

# Příprava, manipulace a detekce jednotlivých fotonů

**Miroslav Ježek**



Katedra optiky  
Přírodovědecká fakulta  
Univerzita Palackého v Olomouci



Brno, 3. 11. 2011



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

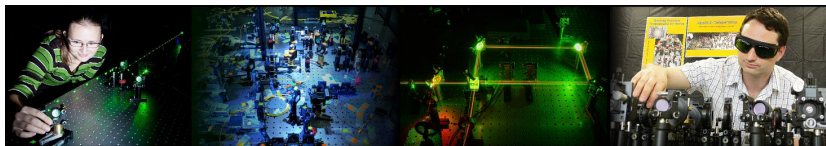


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# Tým laboratoře QOLO a spolupráce

## Experimentální tým

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



## Zahraniční spolupráce

- 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
- 4 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 Závěr
  - Shrnutí

# Motivace

- Fundamentální otázky: dualita, neklasické stavy světla
- Kvantová komunikace: distribuce kvantového klíče
- Kvantové počítače: kvantový bit (qubit)  
 $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$   
dvoumódové vs. jednomódové kódování
- Kvantová metrologie: SQL, super-sensitivita

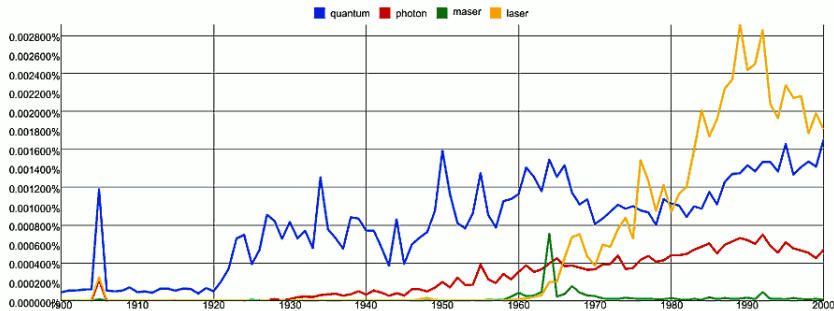
# Vlnově-částicová dualita světla

## Quantum, photon, maser, laser...

Google books Ngram Viewer

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

between  and  from the corpus  with smoothing of .



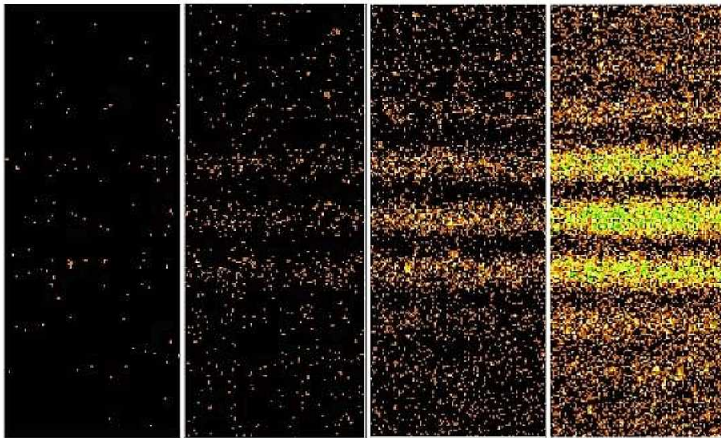
# Vlnově-částicová dualita světla

G. I. TAYLOR *Proc. Camb. Philos. Soc.*, **15** (1909), 114–115  
**Interference Fringes with Feeble Light**

Thomson however suggested that if the intensity of light in a diffraction pattern were so greatly reduced that only a few of these indivisible units of energy should occur on a Huygens zone at once the ordinary phenomena of diffraction would be modified. Photographs were taken of the shadow of a needle, the source of light being a narrow slit placed in front of a gas flame. The intensity of the light was reduced by means of smoked glass screens.

# Vlnově-částicová dualita světla

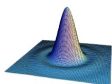
Zdroj jednotlivých fotonů na bázi NV centra v diamantu  
Fresnelův hranol, doba měření  $T=10, 100, 500, 2000$  s





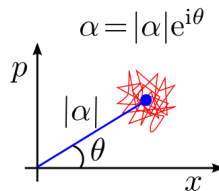
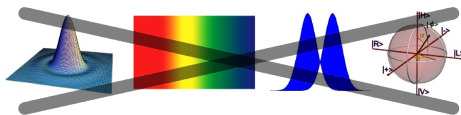
# Kvantový popis světla

- Mód světla



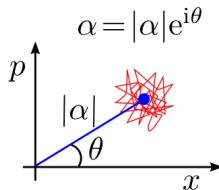
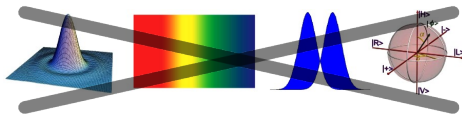
# Kvantový popis světla

- 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  $N = a^\dagger a$

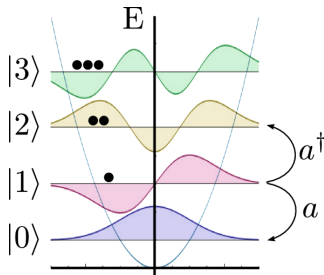
Fockovy stavy:  $N|n\rangle = n|n\rangle$

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

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

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

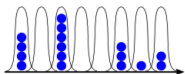
bosony  $[a, a^\dagger] = aa^\dagger - a^\dagger a = 1$



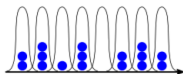
# Fotorozdělení

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

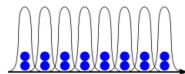
termální zdroj



laser



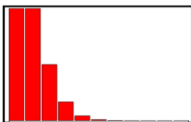
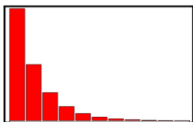
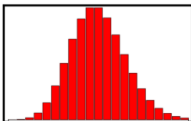
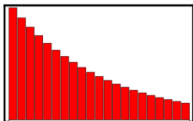
???



Bose - Einstein

Poisson

Fock

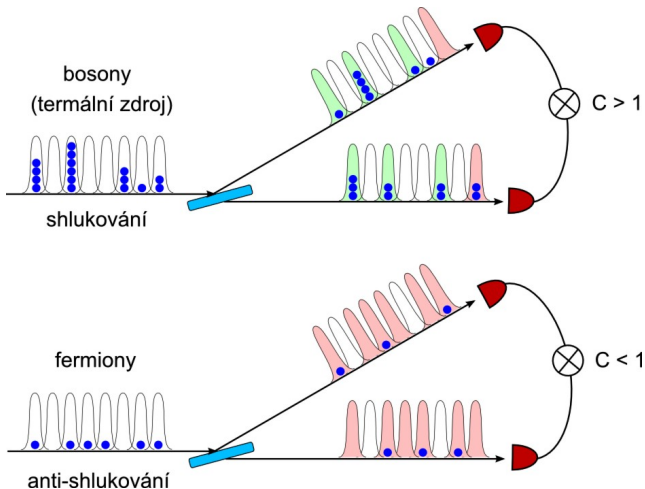
 $\langle N \rangle = 1$  $\langle N \rangle = 10$ 

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

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

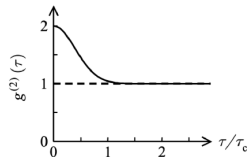
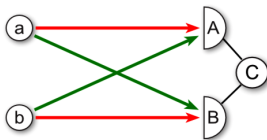
$$\text{Var}[N] = 0$$

# Korelační funkce

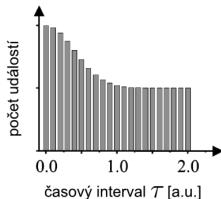
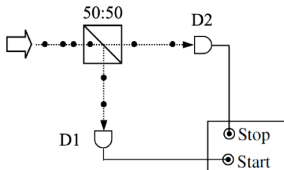


# Korelační funkce $g^{(2)}$

- 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, kompatibilní s kvantovou teorií

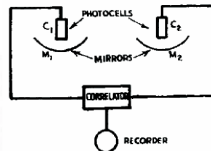
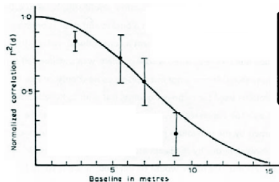
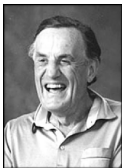


- Intenzita  $\rightarrow$  počet fotonů:  $g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \langle n_2(t+\tau) \rangle}$

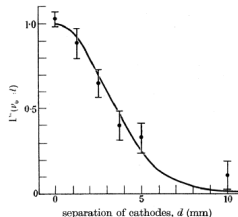
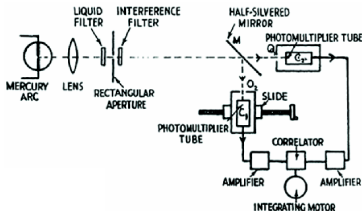


# Hanbury-Brownův a Twissův experiment

- Robert Hanbury-Brown & Richard Q. Twiss, 1954-1955: měření úhlového průměru hvězd intenzitním interferometrem

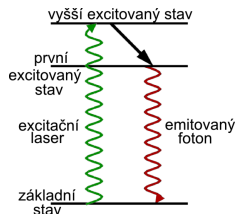


- 1956: demonstrace shlukování fotonů z termálního zdroje

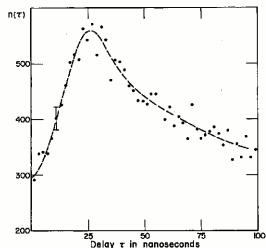
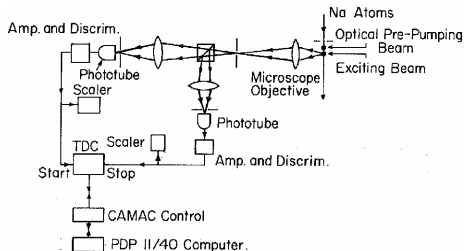


# Anti-shlukování fotonů

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



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

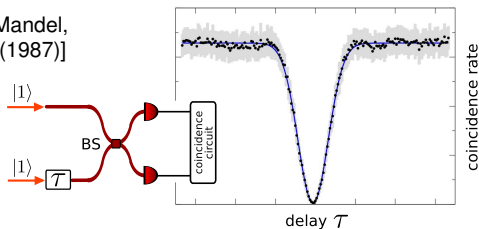




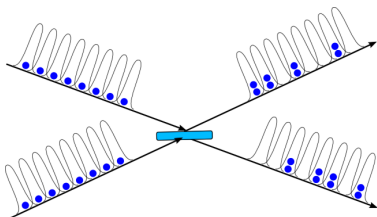
# Interference fotonů

- HOM interference

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



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

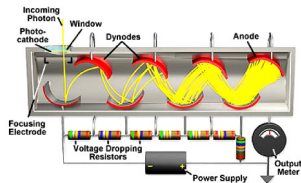
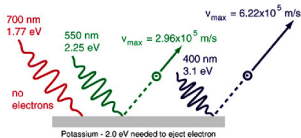


# Obsah

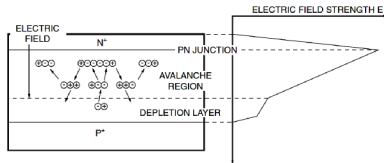
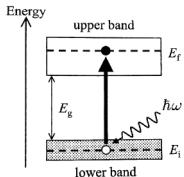
- 1 Úvod
  - Motivace
  - Statistický a kvantový popis světla
- 2 **Detektory fotonů**
  - Detekce jednotlivých fotonů
  - Účinnost detekce
  - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
  - Jednotlivé emitory
  - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Závěr
  - Shrnutí

# Fotoelektrický jev

- Vnější fotoelektrický jev, fotokatoda, fotonásobič

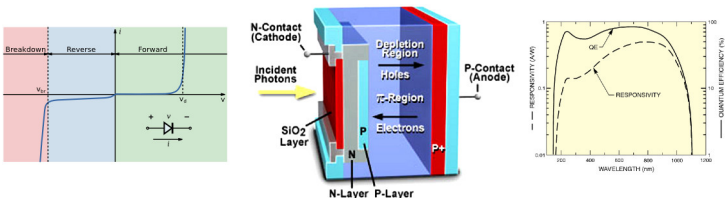


- Vnitřní fotoelektrický jev v polovodičích  
Sekundární emise  $\rightarrow$  lavinový jev, lavinová fotodioda

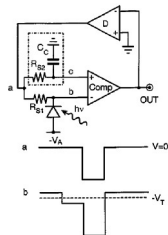
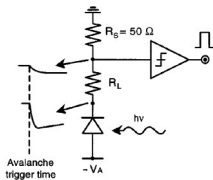
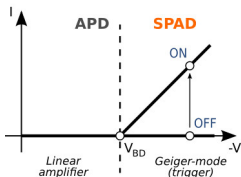


# Lavinová fotodioda

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

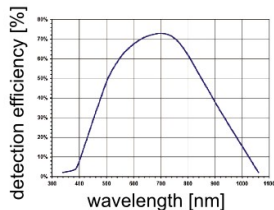
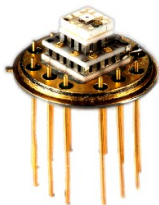


- APD v lineárním módu vs. Geigerův režim (SPAD)  
pasivní vs. aktivní zhášení [S. Cova et al. Applied Optics 35, 1956 (1996)]

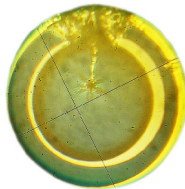
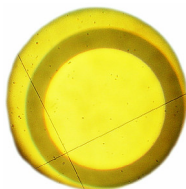


# Komerční SPAD

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

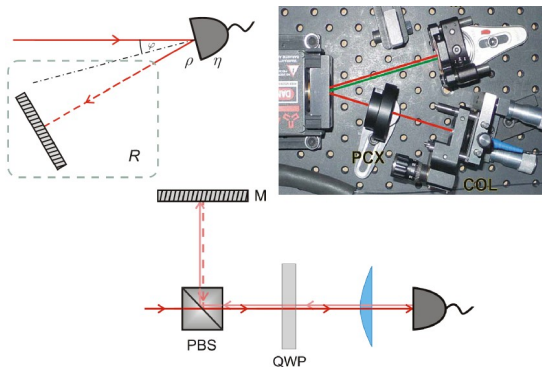


- Neschopnost rozlišit počet fotonů (stejně jako ostatní SPAD)
- Malý dynamický rozsah:  
temné detekce  $50\text{-}500\ \text{s}^{-1}$ , saturace  $1\text{-}10\ \text{M s}^{-1}$



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

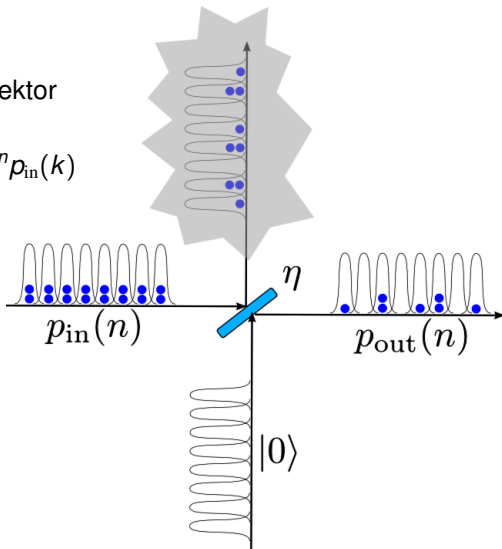


- Větší zisk pravděpodobně pro kratší vlnové délky nebo v kombinaci s interferenčním filtrem [P. Kwiat et al. J. Mod. Opt. 58, 306 (2011)]

# 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)?

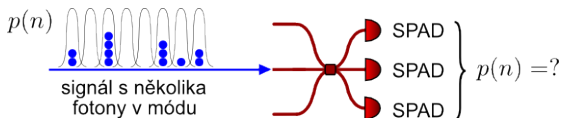


# Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

**multiplex** – časový, prostorový, ...

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

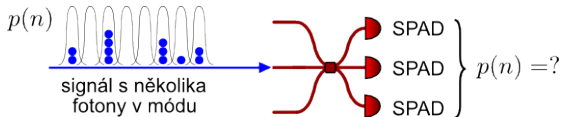


# Detekce fotorozdělení

- Jak měřit fotorozdělení binárními fotodetektory (SPAD)?

**multiplex** – časový, prostorový, ...

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

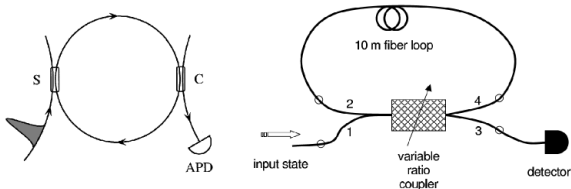


- Smyčkový detektor

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

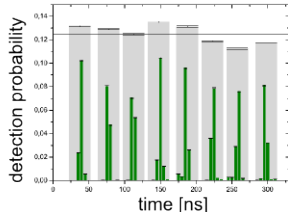
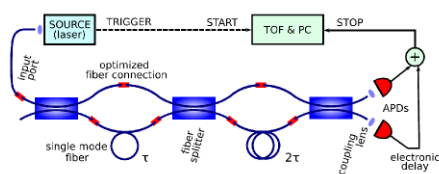
[J. Řeháček et al. Phys. Rev. A 67, 061801(R) (2003)]

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



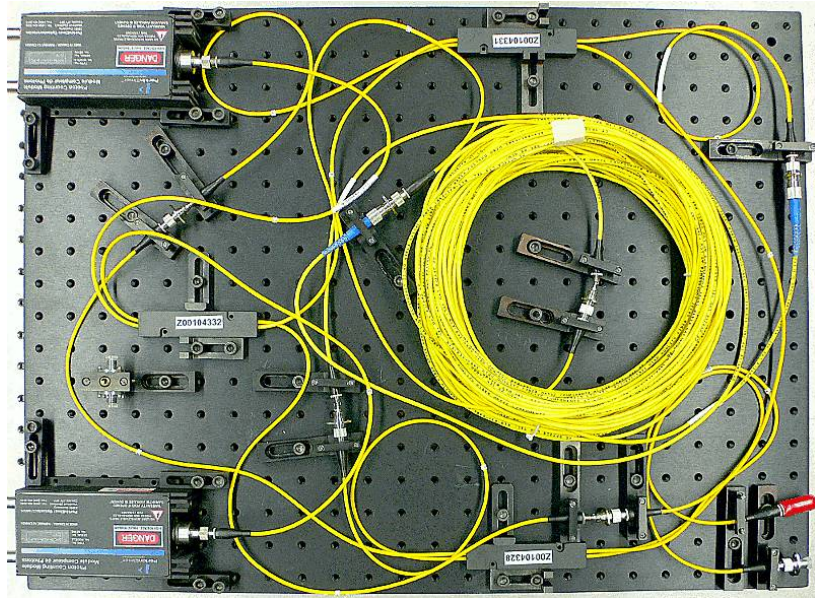
# Detekce fotorozdělení – časový multiplex

- 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

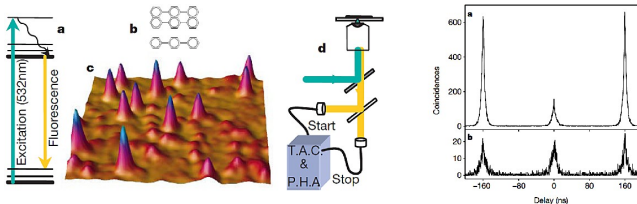
- 1 Úvod
  - Motivace
  - Statistický a kvantový popis světla
- 2 Detektory fotonů
  - Detekce jednotlivých fotonů
  - Účinnost detekce
  - Rozlišení počtu fotonů
- 3 Příprava jednotlivých fotonů
  - Jednotlivé emitory
  - Nerezonanční interakce – parametrická konverze
- 4 Závěr
  - Shrnutí

# Generace fotonů z jednotlivých emitorů

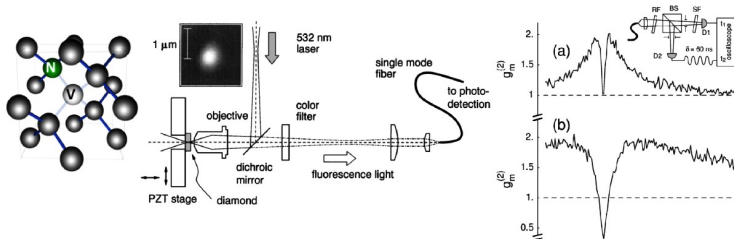
- Fluorescence, fotoluminiscence, elektroluminiscence
- Předpoklad: jeden individuální emitor či atom
  - lokalizace/chycení přirozeného atomu nebo molekuly
  - umělý "atom" v podobě vakance nebo kvantové tečky
  - – pevnolátkové systémy při pokojové teplotě / chlazené (6 K)
- Opticky: konfokální mikroskop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

# Generace fotonů z jednotlivých emitorů

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

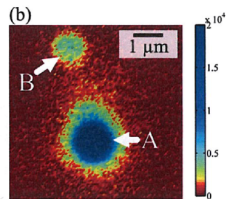
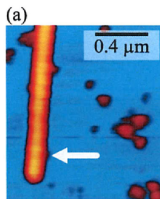
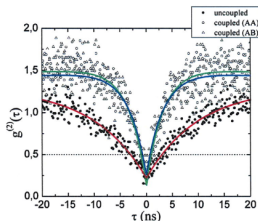
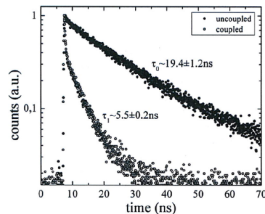
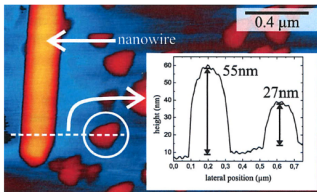


- NV centra v diamantu: luminiscence NV defektů 1990-2000 celistvý materiál či nano částice v nízké koncentraci [C. Kurtsiefer et al. Phys. Rev. Lett. 85, 290 (2000)]



# Generace fotonů z jednotlivých emitorů

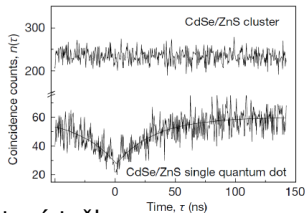
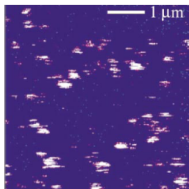
- NV centra v nano částicích diamantu, stříbrné nano drátky  
manipulace pomocí AFM + navázání do plazmonového vlnovodu  
DTU Lyngby [A. Huck et al. Phys. Rev. Lett. 106, 096801 (2011)]



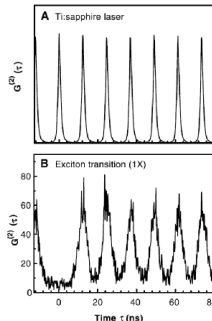
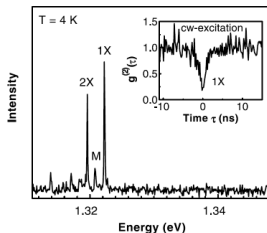
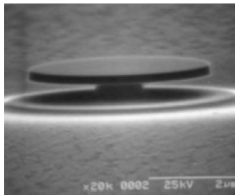


# Generace fotonů z jednotlivých emitorů

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

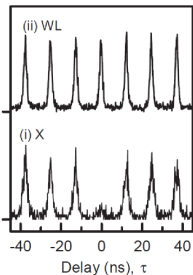
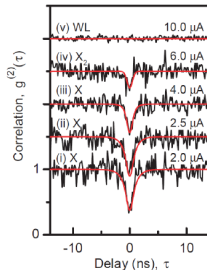
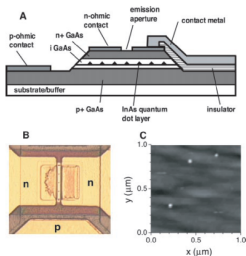


- InAs/GaAs kvantové tečky  
toroidní WGM mikro-rezonátoru,  $T=4$  K  
[P. Michler et al. Science 290, 2282 (2000)]



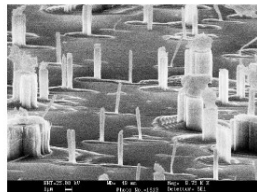
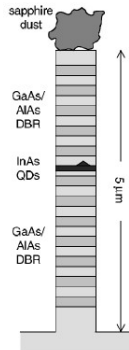
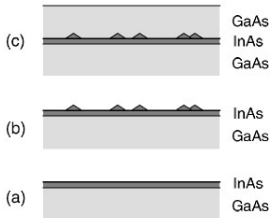
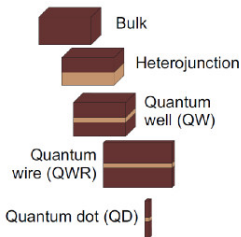
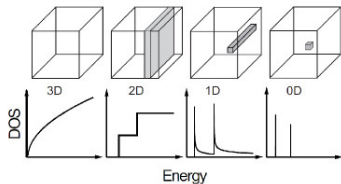
# Generace fotonů z jednotlivých emitorů

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



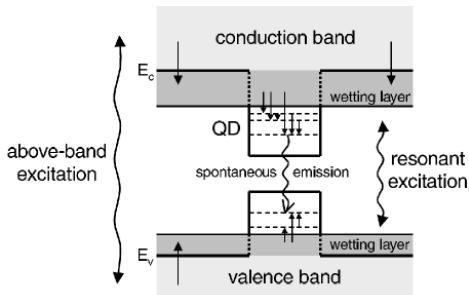
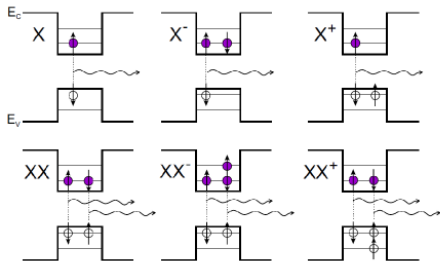
# Kvantové tečky InAs/GaAs (Innsbruck)

## Princip a příprava



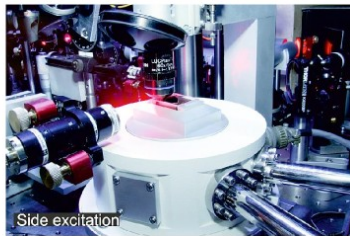
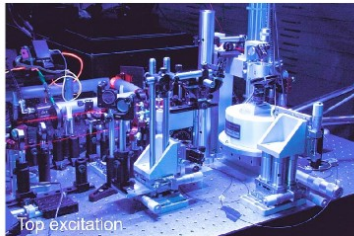
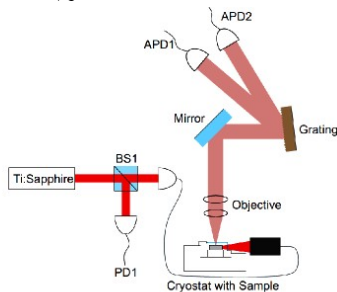
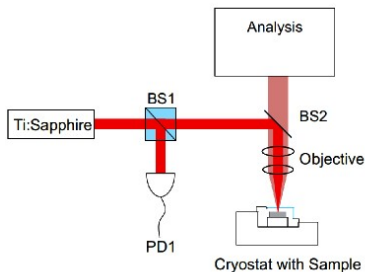
# Kvantové tečky InAs/GaAs (Innsbruck)

- Energetické hladiny a principy excitace exciton & biexciton, triony (pnutí)



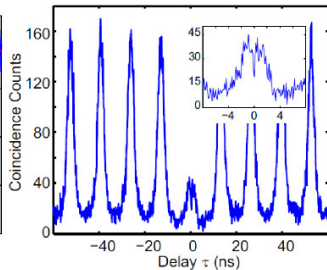
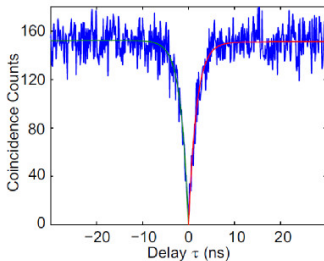
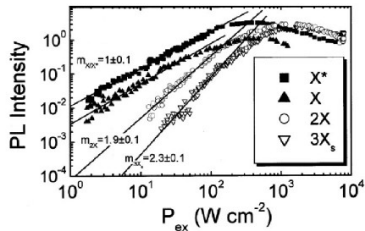
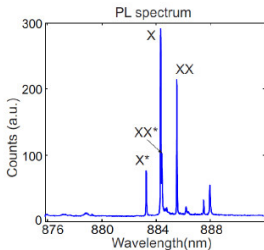
# Kvantové tečky InAs/GaAs (Innsbruck)

- Optické uspořádání, detekční účinnost  $\lesssim 2\%$

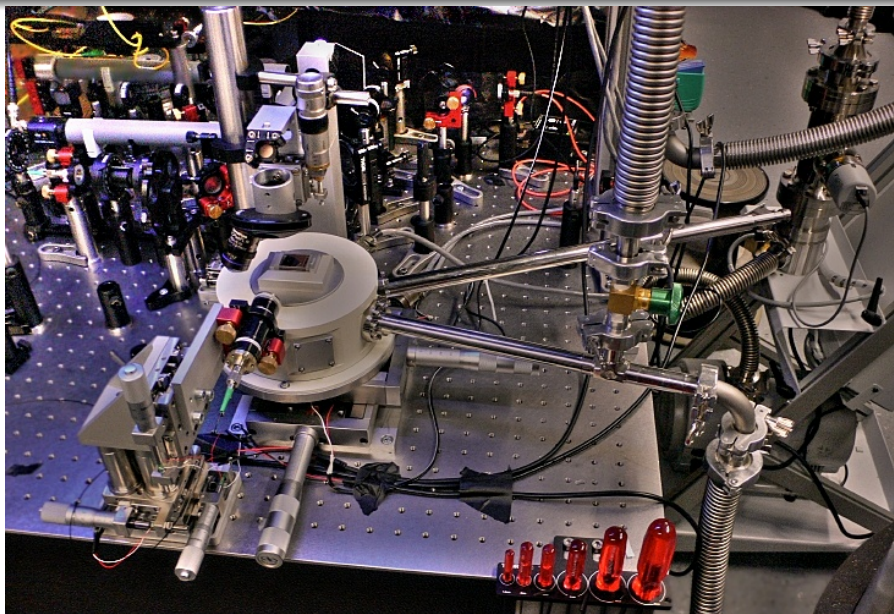


# Kvantové tečky InAs/GaAs (Innsbruck)

- Spektrum a HBT ( $g^{(2)}$  funkce)



# Kvantové tečky InAs/GaAs (Innsbruck)



# 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**



# 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**
- Pokračování v další části přednáškového cyklu

# 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 Závěr
  - Shrnutí

# Shrnutí

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

Děkuji za pozornost!

