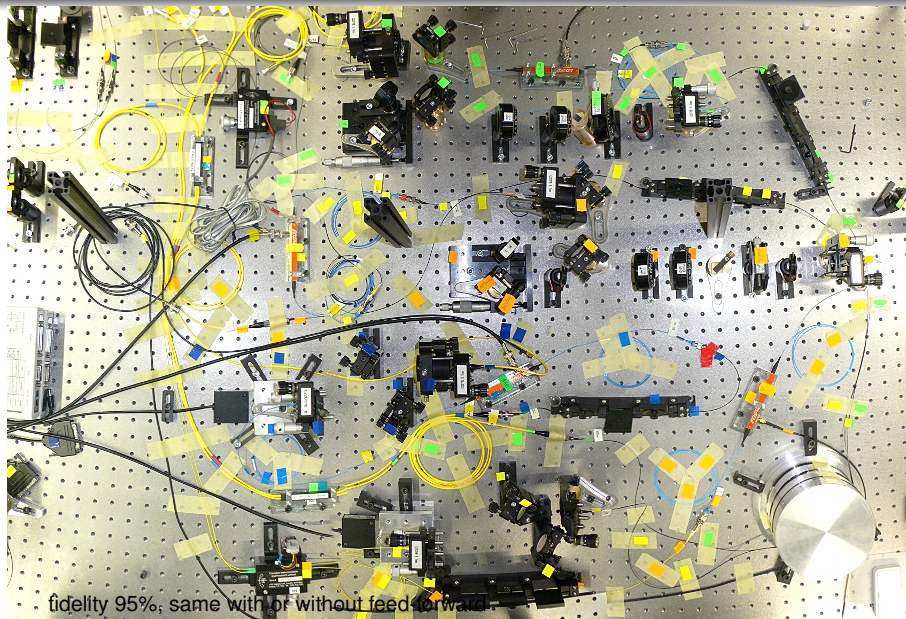
- $|\psi_d\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\psi_p\rangle = (|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle)/\sqrt{2}$
 $|\psi_d\rangle_{\text{OUT}} = \alpha|0\rangle \pm \beta e^{i\phi}|1\rangle$

- Oprava chybných výsledků pomocí dopředné vazby

[Miková, Fikerová, Straka, Mičuda, Ježek & Dušek, arXiv:1111.3237 (2011)]



Programovatelné fázové hradlo

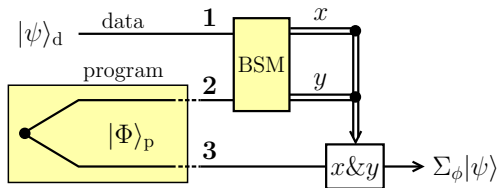


Kvantový software

- Univerzální programovatelnost? [Nielsen & Chuang, PRL 79, 321 (1997)]

Kvantový software

- Univerzální programovatelnost? [Nielsen & Chuang, PRL 79, 321 (1997)]
- Kvantové počítání s využitím teleportace [Gottesman & Chuang, Nature 402, 390 (1999)]



- Kvantová teleportace [PRL 70, 1895 (1993); Nature 390, 575 (1997)]
sdílení entanglovaného stavu + Bellovo měření

Programovatelné sigma-Z hradlo

- Programový registr ve stavu $|\Psi^-\rangle$ (teleportace)
(kvantová) identita:

$$|0\rangle \rightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \rightarrow |1\rangle, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Programovatelné sigma-Z hradlo

- Programový registr ve stavu $|\Psi^-\rangle$ (teleportace)

(kvantová) identita:

$$|0\rangle \rightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \rightarrow |1\rangle, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

- Programový registr v Bellově stavu $|\Psi^+\rangle = |01\rangle + |10\rangle$

Změna znaménka:

$$|0\rangle \rightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \rightarrow -|1\rangle, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix}$$

Programovatelné sigma-Z hradlo

- Programový registr ve stavu $|\Psi^-\rangle$ (teleportace)

(kvantová) identita:

$$|0\rangle \rightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \rightarrow |1\rangle, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

- Programový registr v Bellově stavu $|\Psi^+\rangle = |01\rangle + |10\rangle$

Změna znaménka:

$$|0\rangle \rightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \rightarrow -|1\rangle, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix}$$

- Programový registr ve stavu $|\Psi\rangle_p = |\varphi\varphi_\perp\rangle + |\varphi_\perp\varphi\rangle$

Programovatelná změna znaménka: $|\varphi\rangle \rightarrow |\varphi\rangle, \quad |\varphi_\perp\rangle \rightarrow -|\varphi\rangle$

Operace prováděná na qubitu datového registru
je kontrolována dvouqubitovým programovým registrem

Realizace programovatelného sigma-Z

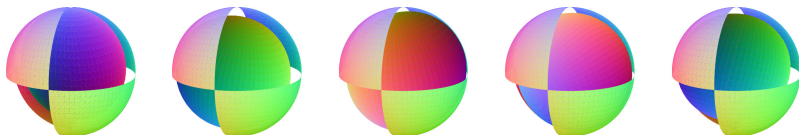
- Teleportační sigma-Z hradlo

[Slodička, Ježek & Fiurášek, PRA 79, 050304(R) (2009)]

pravděpodobnost úspěchu $P_S = 1/4$

Plná charakterizace obvodu pro 5 programů

průměrná shoda s ideálním obvodem: $90 \pm 3\%$



Realizace programovatelného sigma-Z

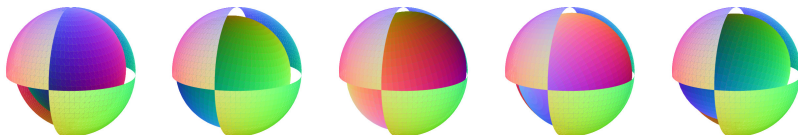
- Teleportační sigma-Z hradlo

[Slodička, Ježek & Fiurášek, PRA 79, 050304(R) (2009)]

pravděpodobnost úspěchu $P_S = 1/4$

Plná charakterizace obvodu pro 5 programů

průměrná shoda s ideálním obvodem: $90 \pm 3\%$



- Nejefektivnější teoreticky navržené schéma dosahuje $P_S = 1/3$

[Hillery, Buzek & Ziman, PRA 65, 022301 (2002)]

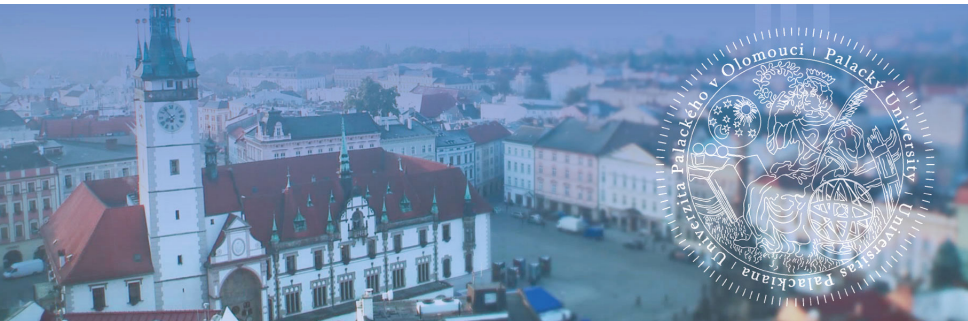
Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

Shrnutí

- Neklasické chování jednotlivých fotonů
- Detekce: účinnost a rozlišení počtu fotonů
- Příprava jednotlivých fotonů
 - PDC: snadná, efektivní, ale pouze přibližně jednofotonový stav
 - Jednotlivé emitory: náročné, neefektivní, stav jednofotonový?
- Využití pro zpracování informace
- Problém škálovatelnosti: probabilistická příprava i detekce

Děkuji Vám za pozornost!



optics.upol.cz
www.facebook.com/optika.olomouc
quantum.opticsolomouc.org