

Příprava, detekce a využití jednotlivých fotonů

Miroslav Ježek



Katedra optiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci



Ostrava, 22. 11. 2011



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Laboratoř kvantové optiky a informatiky

Založení laboratoře na podzim 2009



Laboratoř kvantové optiky a informatiky

Laboratoř kvantové optiky a informatiky

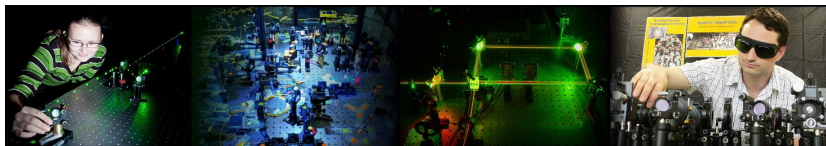
PF 2011



Tým laboratoře QOLO a spolupráce

Experimentální tým

- Helena Fikerová, Ivo Straka (Mgr)
- Martina Miková, Michal Mičuda (PGS)
- Miloslav Dušek, Miroslav Ježek



Zahraniční spolupráce – experiment

- Technical University of Denmark, Lyngby
- The Institute of Photonic Sciences, Barcelona
- Photonics Group, University of Innsbruck

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
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 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
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 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
- Kvantové počítače: kvantový bit (qubit)
- 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."

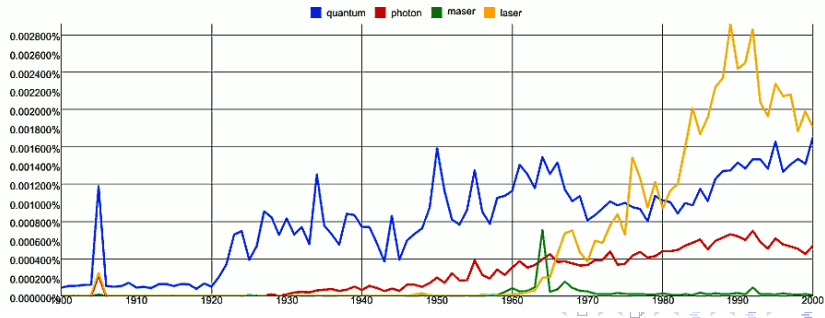
Gilbert N. Lewis, 1926

Kvantum, foton, maser, laser...

Google books Ngram Viewer

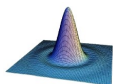
Graph these **case-sensitive** comma-separated phrases:

between and from the corpus with smoothing of



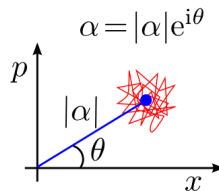
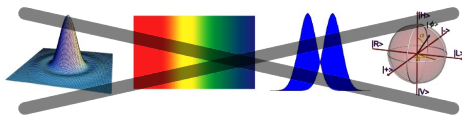
Kvantový popis světla

- Mód světla



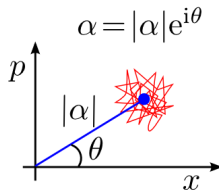
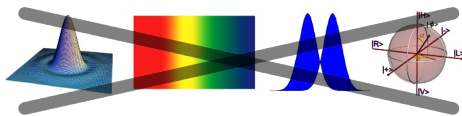
Kvantový popis světla

- 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 $N = a^\dagger a$

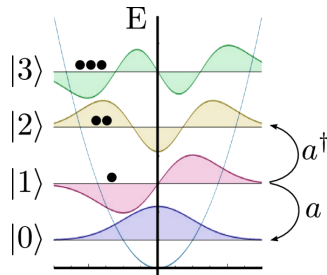
Fockovy stavy: $N|n\rangle = n|n\rangle$

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

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

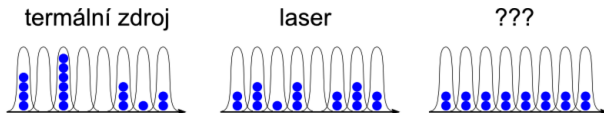
$a^\dagger|n\rangle \rightarrow |n+1\rangle$

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: $p(n) = |c_n|^2$

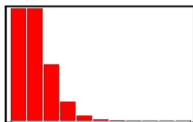
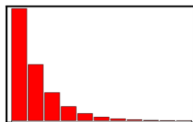


Bose - Einstein

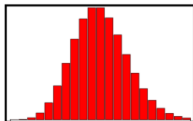
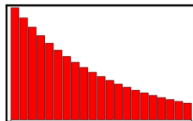
Poisson

Fock

$\langle N \rangle = 1$



$\langle N \rangle = 10$

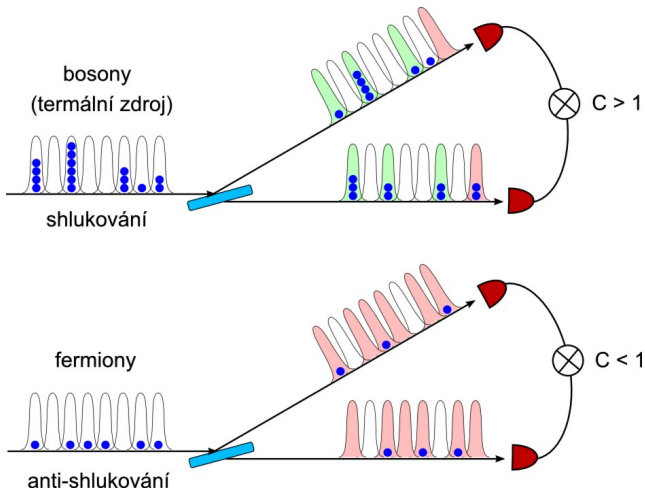


$\text{Var}[N] = \langle N \rangle (1 + \langle N \rangle)$

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

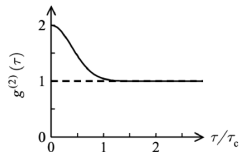
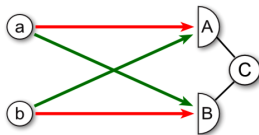
$\text{Var}[N] = 0$

Korelační funkce



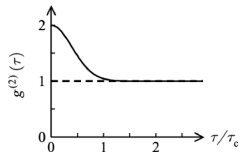
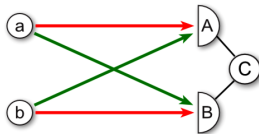
Korelační funkce $g^{(2)}$

- 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

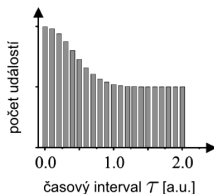
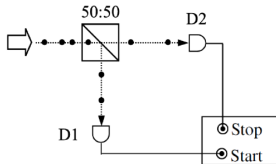


Korelační funkce $g^{(2)}$

- 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

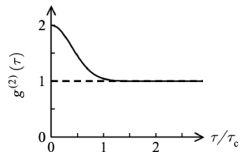
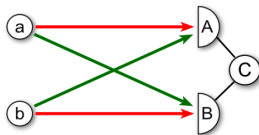


- Intenzita \rightarrow počet fotonů: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle}$

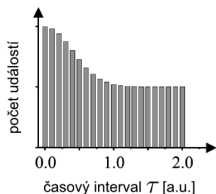
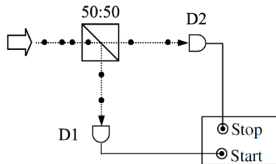


Korelační funkce $g^{(2)}$

- 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



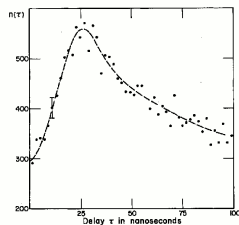
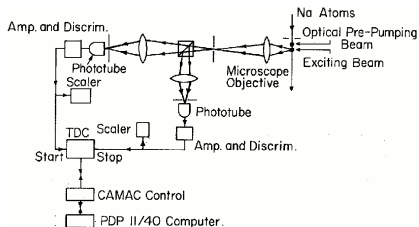
- Intenzita \rightarrow počet fotonů: $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle}$



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

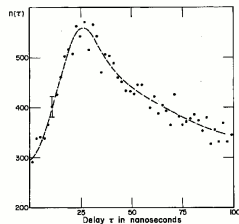
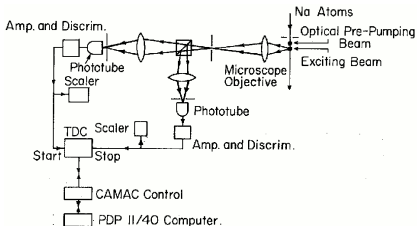
Anti-shlukování fotonů

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

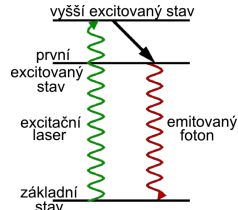


Anti-shlukování fotonů

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

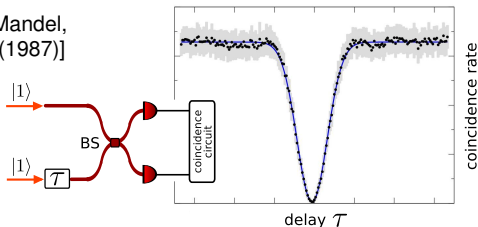


- Neklasické HBT korelace: $g^{(2)}(0) < 1$
nekompatibilní s vlnovou teorií

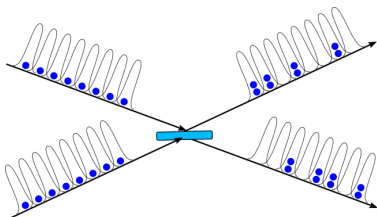


Neklasická interference jednotlivých fotonů

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



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

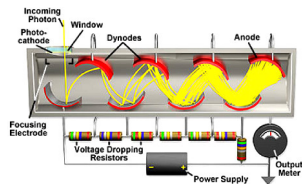
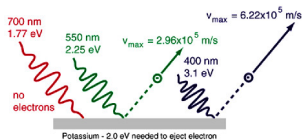


Obsah

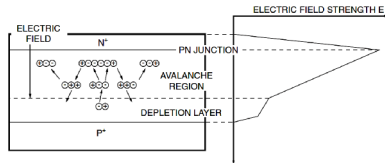
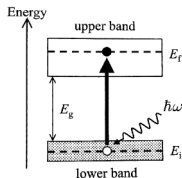
- 1 Úvod
 - Motivace
 - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
 - Detekce jednotlivých fotonů
 - Účinnost detekce
 - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
 - Jednotlivé emitory
 - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 4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

Fotoelektrický jev

- Vnější fotoelektrický jev, fotokatoda, fotonásobič

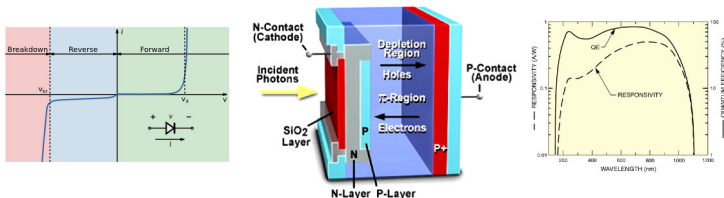


- Vnitřní fotoelektrický jev v polovodičích
Sekundární emise \rightarrow lavinový jev, lavinová fotodioda

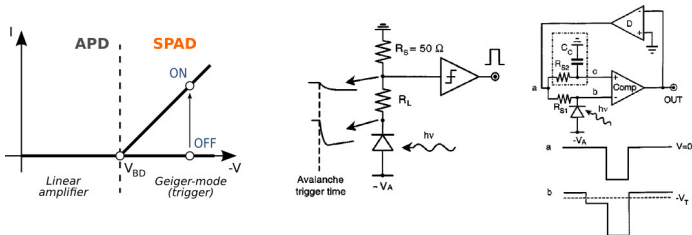


Lavinová fotodioda

- Ochuzená vrstva tenká ($\approx 1 \mu\text{m}$) vs. tlustá ($20 - 150 \mu\text{m}$)
Průrazné napětí $10 - 50 \text{ V}$ resp. $200 - 500 \text{ V}$

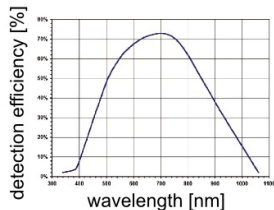
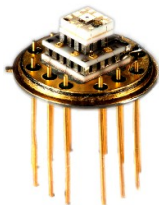


- APD v lineárním módu vs. Geigerův režim (SPAD)
pasivní vs. aktivní zhášení [S. Cova et al. Applied Optics 35, 1956 (1996)]

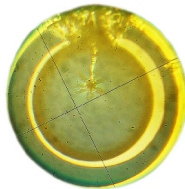
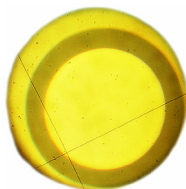


Komerční SPAD

- Perkin-Elmer SPCM-AQxxx, SLIK chip, dia $180\ \mu\text{m}$, $\eta_{\text{max}} = 70\%$

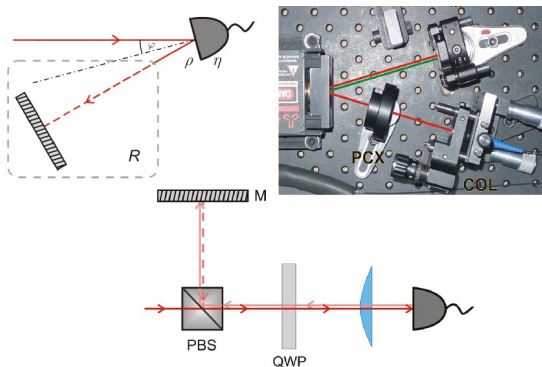


- Neschopnost rozlišit počet fotonů (stejně jako ostatní SPAD)
- Malý dynamický rozsah:
temné detekce $50\text{-}500\ \text{s}^{-1}$, saturace $1\text{-}10\ \text{M s}^{-1}$



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 $0,8 \mu\text{m}$

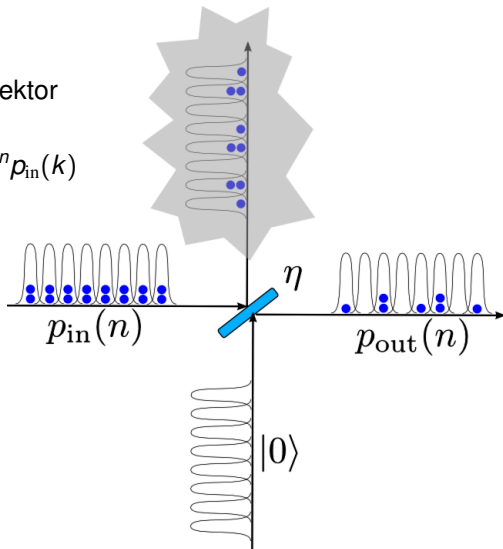


- Větší zisk pravděpodobně pro kratší vlnové délky nebo v kombinaci s interferenčním filtrem [P. Kwiat et al. J. Mod. Opt. 58, 306 (2011)]

Účinnost detektoru

- Reálný detektor
→ dělič svazku + ideální detektor

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



Detekce fotorozdělení

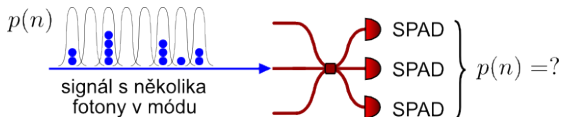
- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

multiplex – časový, prostorový, ...

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

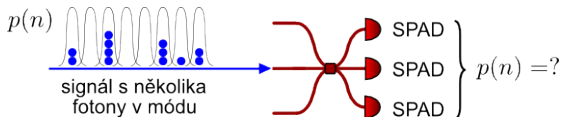


Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

multiplex – časový, prostorový, ...

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

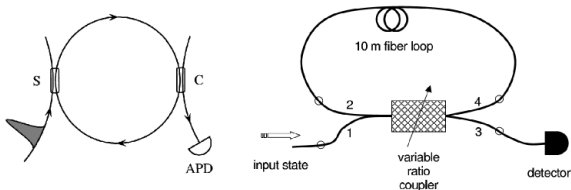


- Smyčkový detektor

[K. Banaszek & I. A. Walmsley, Opt. Lett. 28, 52 (2003)]

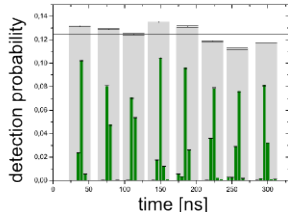
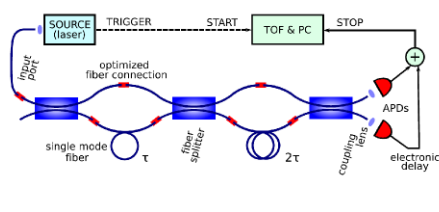
[J. Řeháček et al. Phys. Rev. A 67, 061801(R) (2003)]

[O. Haderka et al. Eur. Phys. J. D 28, 149 (2004)]



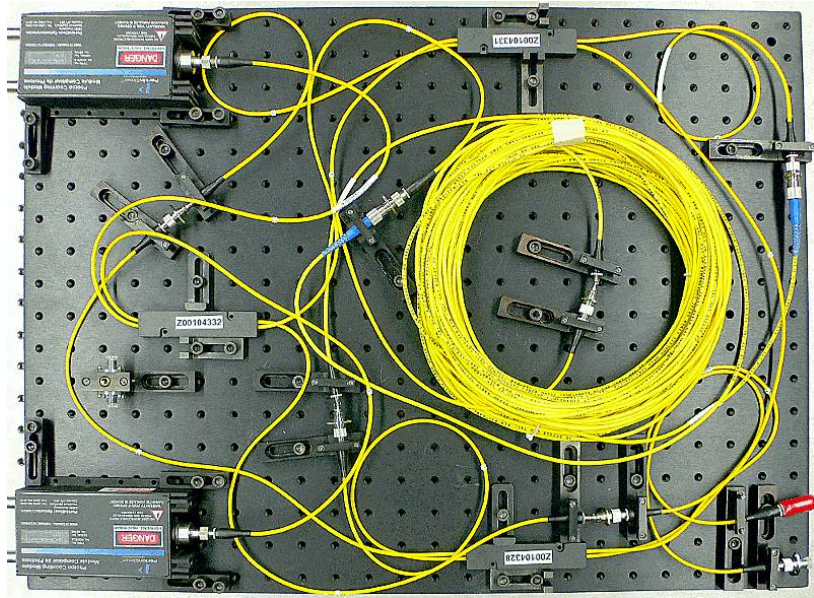
Detekce fotorozdělení – časový multiplex

- Děliče a zpožďovací linky
 [D. Achilles et al. Opt. Lett. 28, 2387 (2003)]
 [M. J. Fitch et al. Phys. Rev. A 68, 043814 (2003)]
 celková účinnost $\leq 20\%$
- 8 kanalový PNR detektor s propustností multiplexu 93%
 [M. Mičuda, O. Haderka & M. Ježek, Phys. Rev. A 78, 025804 (2008)]



celková účinnost 53%, průměrná ztráta vláknového spoje $\leq 1,5\%$

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
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 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

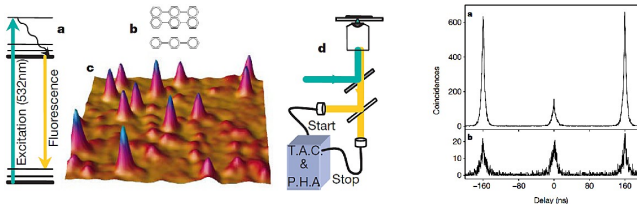
- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
 - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
 - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
 - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)
- Opticky: konfokální mikroskop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

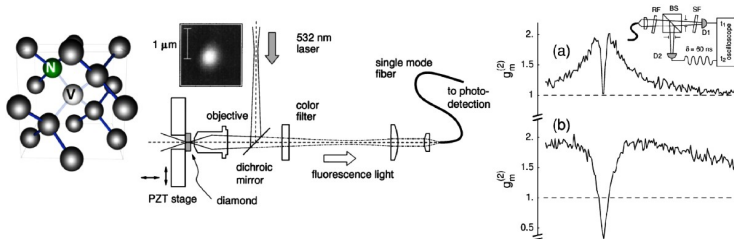
- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
 - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
 - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
 - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)
- Opticky: konfokální mikroskop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

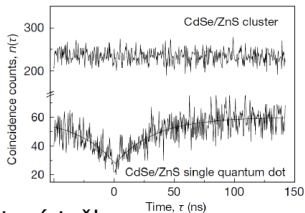
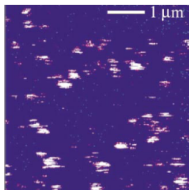


- NV centra v diamantu: luminiscence NV defektů 1990-2000 celistvý materiál či nano částice v nízké koncentraci [C. Kurtsiefer et al. Phys. Rev. Lett. 85, 290 (2000)]

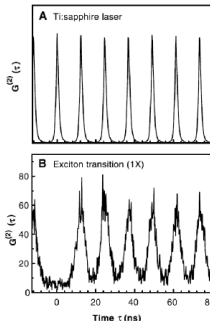
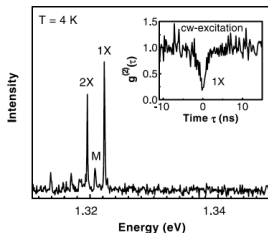
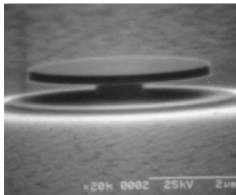


Generace fotonů z jednotlivých emitorů

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

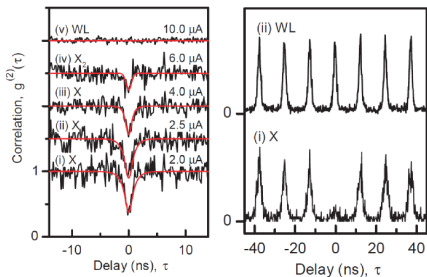
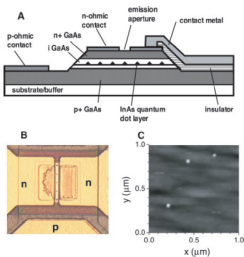


- InAs/GaAs kvantové tečky toroidní WGM mikro-rezonátoru, T=4 K [P. Michler et al. Science 290, 2282 (2000)]



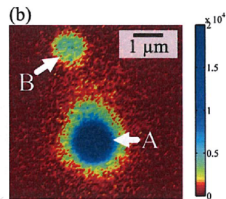
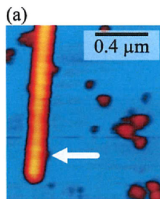
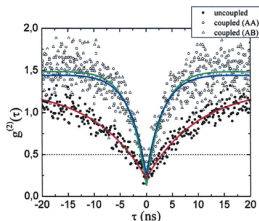
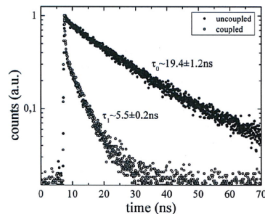
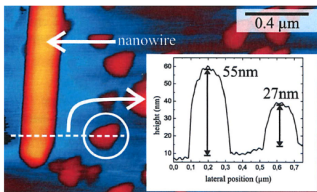
Generace fotonů z jednotlivých emitorů

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



Generace fotonů z jednotlivých emitorů

- NV centra v nano částicích diamantu, stříbrné nano drátky
manipulace pomocí AFM + navázání do plazmonového vlnovodu
DTU Lyngby [A. Huck et al. Phys. Rev. Lett. 106, 096801 (2011)]



Generace párů fotonů parametrickou interakcí

- Spontánní parametrická sestupná frekvenční konverze
 - inverzní proces generace druhé harmonické

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$$

- 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

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$$

- 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

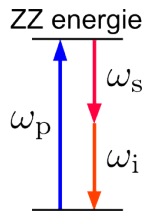
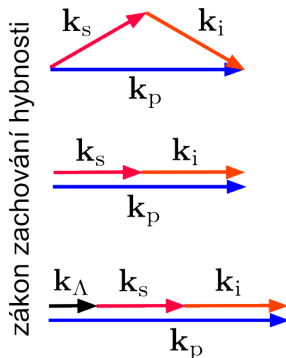
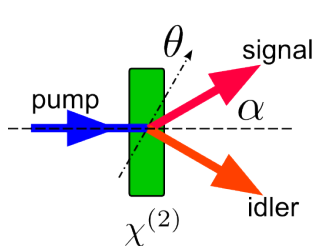
- Spontánní parametrická sestupná frekvenční konverze
 - inverzní proces generace druhé harmonické

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$$

- 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

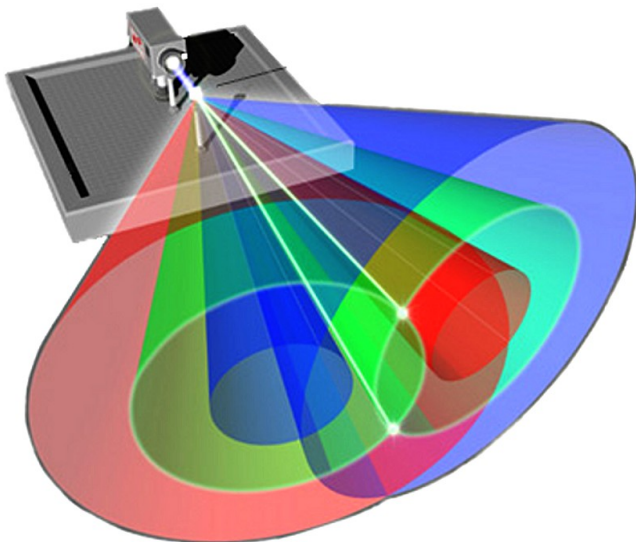
- Nelineární optický proces 2. řádu, třívlňové směšování
- Fázové sladění: zákon zachování energie a hybnosti
 - techniky f.s.: úhlové, teplotní, periodické polování



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

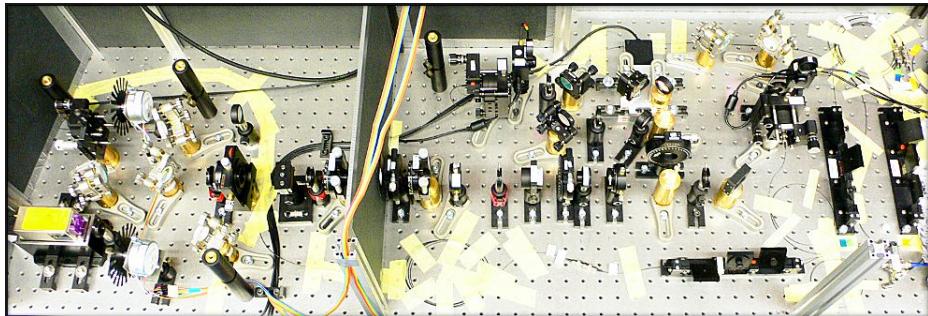
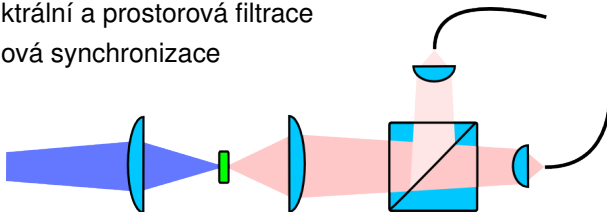
PDC typ II – 3D geometrie

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



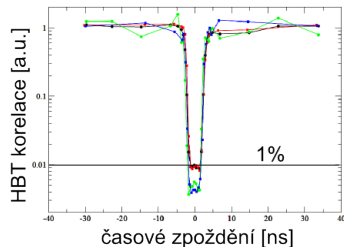
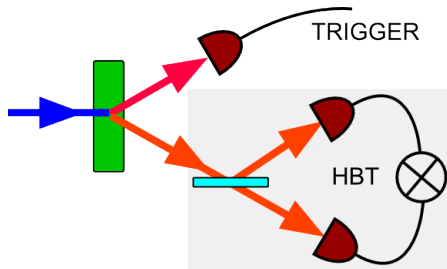
PDC typ II – selekce a navazování módů

- Spektrální a prostorová filtrace
- Časová synchronizace



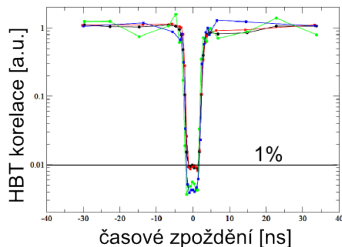
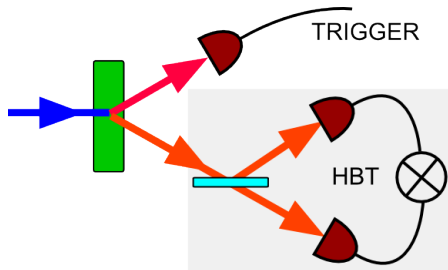
PDC podmíněná generace jediného fotonu

- Náhodná generace s oznámením (heralded source)



PDC podmíněná generace jediného fotonu

- Náhodná generace s oznámením (heralded source)



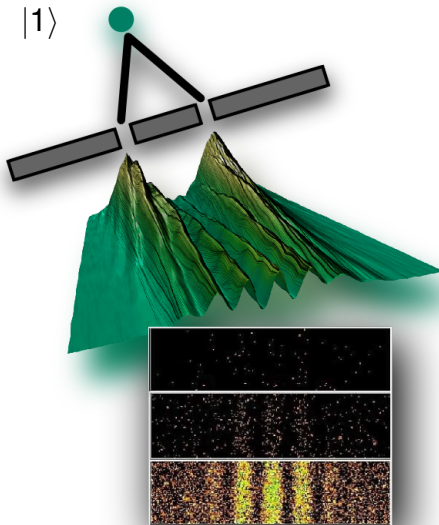
- Hodnocení neklasického charakteru produkovaných stavů světla
Kritérium negaussovského charakteru

[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)]

Vlnově-částicová dualita světla

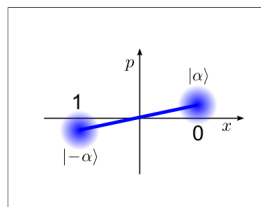
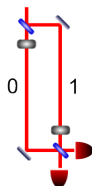
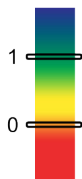
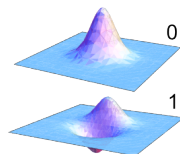
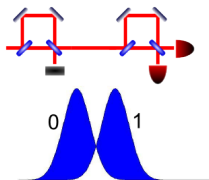
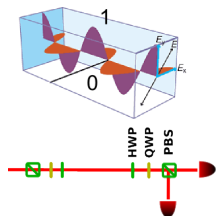


Obsah

- 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
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 4 Využití jednotlivých fotonů
 - Kvantové bity a hradla
 - Kvantový software
- 5 Závěr
 - Shrnutí

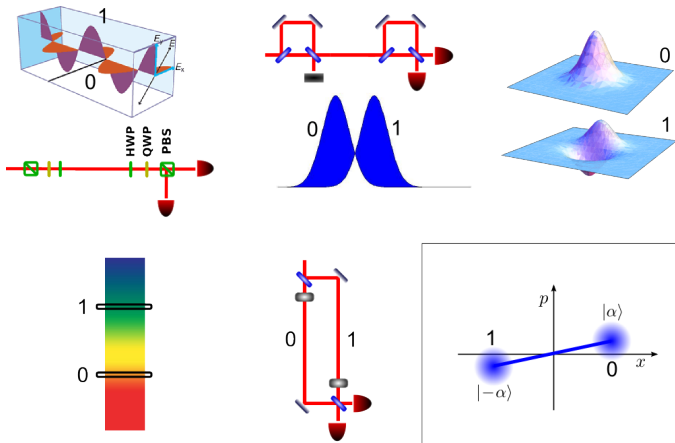
Kódování kvantových bitů (qubitů)

- Dvumódové vs. jednomódové kódování



Kódování kvantových bitů (qubitů)

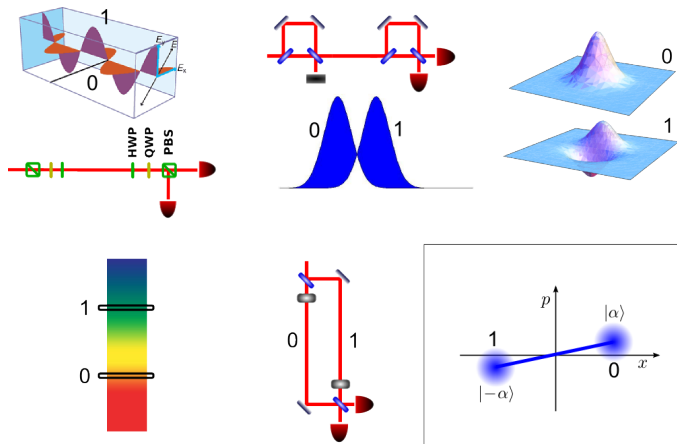
- Dvumódové vs. jednomódové kódování



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

Kódování kvantových bitů (qubitů)

- Dvumódové vs. jednomódové kódování



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

Logické funkce qubitů

- Klasická logická funkce

$$f(x) : \quad f(0), f(1)$$

$$f(x, y) : \quad f(0, 0), f(0, 1), f(1, 0), f(1, 1)$$

Logické funkce qubitů

- Klasická logická funkce

$$f(x) : \quad f(0), f(1)$$

$$f(x, y) : \quad f(0, 0), f(0, 1), f(1, 0), f(1, 1)$$

- Kvantová logická funkce

$$f(x) : \quad f(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha f(|0\rangle) + \beta f(|1\rangle)$$

Logické funkce qubitů

- Klasická logická funkce

$$f(x) : \quad f(0), f(1)$$

$$f(x, y) : \quad f(0, 0), f(0, 1), f(1, 0), f(1, 1)$$

- Kvantová logická funkce

$$f(x) : \quad f(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha f(|0\rangle) + \beta f(|1\rangle)$$

$$f(x, y) : \quad f(\alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \delta|11\rangle) = \\ \alpha f(|00\rangle) + \beta f(|01\rangle) + \gamma f(|10\rangle) + \delta f(|11\rangle)$$

Logické funkce qubitů

- Klasická logická funkce

$$f(x) : f(0), f(1)$$

$$f(x, y) : f(0, 0), f(0, 1), f(1, 0), f(1, 1)$$

- Kvantová logická funkce

$$f(x) : f(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha f(|0\rangle) + \beta f(|1\rangle)$$

$$f(x, y) : f(\alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \delta|11\rangle) = \\ \alpha f(|00\rangle) + \beta f(|01\rangle) + \gamma f(|10\rangle) + \delta f(|11\rangle)$$

Kvantová paralelita

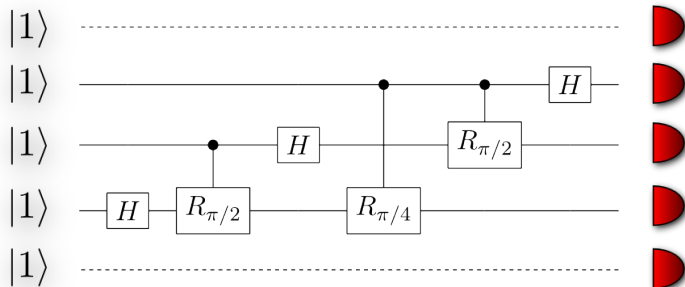
Kvantové algoritmy

- Výpočetní algoritmy efektivnější než klasické realizace
 - Shorův algoritmus (faktorizace) → prolomení RSA šifry
 - Groverův algoritmus (prohledávání neseříděné databáze)
 - simulace kvantových systémů (chemie, nanotechnologie)

Kvantové algoritmy

- Výpočetní algoritmy efektivnější než klasické realizace
 - Shorův algoritmus (faktorizace) → prolomení RSA šifry
 - Groverův algoritmus (prohledávání neseříděné databáze)
 - simulace kvantových systémů (chemie, nanotechnologie)
- Komunikační protokoly
 - kvantová kryptografie
 - kvantová teleportace
 - distribuce kvantové provázanosti → kvantové opakovače

Architektura kvantového počítače

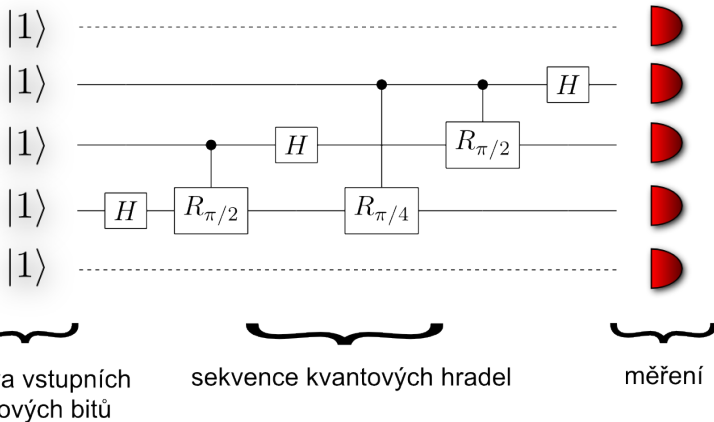


příprava vstupních kvantových bitů

sekvence kvantových hradel

měření

Architektura kvantového počítače



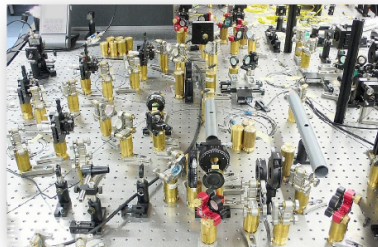
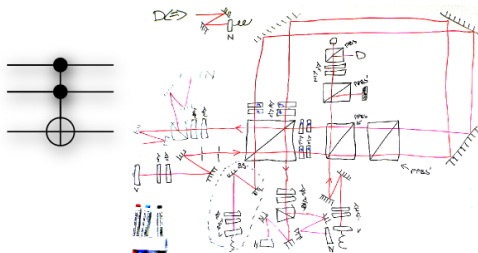
Škálovatelnost? pravděpodobnost úspěchu $\sim \eta^N$
Koherence? schopnost interference fotonů/qubitů

Realizace logických kvantových obvodů

- Hadamardovo hradlo $|0\rangle \rightarrow |0\rangle + |1\rangle$, $|1\rangle \rightarrow |0\rangle - |1\rangle$



- CCNOT hradlo



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**

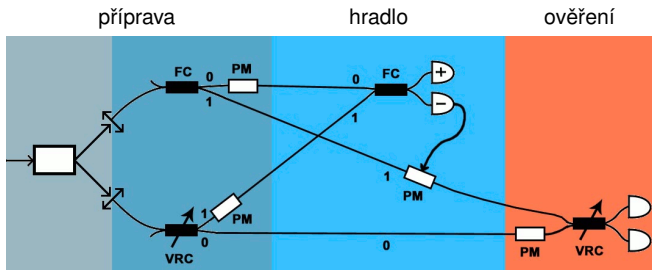
[Vidal, Masanes & Cirac, Physical Review Letters 88, 047905 (2002)]

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

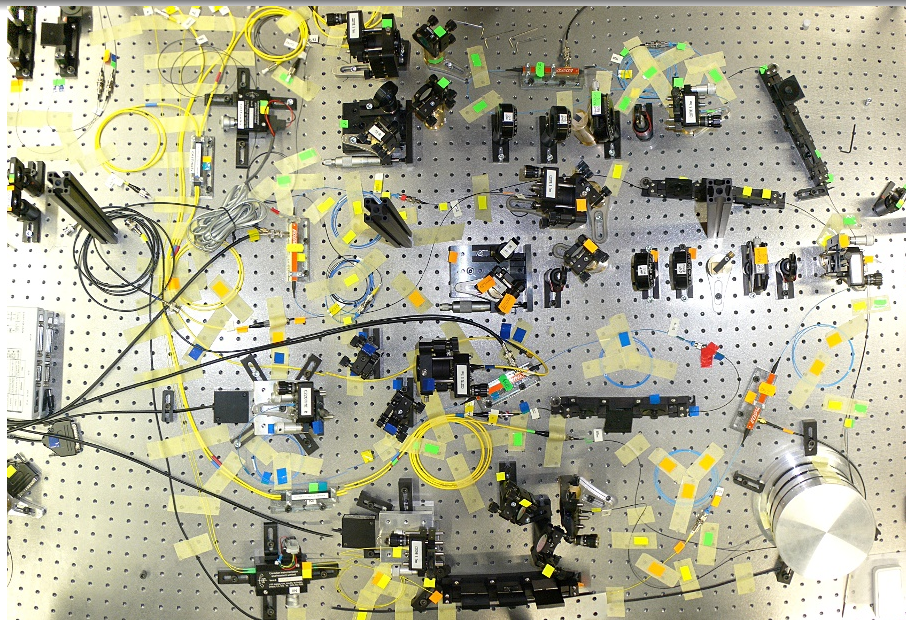
- $|\psi_d\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\psi_p\rangle = (|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle)/\sqrt{2}$
 $|\psi_d\rangle_{\text{OUT}} = \alpha|0\rangle \pm \beta e^{i\phi}|1\rangle$

- Oprava chybných výsledků pomocí dopředné vazby

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



Programovatelné fázové hradlo



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
 - Vlnově-částicová dualita světla
- 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 za pozornost!

