

# Jak ovládnout šum světla?

**Radim Filip**

katedra optiky PŘF University Palackého



**Petr Marek, Miroslav Gavenda, Vladyslav Usenko  
Ladislav Mišta, Jaromír Fiurášek**

**U.L. Andersen (DTU Lyngby), G. Leuchs (MPI Erlangen).**



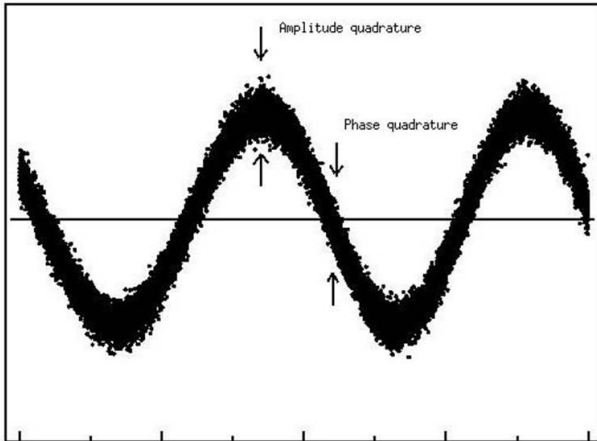
# SVĚTLO: ŠUM A INFORMACE



- Světlo je vynikajícím nosičem informace.
- Přenos informace je omezen šumem světla.
- Kvantový šum limituje přenos informace.

**Jak snížit a manipulovat kvantový šum světla?**

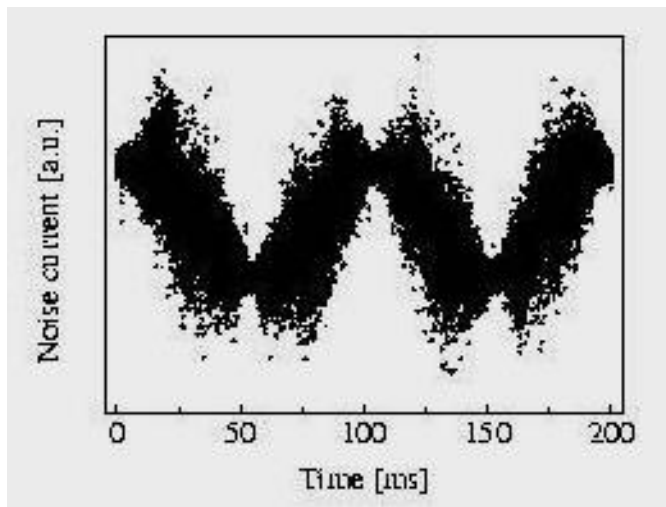
# KVANTOVÝ ŠUM SVĚTLA



Kvantový šum intenzivního laserového záření je měřitelný **homodynní detekcí**.

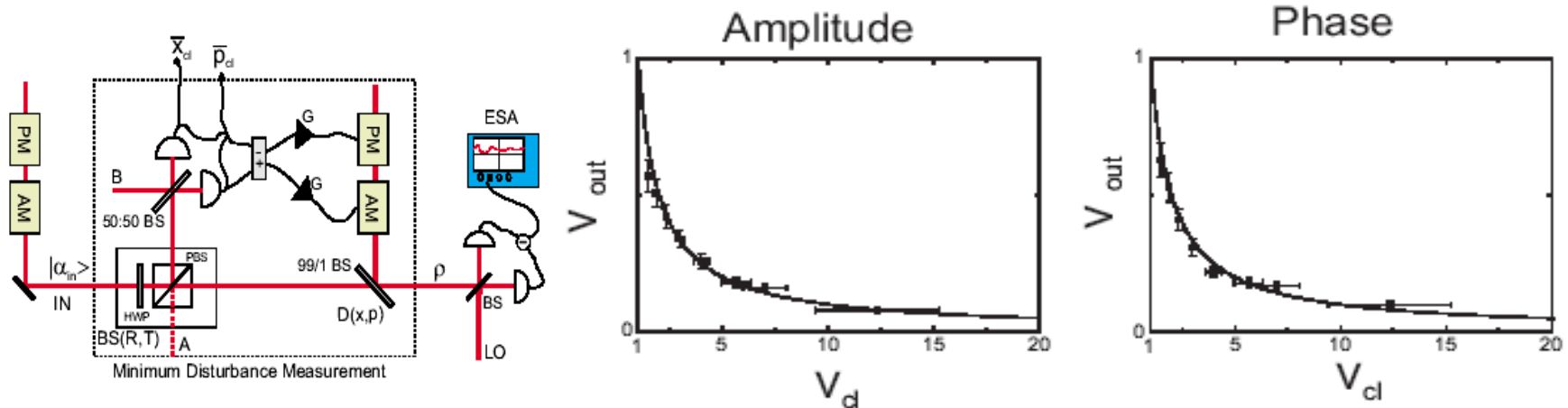
Informace může být současně vložena do **amplitudové a fázové kvadratury** optického signálu (komplementární).

Částečné „stlačení“ šumu pomocí **nelineárních procesů** v OPO, OPA.



# SUPER CITLIVÉ MĚŘENÍ

- QM: za získání informace (z měření) či za únik do okolí se platí zvýšením šumu.
- Jak měřit kvantový šum s minimálním přidaným šumem?

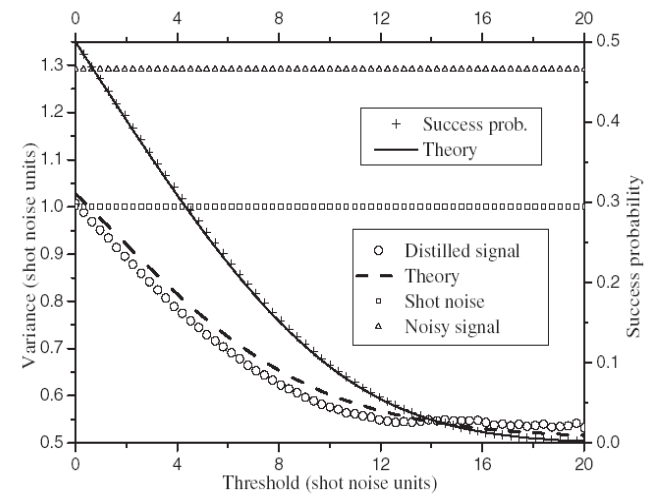
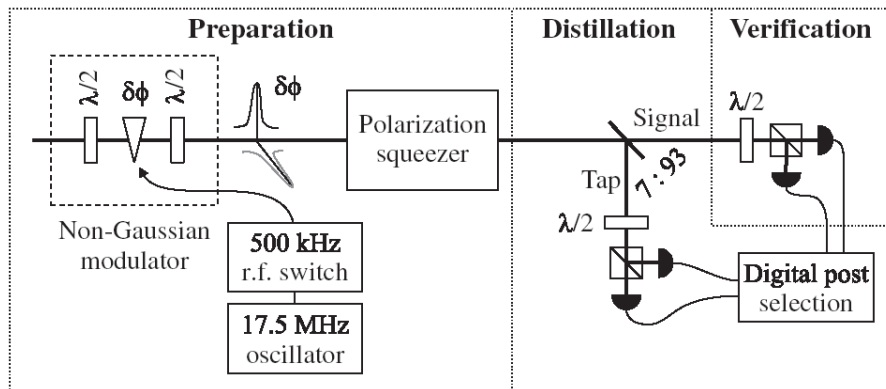
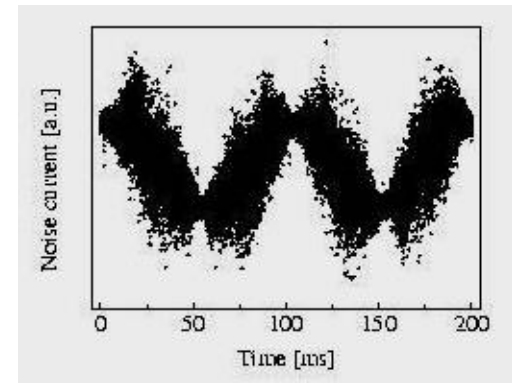


U.L. Andersen, M. Sabuncu, R. Filip, G. Leuchs, Phys. Rev. Lett. 020409 (2006).

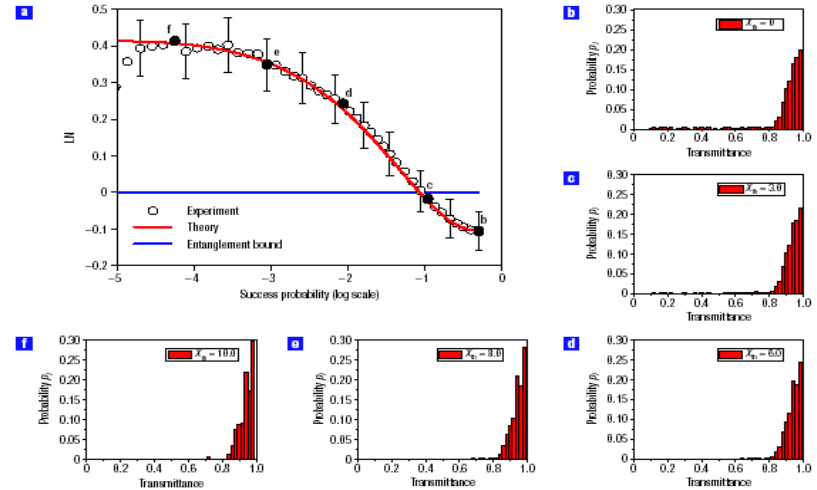
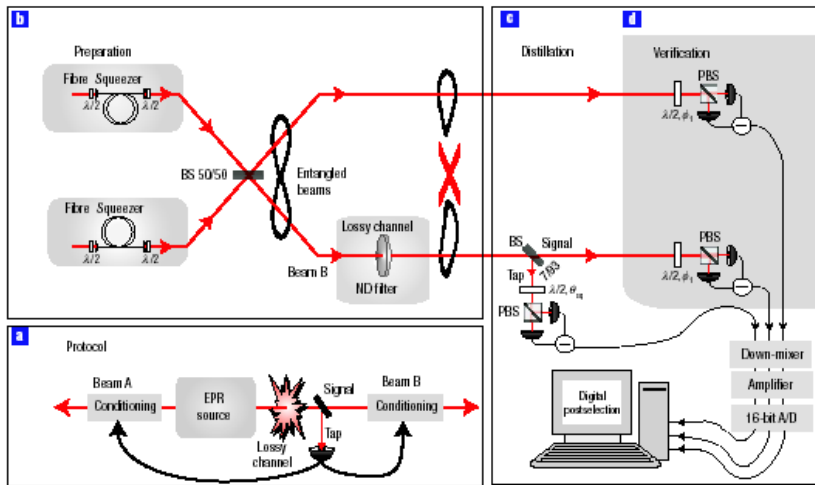
M. Sabuncu, L. Mišta, J. Fiurášek, R. Filip, G. Leuchs, U.L. Andersen, Phys. Rev. A 76,032309 (2007).

# I. REDUKCE ŠUMU CITLIVÝM MĚŘENÍM

Stlačení šumu pomocí nelineárních procesů je často **překryto rušivými vlivy** (nestabilita výkonu, ztrát, časové synchronizace).



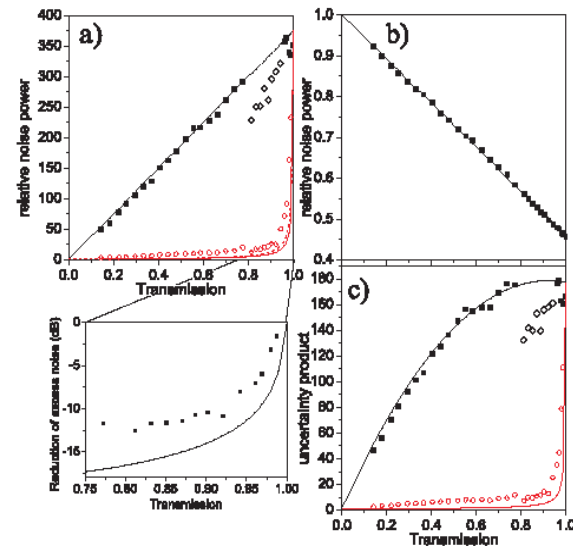
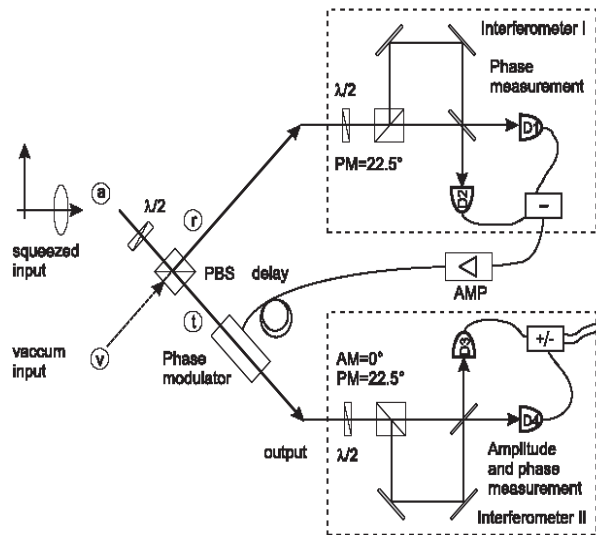
# DESTILACE KV. PROVÁZANOSTI CITLIVÝM MĚŘENÍM



- **Kvantová provázanost** (kvantově korelovaný šum) je „resource“. Nestabilní ztráty výrazně snižují kvantovou provázanost (např. šíření atmosférou).
- **Destilace obnovuje kvantovou provázanost.**

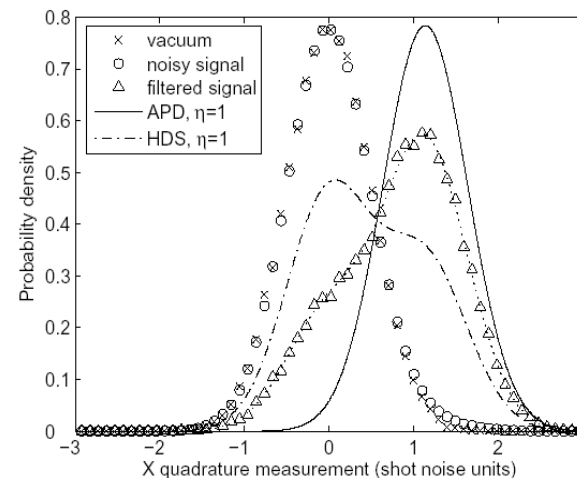
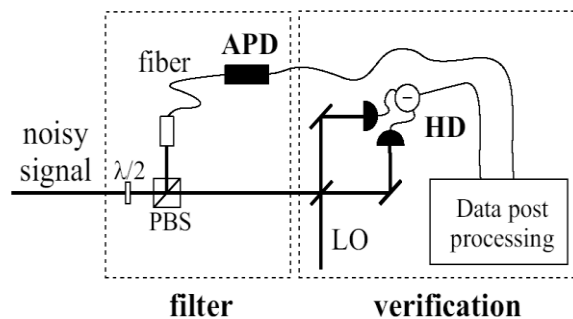
# PURIFIKACE CITLIVÝM MĚŘENÍM

- Stlačený šum v amplitudové kvadratuře však může mít příliš mnoho šumu ve fázové kvadratuře (-5dB versus 27 dB)
- Lze snížit tento šum pomocí citlivé homodynní detekce, i za cenu snížení stlačení šumu? Zlepšíme tak čistotu stavu?



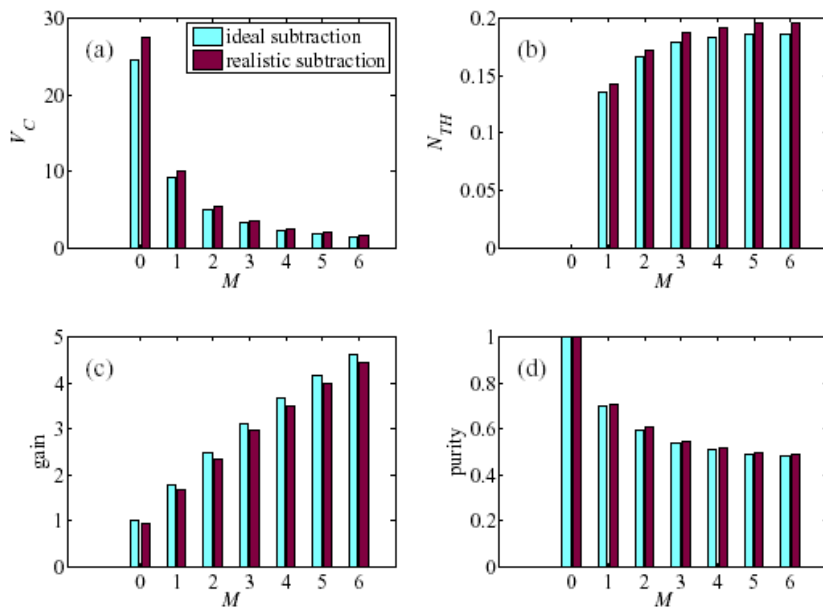
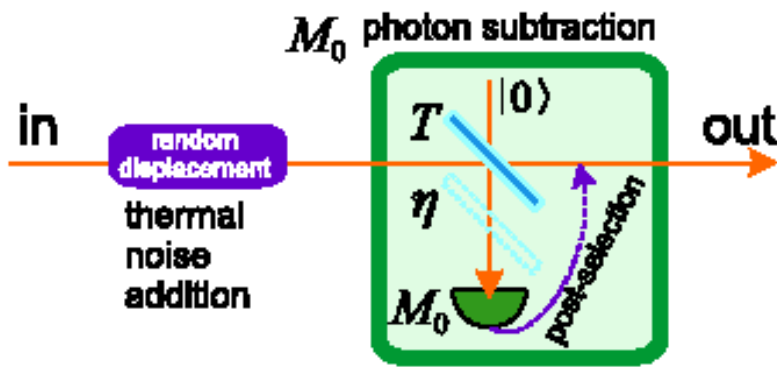
# FILTRACE INFORMACE CITLIVÝM MĚŘENÍM

- Nestabilita synchronizace koherentního signálu způsobuje **směs signálu a vakuového šumu**.
- Koherentní signál a šum mohou být rozlišeny **nedestruktivním měřením**.
- **Detektory čítající fotony** registrují signál nesoucí informaci v amplitudě a ve fázi.



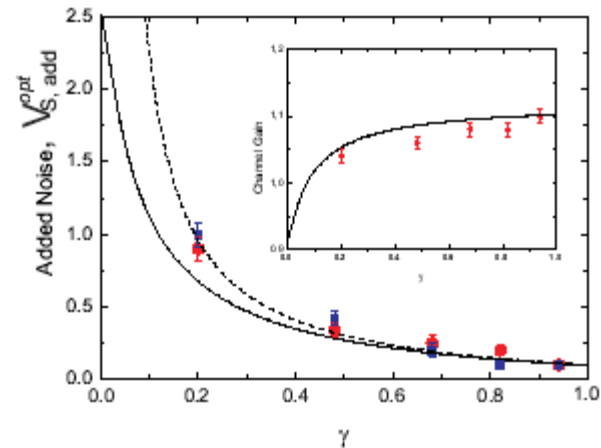
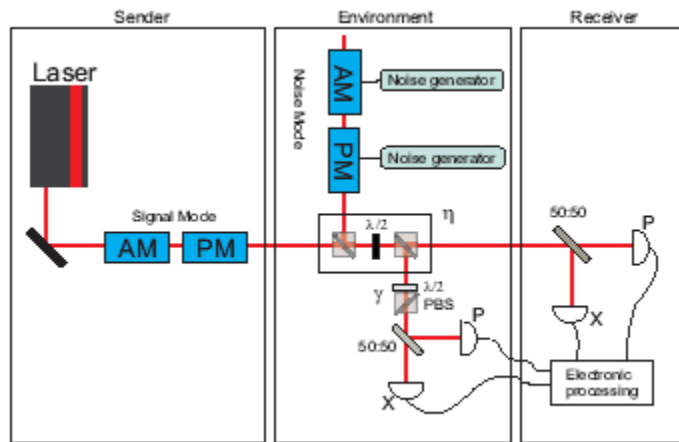


# KVANTOVÝ ZESILOVAČ KONCENTRUJÍCÍ FÁZI



- Běžný kvantový zesilovač zvětšuje šum ve fázi.
- Pravděpodobnostně, stav může být zesílen a fluktuace ve fázi mohou výrazně klesat.
- Zdrojem energie zesilovače je šum.

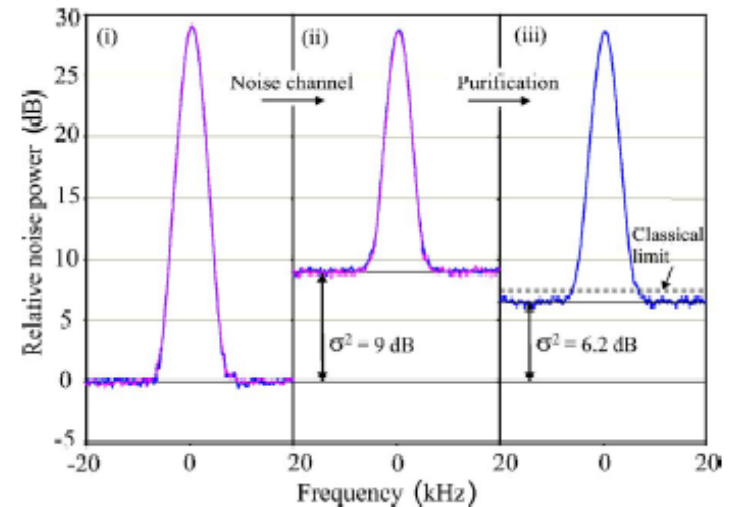
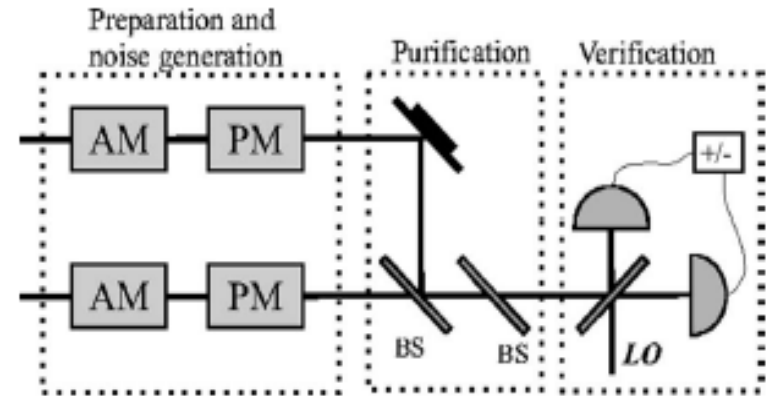
# KOREKCE ŠUMU KOMPLETNĚ RUŠÍCÍHO KVANTOVÝ PŘENOS



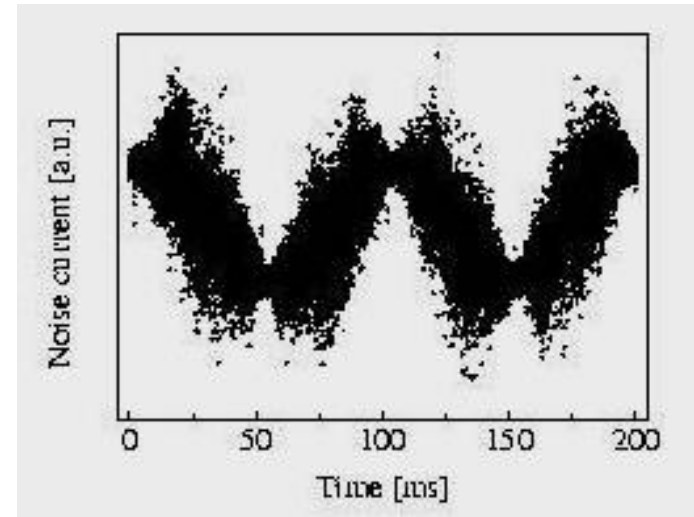
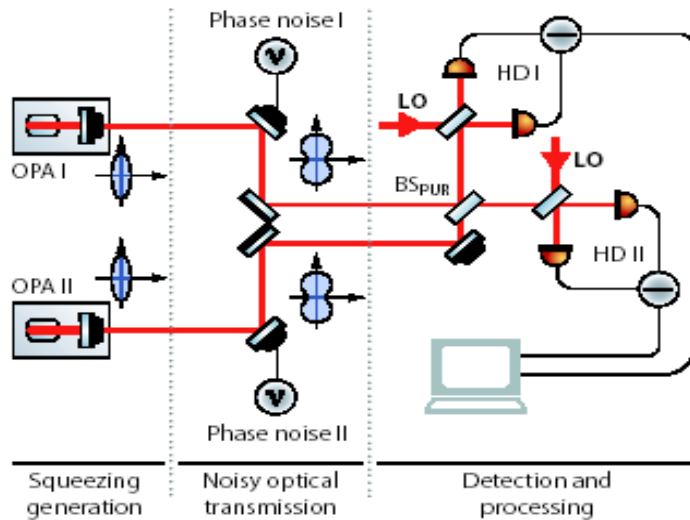
- Velké zvýšení šumu vazbou na okolí vede k **úplné ztrátě kvantových vlastností**.
- **Kvantovou informací** nesenou komplementárními veličinami **je možné obnovit** částečnou detekcí šumu a elektronickou (elektro-optickou) opravou.

# II. REDUKCE ŠUMU INTERFERENCÍ

- Konstruktivní interference více kopií zašuměného signálu umožňuje snížit šum. S rostoucím počtem kopií je možné dosáhnout původní signál.
- Přidaný šum  $V=(V_1+V_2)/4$ .
- Přidaný šum je redukován faktorem  $1/N$ , kde  $N$  je počet kopií.



# REDUKCE FÁZOVÉHO ŠUMU

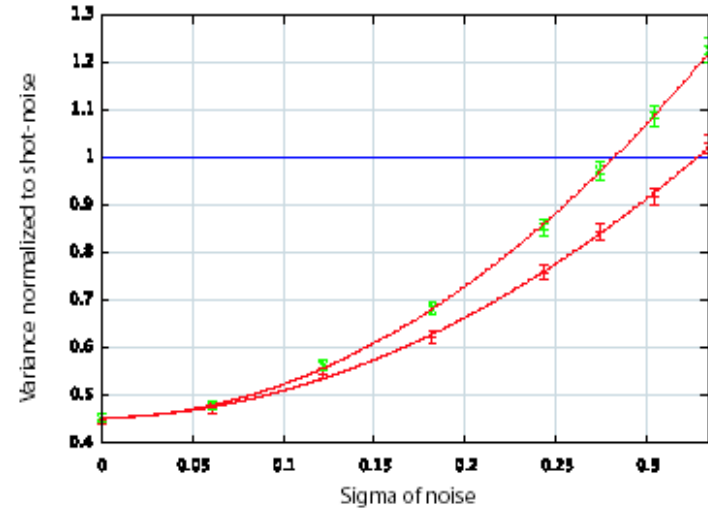
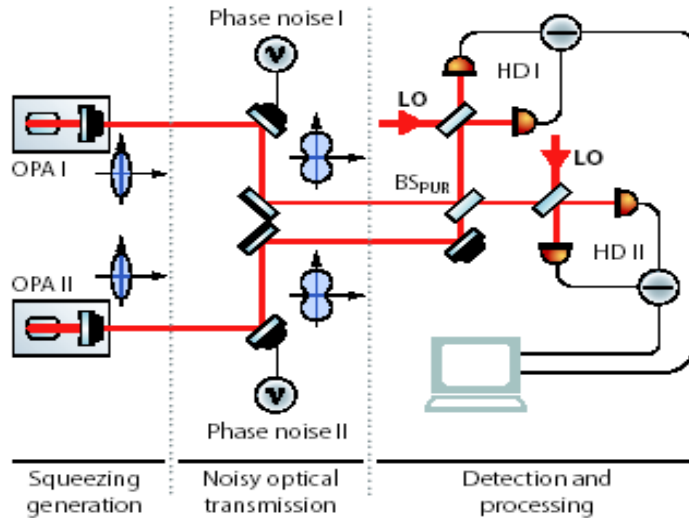


- Fázovým šumem se Gaussovský šum mění v ne-Gaussovský.
- Pro úplnou redukci (destilaci) potřebujeme více kopií a iterativní protokol.

J. Fiurášek, P. Marek, R. Filip, and R. Schnabel, Phys. Rev. A 75, 050302(R) (2007).

A. Franzen, B. Hage, J. DiGuglielmo, J. Fiurasek, R. Schnabel, Phys. Rev. Lett. 97, 150505 (2006)

# REDUKCE FÁZOVÉHO ŠUMU

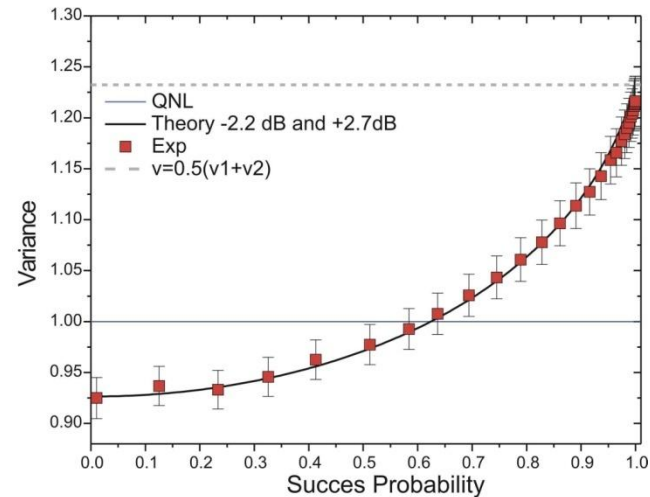
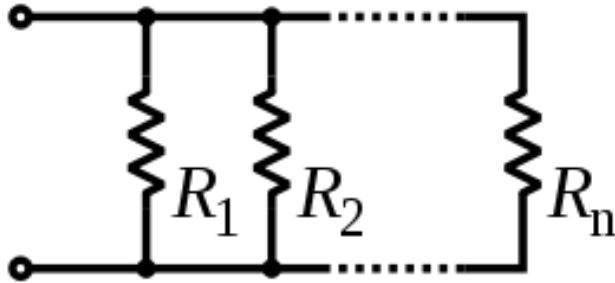


- Fázovým šumem se Gaussovský šum mění v ne-Gaussovský.
- Pro úplnou redukci (destilaci) potřebujeme více kopií a iterativní protokol.

J. Fiurášek, P. Marek, R. Filip, and R. Schnabel, Phys. Rev. A 75, 050302(R) (2007).

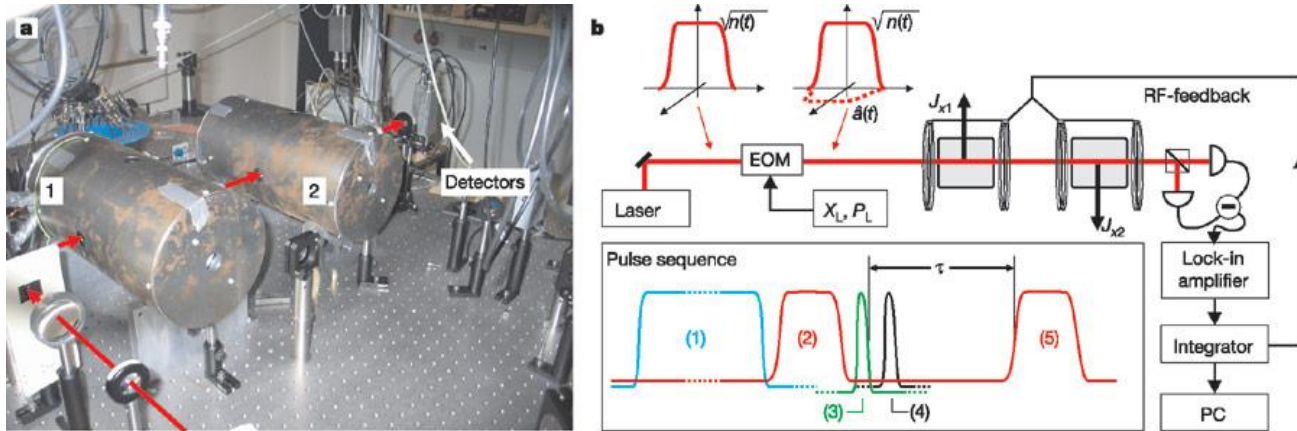
A. Franzen, B. Hage, J. DiGuglielmo, J. Fiurasek, R. Schnabel, Phys. Rev. Lett. 97, 150505 (2006)

# HARMONICKÝ PRŮMĚR KVANTOVÝCH ŠUMŮ



- **Kvantové šumy** se normálně skládají aditivně:  $V=V_1+V_2$  nebo  $V=(V_1+V_2)/2$ . To neumožňuje efektivně stabilizovat zdroje kvantových šumů.
- **Kvantové šumy** se mohou skládat i harmonicky:  $1/V=1/V_1+1/V_2$  nebo  $1/V=(1/V_1+1/V_2)/2$ .

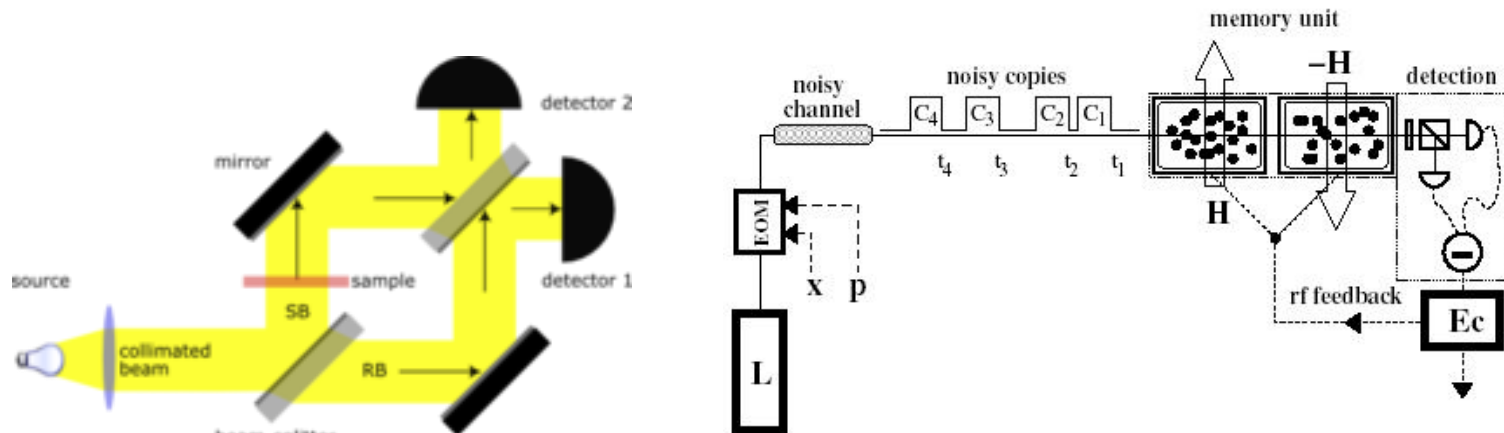
# ZÁPIS DO KVANTOVÉ PAMĚTI S MINIMEM ŠUMU



B. Julsgaard et al., Nature 2004

- kvantová paměť = kvantový stav světla uchován do mraků mnoha atomů.
- slabá interakce mezi světlem a atomy – optimální zápis bez šumu, **pouze s minimálními ztrátami** (klíčový pro vysoce neklasické stavy)

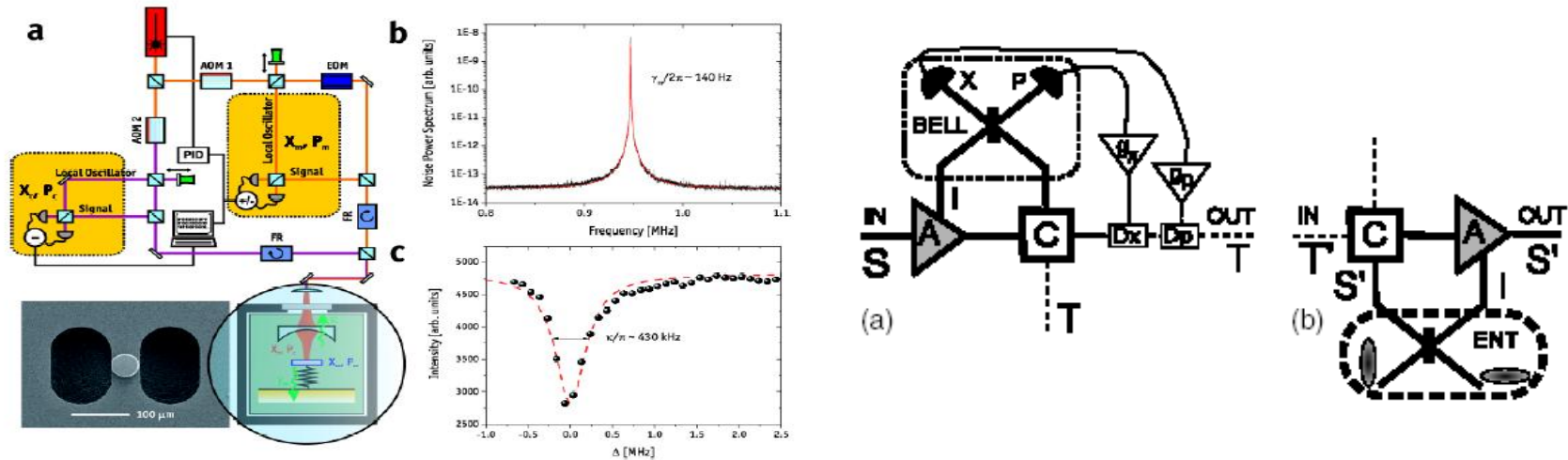
# INTERFERENCE A REDUKCE ŠUMU V KVANTOVÉ PAMĚTI



- kvantová paměť by měla umožnit interferenci bez časové synchronizace: **kvantové experimenty pro náhodně přicházející signály.**
- redukce šumu je možná přímo v atomové paměti.



# KVANTOVÝ PŘEVODNÍK

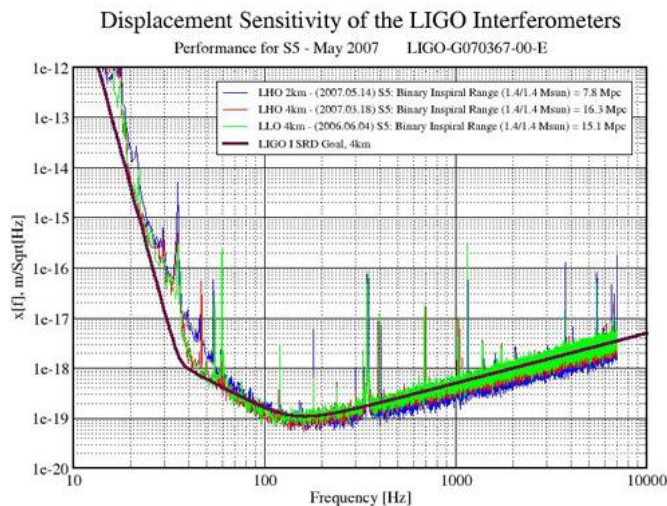


- **Kvantový převodník** přenáší kvantový šum světla na jiné mnohem více šumící fyzikální systémy (atomy, kvantové tečky, plasmony, mech. oscilátor) skrz typicky velmi slabou interakci.
- **Ideální kvantový převodník je dosažitelný.**

# APLIKACE: PŘESNÉ MĚŘENÍ



- Kvantová interferometrie: první využití stlačeného šumu světla.
- Přesnost měření není možné zvýšit větším výkonem laseru, protože ten zvyšuje současně tlak světla na měřený objekt.
- Podmínkou je, aby stlačený šum byl velmi kvalitní, stabilní a jeho převod na měřený objekt byl velmi účinný.



# APLIKACE: BEZPEČNÁ ŠIFRA



- Kvantová kryptografie: první využití vztahu informace a kvantového šumu.
- Únik informace je vždy doprovázen zvýšením kvantového šumu, který je možné měřit.
- Podmínkou je, aby celý přenos informace byl blízko hranice kvantového šumu. Jinak je bezpečnost ztracena.

# BUDOUCNOST

- Další aplikace kvantového šumu ?
- Nové metody ovládání šumu světla a látky ?
- Kvantový šum světla versus kvantový šum elektronů ? Podobnosti, odlišnosti a fyzikální převodník ?
- **Volná stipendia pro PhD studenty.**

