

Kvantová komunikace a zpracování informace I

Jaromír Fiurášek

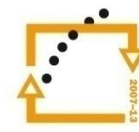
Katedra optiky, Univerzita Palackého, 17. listopadu 12, 77146 Olomouc



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vybrané aspekty kvantového zpracování informace s lineární optikou

Kvantová interference a statistika

1. Kvantová interference fotonů, Hong-Ou-Mandelův jev
2. Matematický popis pasivních lineárních optických interferometrů
3. Antikorelace jednofotonových stavů

Kvantová teleportace

1. Experimentální kvantová teleportace
2. Kvantová teleportace fotonů na telekomunikační vlnové délce
3. Kvantová teleportace párů kvantově provázaných fotonů

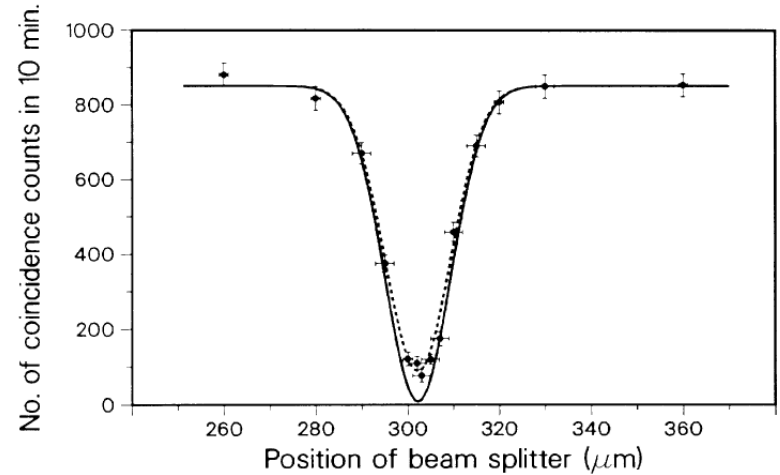
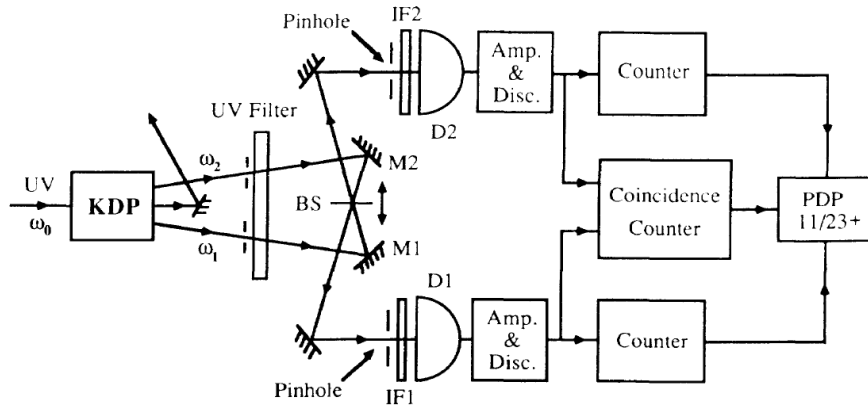
Kvantové kopírování fotonů

1. Experimentální kvantové kopírování polarizačních stavů jednotlivých fotonů
2. Optimální kvantové kopírování pomocí interference na děliči svazku
3. Optimální fázově kovariantní kopírování

Lineárně optická kvantová logická hradla

1. Lineárně optické CZ hradlo pomocí interference na nevyváženém děliči svazku
2. Nedestruktivní lineárně optické CNOT hradlo
3. Hradlo provádějící částečnou záměnu kvantových stavů dvou fotonů

Hong-Ou-Mandelův jev



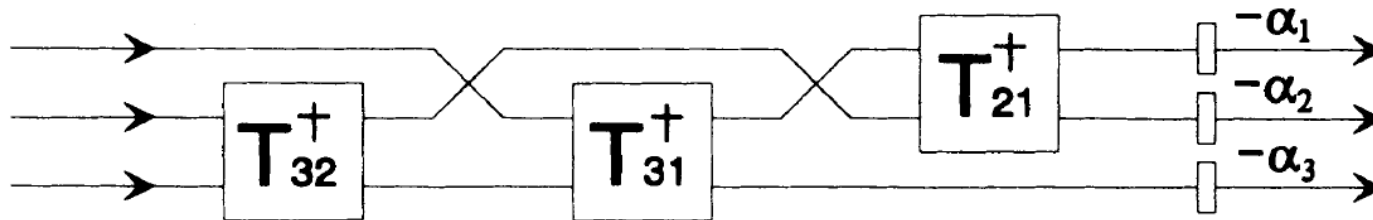
Generace párů korelovaných fotonů pomocí procesu sestupné frekvenční parametrické konverze.

Pokles počtu detekovaných dvoufotonových koincidencí v důsledku destruktivní interference na vyváženém děliči svazku.

Časové zpoždění mezi fotony ovlivňuje jejich rozlišitelnost a tím i vizibilitu dvoufotonové interference.

C.K. Hong, Z.Y. Ou, and L. Mandel, *Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference*, Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987).

Matematický popis pasivních lineárních interferometrů

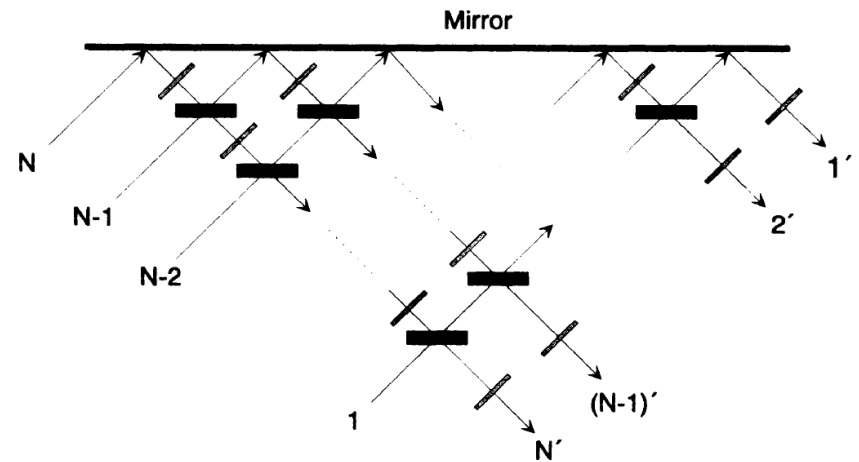


Libovolný N módový pasivní lineární optický interferometr je popsán unitární maticí s N řádky a vektory.

Tuto matici lze rozložit na součin unitárních matic, které vždy provazují jen dva módy.

Závěr:

Libovolný interferometr lze realizovat jako sekvenci děličů svazku a fázových posunů na jednotlivých módech. Počet potřebných děličů obecně roste kvadraticky s N .



Experimentální kvantová teleportace

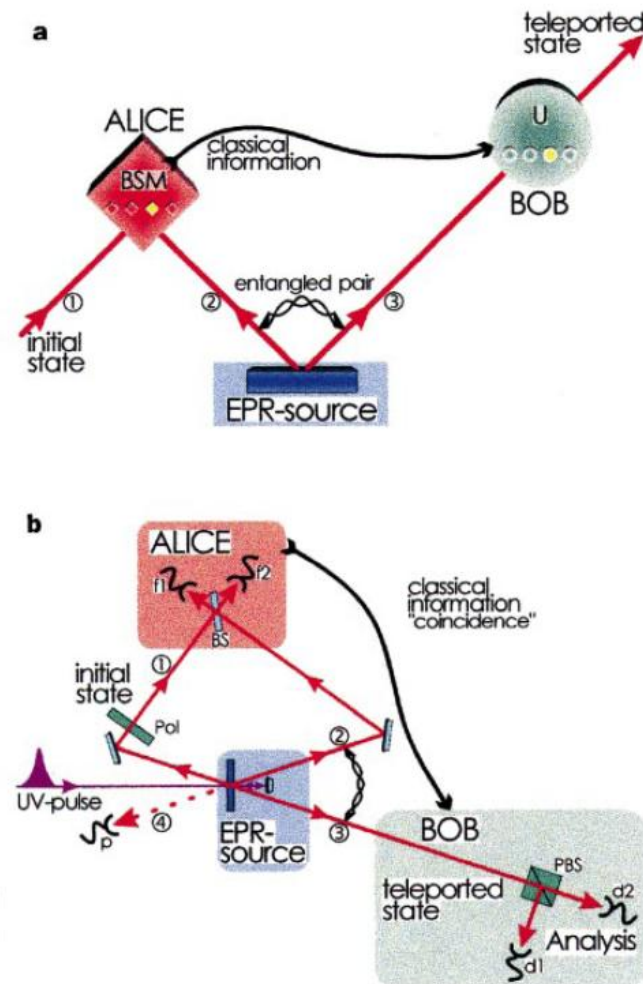
Generace kvantově korelovaných párů fotonů pomocí pulzní sestupné frekvenční parametrické konverze Typu II.

Jeden foton z prvního páru indikuje přítomnost druhého fotonu, jehož stav bude teleportován.

Druhý kvantově provázaný fotonový pár slouží jako kvantový kanál (EPR kanál) v teleportaci.

Alice provede Bellovo měření pomocí interference fotonů na vyváženém děliči svazku – koincidence indikují projekci na singletní Bellův stav a úspěšnou teleportaci.

Bob ověřuje úspěch teleportace pomocí měření na teleportovaném fotonu.

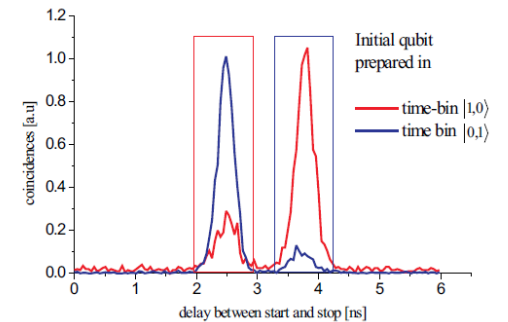
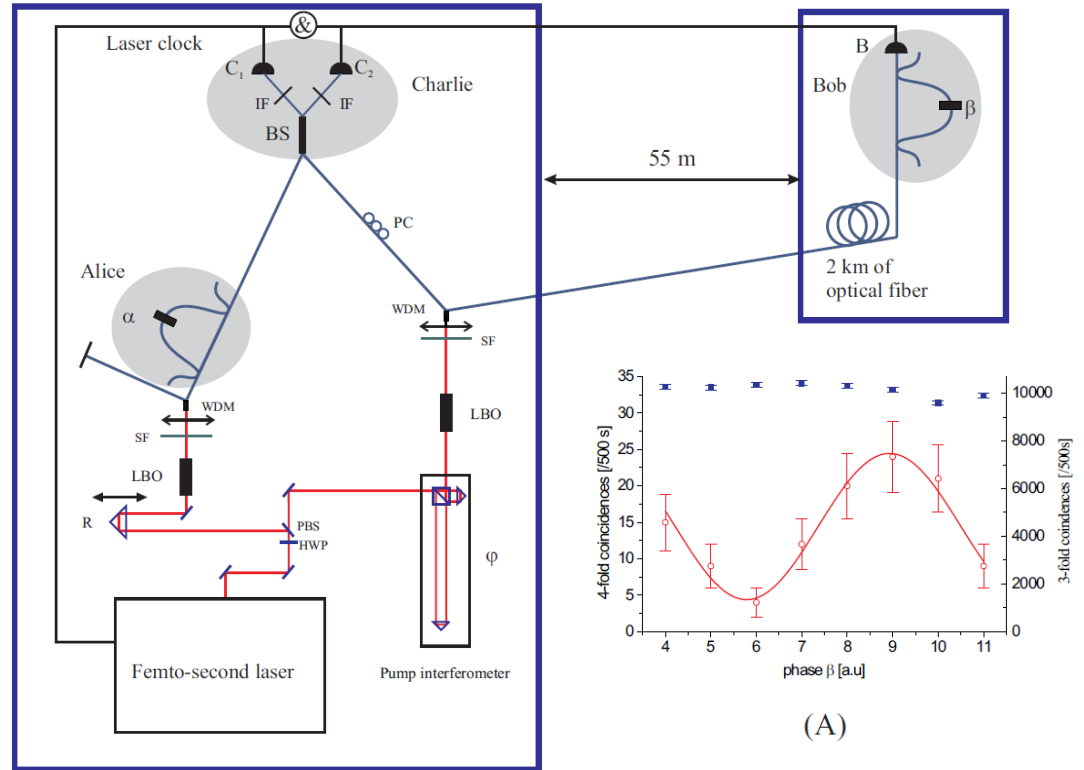


Teleportace fotonů na telekomunikační vlnové délce

Kvantové bity jsou v tomto experimentu kódované do tzv. time-binů, což je superpozice fotonu ve dvou časových oknech.

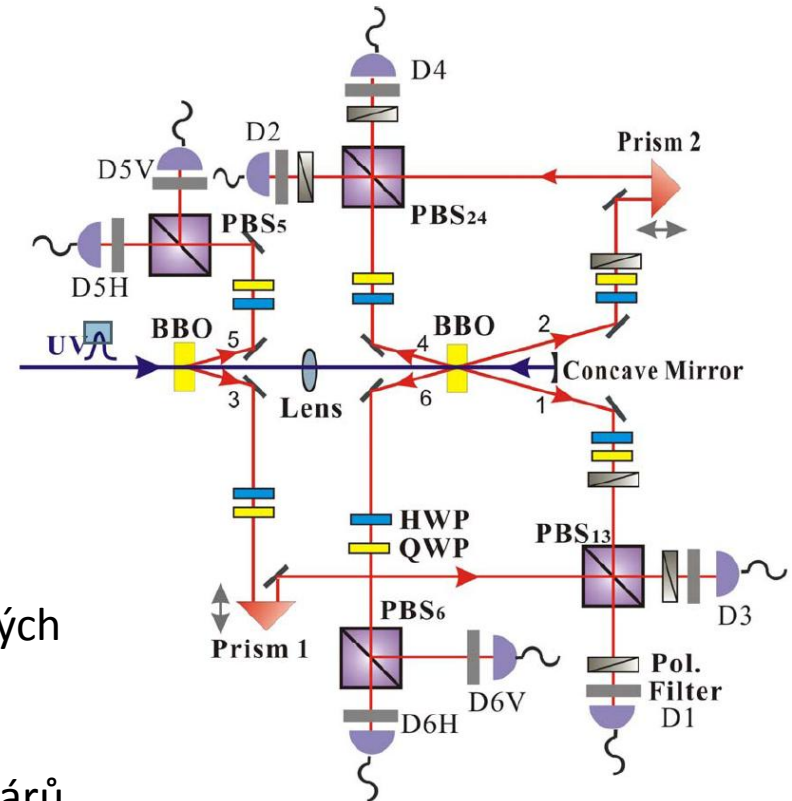
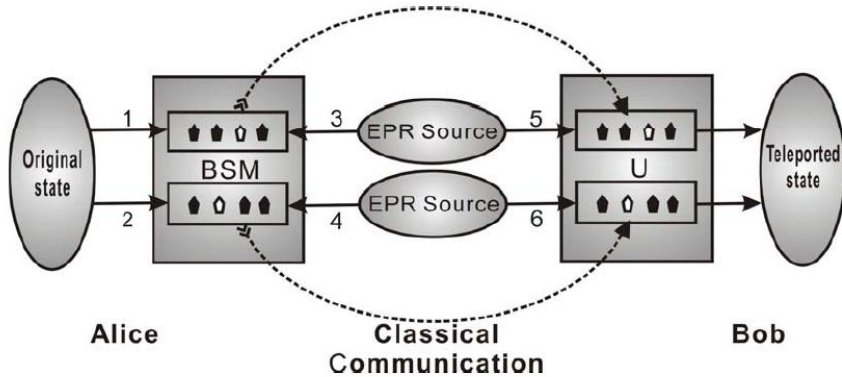
Teleportace se uskutečnila na vzdálenost 2 km optického vlákna, fyzická vzdálenost mezi laboratoří odesílatele a příjemce činila cca 55 m.

Experimenty na telekomunikační vlnové délce jsou náročné z toho důvodu, že nelze použít křemíkové diody a účinnost jednofotonových GaAS diod je jen cca 10%.



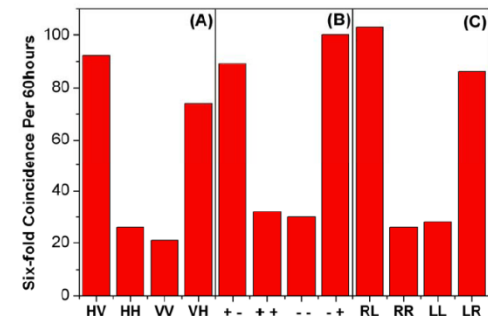
I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, and N. Gisin, *Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths*, Nature **421**, 509-513 (2003).

Teleportace kvantově provázaného páru fotonů



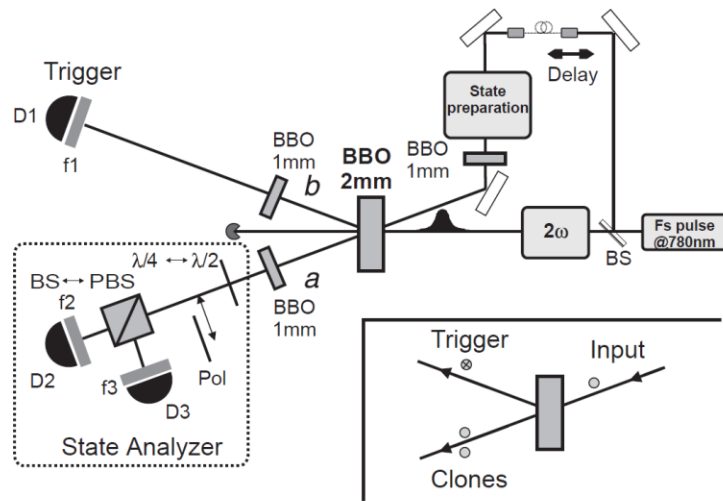
Náročné schéma vyžadující detekci šestifotonových koincencí.

Nízká pravděpodobnost současné generace tří párů fotonů implikuje dlouhou dobu měření, řádově týdny až měsíce.



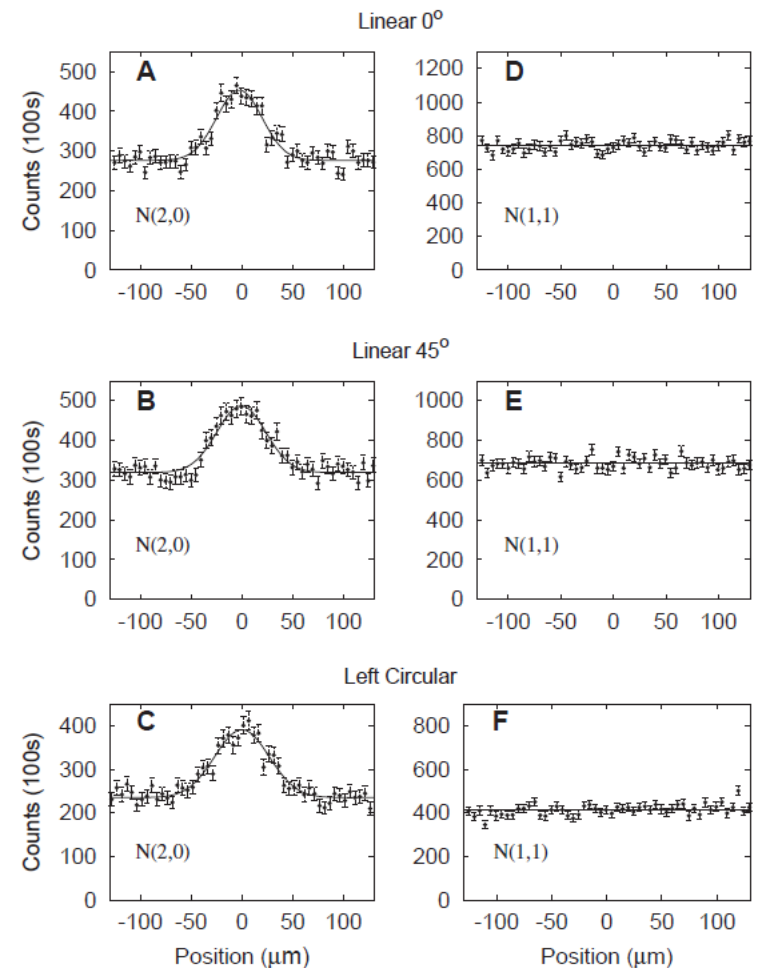
Q. Zhang, A. Goebel, C. Wagenknecht, Y.A. Chen, B. Zhao, T. Yang, A. Mair, J. Schmiedmayer, and J.W. Pan, *Experimental quantum teleportation of a two-qubit composite system*, Nature Phys. **2**, 678-682 (2006).

Experimentální kvantové kopírování fotonů

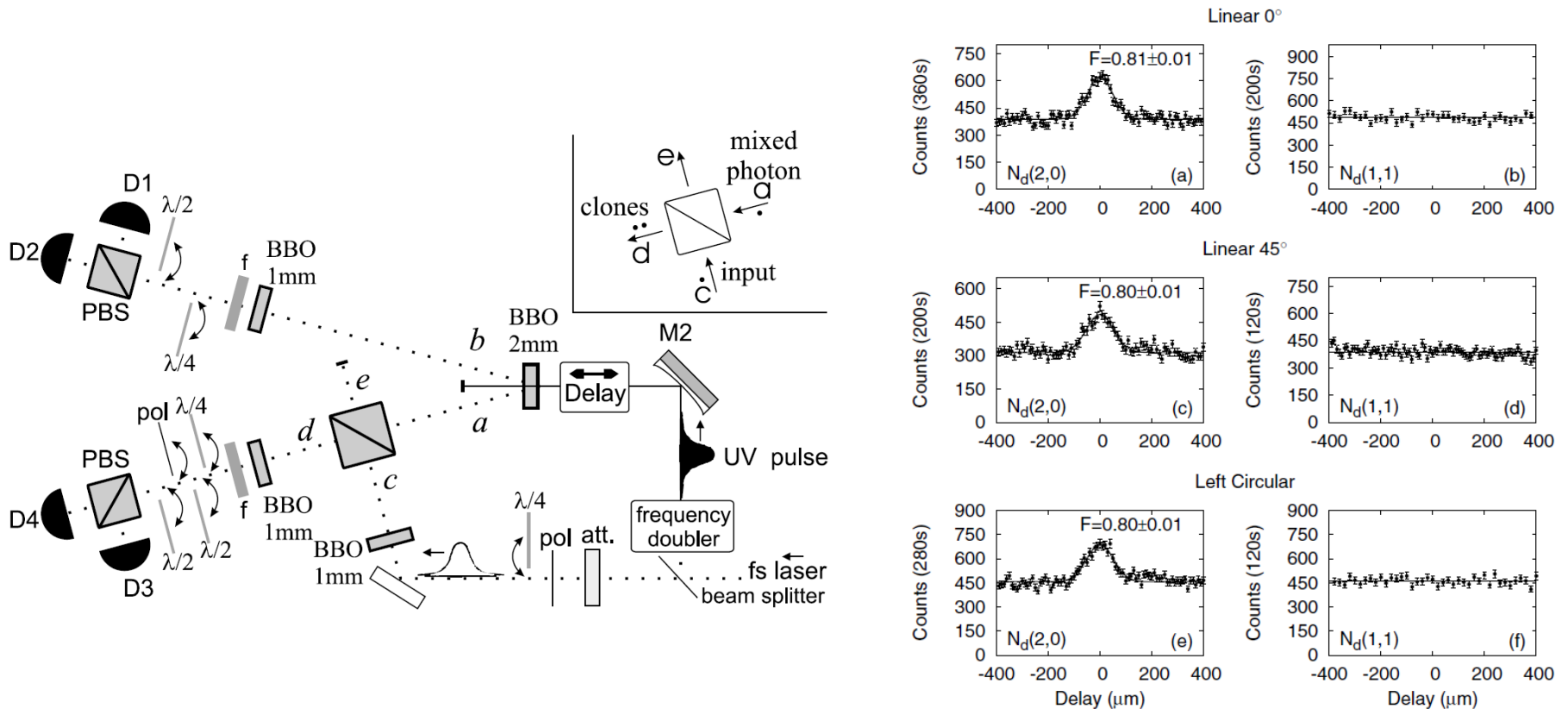


Klonování probíhá pomocí procesu stimulované sestupné frekvenční parametrické konverze v nelineárním krystalu.

Naměřená fidelita tohoto univerzálního kvantového kloneru je blízká teoretickému maximu $F=5/6$.



Kvantové kopírování fotonů pomocí interference

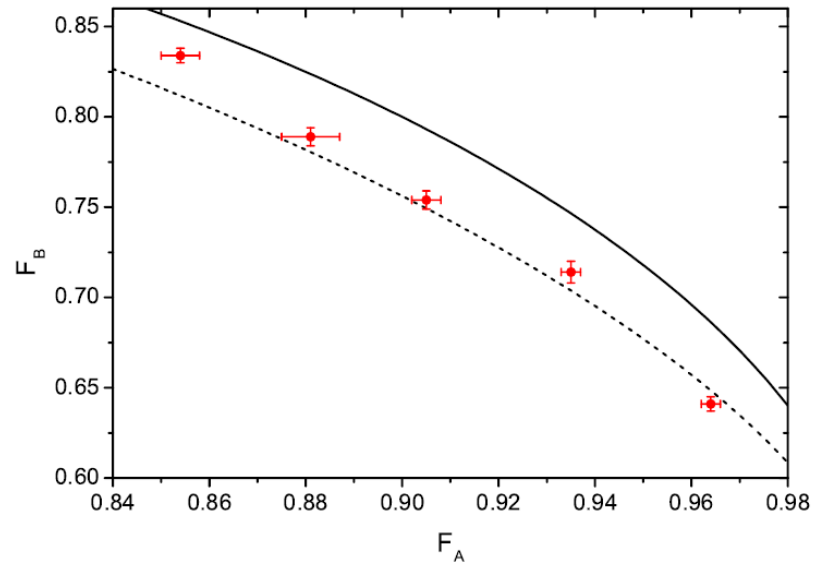
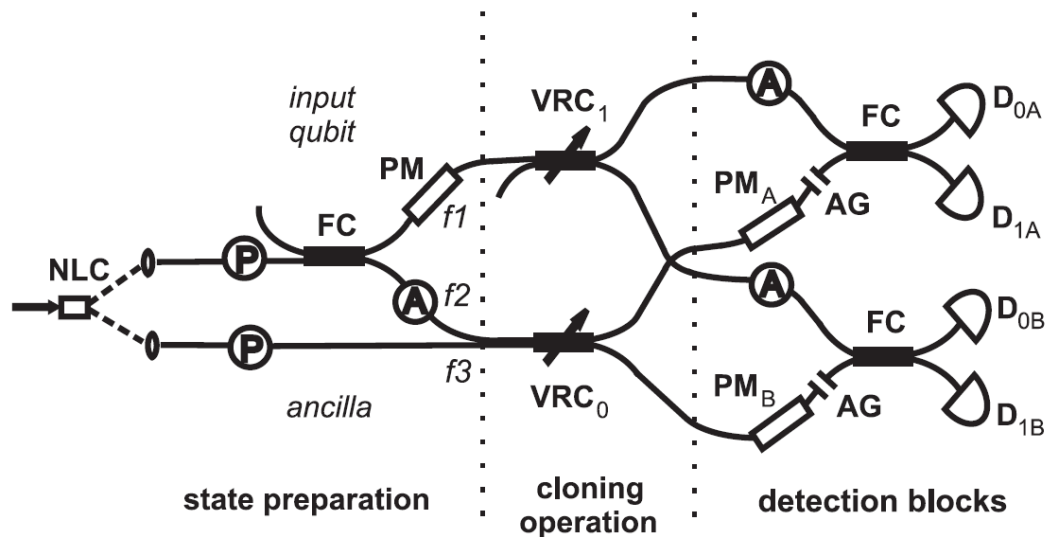


Alternativní schéma pro kvantové kopírování založené na interferenci fotonů na děliči svazku.

Díky jednoduchosti tohoto experimentálního uspořádání lze dosáhnout vysokou fidelitu.

W.T.M. Irvine, A. Lamas-Linares, M.J.A. de Dood, and D. Bouwmeester, *Optimal Quantum Cloning on a Beam Splitter*, Phys. Rev. Lett. **92**, 047902 (2004).

Fázově kovariantní kvantové kopírování



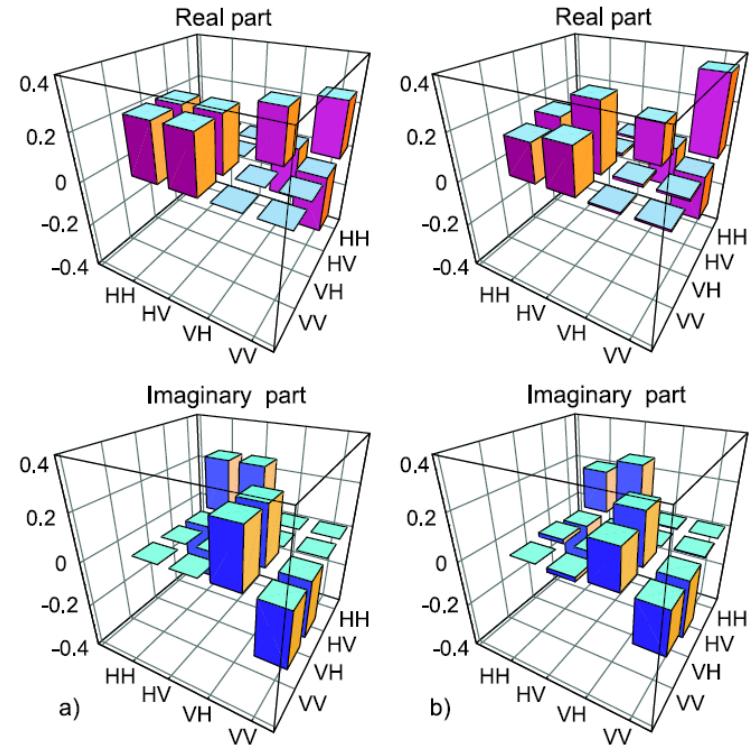
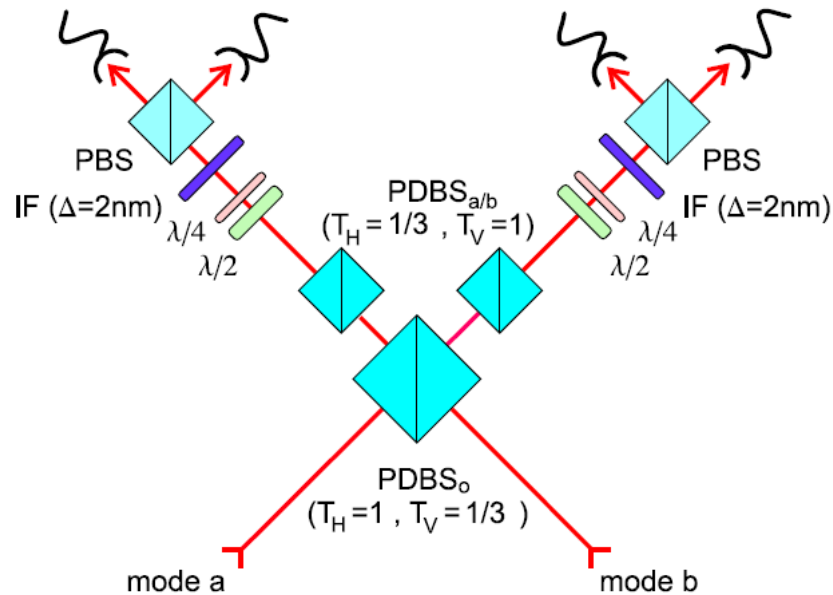
Experimentální schéma využívající optická vlákna.

Toto zařízení optimálně kopíruje kvantové stavy na rovníku Blochovy sféry.

Asymetrický kloner: poměr kvalit obou kopií lze ladit pomocí nastavení dělicích poměrů vláknových děličů svazku.

L. Bartůšková, M. Dušek, A. Černocho, J. Soubusta, and J. Fiurášek, *Fiber-Optics Implementation of an Asymmetric Phase-Covariant Quantum Cloner*, Phys. Rev. Lett. **99**, 120505 (2005).

Lineárně optické kvantové CZ hradlo



Dvouqubitové kvantové logické hradlo implementované pomocí interference na částečně polarizujícím děliči svazku a postselekcce.

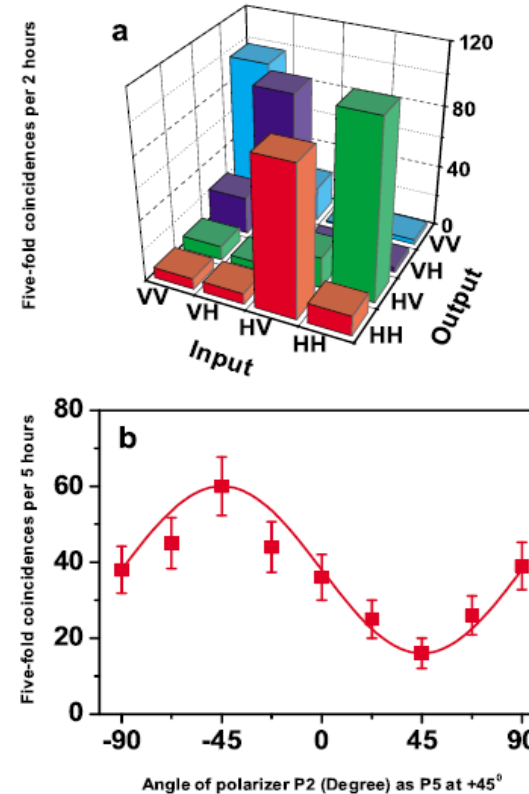
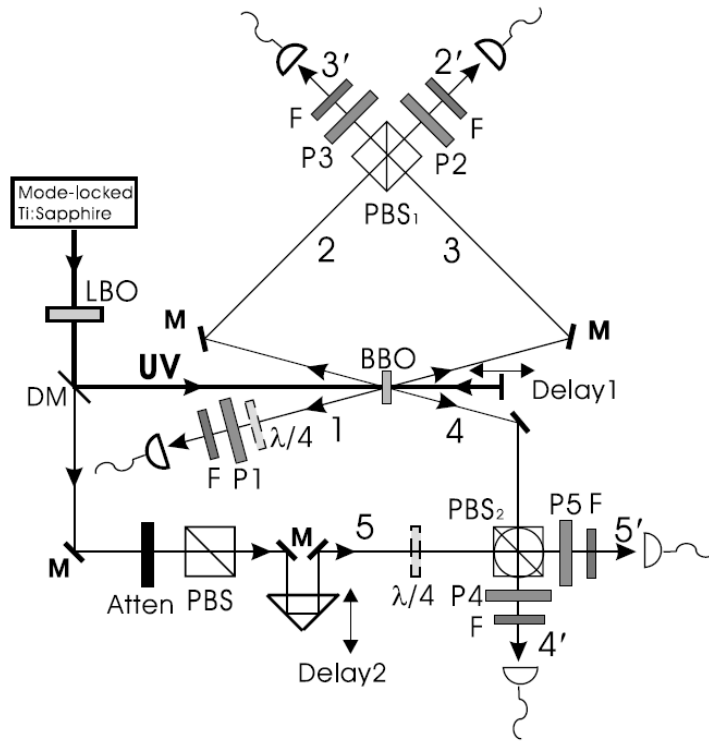
Hovoříme o hradlech fungujících tzv. v koincidenční bázi.

Hradlo bylo charakterizované pomocí kompletní tomografie kvantového procesu.

N. Kiesel, C. Schmid, U. Weber, R. Ursin, and H. Weinfurter, *Linear Optics Controlled-Phase Gate Made Simple*, Phys. Rev. Lett. **95**, 210505 (2005).

R. Okamoto, H.F. Hofmann, S. Takeuchi, and K. Sasaki, *Demonstration of an Optical Quantum Controlled-NOT Gate without Path Interference*, Phys. Rev. Lett. **95**, 210506 (2005).

Lineárně optické kvantové nedestruktivní CNOT hradlo

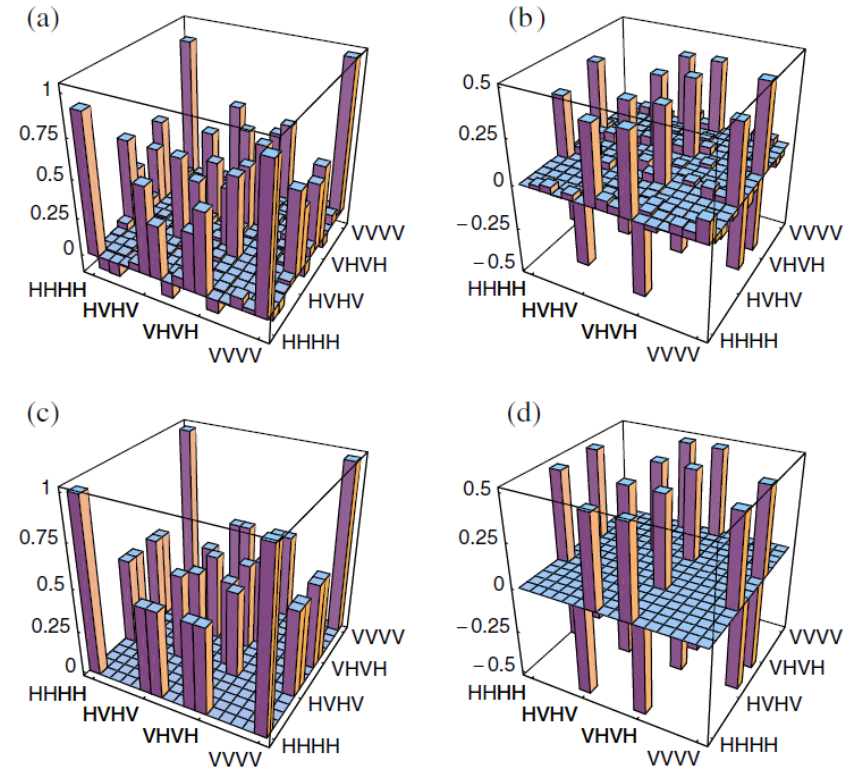
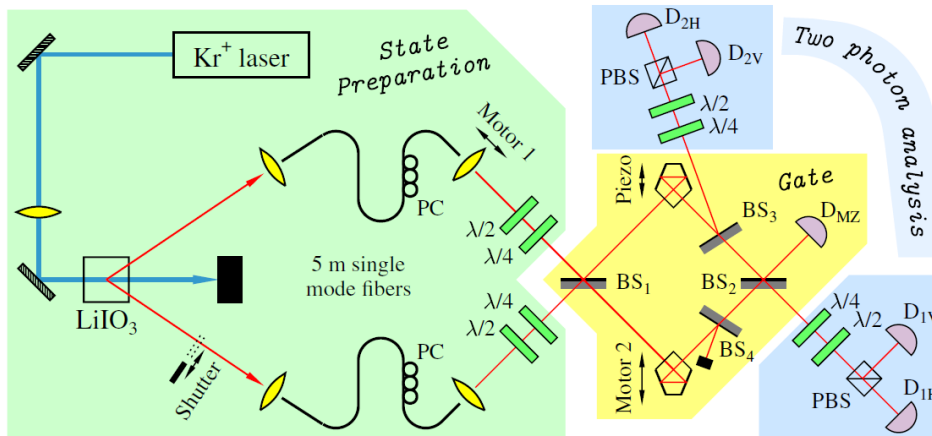


Toto schéma využívá pomocný kvantově korelovaný pár fotonů.

Tento postup umožňuje implementovat kvantové logické hradlo, aniž by fotony nesoucí kvantovou informaci musely být detekovány.

Experiment je náročný, vyžaduje měření pětifotonových koincidencí.

Lineárně optické kvantové partial-SWAP hradlo



Partial SWAP hradlo je kvantová operace, která nemá klasickou analogii. Dochází k částečné výměně kvantového stavu dvou kvantových bitů, přitom je zachována kvantová superpozice.

Demonstované schéma využívá kombinaci jedno- a dvou-fotonové interference.

Toto schéma je mnohem jednodušší než implementace pomocí sekvence CNOT hradel.