

Subtrakce fotonů ze stlačeného světla

a optická Schrödingerova kočka

Miroslav Ježek



Katedra optiky
Přírodovědecká fakulta
Univerzita Palackého v Olomouci



Olomouc, 25. 6. 2012



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

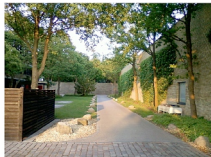


OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Dánská technická univerzita (DTU), Lyngby



DTU – Skupina kvantové informatiky, 2009

- prof. Ulrik L. Andersen
- Cat Lab: Anders Tipsmark, Miroslav Ježek (Ruifang Dong, Christian Kothe-Termén)
- NV Lab: Abdul Shakoor, Shailesh Kumar, Alexander Huck
- CV QIP Lab: Lars Madsen, Mario A. Usuga, Mikael Lassen



DTU – Skupina kvantové informatiky, 2011



Obsah

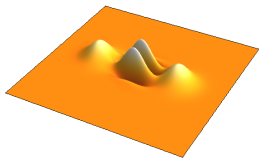
- 1 Úvod
 - Motivace
- 2 Experiment
 - Základní schéma experimentu
 - Generace druhé harmonické
 - Generace stlačení
 - Homodynní detektor
 - Stlačené vakuum
 - Subtrakce fotonu
- 3 Závěr
 - Shrnutí

Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
- 2 Experiment
 - Základní schéma experimentu
 - Generace druhé harmonické
 - Generace stlačení
 - Homodynní detektor
 - Stlačené vakuum
 - Subtrakce fotonu
- 3 Závěr
 - Shrnutí

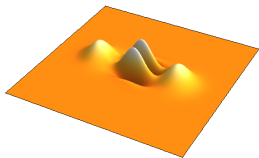
Optická Schrödingerova kočka

- Kvantová superpozice „klasických objektů“
– koherentních stavů $|\alpha\rangle + e^{i\varphi} |-\alpha\rangle$

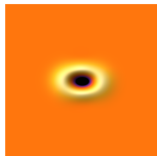
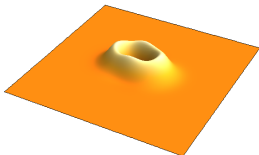


Optická Schrödingerova kočka

- Kvantová superpozice „klasických objektů“
– koherentních stavů $|\alpha\rangle + e^{i\varphi} |-\alpha\rangle$

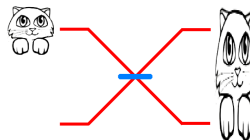
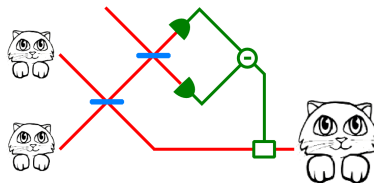


- Schrödingerovo kotě \approx stlačený foton



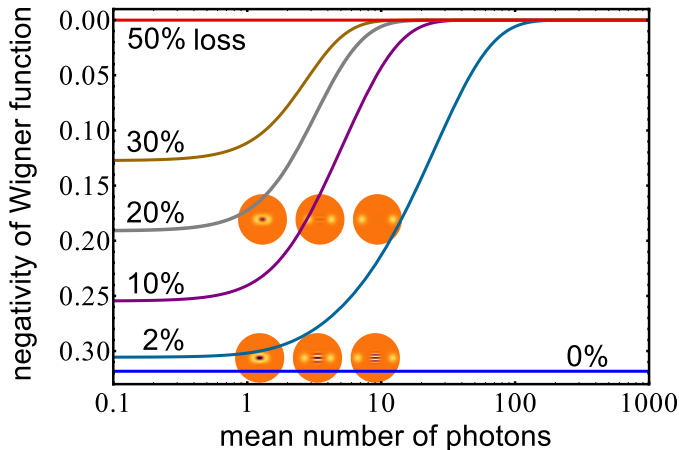
Dělením kočky můžeme...

- Vytvořit větší kočku
A.P.Lund et al., PRA 2004
H.Jeong et al., PRA 2005
- Získat kvantovou provázanost
a testovat Bellovy nerovnosti
M.Stobinska et al., PRA 2007
 $|\alpha| > 0,842$
- Teleportovat kvantové stavy
A.M.Branczyk, T.C.Ralph, PRA 2008
- Realizovat kvantová hradla



Stabilita "makroskopických" optických superpozic

- Vliv ztrát \sim střední počet fotonů
- Vliv přidaného šumu



Motivace

- Jak makroskopický může být stav s měřitelnou neklasičností, přesněji kvantovým negaussovským charakterem?

Motivace

- Jak makroskopický může být stav s měřitelnou neklasičností, přesněji kvantovým negaussovským charakterem?
- Jednotlivé fotony a NOON stavy
 - 1 foton: max 1 M/s, pravděpodobnost 10^{-3} v okně 1 ns
 - 1 foton v pulzu měřený HD: pravděpodobnost max 10^{-4}
 - 2 fotony v pulzu měřené HD: pravděpodobnost max 10^{-8}

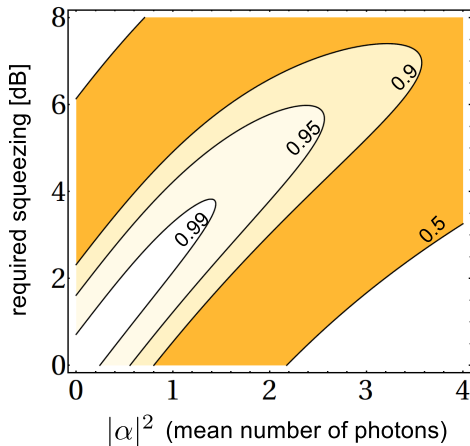
Motivace

- Jak makroskopický může být stav s měřitelnou nekласičností, přesněji kvantovým negaussovským charakterem?
- Jednotlivé fotony a NOON stavy
 - 1 foton: max 1 M/s, pravděpodobnost 10^{-3} v okně 1 ns
 - 1 foton v pulzu měřený HD: pravděpodobnost max 10^{-4}
 - 2 fotony v pulzu měřené HD: pravděpodobnost max 10^{-8}
- Stlačené stavy
 - CW: 13 dB, střední počet fotonů 4,5 v časovém modu
 - pulzní: 4-5 dB, cca 0.3 fotonu v pulzu (100 fs - 1 ps)
 - pulzní OPA deamplifikace: až 12 dB, problém sladění modů
 - **gaussovské**

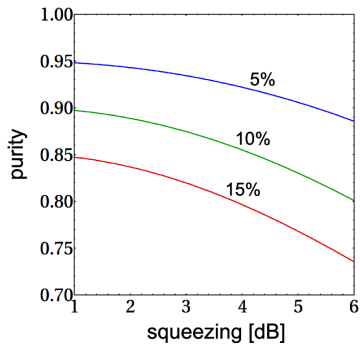
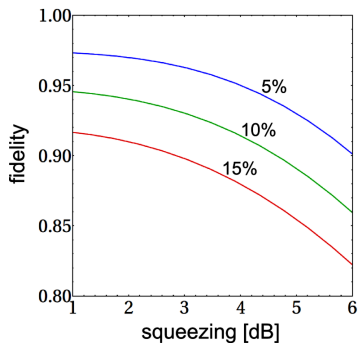
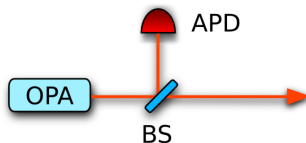
Motivace

- Jak makroskopický může být stav s měřitelnou nekласičností, přesněji kvantovým negaussovským charakterem?
- Jednotlivé fotony a NOON stavy
 - 1 foton: max 1 M/s, pravděpodobnost 10^{-3} v okně 1 ns
 - 1 foton v pulzu měřený HD: pravděpodobnost max 10^{-4}
 - 2 fotony v pulzu měřené HD: pravděpodobnost max 10^{-8}
- Stlačené stavy
 - CW: 13 dB, střední počet fotonů 4,5 v časovém modu
 - pulzní: 4-5 dB, cca 0.3 fotonu v pulzu (100 fs - 1 ps)
 - pulzní OPA deamplifikace: až 12 dB, problém sladění modů
 - **gaussovské**
- **Stlačené vakuum s odečteným fotonem (stlačený foton)**
 - střední počet fotonů 1-2 v pulzu (100 fs - 1 ps)
 - pravděpodobnost 5×10^{-3}

Subtrakce fotonu vs. Schrödingerova kočka



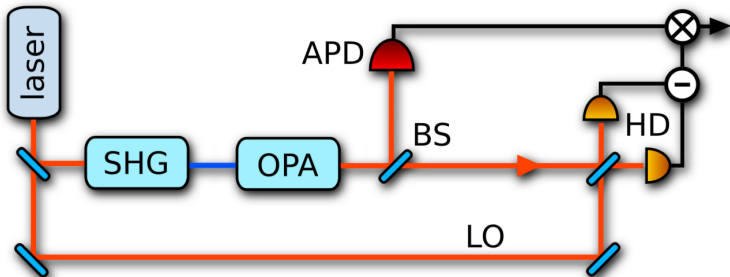
Realistická subtrakce fotonu



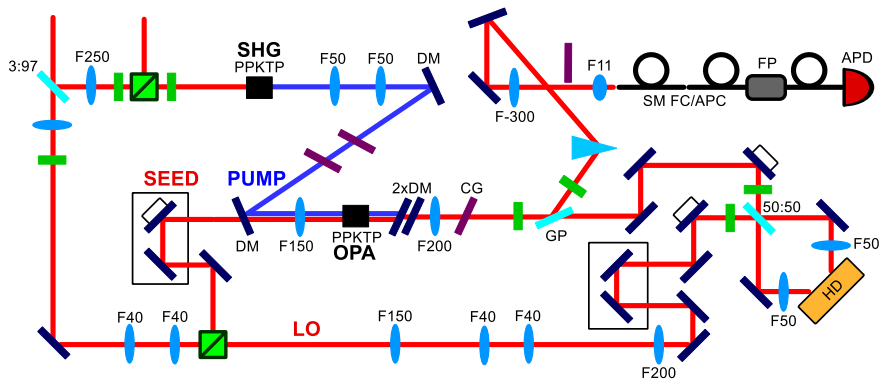
Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
- 2 Experiment
 - Základní schéma experimentu
 - Generace druhé harmonické
 - Generace stlačení
 - Homodynní detektor
 - Stlačené vakuum
 - Subtrakce fotonu
- 3 Závěr
 - Shrnutí

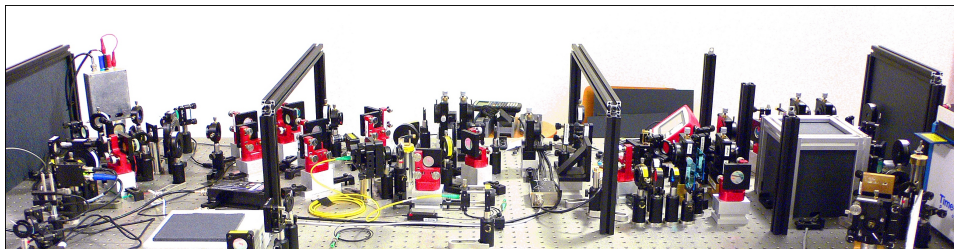
Základní schéma experimentu



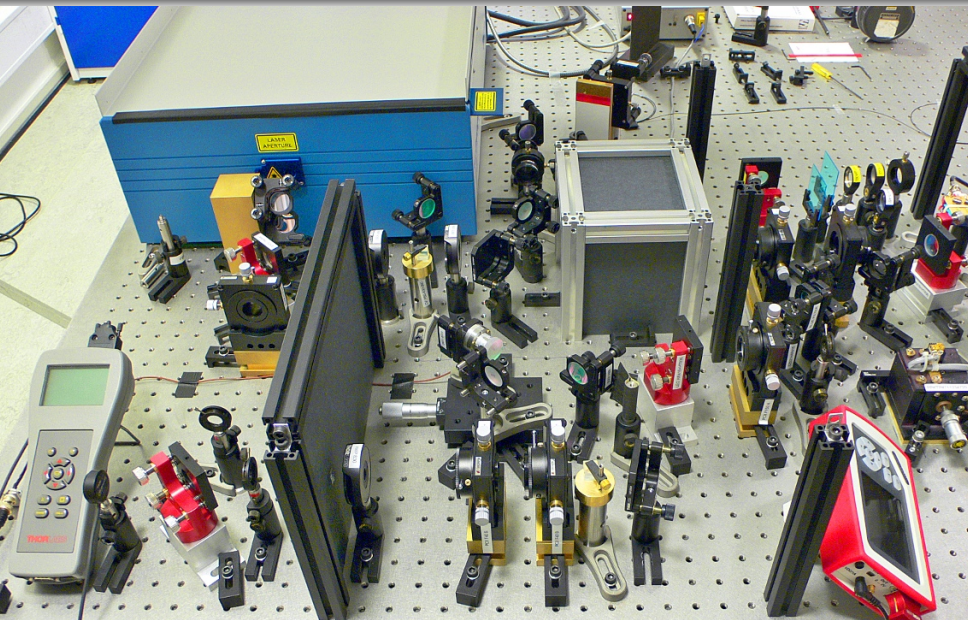
Prostorový a svazkový návrh



Experimentální uspořádaní



Experimentální uspořádání – laser a SHG



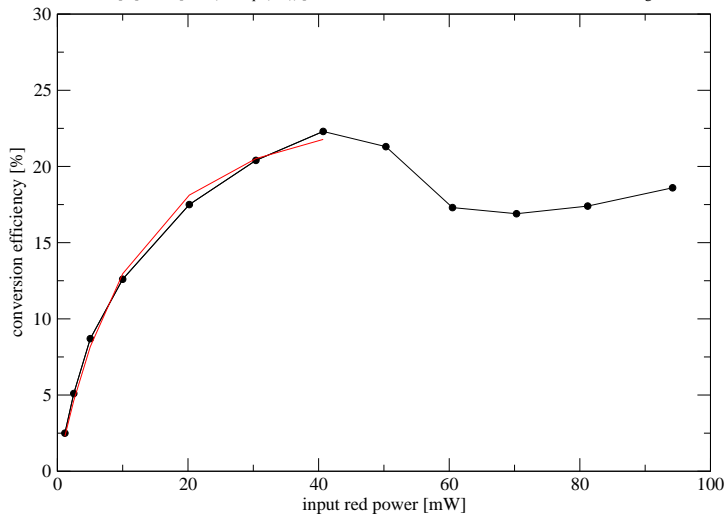
SHG

- Periodicky polovaný KTP
 - návrh pro centrální vlnovou délku 830 nm
 - perioda $\Lambda \sim 11 \mu\text{m}$
 - délka 3 mm
 - fázové sladění typ 0

SHG – optimální fokusace vs. gray-tracking

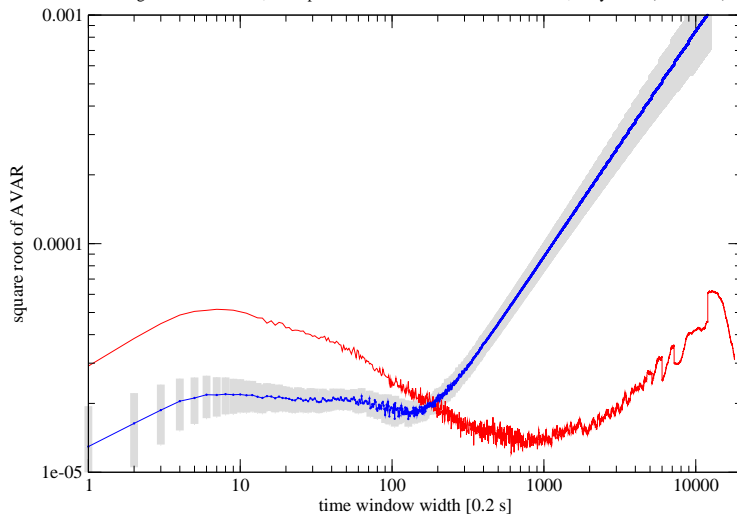
SHG conversion efficiency versus input power, F40 lens, steady state after 24 h

$\eta [\%] = T * [\tanh(G * \sqrt{P_{in}})]^2$ where $T=23.8\%$ is linear transmittance and G is SHG gain



SHG – optimální fokusace vs. gray-tracking

Allan variance of Tiger-CD-ps laser power @830 nm (red) and SHG power @415 nm (blue) during 2 h measurement; SHG power decreases from 30.0 to 25.5 mW, ie by 15% (6.10.2009)

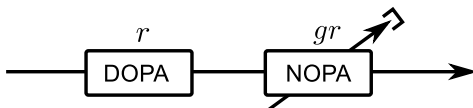


SHG – finální parametry

- Laser: Tiger-CD-ps (Time-Bandwidth Products)
 - délka pulzu cca 5 ps
 - průměrný výkon 50–60 mW
 - centrální vlnová délka 830 nm
 - šířka spektra 0,2 nm
 - opakovací frekvence 815 kHz

- SHG
 - průměrný výkon 20–25 mW
 - účinnost 40–42%
 - centrální vlnová délka 415 nm

OPA - zjednodušený model



Střední hodnoty kvadraturních operátorů

$$\langle X \rangle = x_0 e^{-r} \cosh(gr)$$

$$\langle P \rangle = p_0 e^r \cosh(gr)$$

Měřené zisky zeslabení a zesílení SEED signálu

$$g_{\min} = e^{-2r} \cosh^2(gr), \quad g_{\max} = e^{2r} \cosh^2(gr)^2$$

Parametry modelu odhadnuté z měřených zisků

$$r = \frac{1}{4} \ln \frac{g_{\max}}{g_{\min}}, \quad g = \frac{\operatorname{arccosh} \sqrt[4]{g_{\min} g_{\max}}}{r}$$

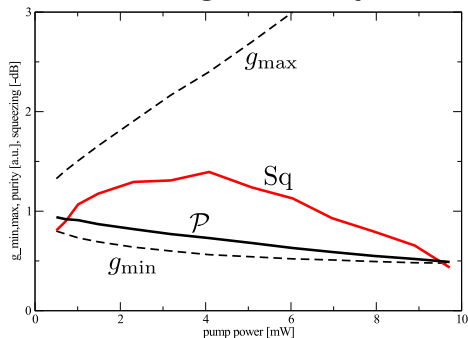
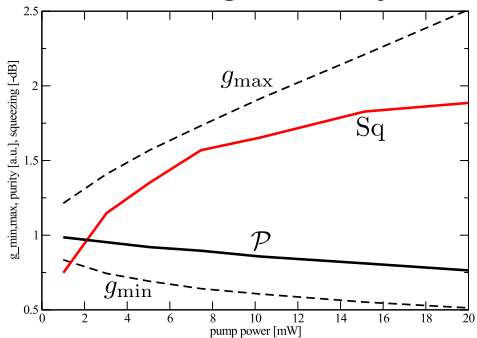
Předpokládané stlačení a purita odhadnuté z měřených zisků

$$S_q = 10 \log(-1 + g_{\min} + \sqrt{g_{\min} g_{\max}})$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{g_{\max}^3 g_{\min}} + \sqrt{g_{\max} g_{\min}^3} + g_{\max} (2g_{\min} - 1) - 2\sqrt{g_{\max} g_{\min}} - g_{\min} + 1}}$$

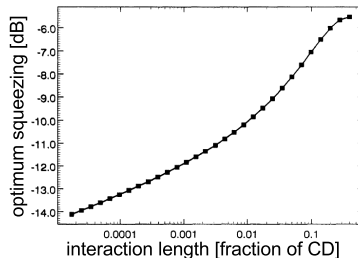
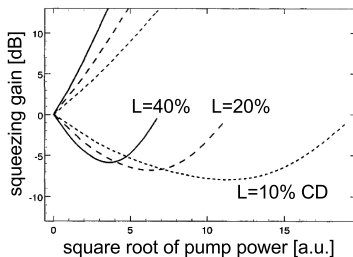
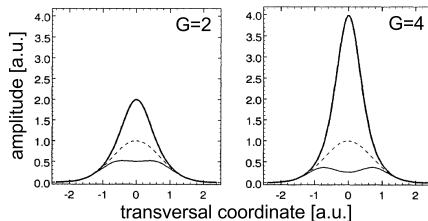
OPA – optimalizace fokusace a dalších parametrů

- Parametry: fokusace, teplota, geometrie
- Metody:
 - SEED zeslabení/zasílení
 - PUMP+SHG(SEED) interference

F150, 80 μm @ 830 nm, 40 degF250, 120 μm @ 830 nm, 41 deg

OPA – optimální fokusace vs. gain-induced diffraction

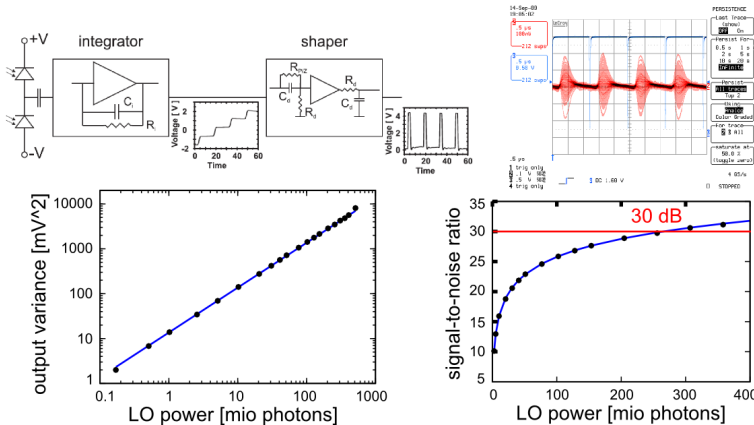
A. La Porta, R. E. Slusher,
Squeezing limits
at high parametric gains,
PRA 44, 2013 (1991)



Rosa Tualle-Brouri et al., PRA 80, 013806 (2009)

Homodynní detektor s časovým rozlišením

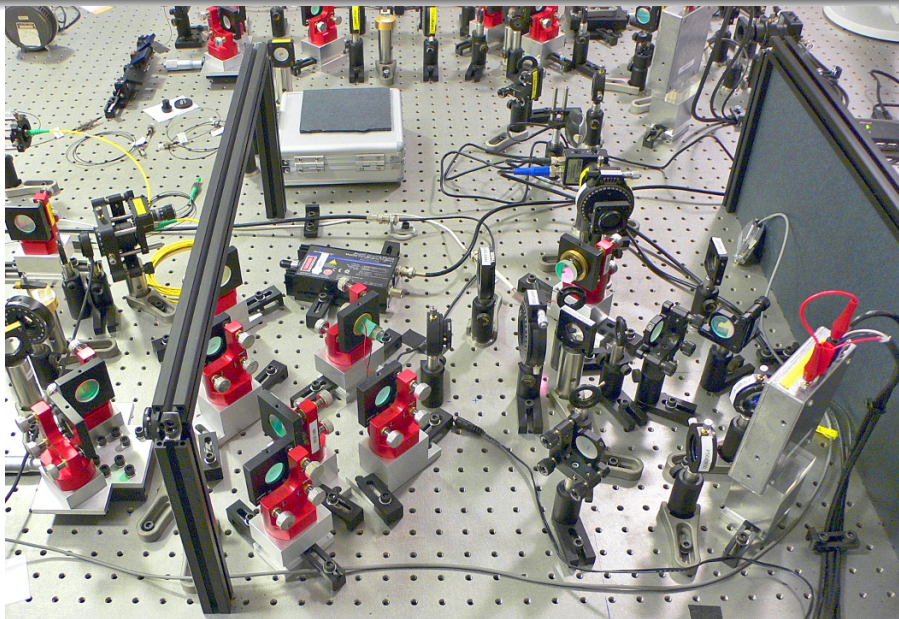
- Hamamatsu S3883, kvantová účinnost cca 93% @ 830 nm
- Nábojově citlivý zesilovač: BW 1,6 MHz, SNR 30 dB



Přehled HD s časovým rozlišením

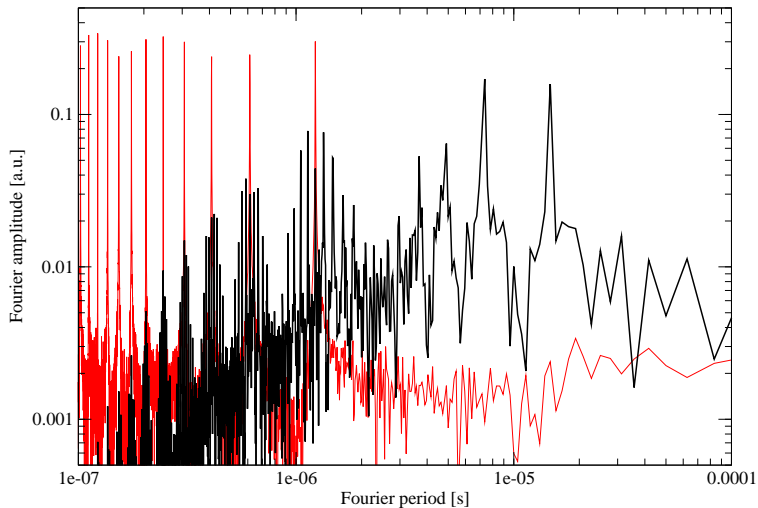
- Nábojově citlivý zesilovač: $BW \lesssim 2$ MHz
 - 800 kHz, 9 dB, Konstanz, [Opt. Lett. 26, 1714 (2001)]
 - 800 kHz, 14 dB, Orsy
 - 1,6 MHz, 30 dB, Lyngby 2009-10, [PRA 84, 050301(R) (2011)]
- Transimpedanční zesilovač: $BW \times SNR \lesssim C$
 - AC 80 MHz, 7-9 dB, Florence [J. Opt. Soc. Am. B 19, 1189 (2002)]
 - 80 MHz (250 MHz), 7,5 dB, Tokyo [Opt. Lett. 33, 1458 (2008)]
 - DC-50 MHz, 12 dB, Olomouc [Appl. Opt. 48, 2884 (2009)]
 - 80 MHz, 14 dB, 85%, Calgary [Opt. Lett. 34, 2739 (2009)]

Experimentální uspořádání: HD



Vyvážení HD – spektrum

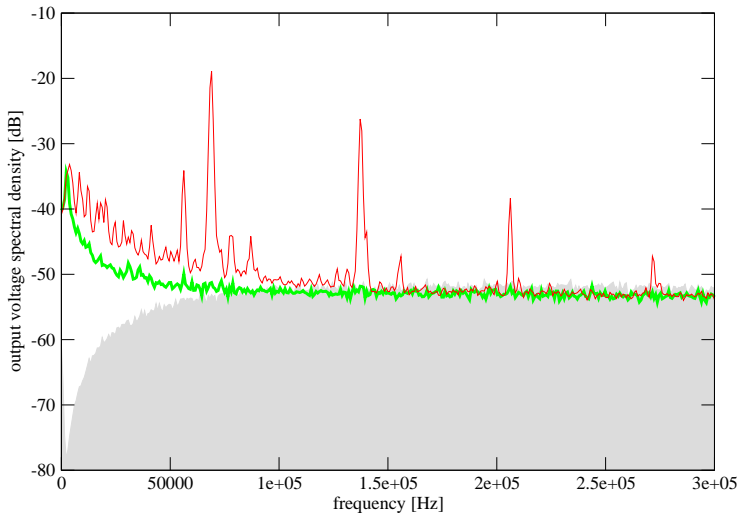
DFT of CD trigger (red) and HD differential signal (black)



Vyvážení HD – relaxační oscilace laseru

Noise induced by misaligned cavity dumper (red thin)

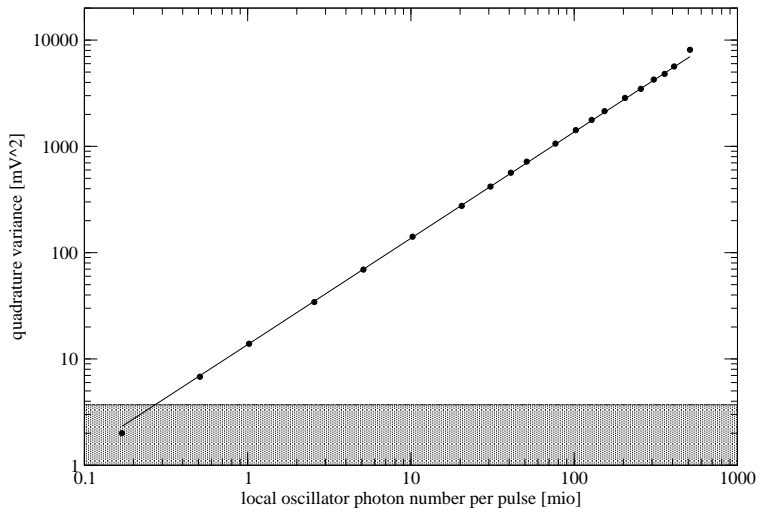
9.9.2009; Tiger-CD-ps laser, Nathan1 detector 30-300kHz + Femto HCA-1M-1M amp; electronic noise (gray shaded); with CD aligned (green thick)



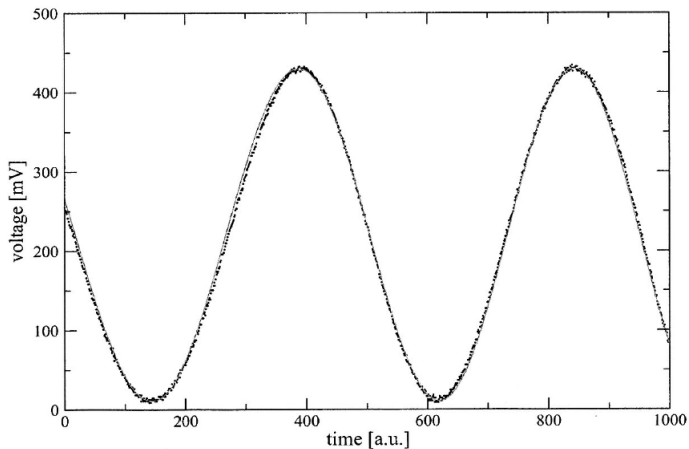
Vyvážení HD – finální linearita

Shot-noise variance linearity measured within 30 dB range of LO power

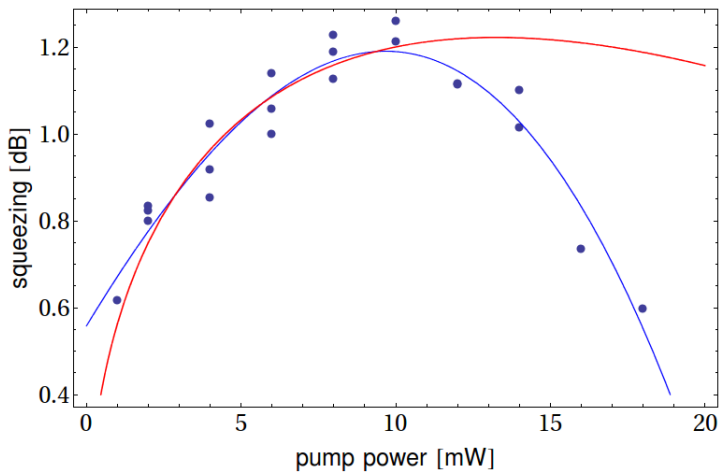
gain: $13.6 \text{ mV}^2 / \text{mio}$ per puls; electronic noise: 3.7 mV^2 which is equivalent to 530 e / puls (shaded)



HD – justáž překryvu LO-SEED



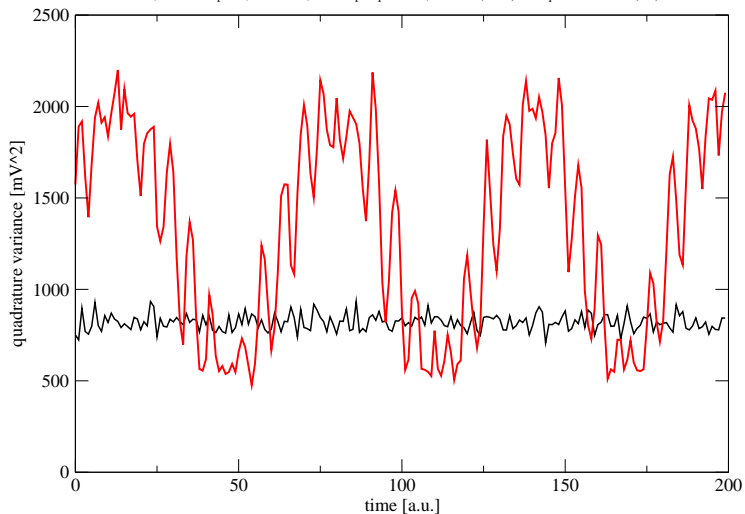
Detekce stlačeného vakua



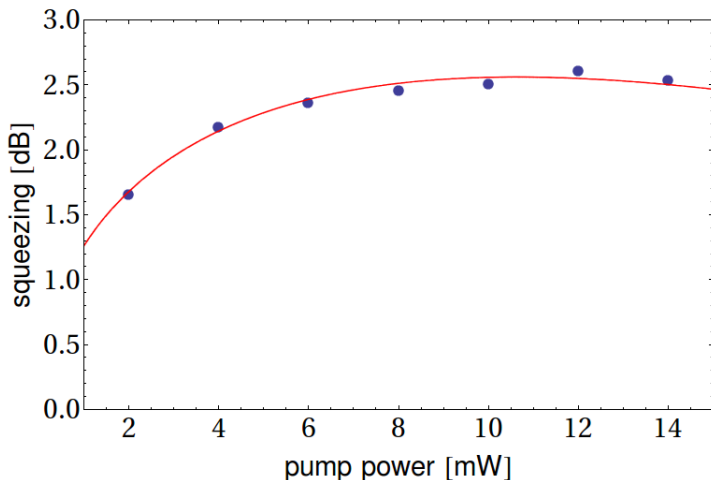
Detekce stlačeného vakua – fázová nestabilita

Phase fluctuations due to vibrations of TEC fan (approx 200 Hz superimposed on slow PZT modulation)

22.12. 2009, 815 kHz rep rate, LO 10 uW, 415 nm pump 13 mW; vacuum (black) and squeezed vacuum (red) variances



Detekce stlačeného vakua – finální výsledky

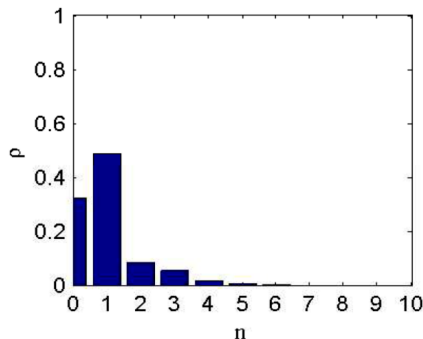
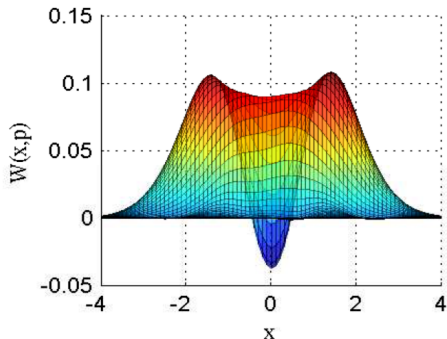


Subtrakce – frekvenční filtr

- Vlákno Fabry–Perot (Micron Optics Inc.)
 - vlnová délka návrhu 830 nm
 - FSR 33 THz
 - finesa 1463
 - šířka pásma 22 GHz (cca 0.04 nm)
 - vložené ztráty 0.4 dB
 - laditelné PZT 12 V
- Účinnost jednofotonového ramene
 - APD cca 50%
 - propustnost optiky a filtru pro SEED (0,2 nm) cca 17% (včetně prostorové filtrace SM vláknem)
- Četnost falešných detekcí
 - elektronické zanedbatelné
 - rozptýlený laser 2/s (10^{-3} skutečného signálu)
 - falešné detekce z jiných modů? (20%)

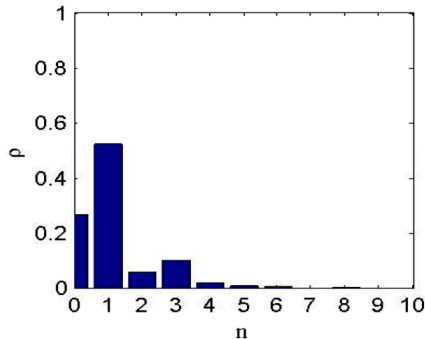
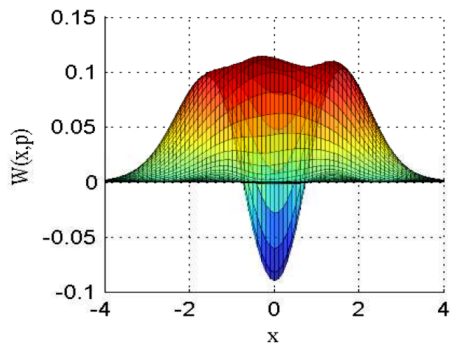
Subtrakce fotonu – výsledky

čerpací výkon (mW)	F_{odd}	α	$W(0,0)$
1	0.53	0.71	-0.029 ± 0.020
2	0.54	0.89	-0.037 ± 0.020
4	0.52	1.05	-0.028 ± 0.020



Subtrakce fotonu – korekce na účinnost HD

čerpací výkon (mW)	F_{odd}	α	$W_{\text{on}}(0, 0)$
2	0.62	1.03	-0.09 ± 0.05



Přehled dosažené negativity

<p>-0.026 ±0.012 (uncorrected)</p>	<p>pulsed (~120 fs)</p>	<p>A. Ourjoumteev, R. Tualle-Brouri, J. Laurat, P. Grangier, Generating optical Schrödinger kittens for quantum information processing, Science 312 (5770), 83-86 (2006).</p>
<p>-0.040 ±0.014 (corrected)</p>	<p>CW</p>	<p>J. S. Neergaard-Nielsen, B. Melholt Nielsen, C. Hettich, K. Mølmer, and E. S. Polzik, Generation of a superposition of odd photon number states for quantum information networks Phys. Rev. Lett. 97, 083604/1-4 (2006).</p>
<p>-0.083 (uncorrected)</p>	<p>CW</p>	<p>K. Wakui, H. Takahashi, A. Furusawa, and M. Sasaki, Photon subtracted squeezed states generated with periodically poled KTIPOPO₄ Opt. Express 15, 3568 (2007).</p>
<p>-0.041 +0.009 -0.001 (corrected)</p>	<p>pulsed (~140 fs)</p>	<p>T. Gerrits, S. Glancy, T.S. Clement, B. Calkins, A.E. Lita, A.J. Miller, A.L. Migdall, S.W. Nam, R.P. Mirin, and E. Knill, Generation of optical coherent state superpositions by number-resolved photon subtraction from squeezed vacuum, Phys. Rev. A 82 (3), 031802(R) (2010).</p>
<p>-0.040 ±0.020 (uncorrected)</p>	<p>pulsed (~5 ps)</p>	<p>Anders Tipsmark, Ruifang Dong, Amine Laghaout, Petr Marek, Miroslav Ježek, and Ulrik L. Andersen, Experimental demonstration of a Hadamard gate for coherent state qubits, Phys. Rev. A 84, 050301(R) (2011).</p>

Obsah

- 1 Úvod
 - Motivace
- 2 Experiment
 - Základní schéma experimentu
 - Generace druhé harmonické
 - Generace stlačení
 - Homodynní detektor
 - Stlačené vakuum
 - Subtrakce fotonu
- 3 Závěr
 - Shrnutí

Shrnutí

- Neklasické makroskopické stavy? – pro negaussovskou superpozici s 10 fotony jsou ztráty 1% kritické

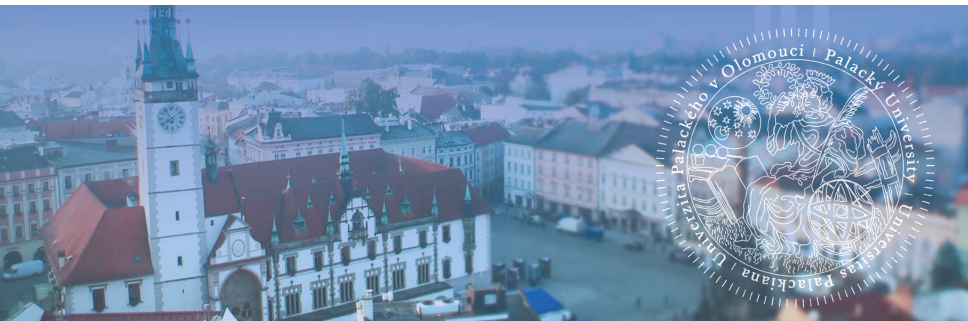
Shrnutí

- Neklasické makroskopické stavy? – pro negaussovskou superpozici s 10 fotony jsou ztráty 1% kritické
- Demonstrována negativita Wignerovy funkce „kočky“
 - jednotky standardní směrodatné odchylky
 - prokazatelný kvantový negaussovský charakter
 - velikost $|\alpha|$ cca 1
 - pro větší $|\alpha|$ kvalita klesá

Shrnutí

- Neklasické makroskopické stavy? – pro negaussovskou superpozici s 10 fotony jsou ztráty 1% kritické
- Demonstrována negativita Wignerovy funkce „kočky“
 - jednotky standardní směrodatné odchylky
 - prokazatelný kvantový negaussovský charakter
 - velikost $|\alpha|$ cca 1
 - pro větší $|\alpha|$ kvalita klesá
- Hlavní problémy
 - sladění prostoročasových modů (OPA/GID)
 - stabilita fáze resp. akviziční elektronika
 - stabilita FP filtru
- Aktivní sladění modů (SLM)?

Děkuji Vám za pozornost!



optics.upol.cz
quantum.opticsolomouc.org