

Kvantové zpracování informace se spojitými kvantovými proměnnými

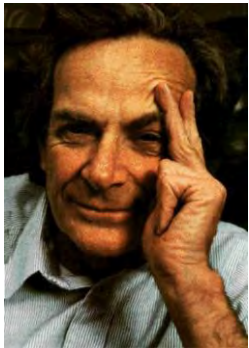
Jaromír Fiurášek

Katedra optiky, Univerzita Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, Olomouc



Kvantová fyzika a kvantové zpracování informace

- Informace je fyzikální (její zpracování je závislé na fyzikálním systému, v němž je zakódována).
- Až do relativně nedávné doby se ovšem o informaci uvažovalo jen v kontextu konceptů vycházejících z klasické fyziky.
- Kvantová mechanika hrála jen podpůrnou roli.
- Kvantové systémy se chovají jinak než klasické (podivuhodněji).
- Využití kvantových jevů nabízí řešení některých problémů neřešitelných v rámci klasické teorie informace.



R.P. Feynmann



P. Shor



G. Brassard a Ch. Bennett

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Spojité kvantové proměnné

Kvantové stavy módů optických polí

- Kódování informace do amplitudy a fáze optického signálu
- Kvadrurní operátory x a p se spojitým spektrem vlastních hodnot
- Kanonické komutační relace
- Nekonečně dimenzionální Hilbertův prostor

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i$$

Spojité kvantové proměnné

Kvantové stavy módů optických polí

- Kódování informace do amplitudy a fáze optického signálu
- Kvadrurní operátory x a p se spojitým spektrem vlastních hodnot
- Kanonické komutační relace
- Nekonečně dimenzionální Hilbertův prostor

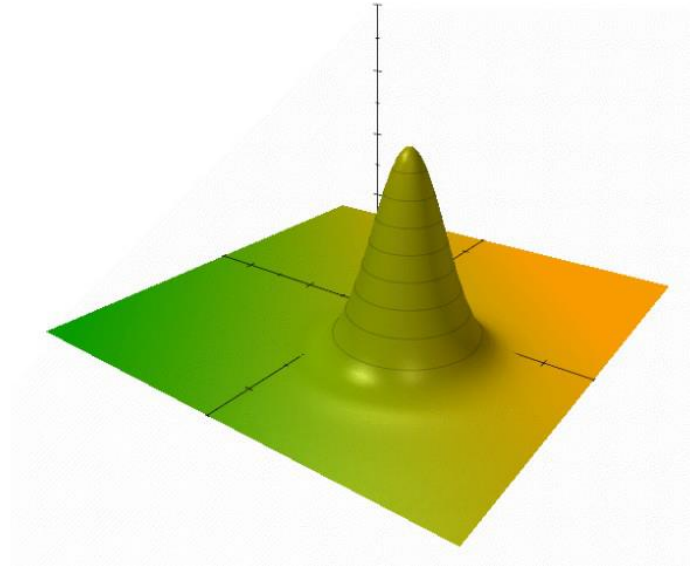
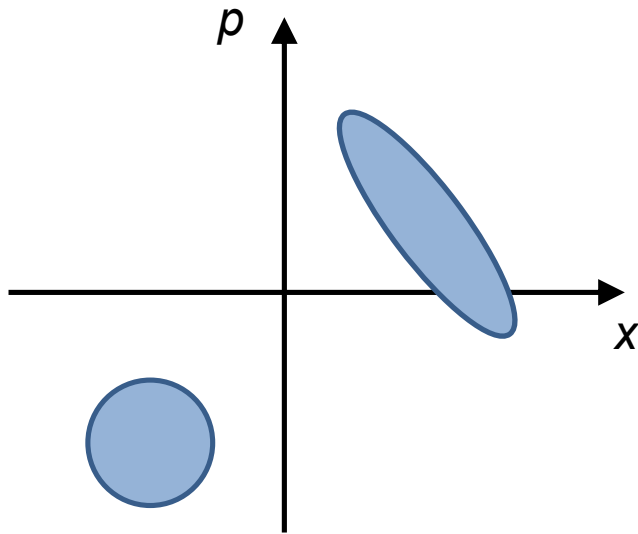
$$[\hat{x}, \hat{p}] = i$$

Kvantové stavy kolektivního spinu mnoha atomů

- Polarizovaný soubor N atomů $\langle \hat{J}_x \rangle = FN$
- Kódování informace do y -ové a z -ové komponenty kolektivního spinu atomů
- Aproximativní kanonické komutační relace (Holstein–Primakoff aproximace)

$$[\hat{J}_y, \hat{J}_z] = i\hat{J}_x \approx iFN$$

Gaussovské kvantové stavy



Kvantové stavy s gaussovskou Wignerovou funkcí

- Tyto stavy lze plně specifikovat pomocí prvních a druhých momentů kvadrurních operátorů – vektor středních hodnot kvadratur a kovarianční matice
- Efektivní matematický popis

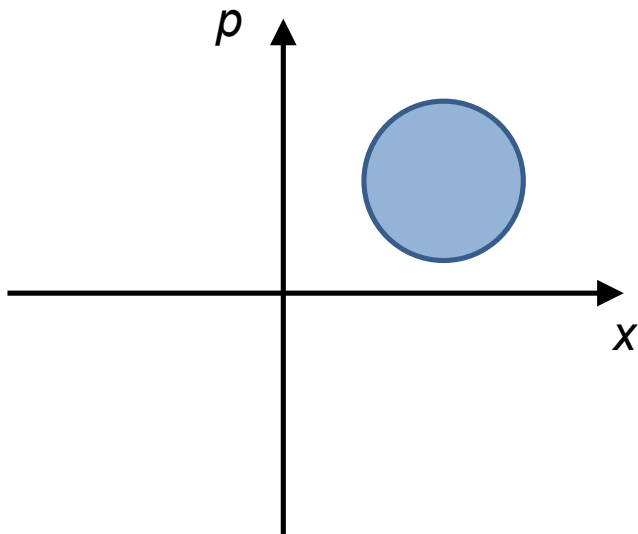
$$\hat{\mathbf{r}} = (\hat{x}_1, \hat{p}_1, \hat{x}_2, \hat{p}_2, \dots, \hat{x}_N, \hat{p}_N)$$

$$\mathbf{d} = \langle \hat{\mathbf{r}} \rangle$$

$$\gamma_{jk} = \langle \Delta \hat{r}_j \Delta \hat{r}_k + \Delta \hat{r}_k \Delta \hat{r}_j \rangle$$

Koherentní a stlačené stavy světla

Významné Gaussovské stavy světla



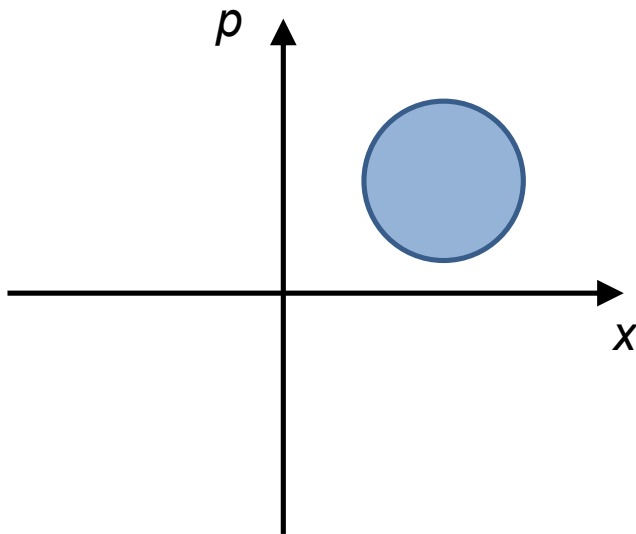
Koherentní stavy

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

$$\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$$

Koherentní a stlačené stavy světla

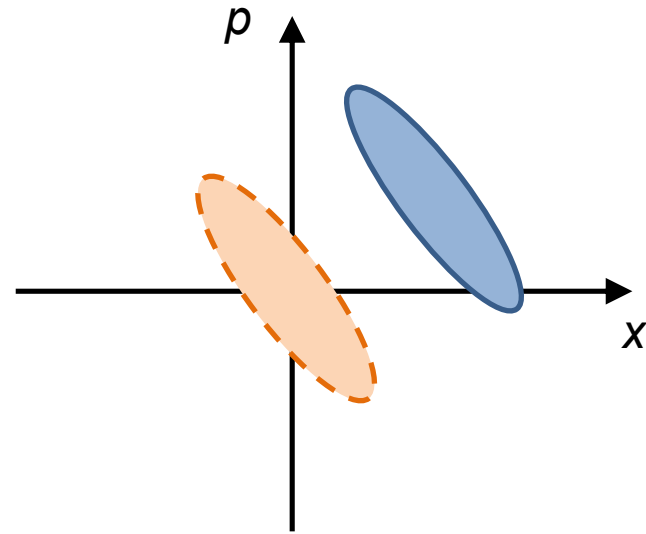
Významné Gaussovské stavy světla



Koherentní stavy

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

$$\hat{a}|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$$



Stlačené stavy

$$|r, \varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{\cosh r}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sqrt{(2n)!} (\tanh r)^n}{2^n n!} e^{-2in\varphi} |2n\rangle$$

Jednomódové stlačené vakuum

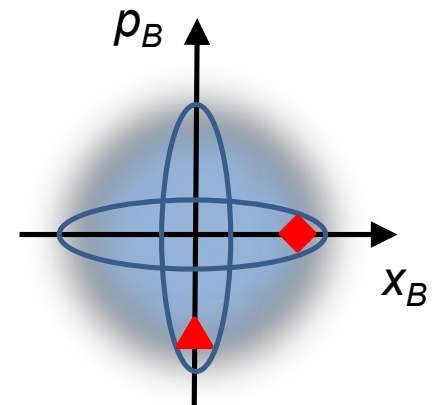
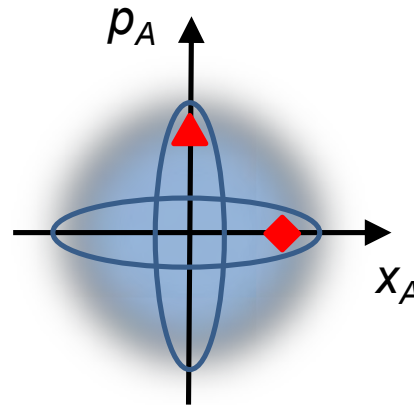
Dvumódové stlačené stavy světla

Kvantově provázané (entanglované) stavy

- Generace pomocí interference dvou jednomódových stlačených stavů na vyváženém děliči svazku
- Nebo přímá generace pomocí nedegenerovaného optického parametrického zesilovače

$$|\Psi\rangle = \sqrt{1 - \lambda^2} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n |n, n\rangle_{AB}$$

$$\lambda = \tanh r$$



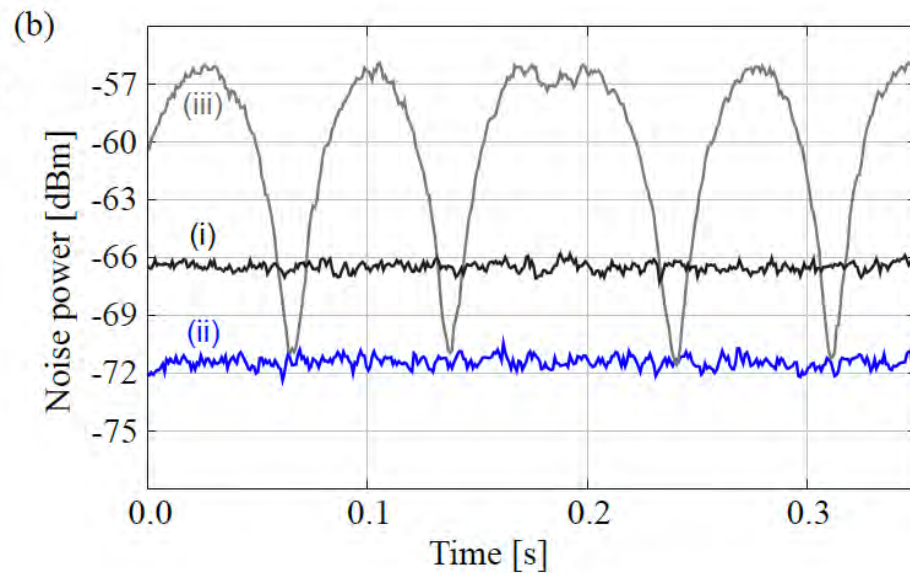
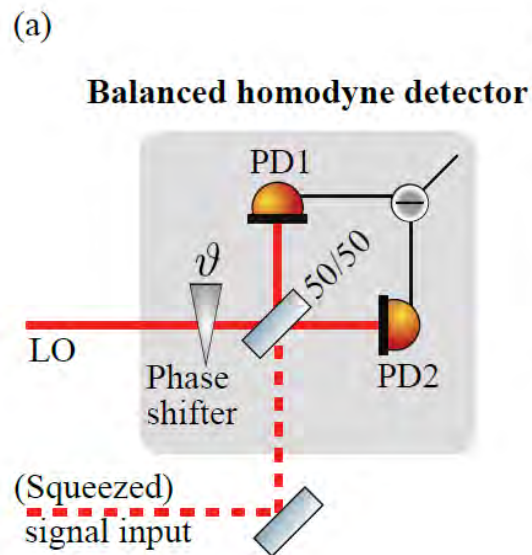
- Perfektní kvantové korelace v bázi Fockových stavů
- V limitě nekonečného stlačení dostáváme ideální EPR stavy:

$$\langle \Delta(\hat{x}_A - \hat{x}_B) \rangle \rightarrow 0, \quad \langle \Delta(\hat{p}_A + \hat{p}_B) \rangle \rightarrow 0$$

Homodynní a heterodynní detekce

Homodynní detekce

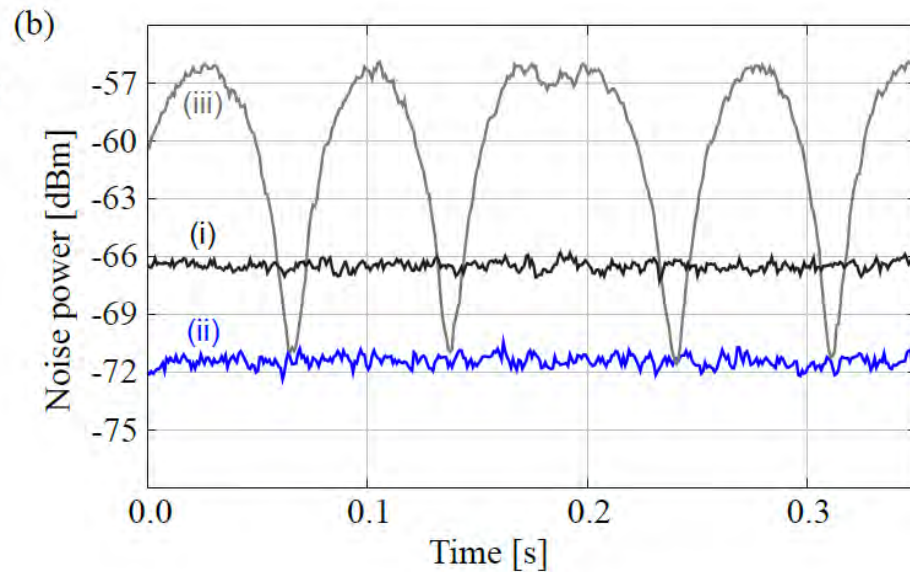
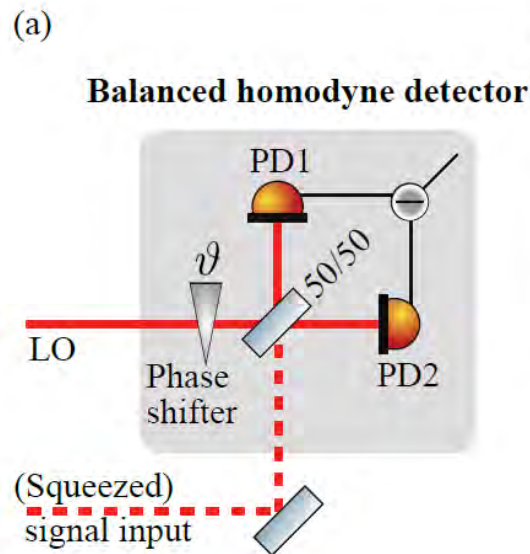
- Přímé měření rotované kvadratury
- Vysoká účinnost detektoru, velká šířka pásma



Homodynní a heterodynní detekce

Homodynní detekce

- Přímé měření rotované kvadratury
- Vysoká účinnost detektoru, velká šířka pásma



Heterodynní detekce / osmiportová homodynní detekce

- Realizuje projekci na koherentní stavy
- Lze realizovat pomocí dvou homodynních detektorů

Gaussovské kvantové operace

Fyzikální realizace

- Lineární optické interferometry (děliče svazku, fázové destičky, apod.)
- Optické parametrické zesilovače (operace stlačení)
- Pomocné módy připravené v Gaussovských stavech
- Homodynní či heterodynní detekce a dopředná vazba

Matematický popis

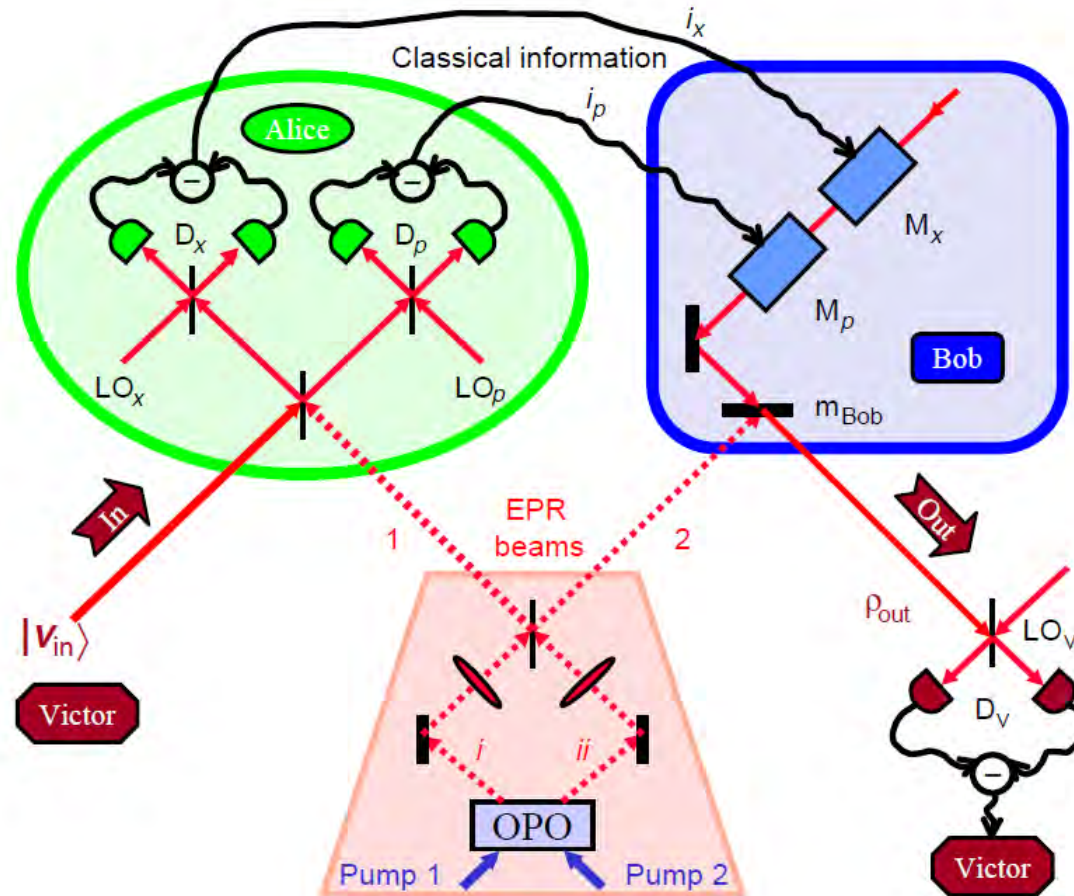
- Operace generované Hamiltoniány, jež jsou kvadratickými funkcemi kvadrurních operátorů
- Lineární transformace kvadrurních operátorů v Heisenbergově obraze
- Symplektické transformace a Gaussovské kompletně pozitivní zobrazení

$$\mathbf{d} \rightarrow S\mathbf{d} \quad \gamma \rightarrow S\gamma S^T + G$$

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

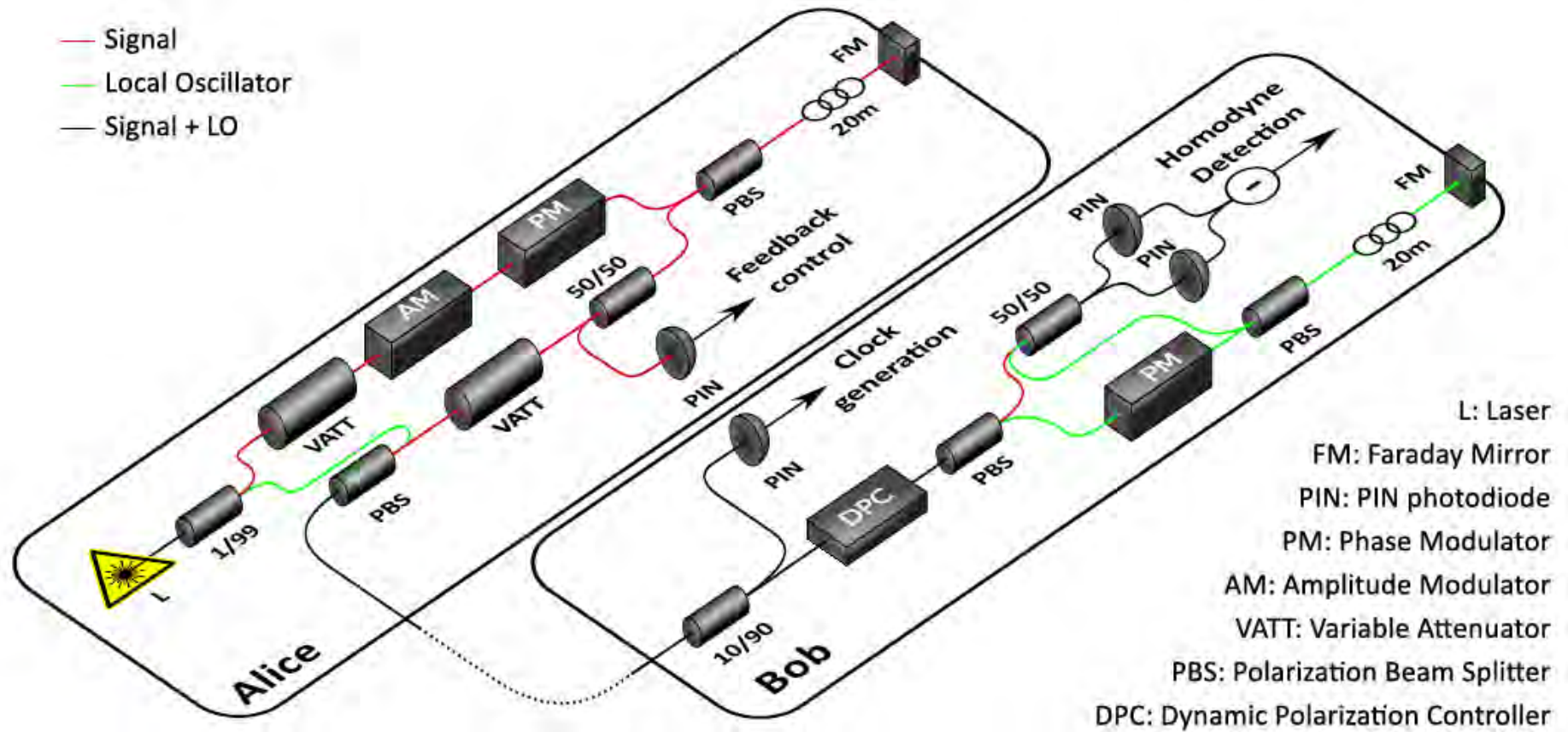
Kvantová teleportace se spojitými proměnnými



A. Furusawa, J.L. Sørensen, S.L. Braunstein, C.A. Fuchs, H.J. Kimble, and E.S. Polzik, *Unconditional quantum teleportation*, Science **282**, 706-709 (1998).

S.L. Braunstein and H.J. Kimble, *Teleportation of continuous quantum variables*, Phys. Rev. Lett. **80**, 869-872 (1998).

Kvantová kryptografie s koherentními stavy světla

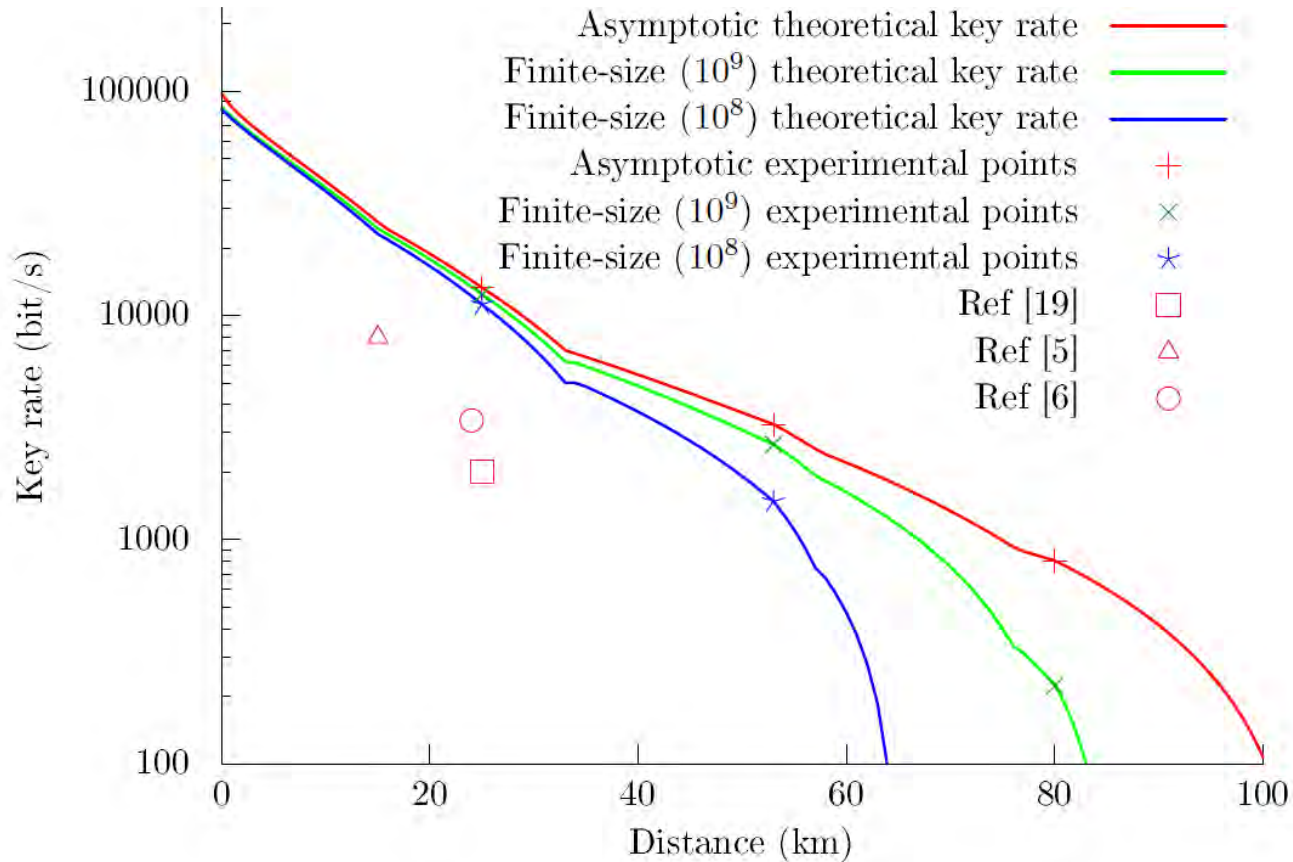


P. Jouguet, S. Kunz-Jacques, A. Leverrier, P. Grangier, and E. Diamanti, *Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution*, Nature Phot. **7**, 378-381 (2013).

F. Grosshans, G. Van Assche, J. Wenger, R. Brouri, N. J. Cerf, Ph. Grangier, *Quantum key distribution using gaussian-modulated coherent states*, Nature (London) **421**, 238 (2003).

F. Grosshans and P. Grangier, *Continuous variable quantum cryptography using coherent states*, Phys. Rev. Lett. **88**, 057902 (2002).

Kvantová kryptografie s koherentními stavy světla



P. Jouguet, S. Kunz-Jacques, A. Leverrier, P. Grangier, and E. Diamanti, *Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution*, Nature Phot. **7**, 378-381 (2013).

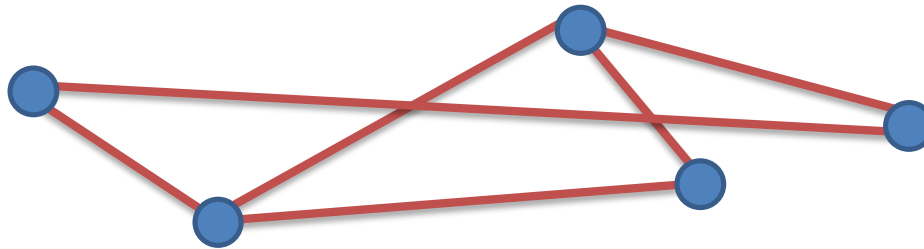
F. Grosshans, G. Van Assche, J. Wenger, R. Brouri, N. J. Cerf, Ph. Grangier, *Quantum key distribution using gaussian-modulated coherent states*, Nature (London) **421**, 238 (2003).

F. Grosshans and P. Grangier, *Continuous variable quantum cryptography using coherent states*, Phys. Rev. Lett. **88**, 057902 (2002).

Optická kvantové komunikační síť

Kvantová komunikační síť sestává z jednotlivých uzlů a propojení

Pro řadu aplikací je třeba distribuovat kvantově provázané stavy mezi jednotlivé uzly komunikační sítě



Kvantové komunikační linky:

- Optická vlákna
- Šíření volným prostorem
- Využití satelitní komunikace

Aspekty kvantového zpracování informace se spjitými proměnnými

Výhody/pozitiva:

- Deterministická generace koherentních a stlačených stavů světla
 - Vysoce účinná homodynní detekce s velkou šířkou pásma
 - Deterministická detekce v bázi Bellových stavů
- Deterministická teleportace a kvantová kryptografie s koherentními stavy

Aspekty kvantového zpracování informace se spjitými proměnnými

Výhody/positiva:

- Deterministická generace koherentních a stlačených stavů světla
 - Vysoce účinná homodynní detekce s velkou šířkou pásma
 - Deterministická detekce v bázi Bellových stavů
- Deterministická teleportace a kvantová kryptografie s koherentními stavy

Nevýhody/negativa:

- Citlivost na ztráty a šum v kvantové komunikační lince
 - Není možné potlačit ztráty pouze pomocí Gaussovských stavů a operací (běžných zesilovačů)
 - Potřebnost negaussovských operací pro pokročilé protokoly a aplikace
- Problematika potlačení ztrát a fluktuací v optické kvantové komunikaci

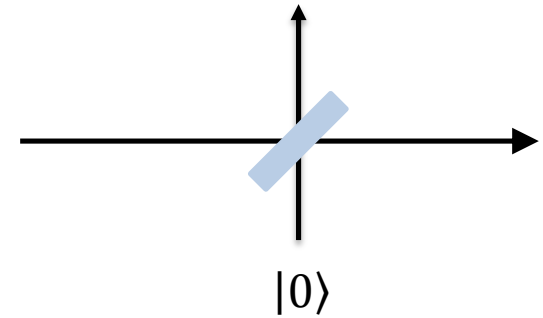
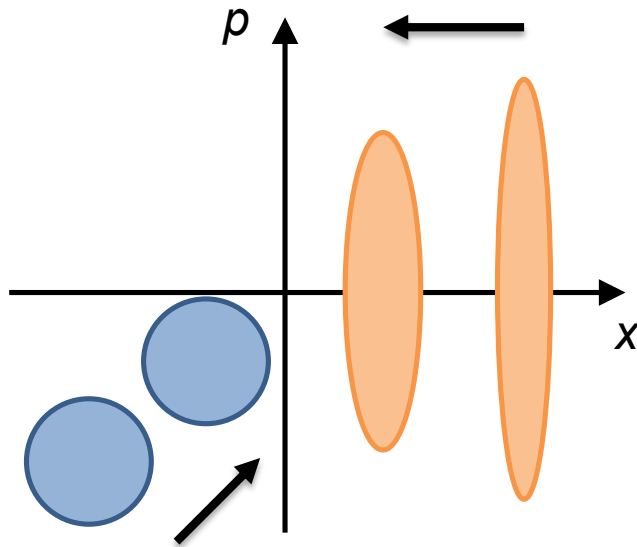
Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Ztráty a fázové fluktuace

Ztrátový kvantový kanál

- Pokles amplitudy signálu
- Pokles stlačení a nárůst šumu u stlačených stavů



$$|\alpha\rangle \rightarrow |t\alpha\rangle$$

$$|r, \varphi\rangle\langle r, \varphi| \rightarrow \rho_r$$

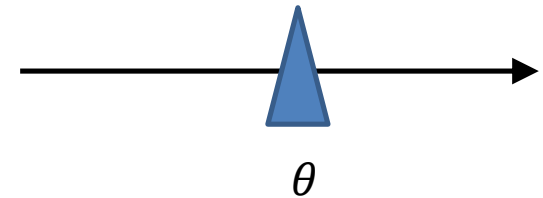
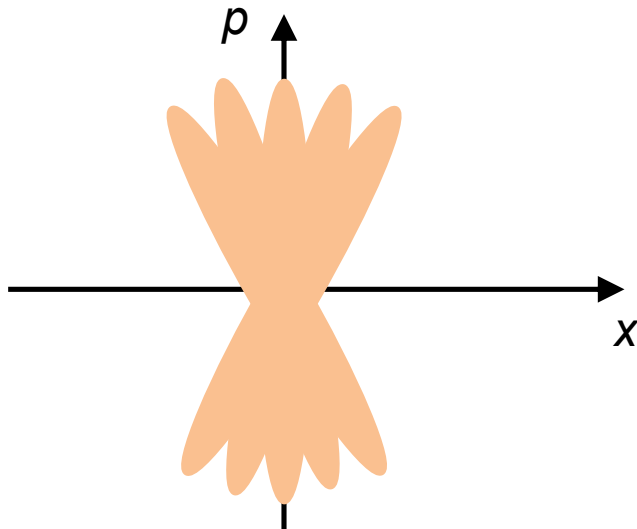
$$V_x \rightarrow TV_x + 1 - T$$

$$V_p \rightarrow TV_p + 1 - T$$

Ztráty a fázové fluktuace

Fázové fluktuace

- Náhodné rotace ve fázovém prostoru
- Smíchání stlačené a anti-stlačené kvadratury
- Negaussovský kvantový kanál
- Výstupní stav je negaussovský



Symetrické fázové fluktuace

$$\langle \sin(n\theta) \rangle = 0$$

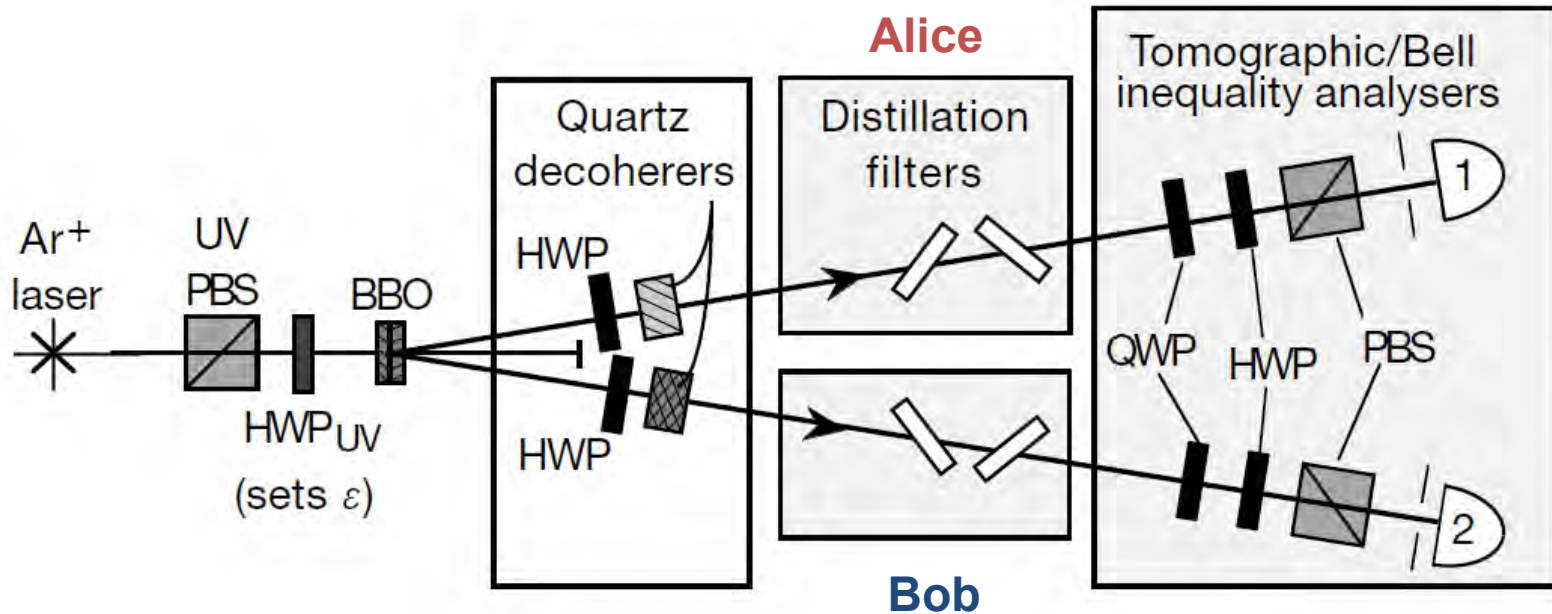
$$V_x \rightarrow \langle (\cos \theta)^2 \rangle V_x + \langle (\sin \theta)^2 \rangle V_p$$

$$V_p \rightarrow \langle (\cos \theta)^2 \rangle V_p + \langle (\sin \theta)^2 \rangle V_x$$

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Koncentrace kvantové provázanosti

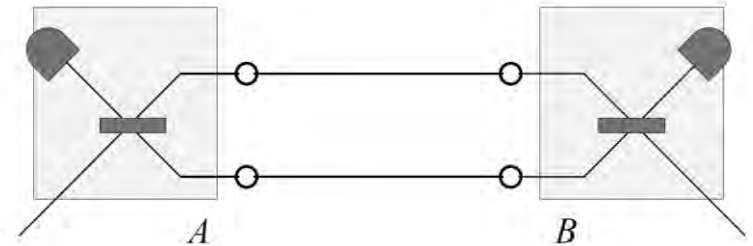
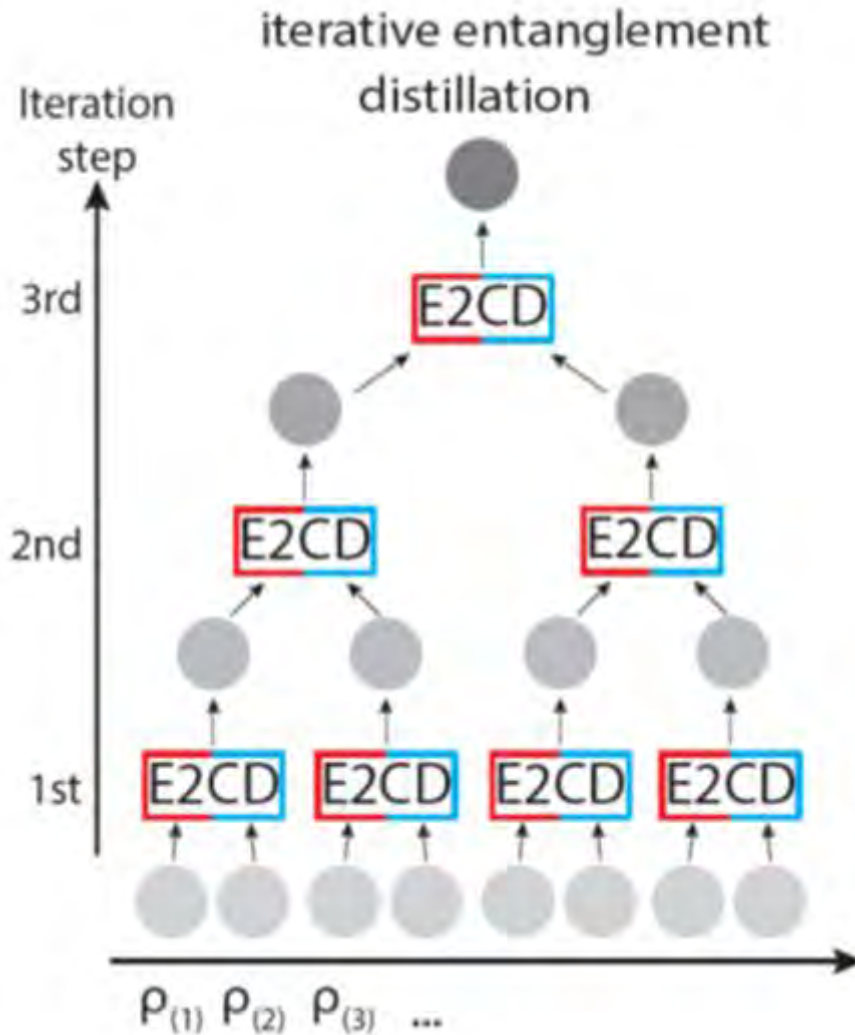


- Podmíněné navýšení kvantové provázanosti po distribuci sdíleného stavu mezi Alici a Boba.
- Lokální kvantové operace (kvantové filtry) na straně Alice a Boba a klasická komunikace (LOCC)
- Protokol vyžaduje jen jednu kopii stavu

P.G. Kwiat, S. Barraza-Lopez, A. Stefanov, and N. Gisin, *Experimental entanglement distillation and 'hidden' non-locality*, Nature **409**, 1014-1017 (2001).

C.H. Bennett, H.J Bernstein, S. Popescu, and B. Schumacher, *Concentrating partial entanglement by local operations*, Phys. Rev. A **53**, 2046 (1996).

Destilace a purifikace kvantové provázanosti



Elementární krok kvantového destilačního protokolu

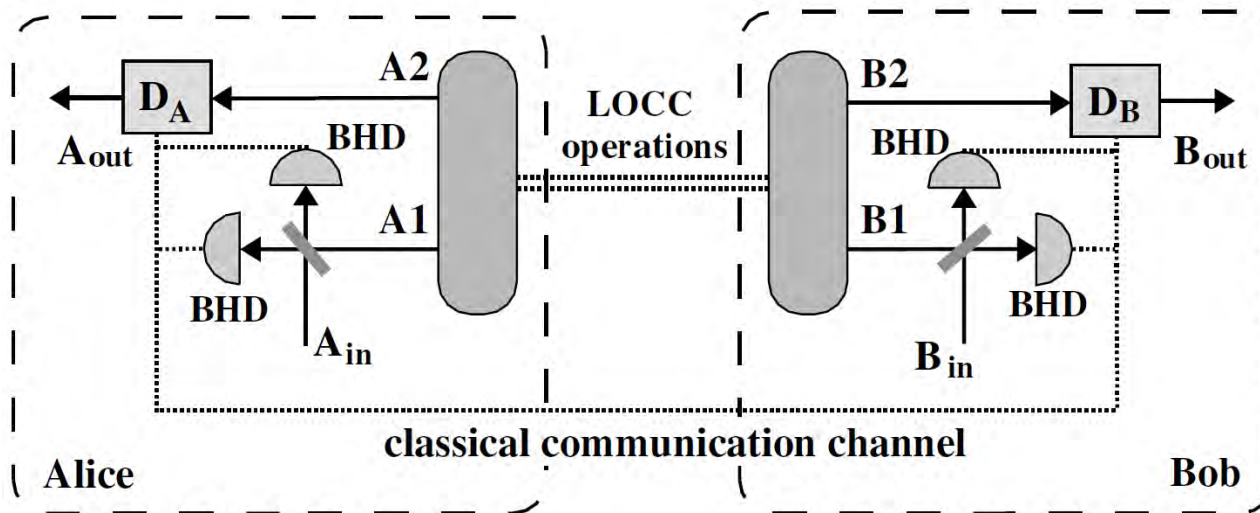
$$\rho^{(n+1)} = \frac{E(\rho^{(n)} \otimes \rho^{(n)})}{\text{Tr}[E(\rho^{(n)} \otimes \rho^{(n)})]}$$

C. H. Bennett, G. Brassard, S. Popescu, B. Schumacher, J. a. Smolin, and W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **76**, 722-725 (1996).

D. Deutsch, A. Ekert, R. Jozsa, C. Macchiavello, S. Popescu, and A. Sanpera, Phys. Rev. Lett. **77**, 2818-2821 (1996).

No-go teoremy pro destilaci Gaussovských stavů

- Nelze realizovat destilaci nebo koncentraci kvantové provázanosti gaussovských kvantových stavů pomocí lokálních gaussovských kvantových operací a klasické komunikace (GLOCC).



- Formalizmus deterministických a probablistických Gaussovských kvantových operací (CP map)
- Libovolnou probablistickou GLOCC operaci lze pro známý vstupní stav nahradit deterministickou GLOCC operací

J. Eisert, S. Scheel, and M.B. Plenio, *Distilling Gaussian States with Gaussian Operations is Impossible*, Phys. Rev. Lett. **89**, 137903 (2002).

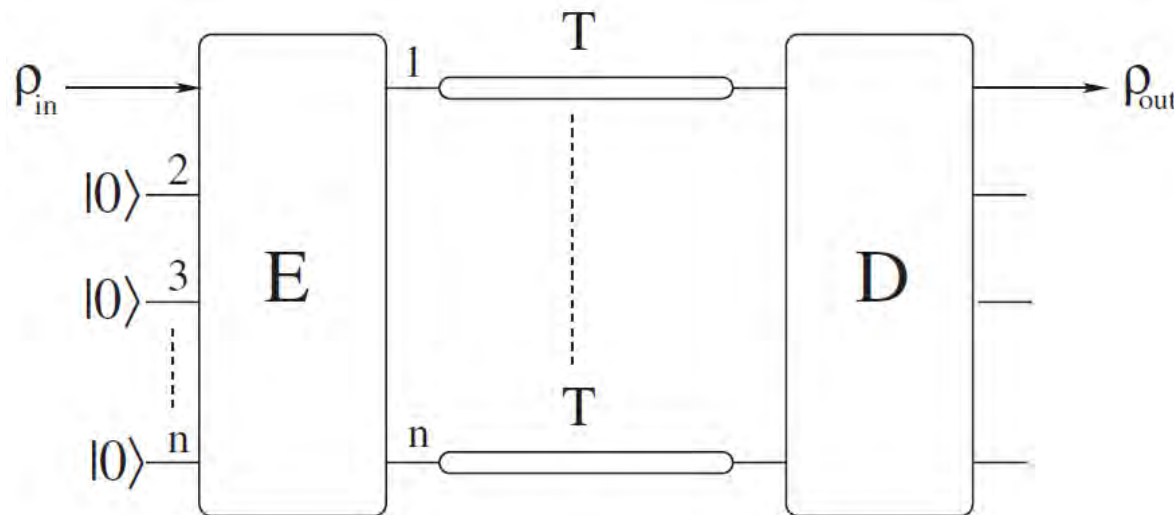
G Giedke and J.I. Cirac, *Characterization of Gaussian operations and distillation of Gaussian states*, Phys. Rev. A **66**, 032316 (2002).

J. Fiurášek, *Gaussian Transformations and Distillation of Entangled Gaussian States*, Phys. Rev. Lett. **89**, 137904 (2002).

J. Niset, J. Fiurášek, and N.J. Cerf, *No-Go Theorem for Gaussian Quantum Error Correction*, Phys. Rev. Lett. **102**, 120501 (2009).

No-go teorémy pro destilaci gaussovských stavů

- Nelze realizovat destilaci nebo koncentraci kvantové provázanosti gaussovských kvantových stavů pomocí lokálních gaussovských kvantových operací a klasické komunikace (GLOCC).
- Rovněž nelze implementovat kvantovou korekci chyb v gaussovských kvantových komunikačních kanálech pomocí gaussovských kódovacích a dekódovacích operací



➤ **Je vyžadován určitý negaussovský element (stav či operace)**

J. Eisert, S. Scheel, and M.B. Plenio, *Distilling Gaussian States with Gaussian Operations is Impossible*, Phys. Rev. Lett. **89**, 137903 (2002).

G Giedke and J.I. Cirac, *Characterization of Gaussian operations and distillation of Gaussian states*, Phys. Rev. A **66**, 032316 (2002).

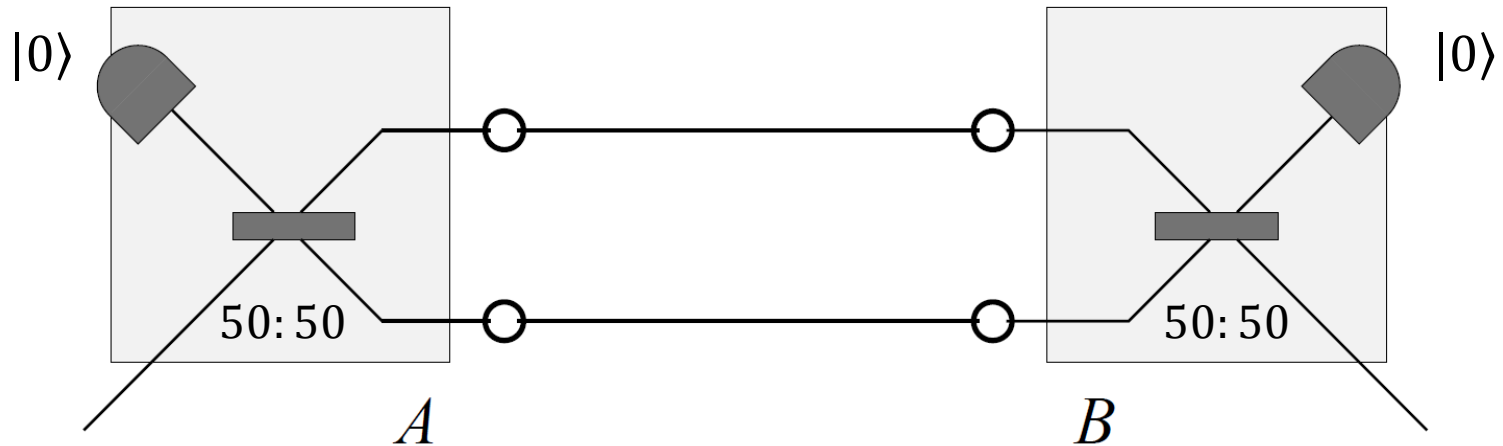
J. Fiurášek, *Gaussian Transformations and Distillation of Entangled Gaussian States*, Phys. Rev. Lett. **89**, 137904 (2002).

J. Niset, J. Fiurášek, and N.J. Cerf, *No-Go Theorem for Gaussian Quantum Error Correction*, Phys. Rev. Lett. **102**, 120501 (2009).

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Gaussifikace kvantových stavů



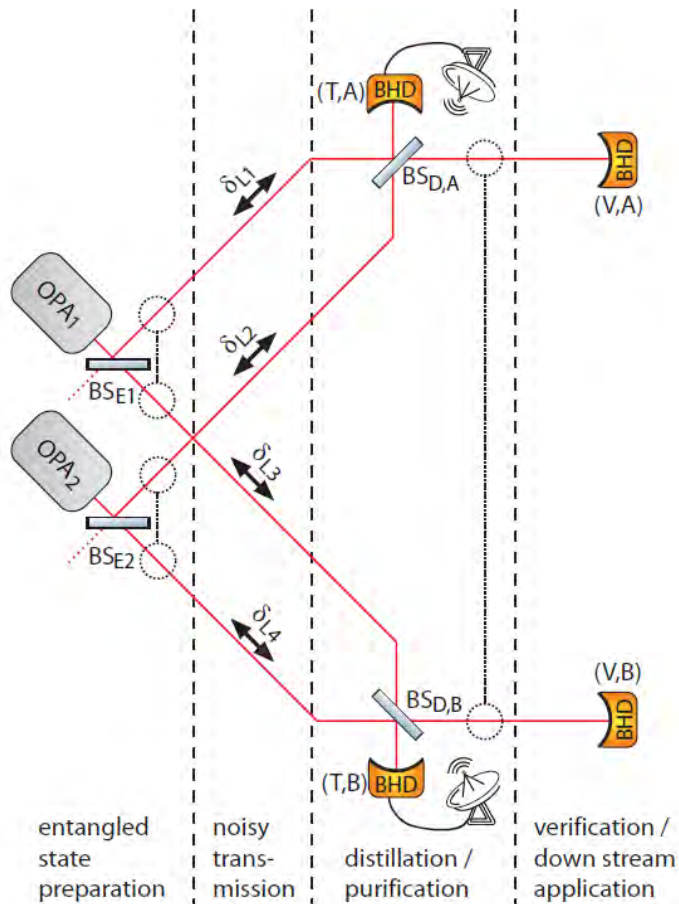
$$\rho^{(n+1)} = \frac{G(\rho^{(n)} \otimes \rho^{(n)})}{\text{Tr}[G(\rho^{(n)} \otimes \rho^{(n)})]}$$

- Využití interference na děliči a projekce na vakuový stav
- Iterační protokol, který transformuje negaussovské stavy na gaussovské.
- Lze jej využít pro destilaci kvantové provázanosti určitých kvantových stavů.

J. Eisert, D.E. Browne, S. Scheel, M.B. Plenio, *Distillation of continuous-variable entanglement with optical means*, Ann. Phys. (NY) **311**, 431 (2004).

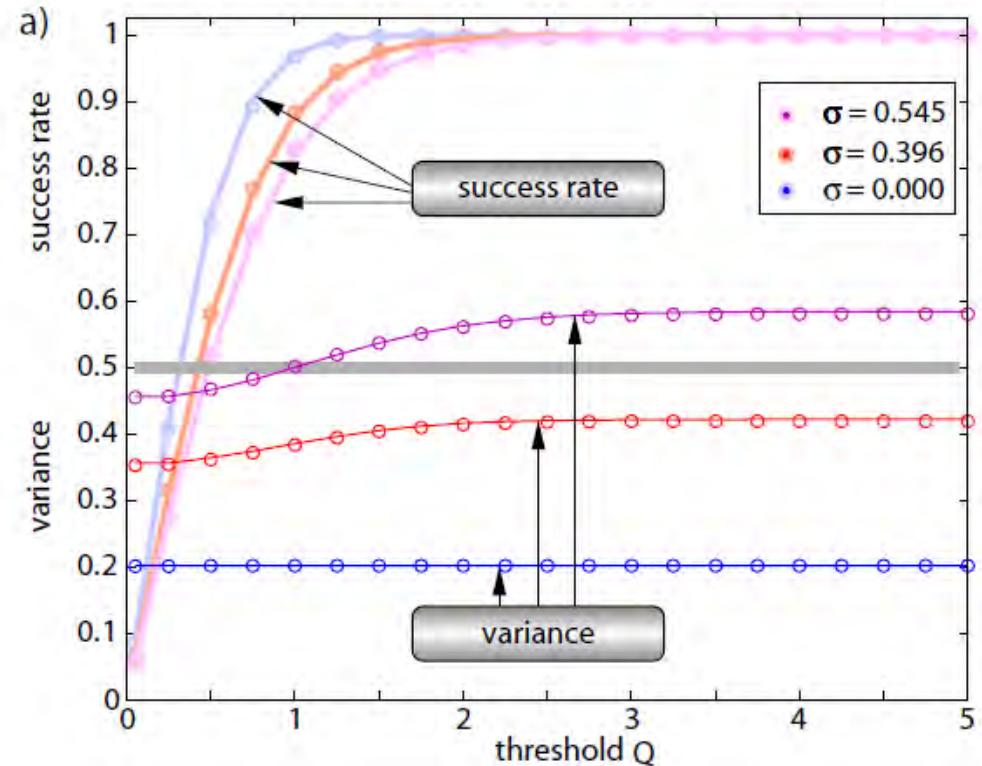
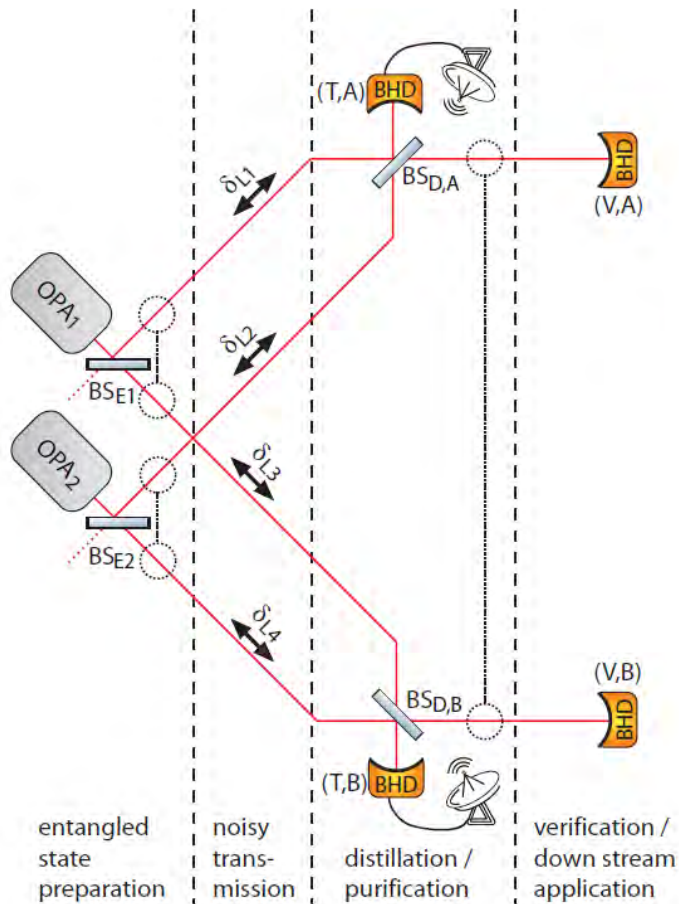
D.E. Browne, J. Eisert, S. Scheel, M.B. Plenio, *Driving non-Gaussian to Gaussian states with linear optics*, Phys. Rev. A **67**, 062320 (2003).

Destilace stlačených stavů narušených fázovými fluktuacemi



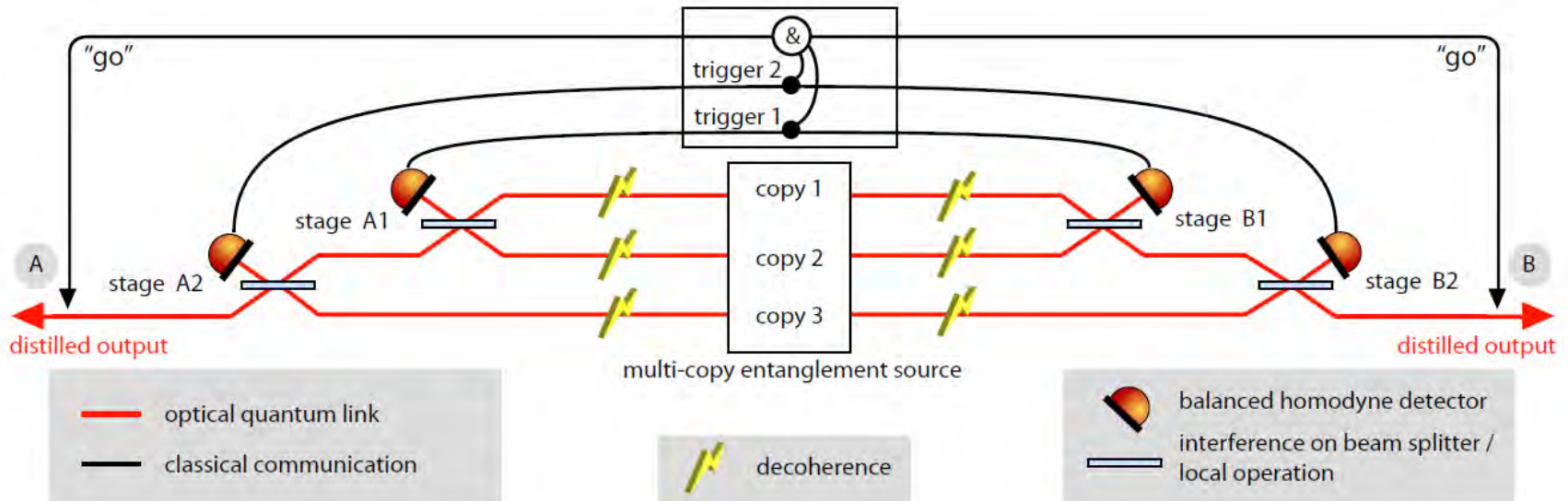
- Fázové fluktuace vedou k degaussifikaci dvoumódových stlačených stavů
- Destilaci je tak možné provést pomocí gaussifikace

Destilace stlačených stavů narušených fázovými fluktuacemi



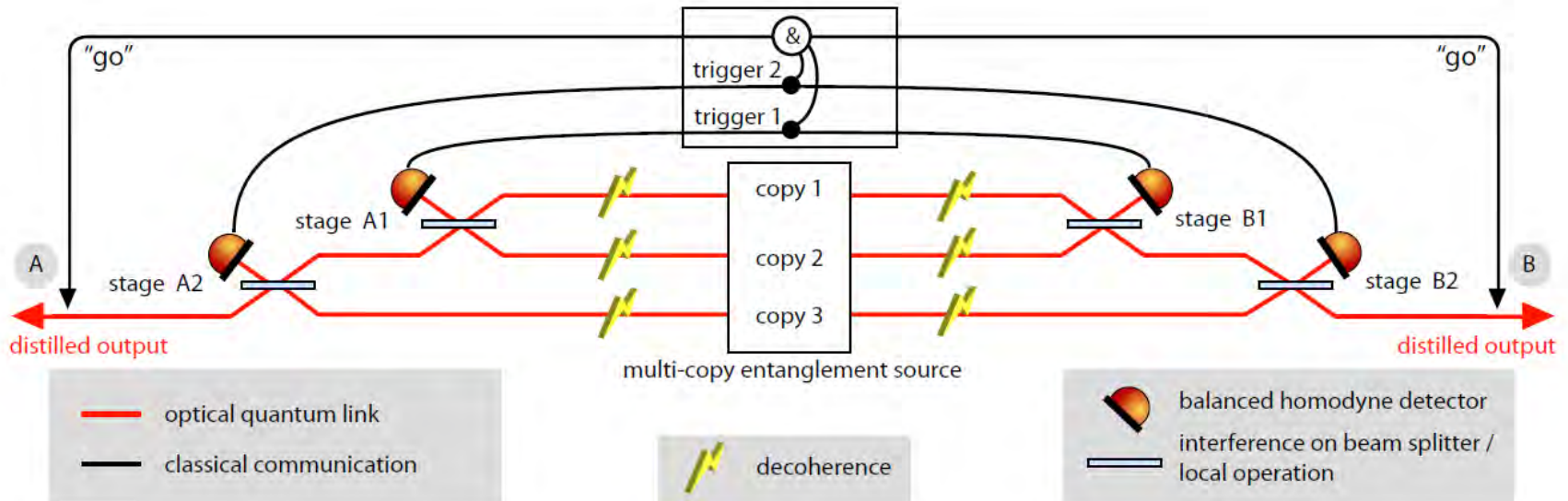
- Fázové fluktuace vedou k degaussifikaci dvoumódových stlačených stavů
- Destilaci je tak možné provést pomocí gaussifikace

Destilace kvantové provázanosti ze tří kopií stavů

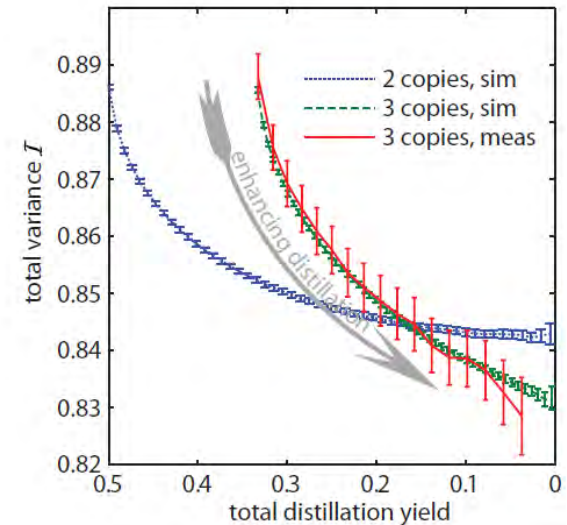


- Destilace kvantové provázanosti dvoumódových stlačených stavů narušených fázovými fluktuacemi
- Kolektivní destilace ze tří kopií stavu
- Dosažené lepší výsledky než pro destilaci ze dvou kopií

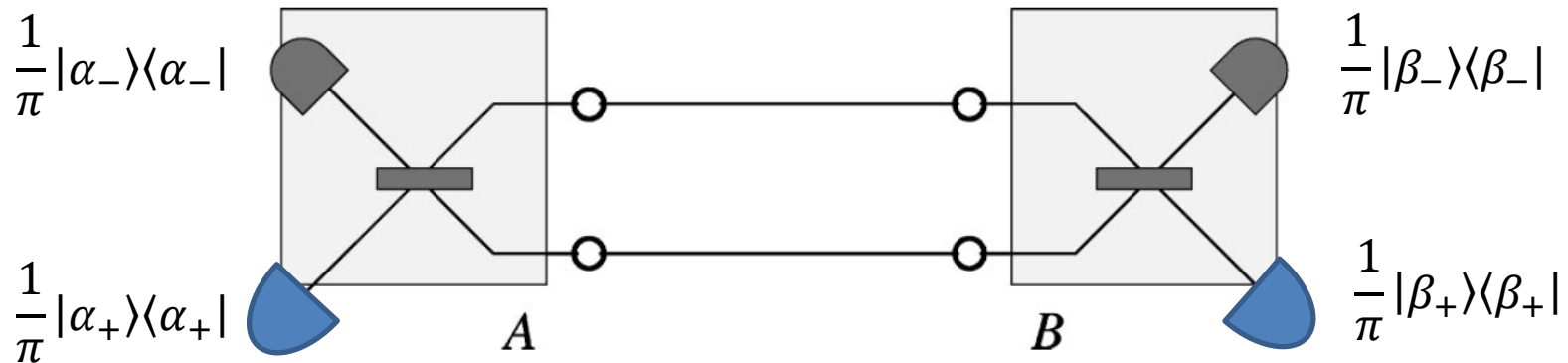
Destilace kvantové provázanosti ze tří kopií stavů



- Destilace kvantové provázanosti dvoumódových stlačených stavů narušených fázovými fluktuacemi
- Kolektivní destilace ze tří kopií stavu
- Dosažené lepší výsledky než pro destilaci ze dvou kopií



Emulace iteračního gaussifikačního protokolu



Modifikovaný Gaussifikační protokol – heterodynní detekce na všech výstupních módech

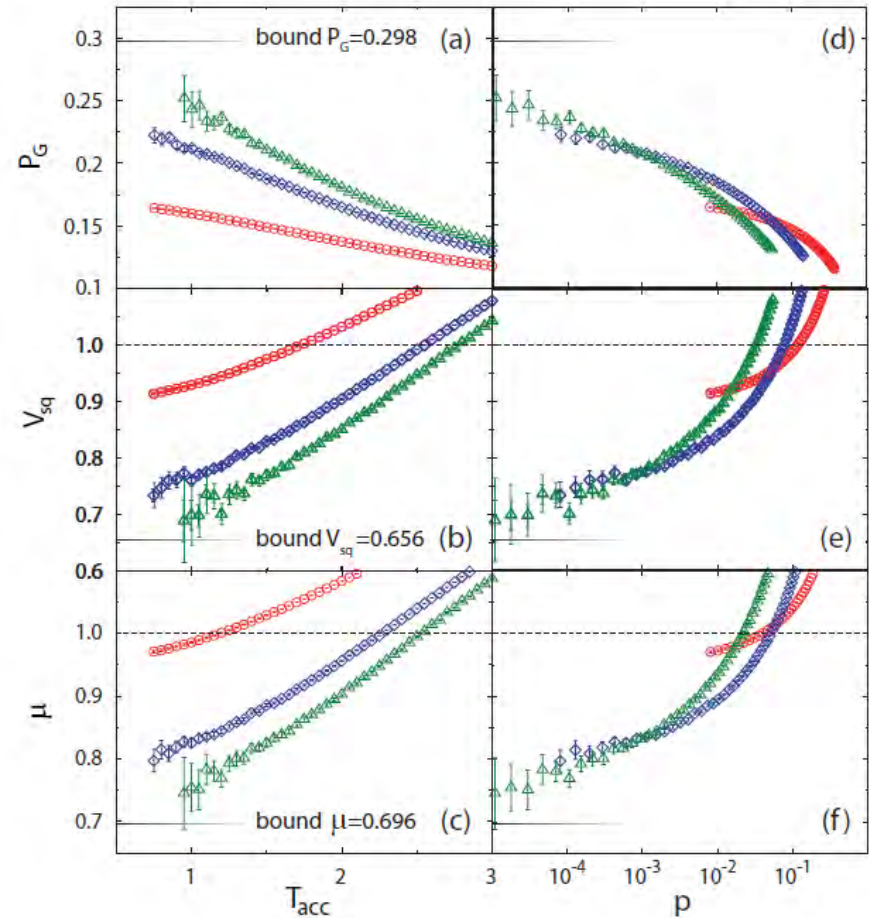
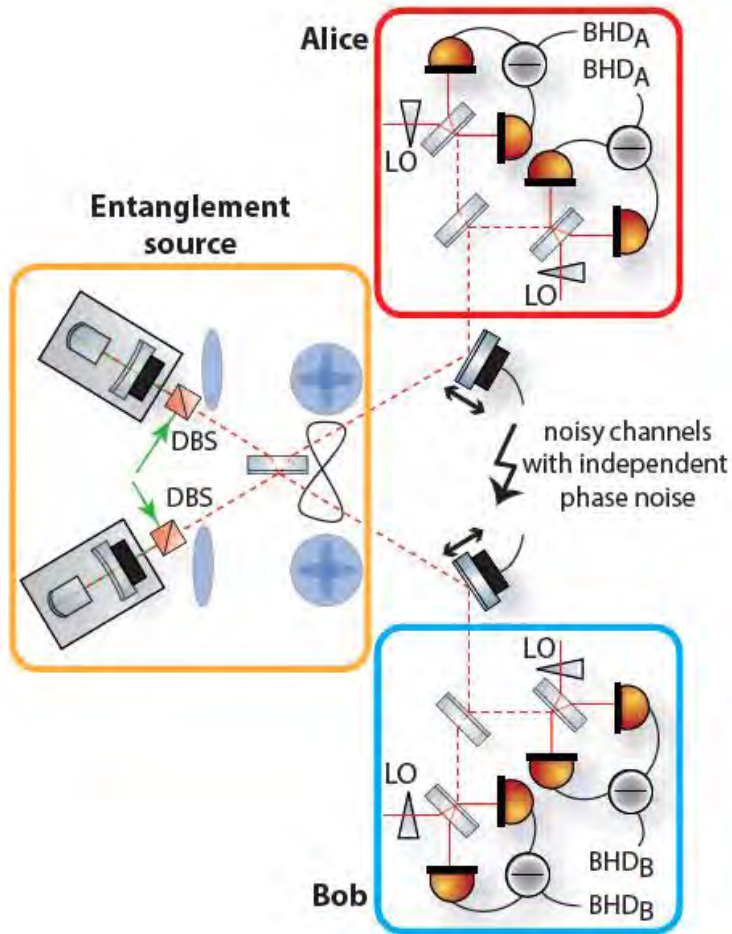
Fyzickou realizaci iteračního protokolu lze nahradit emulací na datech získaných heterodynní detekcí na jedné kopii stavu:

$$\alpha_{n,+} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha_{2n} + \alpha_{2n+1}) \quad \beta_{n,+} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\beta_{2n} + \beta_{2n+1})$$

$$\alpha_{n,-} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha_{2n} - \alpha_{2n+1}) \quad \beta_{n,-} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\beta_{2n} - \beta_{2n+1})$$

Umožňuje získat data odpovídající heterodynní detekci na Gaussifikovaném stavu

Emulace iteračního gaussifikačního protokolu

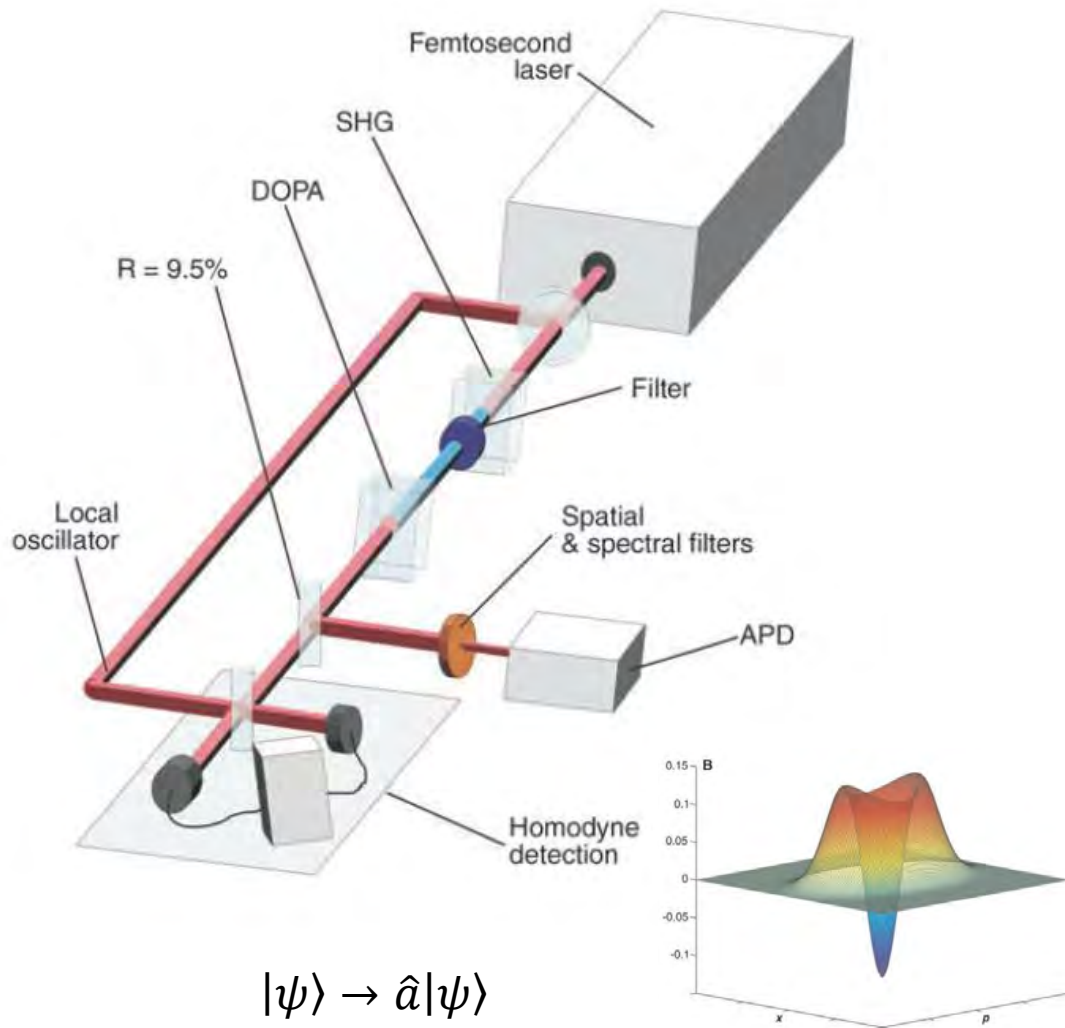


Efektivní implementace 3 iteračních kroků protokolu = gaussifikace z 8 kopií vstupního stavu

Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

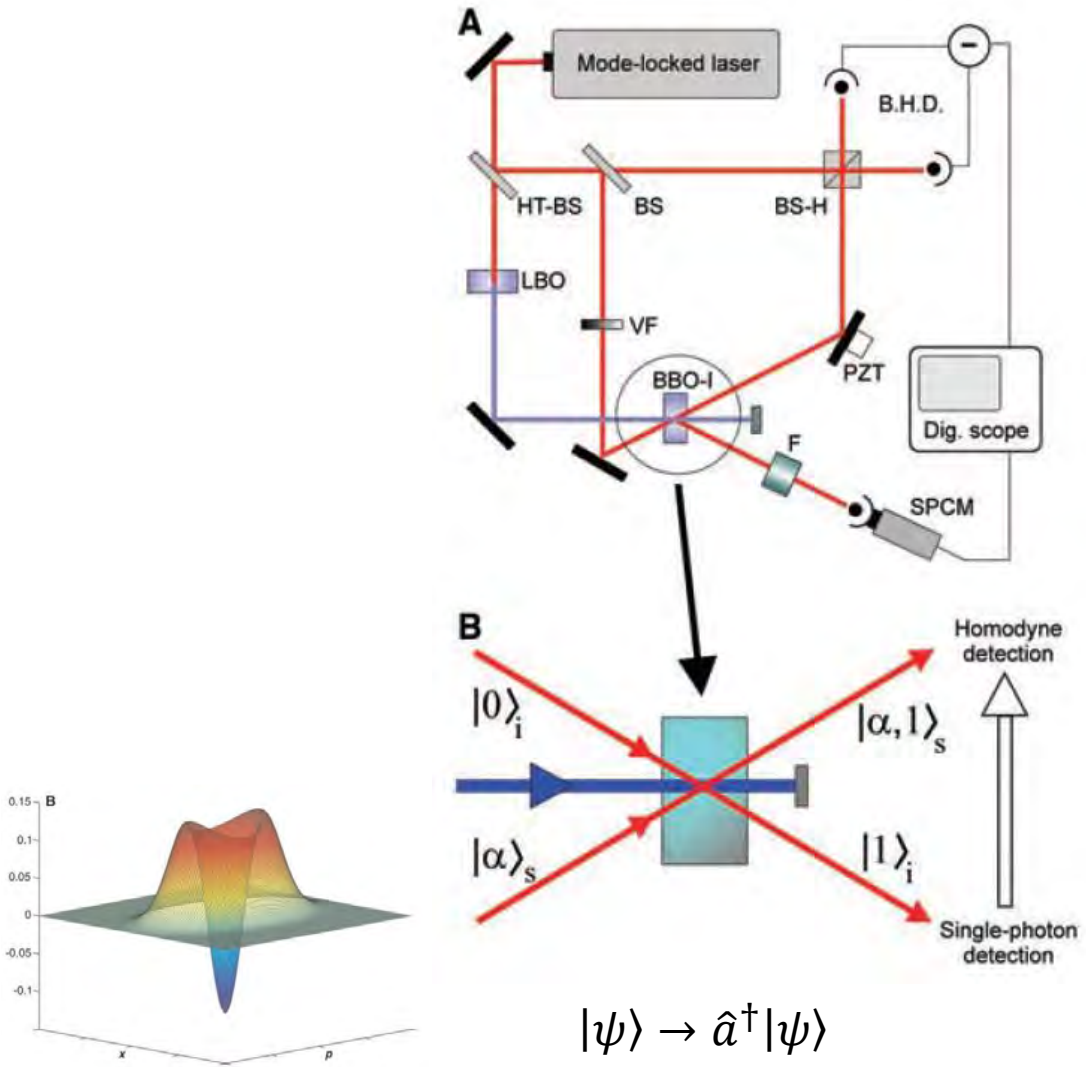
Podmíněná subtrakce a adice fotonů



A. Ourjoumteev, R. Tualle-Brouri, J. Laurat, and P. Grangier, *Generating Optical Schrodinger Kittens for Quantum Information Processing*, Science **312**, 83 (2006).

A. Zavatta, S. Viciani, M. Bellini, *Quantum-to-Classical Transition with Single-Photon-Added Coherent States of Light*, Science **306**, 660 (2004).

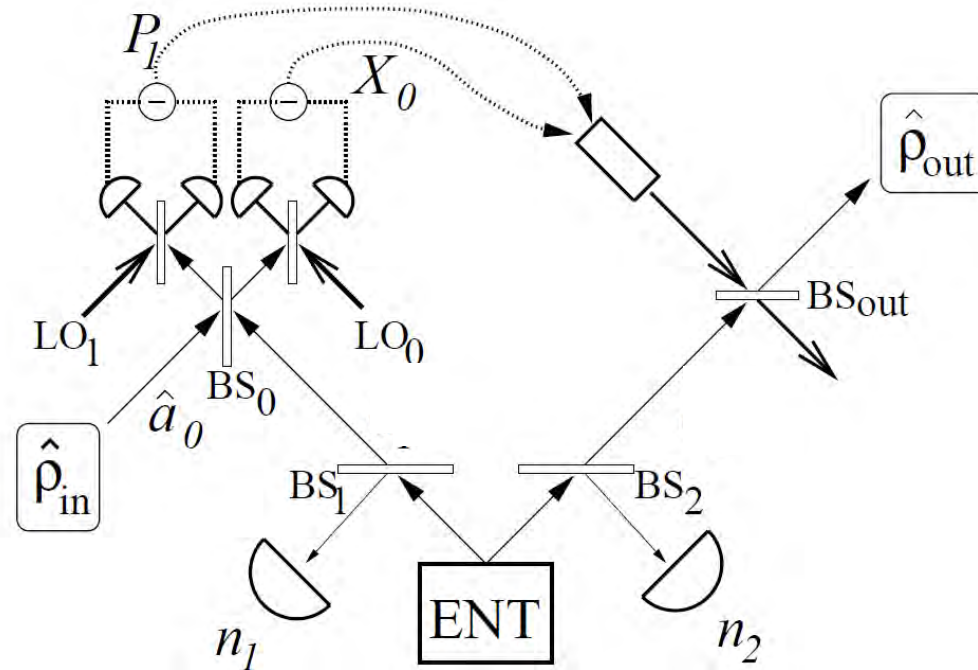
Podmíněná subtrakce a adice fotonů



A. Ourjoumtsev, R. Tualle-Brouri, J. Laurat, and P. Grangier, *Generating Optical Schrodinger Kittens for Quantum Information Processing*, Science **312**, 83 (2006).

A. Zavatta, S. Viciani, M. Bellini, *Quantum-to-Classical Transition with Single-Photon-Added Coherent States of Light*, Science **306**, 660 (2004).

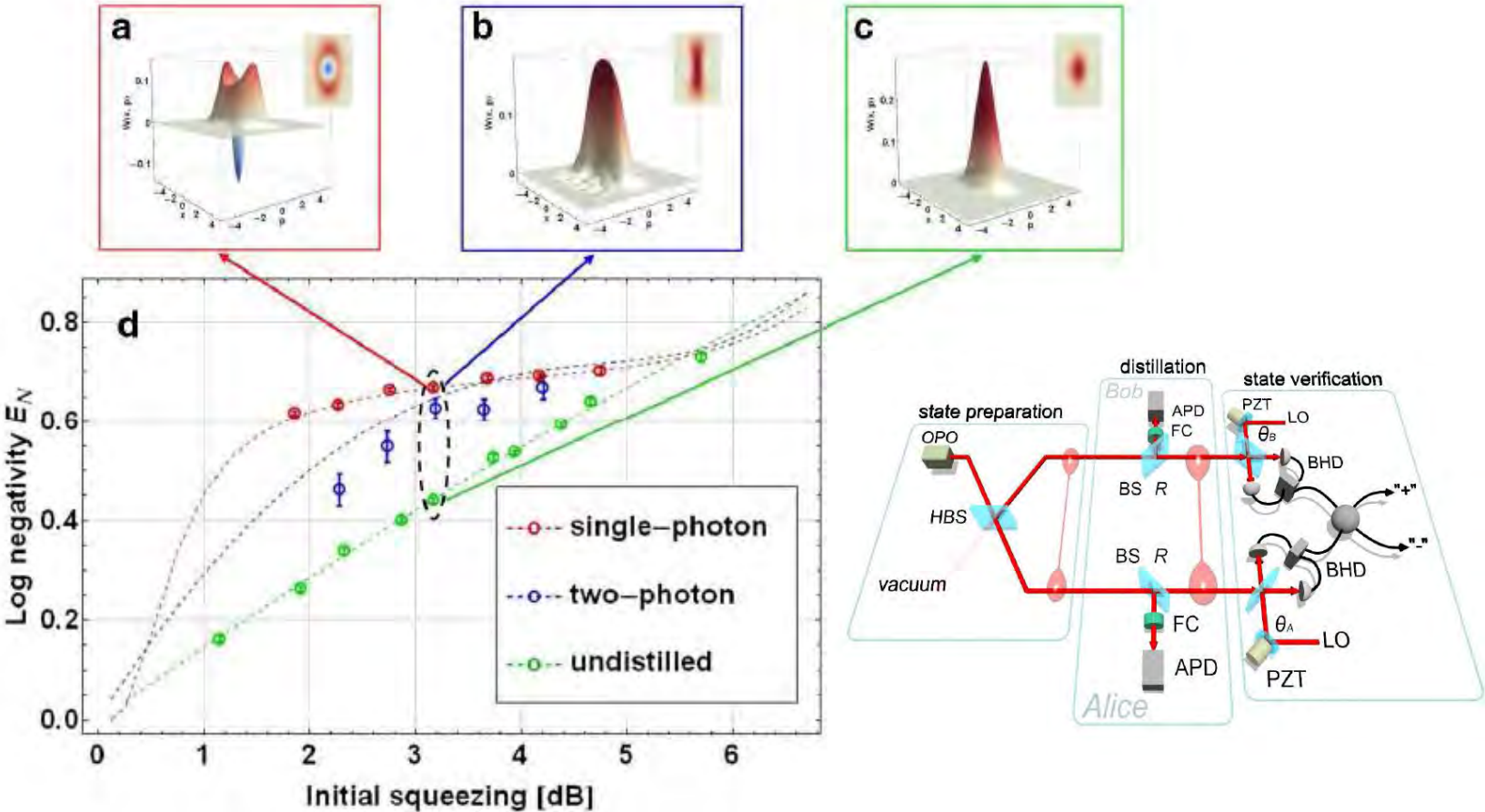
Koncentrace kvantové provázanosti pomocí subtrakce fotonů



$$|\Psi\rangle_{in} = \sqrt{1 - \lambda^2} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n |n\rangle_A |n\rangle_B$$

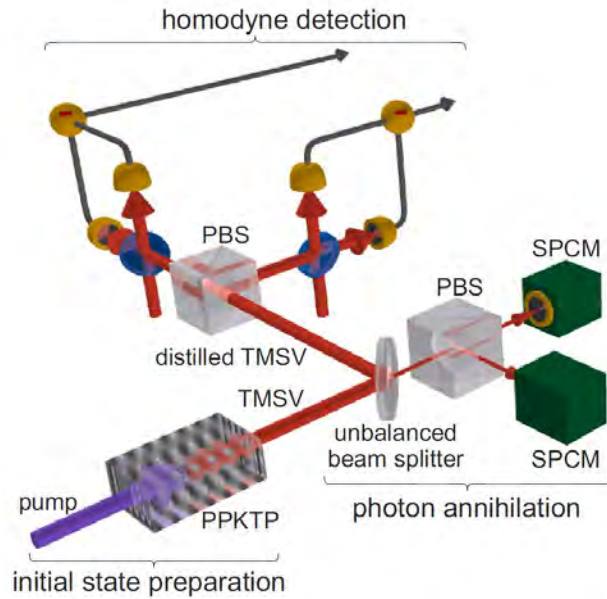
$$|\Psi\rangle_{out} \propto \hat{a}\hat{b}|\Psi\rangle_{in} = \lambda\sqrt{1 - \lambda^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n + 1)\lambda^n |n\rangle_A |n\rangle_B$$

Koncentrace kvantové provázanosti pomocí subtrakce fotonů

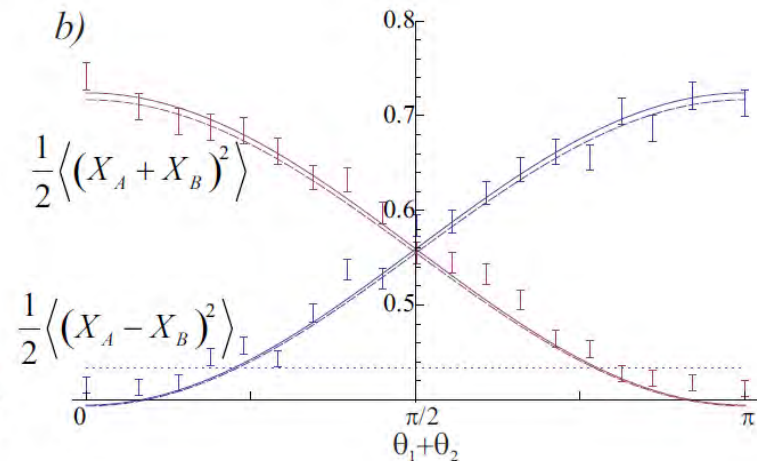
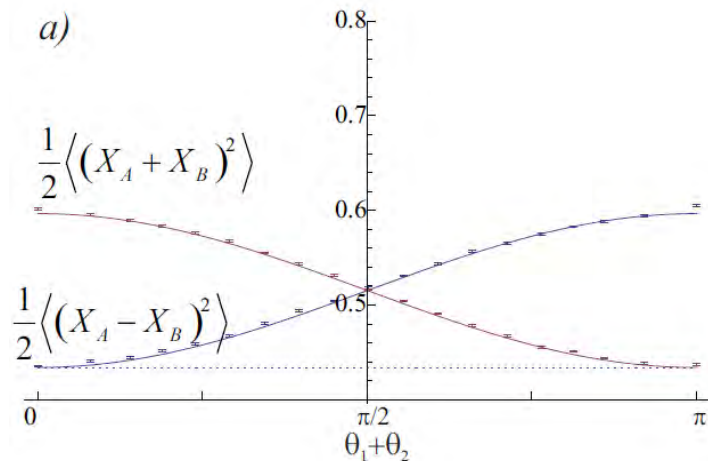


H. Takahashi, J.S. Neergaard-Nielsen, M. Takeuchi, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa, M. Sasaki, Nature Photonics 4, 178 (2010).

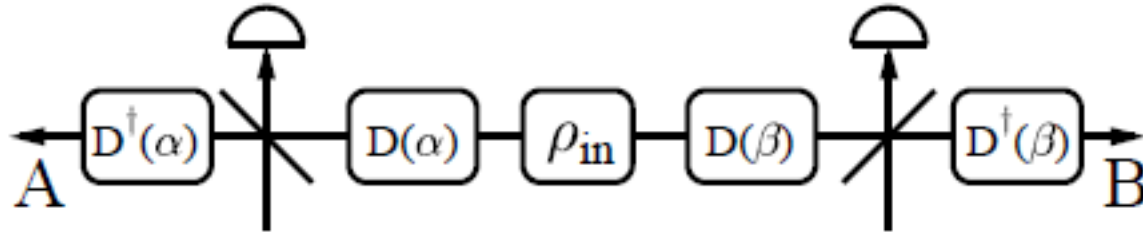
Koncentrace kvantové provázanosti pomocí subtrakce fotonů



$$|\Psi\rangle_{\text{out}} \propto \hat{a}\hat{b}|\Psi\rangle_{\text{in}} = \lambda\sqrt{1-\lambda^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)\lambda^n |n\rangle_A |n\rangle_B$$



Optimalizovaný protokol pro koncentraci kvantové provázanosti



Kombinace podmíněné subtrakce fotonu a koherentního posunutí

$$|\Psi\rangle_{\text{out}} \propto (\hat{a} + \alpha)(\hat{b} + \beta) |\Psi\rangle_{\text{in}}$$

Dvumódové stlačené vakuum s malým stlačením: $\lambda \ll 1$

$$|\Psi\rangle_{\text{out}} \propto (\hat{a} + \alpha)(\hat{b} + \beta)(|00\rangle + \lambda|11\rangle)$$

$$\alpha = -\beta = \sqrt{\lambda} \quad \Rightarrow \quad |\Psi\rangle_{\text{out}} \propto \lambda^{3/2}(|01\rangle - |10\rangle)$$

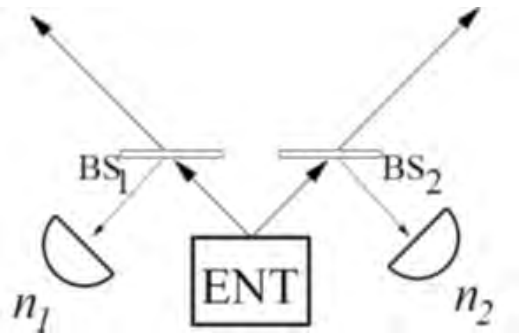
J. Fiurášek, *Improving entanglement concentration of Gaussian states by local displacements*, Phys. Rev. A **84**, 012335 (2011).

S.L. Zhang and P. van Loock, *Local Gaussian operations can enhance continuous-variable entanglement distillation*, Phys. Rev. A **84**, 062309 (2011).

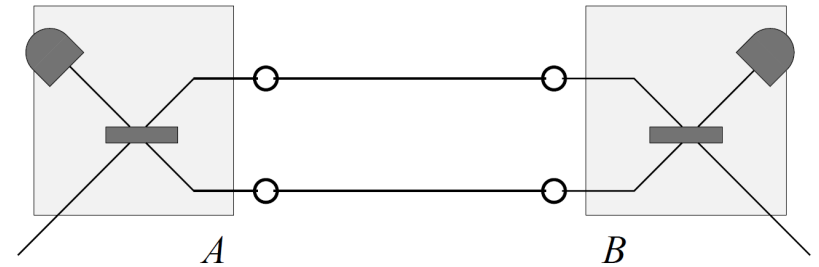
Destilace kvantové provázanosti pomocí subtrakce fotonů a Gaussifikace

Protokol:

- Na vstupní sdílený kvantově provázaný stav je aplikovaná lokální subtrakce fotonu na straně Alice i Boba
- Výsledný stav je gaussifikován pomocí iterativního gaussifikačního protokolu



+



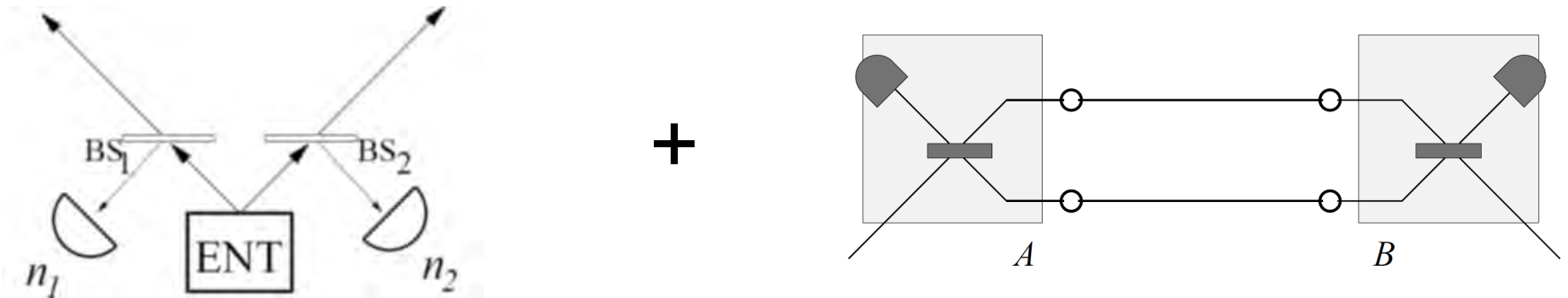
Vstupní smíšené kvantově provázané Gaussovské stavy:

- Dojde k navýšení kvantové provázanosti
- Současně se ale rovněž navýší šum a sníží se purita stavu

Destilace kvantové provázanosti pomocí subtrakce fotonů a Gaussifikace

Protokol:

- Na vstupní sdílený kvantově provázaný stav je aplikovaná lokální subtrakce fotonu na straně Alice i Boba
- Výsledný stav je gaussifikován pomocí iterativního gaussifikačního protokolu



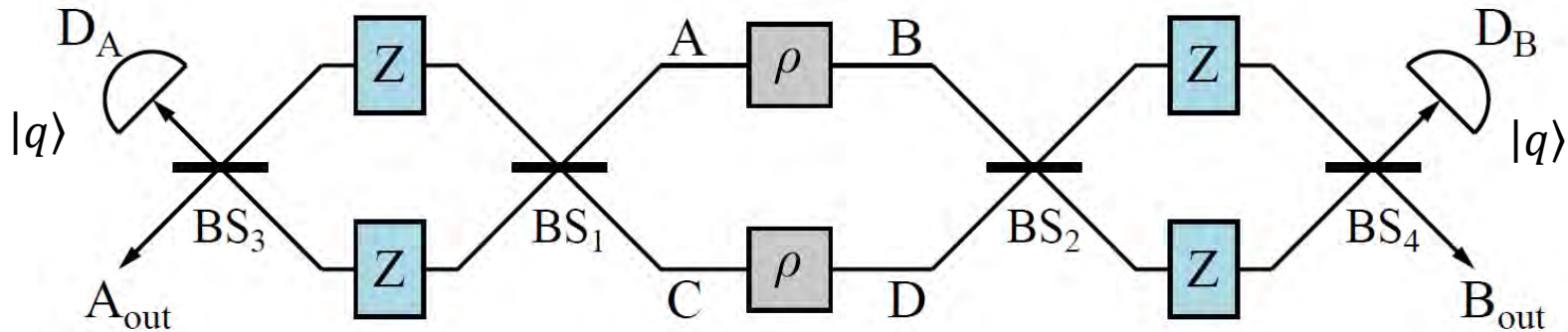
Parametrizace vstupního stavu:

- Čisté dvoumódové stlačené vakuum (λ), průchod ztrátovým kanálem s propustností T
- Parametr

$$\epsilon = (1 - T) \tanh r$$

zůstává při destilaci konstantní.

Schéma pro destilaci čistých dvoumódových stlačených stavů



$$\hat{Z} = (\hat{n} - 1)$$

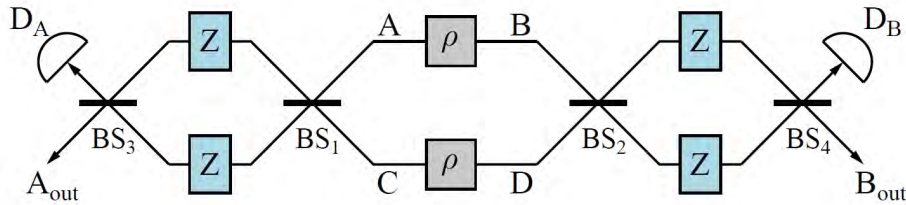
$$|q\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+q^2}}(q|0\rangle + |1\rangle)$$

Dvojité iterační schéma:

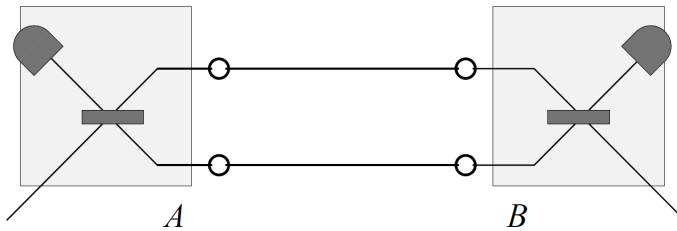
- Degaussifikace s využitím dvou kopií stavu
- Iterativní gaussifikace
- Opakovaná aplikace celého protokolu

Volbou parametru q v každé iteraci protokolu lze docílit libovolné výstupní stlačení

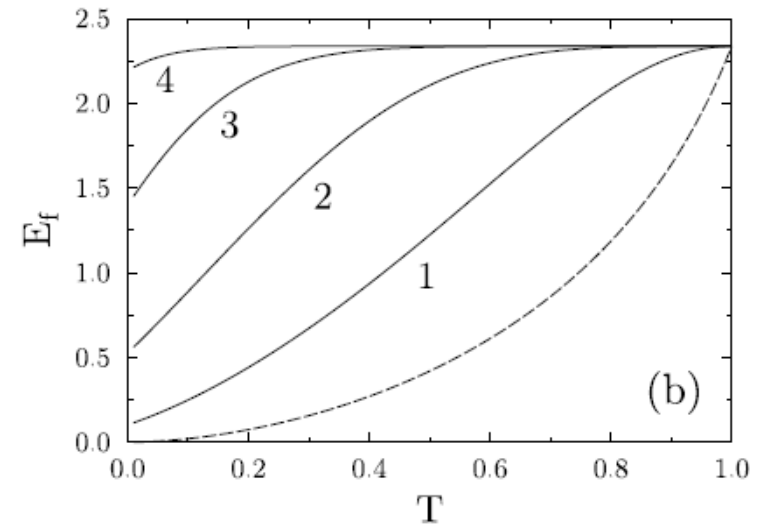
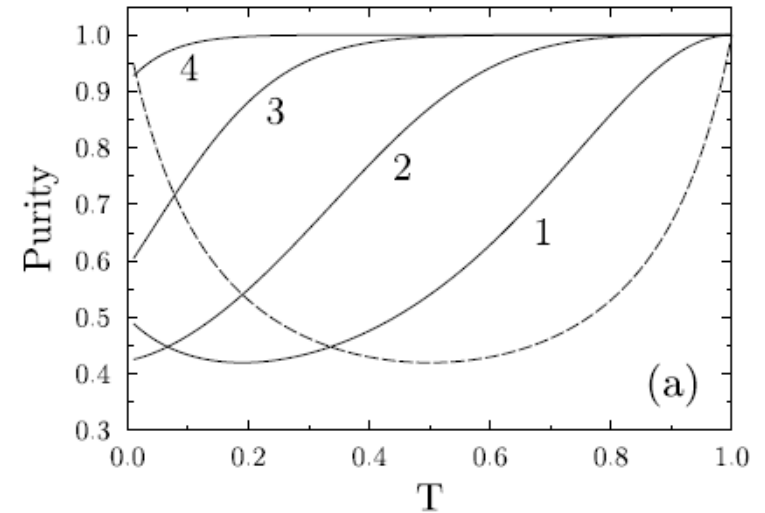
Schéma pro destilaci čistých dvoumódových stlačených stavů



+



Celý protokol je třeba opakovaně iterovat.



Plán přednášky

- Spojité kvantové proměnné, Gaussovské stavy a operace
- Kvantová komunikace se spojitými kvantovými proměnnými
- Ztráty a fázové fluktuace v kvantové komunikaci
- Koncentrace a destilace kvantové provázanosti
- Gaussifikační protokol a jeho aplikace
- Podmíněná subtrakce a adice fotonů a jejich aplikace
- Bezšumový kvantový zesilovač

Bezšumové kvantové zesílení světla

$$|\alpha\rangle \rightarrow |g\alpha\rangle, \quad \forall \alpha$$

Tato transformace je fyzikálně nepřipustná.

Deterministické fázově nesenzitivní zesílení signálu je vždy doprovázeno nárůstem šumu

Bezšumový kvantový zesilovač:

- Podmíněné schéma, funguje pouze s určitou pravděpodobností
- Úspěch je indikován výsledkem pomocného měření (v ideálním případě)
- Fyzikální aproximace operace $g^{\hat{n}}$

$$g^{\hat{n}}|\alpha\rangle = e^{(g^2-1)|\alpha|^2/2}|g\alpha\rangle$$

Bezšumové kvantové zesílení světla

$$|\alpha\rangle \rightarrow |g\alpha\rangle, \quad \forall \alpha$$

Tato transformace je fyzikálně nepřipustná.

Deterministické fázově nesenzitivní zesílení signálu je vždy doprovázeno nárůstem šumu

Bezšumový kvantový zesilovač:

- Podmíněné schéma, funguje pouze s určitou pravděpodobností
- Úspěch je indikován výsledkem pomocného měření (v ideálním případě)
- Fyzikální aproximace operace $g^{\hat{n}}$

$$g^{\hat{n}}|\alpha\rangle = e^{(g^2-1)|\alpha|^2/2}|g\alpha\rangle$$

Možné aplikace

- estimace a klonování koherentních stavů
- zesílení kvantové provázanosti
- generace koherentních superpozic koherentních stavů s velkou amplitudou
- kompenzace ztrát v kvantové komunikaci

Bezšumové kvantové zesílení světla

$$|\alpha\rangle \rightarrow |g\alpha\rangle, \quad \forall \alpha$$

Tato transformace je fyzikálně nepřipustná.

Deterministické fázově nesenzitivní zesílení signálu je vždy doprovázeno nárůstem šumu

Bezšumový kvantový zesilovač:

- Podmíněné schéma, funguje pouze s určitou pravděpodobností
- Úspěch je indikován výsledkem pomocného měření (v ideálním případě)
- Fyzikální aproximace operace $g^{\hat{n}}$

$$g^{\hat{n}}|\alpha\rangle = e^{(g^2-1)|\alpha|^2/2}|g\alpha\rangle$$

Různé implementace:

- Modifikované kvantové nůžky
- Náhodná modulace signálu a podmíněná subtrakce fotonů
- Kombinace podmíněné subtrakce a adice fotonů

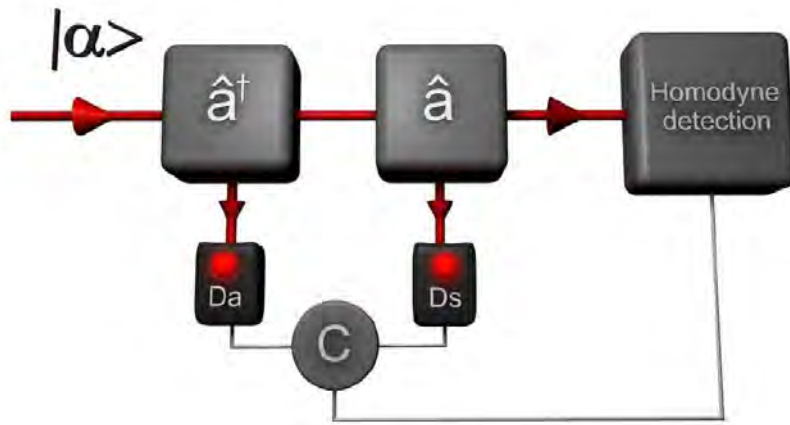
G. Y. Xiang, T. C. Ralph, A. P. Lund, N. Walk, and G.J. Pryde, *Nature Phot.* **4**, 316-319 (2010).

F. Ferreyrol, M. Barbieri, R. Blandino, S. Fossier, R. Tualle-Brouri, and P. Grangier, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 123603 (2010).

M.A. Usuga, C.R. Muller, C. Wittmann, P. Marek, R. Filip, C. Marquardt, G. Leuchs, and U.L. Andersen, *Nature Phys.* **6**, 767-771 (2010).

A. Zavatta, J. Fiurášek, and M. Bellini, *Nature Phot.* **5**, 52 (2011).

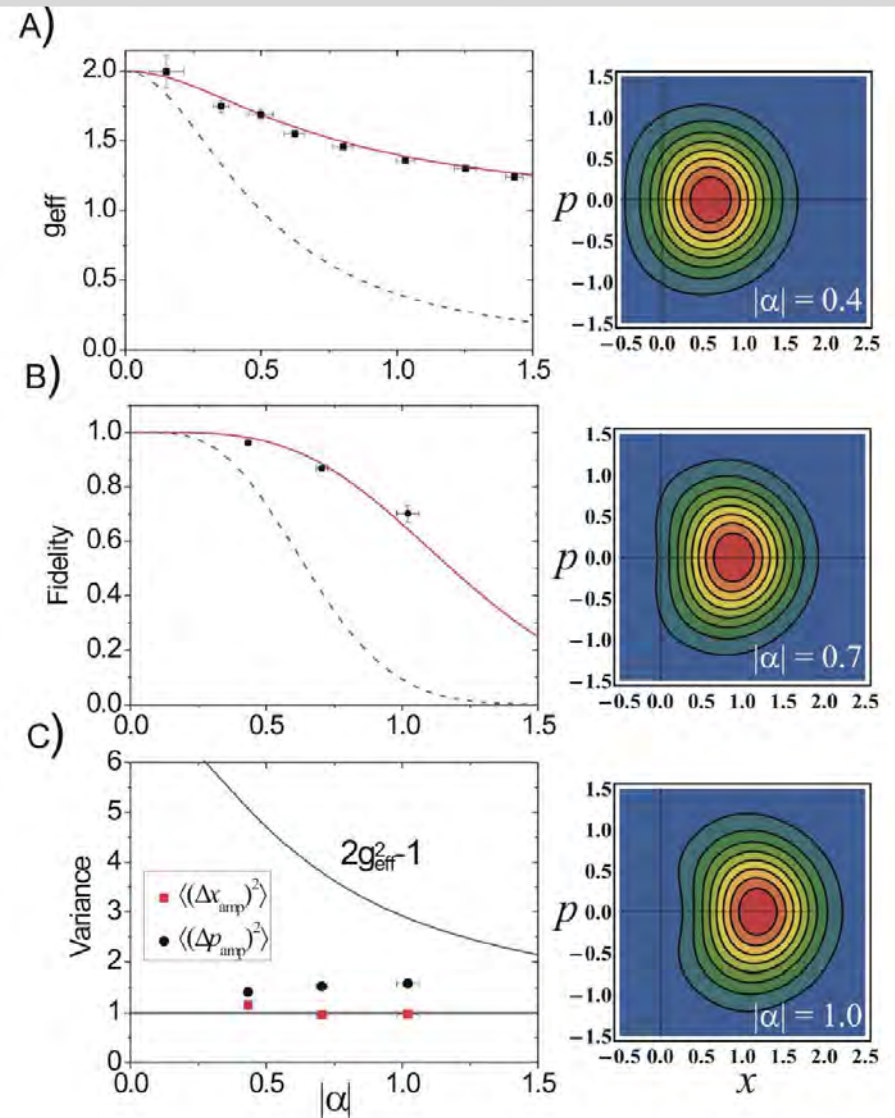
Bezšumové kvantové zesílení pomocí subtrakce a adice fotonů



$$\hat{a}\hat{a}^\dagger|\alpha\rangle = (\hat{n} + 1)|\alpha\rangle$$

$$(\hat{n} + 1)|\alpha\rangle \approx (\hat{n} + 1)(|0\rangle + \alpha|1\rangle)$$

$$(\hat{n} + 1)|\alpha\rangle \approx |0\rangle + 2\alpha|1\rangle \approx |2\alpha\rangle$$

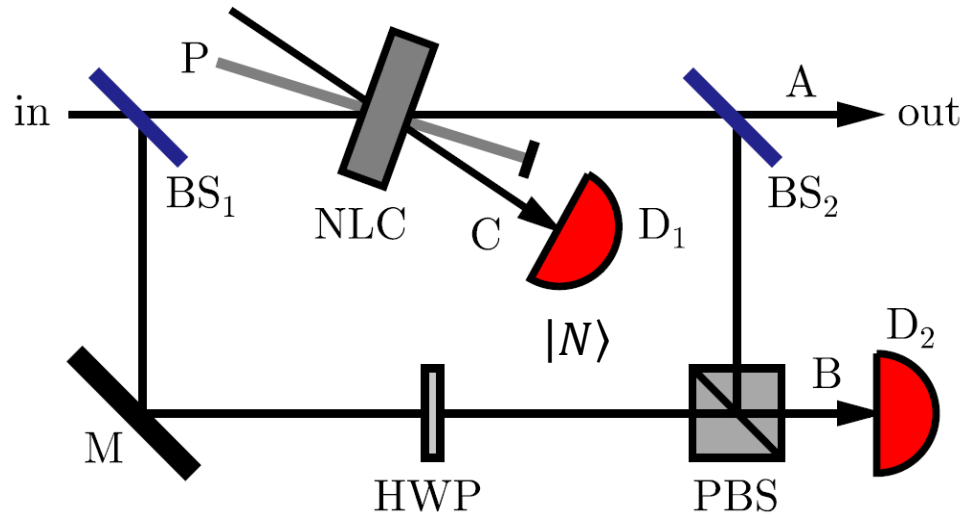


A. Zavatta, J. Fiurášek, and M. Bellini, *A high-fidelity noiseless amplifier for quantum light states*, Nature Photonics **5**, 52–56 (2011).

P. Marek and R. Filip, *Coherent-state phase concentration by quantum probabilistic amplification*, Phys. Rev. A, **81**, 022302 (2010).

J. Fiurášek, *Engineering quantum operations on traveling light beams by multiple photon addition and subtraction*, Phys. Rev. A, **80**, 053822 (2009).

Realizace kvantových operací pomocí subtrakce a adice fotonů



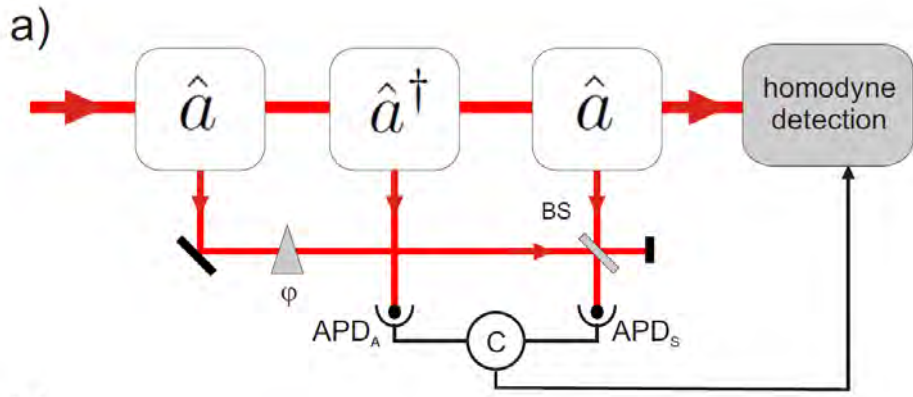
$$|\Psi\rangle = \sum_{k=0}^N b_k |k, N - k\rangle_{H,V}$$

Superpozice podmíněné adice a subtrakce N fotonů.

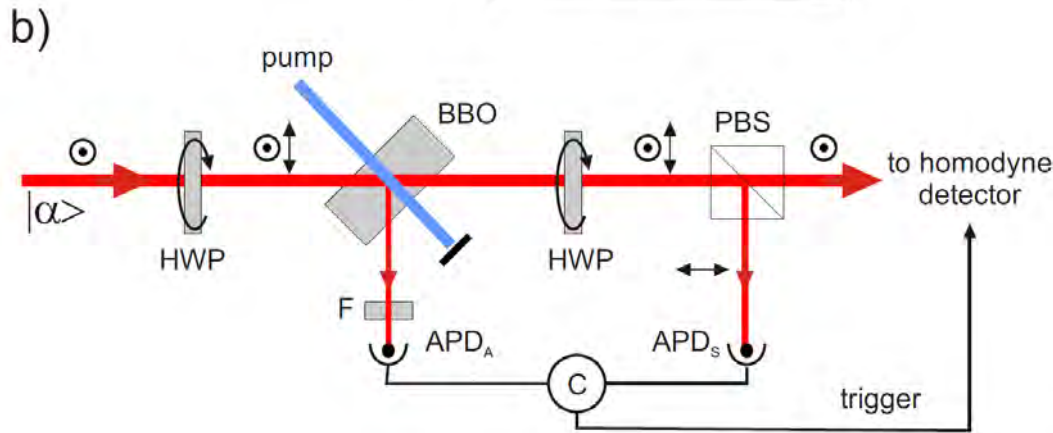
Výsledná operace je diagonální v bázi Fockových stavů – přibližně polynom N -tého stupně v n :

$$P_N(\hat{n}) = C_N \nu^{\hat{n}} \sum_{k=0}^N b_k \sqrt{\binom{N}{k}} \frac{(\hat{n} + k)!}{(\hat{n} + k - N)!}$$

Emulace Kerrovské nelinearity pomocí subtrakce a adice fotonů



$$\hat{V} = A(\hat{n} + 1) + B\hat{n}$$



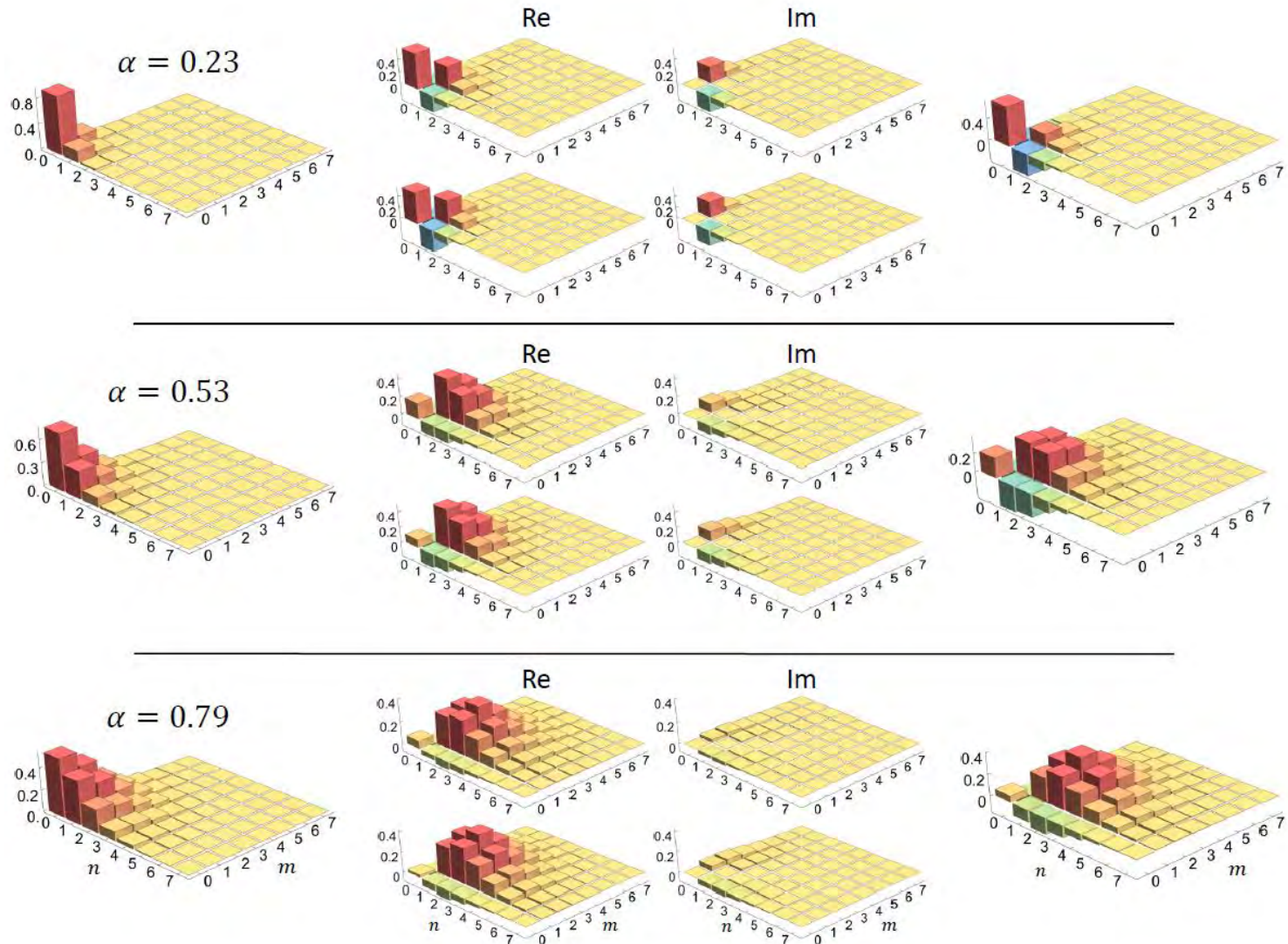
$$\frac{B}{A} = -3 - \sqrt{2}$$

$$g = 1 + \sqrt{2}$$

$$c_0|0\rangle + c_1|1\rangle + c_2|2\rangle = -c_0|0\rangle + gc_1|1\rangle + g^2c_2|2\rangle$$

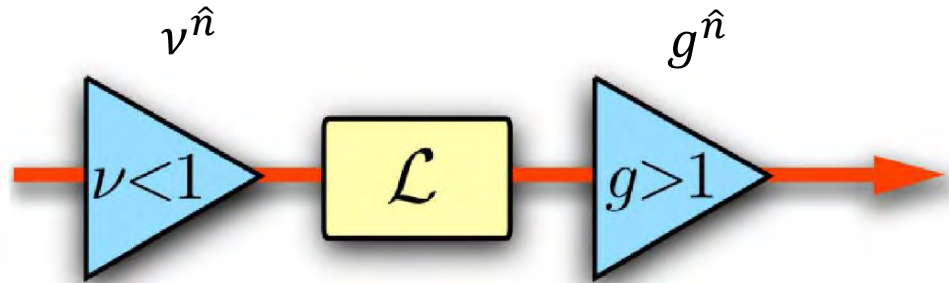
Kombinace ultrasilné Kerrovské nelinearity a bezšumového zesílení.

Emulace Kerrovské nelinearity pomocí subtrakce a adice fotonů



Testování Kerrovské nelinearity na vstupních slabých koherentních stavech.

Přímé potlačení ztrát v optické kvantové komunikaci

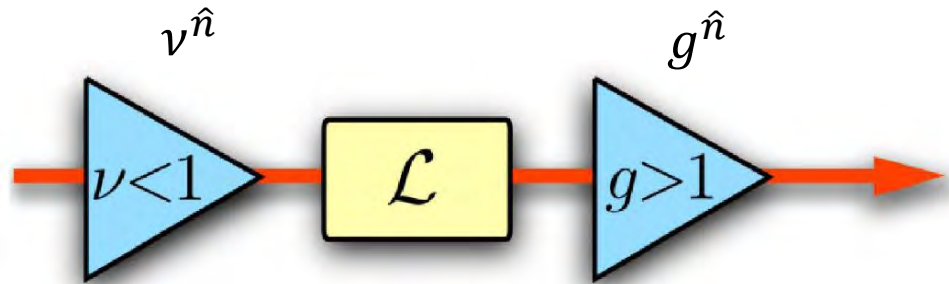


Kombinace bezšumové kvantové atenuace na vstupu a bezšumového kvantového zesílení na výstupu kvantového ztrátového kanálu.

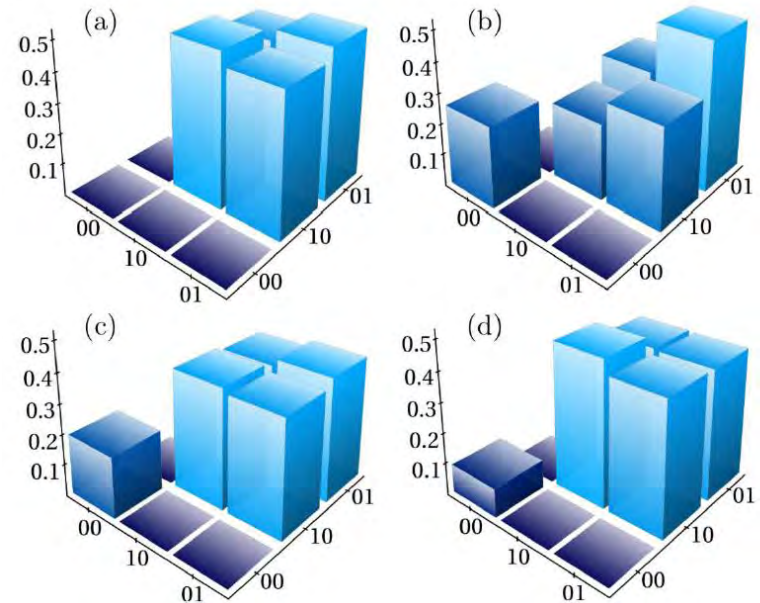
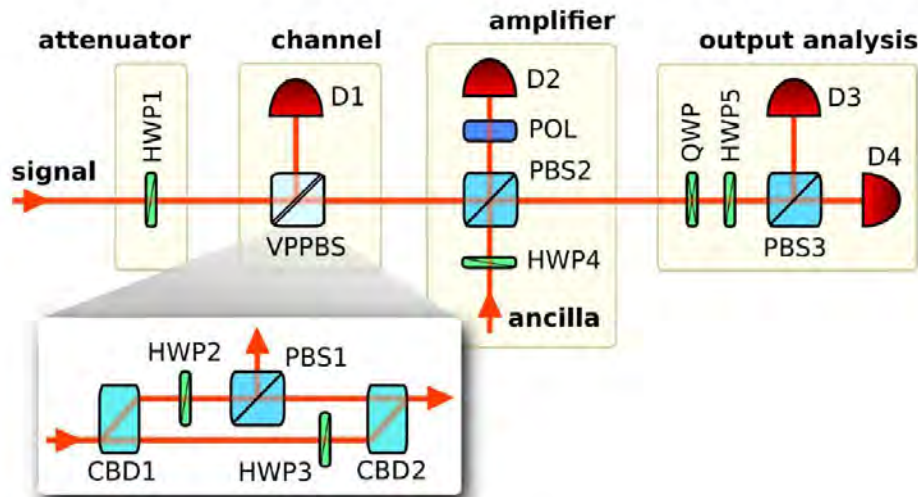
M. Mičuda, I. Straka, M. Miková, M. Dušek, N. J. Cerf, J. Fiurášek, and M. Ježek, *Noiseless Loss Suppression in Quantum Optical Communication*, Phys. Rev. Lett. **109**, 180503 (2012).

T. C. Ralph, *Quantum error correction of continuous-variable states against Gaussian noise*, Phys. Rev. A **84**, 022339 (2011).

Přímé potlačení ztrát v optické kvantové komunikaci



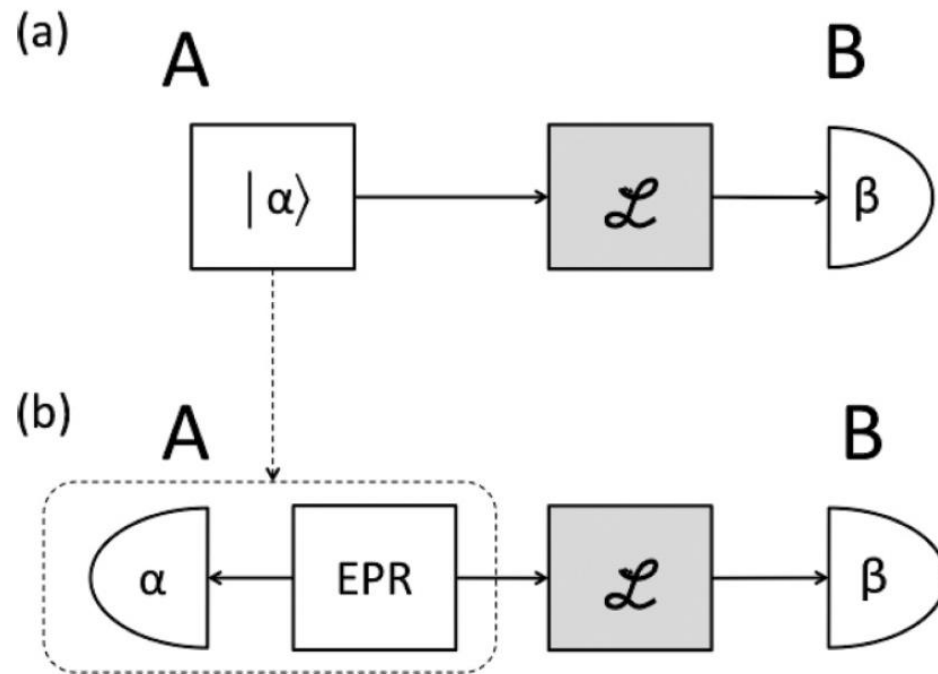
Kombinace bezšumové kvantové atenuace na vstupu a bezšumového kvantového zesílení na výstupu kvantového ztrátového kanálu.



M. Mičuda, I. Straka, M. Miková, M. Dušek, N. J. Cerf, J. Fiurášek, and M. Ježek, *Noiseless Loss Suppression in Quantum Optical Communication*, Phys. Rev. Lett. **109**, 180503 (2012).

T. C. Ralph, *Quantum error correction of continuous-variable states against Gaussian noise*, Phys. Rev. A **84**, 022339 (2011).

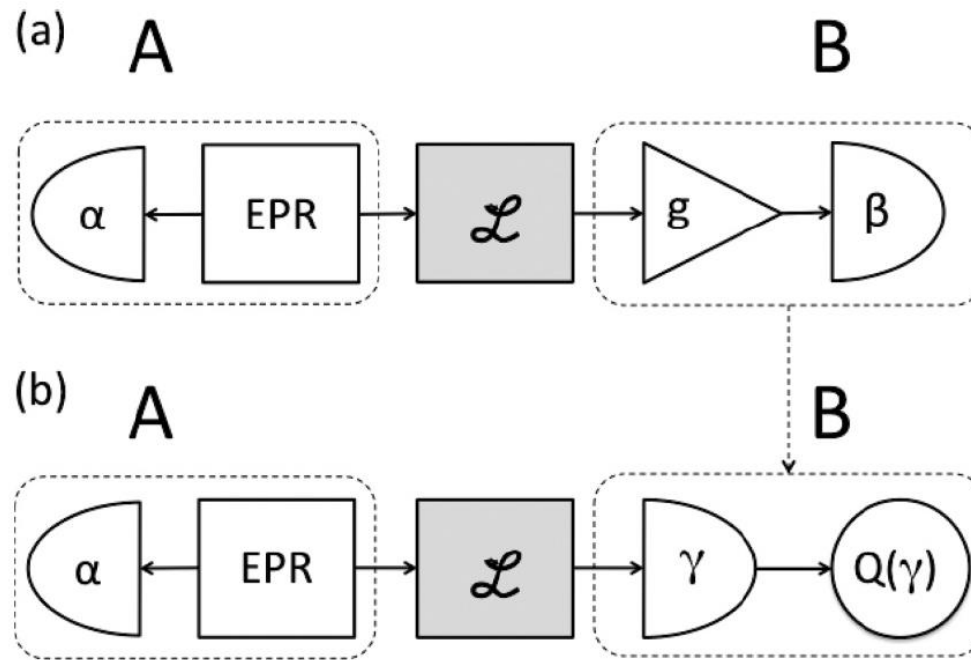
Virtuální kvantové bezšumové zesílení a atenuace



(a) Kvantová distribuce klíče s koherentními stavy a heterodynní detekcí

(b) Ekvivalentní symetrické schéma s kvantově provázaným EPR stavem a heterodynní detekcí na obou stranách.

Virtuální kvantové bezšumové zesílení a atenuace



$$g^{\hat{n}}|\alpha\rangle = e^{(g^2-1)|\alpha|^2/2}|g\alpha\rangle$$

(a) Kvantová distribuce klíče doplněná o bezšumový kvantový zesilovač

(b) Ekvivalentní schéma, kde bezšumové zesílení je nahrazené vhodným zpracováním naměřených dat.

Závěr – trendy a perspektivy

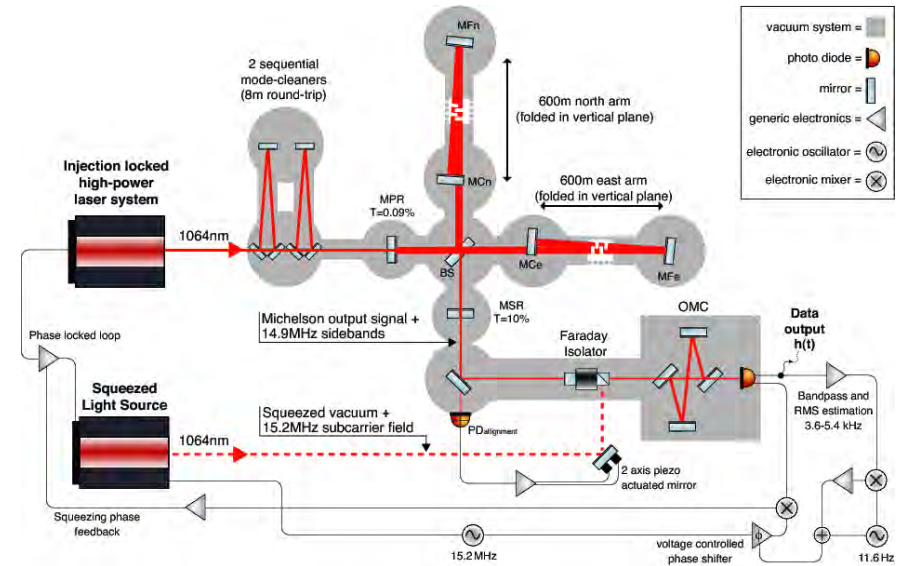
Hybridní kvantové systémy

- optimální využití a kombinace jednotlivých platforem
- Spojité i diskrétní kvantové proměnné
- Světlo jako propojení kvantových uzlů tvořených materiálními systémy (atomové oblaky, BEC, ionty v pasti, supravodivé kvantové bity, ...)
- Kvantové optomechanické a elektromechanické systémy

Využití nejnovějších technologií

- Integrované systémy na optickém čipu (2D i 3D struktury)
- Pokročilé fotonické struktury
- Vysoce účinné supravodivé jednofotonové detektory

Závěr – trendy a perspektivy



Detektor gravitačních vln GEO 600 u Hannoveru využívá stlačeného světla pro zlepšení parametrů detektoru.



Poděkování spolupracovníkům

Olomouc:

Miroslav Ježek, Michal Mičuda, Ivo Straka, Martina Miková, Robert Stárek, Ladislav Mišta, Petr Marek, Radim Filip, Miloslav Dušek, Tomáš Opatrný, Jaroslav Řeháček, Zdeněk Hradil a další

Hannover/Hamburg:

Roman Schnabel, Boris Hage, Christoph Baune, Alex Franzen, Christina Vollmer, Daniela Abdelkhalek

Florencie:

Marco Bellini, Alessandro Zavatta, Luca S. Costanzo, Nicola Biagi

Brusel:

Nicolas J. Cerf, Serge Massar, Julien Nisset, Raúl García-Patrón

Děkuji Vám za pozornost!

