

Entanglement-based Quantum LiDAR

Esame di metà tesi

Federico Collé



**UNIVERSITÀ
DI TORINO**



Relatore: Prof. Leonardo Castellani

Co-relatori: Dr. Ivano Ruo Berchera
Dr. Alessio Avella

Overview

- Tecnologie quantistiche
- LiDAR (Light Detection And Ranging)
- Spontaneous Parametric Down Conversion
- Quantum LiDAR
- Misure Phase-Insensitive
- Setup sperimentale & Analisi dati
- Risultati & Passi successivi

Tecnologie quantistiche

Tecnologie quantistiche: applicazioni tecnologiche legate a fenomeni prettamente quantistici.

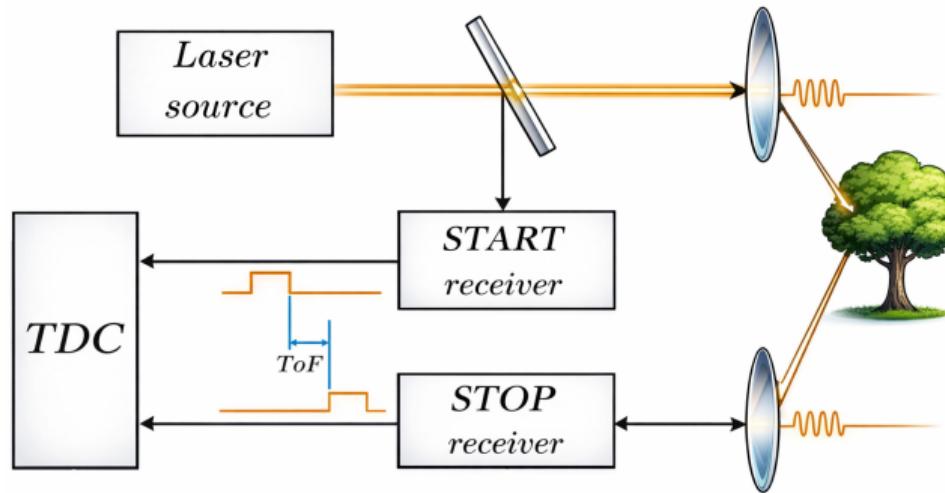
Alcuni esempi:

- Quantum computation
- Quantum communication
- Quantum simulation
- Quantum metrology & **sensing**



LiDAR

LIDAR = LIght Detection And Ranging.



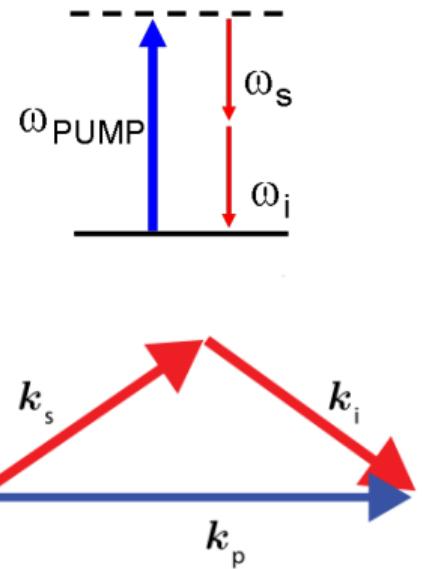
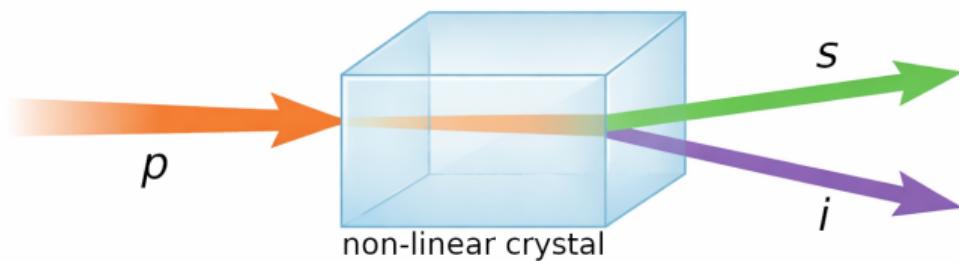
Performance del protocollo misurata con probabilità di errore p_{err} in

- *Detection*: target presente o assente
- *Ranging*: misura tempo di volo

Obiettivo: Migliorare LiDAR con correlazioni quantistiche tra coppie di fotoni.

SPDC

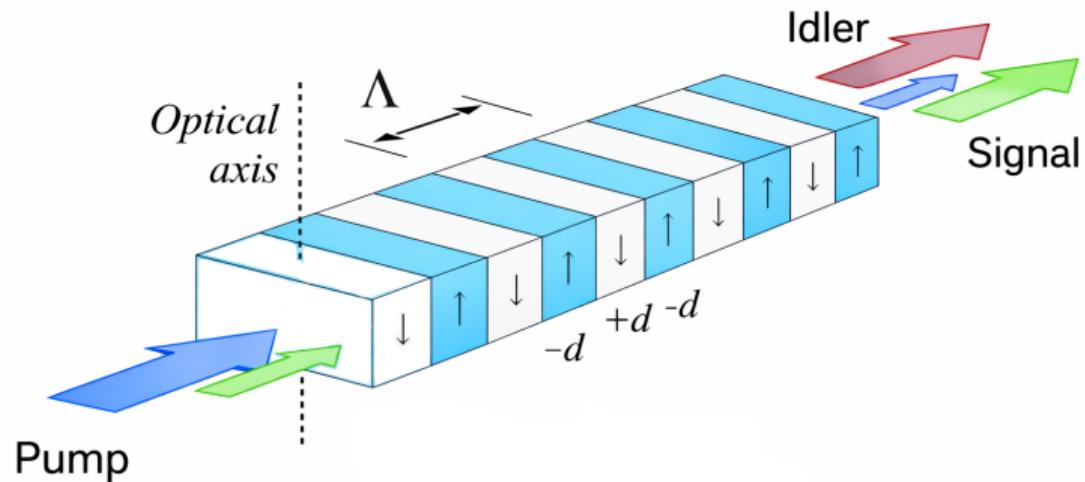
Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC):
1 fotone di pompa \rightarrow 2 fotoni, *signal* e *idler*.



Condizioni di **Phase Matching**: $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, $\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$
Stato entangled $|TMSV\rangle = \sum_n c_n^{\mu_s} |n\rangle_s |n\rangle_i$

SPDC

SPDC processo poco efficiente → **Quasi Phase Matching (QPM)**:
Cristallo non lineare a poli periodici, $\chi^{(2)} = (-1)^n \chi_0^{(2)}$.



$$\kappa_{pump} \simeq \kappa_s + \kappa_i + \kappa_\Lambda$$

$$\kappa_\Lambda = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Quantum Target Detection (QTD)

Protocollo: **Quantum Illumination (QI)**

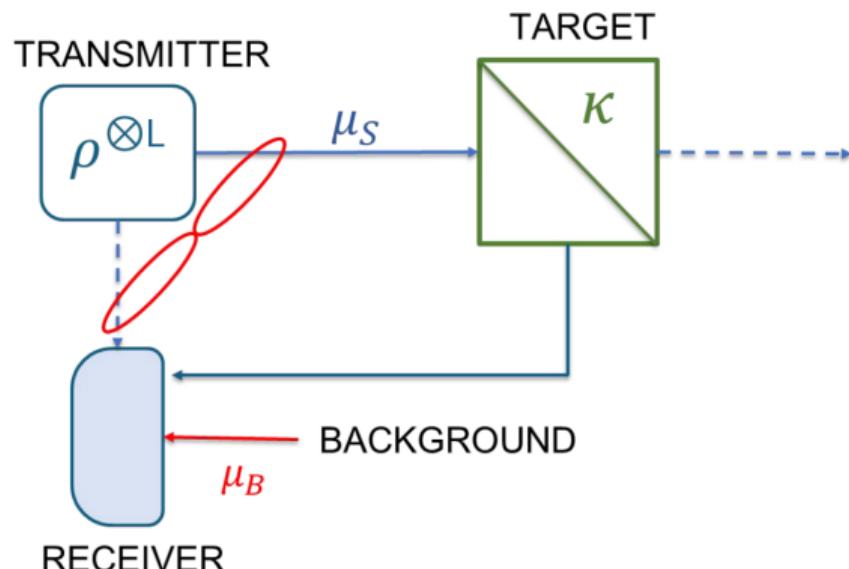
Target modellizzato da canale rumoroso
(Poisson) e con perdite: $\rho_k = \mathcal{E}_{k,\mu_B}(\rho)$

Binary hypothesis testing:

$$\mathcal{H}_0 : \rho_R = \rho_B \otimes \rho_i \quad \mathcal{H}_1 : \rho_R = \rho_k \otimes \rho_i$$

Misura eseguita con stato a multi-copia $\rho^{\otimes L}$.
 \mathcal{E}_{k,μ_B} agisce indipendentemente su ogni copia.
Per $L \rightarrow \infty$ vale il **Quantum Chernoff Bound** (QCB):

$$p_{err}(\rho_0^{\otimes L}, \rho_1^{\otimes L}) \leq \frac{1}{2} e^{-\xi_{QCB} L}$$



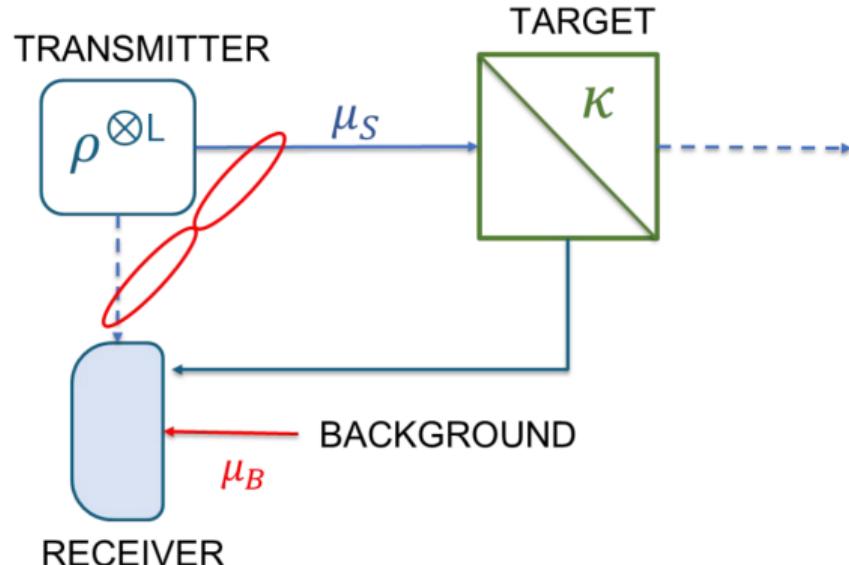
$$\begin{aligned}\xi_{QCB}(\mathcal{H}_0, \mathcal{H}_1) &:= \max_{\alpha \in [0,1]} C_\alpha(\rho_0, \rho_1) \\ C_\alpha(\rho_0, \rho_1) &:= -\log(\text{Tr}[\rho_0^\alpha \rho_1^{1-\alpha}])\end{aligned}$$

Quantum Target Detection (QTD)

Con QI si raggiunge vantaggio quantistico di **6 dB**.

Problemi:

- 6 dB solo per apparati complessi
- storage dell'idler richiede quantum memories
- vantaggio solo in situazione ostile:
 - ▶ $\mu_s \ll \mu_B$
 - ▶ $k \ll 1$



S. Lloyd, Science 321, 1463 (2008)

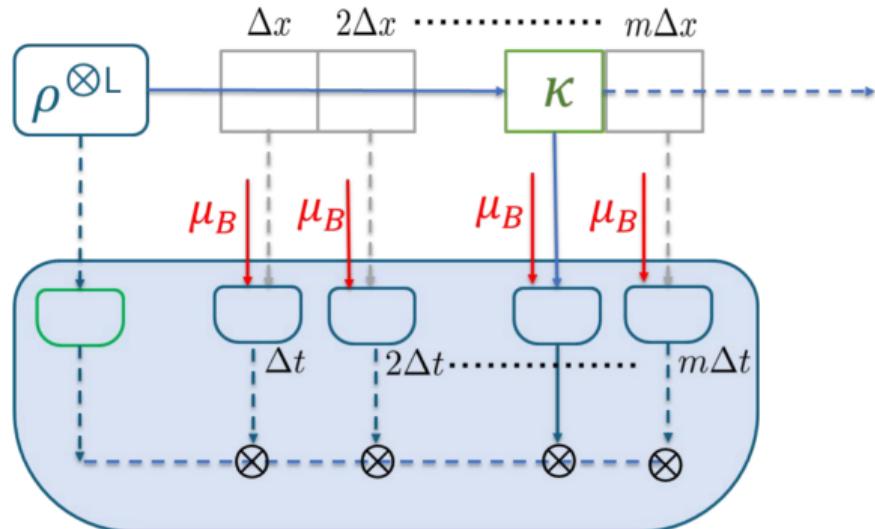
Tan et al., Phys. Rev. Lett. 101, 253601 (2008)

J. Shapiro, IEEE A&E Systems Magazine 35, 8 (2020)

Torromé & Barzanjeh, Prog. Quantum Electron. 93 (2024)

Sorelli et al., IEEE A&E Systems Magazine 37 (2021)

Quantum Target Ranging (QTR)



Ranging = stima del tempo di volo.
Asse dei tempi discretizzato in m time-bins lunghi Δt :

$$\Delta x = c \Delta t / 2 \quad x = j \Delta x$$

il target si trova in uno degli m time-bin.

Multi-hypothesis testing:

$$\{\mathcal{H}_0, \mathcal{H}_1, \dots, \mathcal{H}_m\}$$

Misure Phase-Insensitive

In regime ottico è difficile e poco pratico preservare la fase.

→ **Misura phase-insensitive:** si misura solo il numero di fotoni.

Per lo slot s si ha distribuzione di conteggi:

$$P_s(\vec{n}) = \text{Tr}[\rho_s |\vec{n}\rangle\langle\vec{n}|], \quad |\vec{n}\rangle = \bigotimes_i |n_i\rangle$$

$$\rho_s = \rho_B \otimes \rho_i \text{ oppure } \rho_s = \rho_k \otimes \rho_i$$

Si ottiene un set di distribuzioni di probabilità classiche:

$$\{P_1(\vec{n}), \dots, P_m(\vec{n})\}$$

Chernoff Information ξ_Q da probabilità classiche trovata con metodi numerici.

Misure Phase-Insensitive

Caso **classico**: probe è stato coerente.

$$\text{Vale } \xi_{\text{coh}} = 2\mu_B + k\mu_s - 2\sqrt{\mu_B}\sqrt{\mu_B + k\mu_s}$$

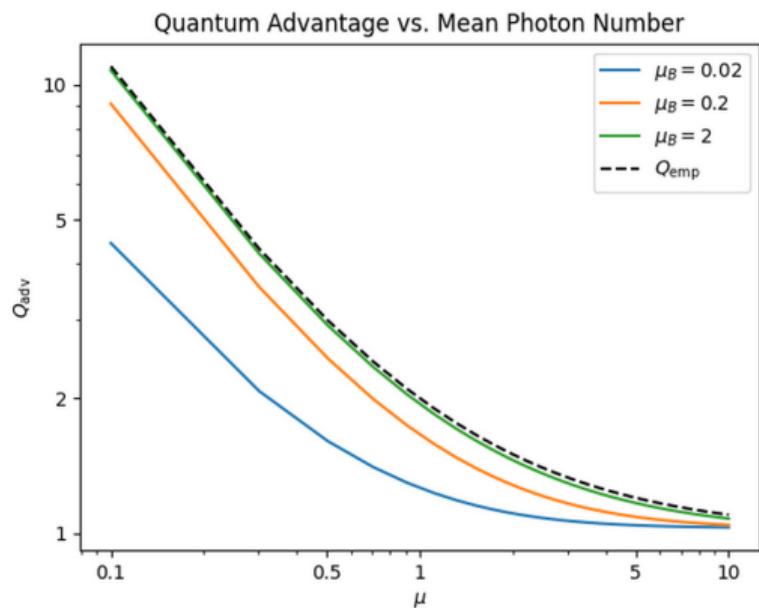
Quantum advantage:

$$Q := \frac{\xi_Q}{\xi_{\text{coh}}}$$

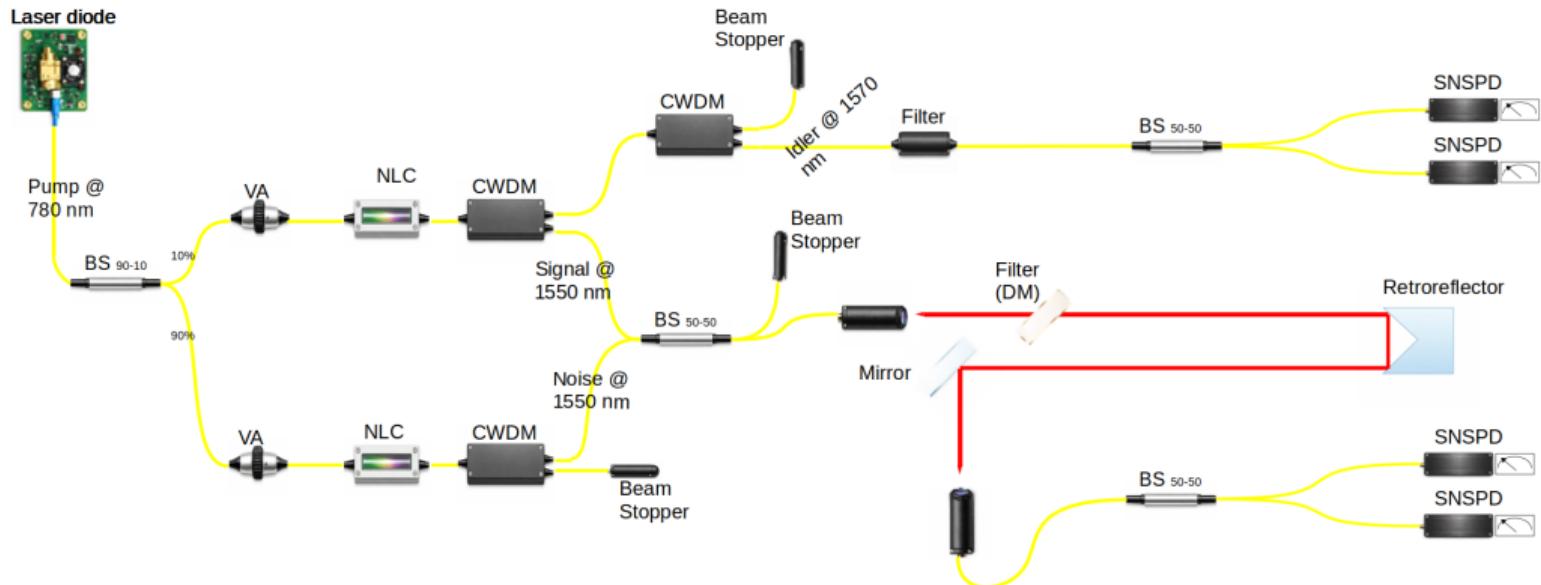
Limite empirico: $Q_{\text{emp}} = 1 + \frac{1}{\mu_s}$.

Lopaeva et al., Phys. Rev. Lett. 110, 153603 (2013)

Ortolano & Ruo Berchera, Phys. Rev. Res. 7, L022059 (2025)

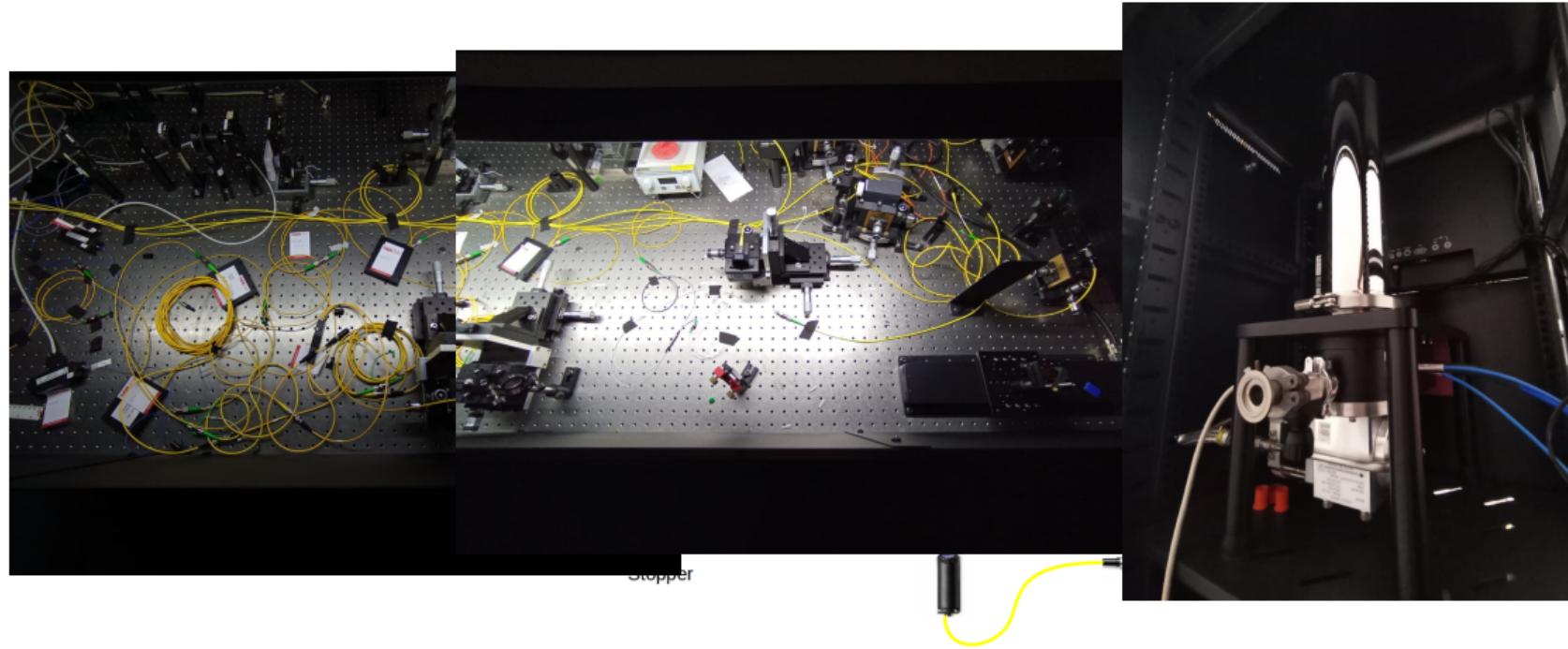


Setup sperimentale



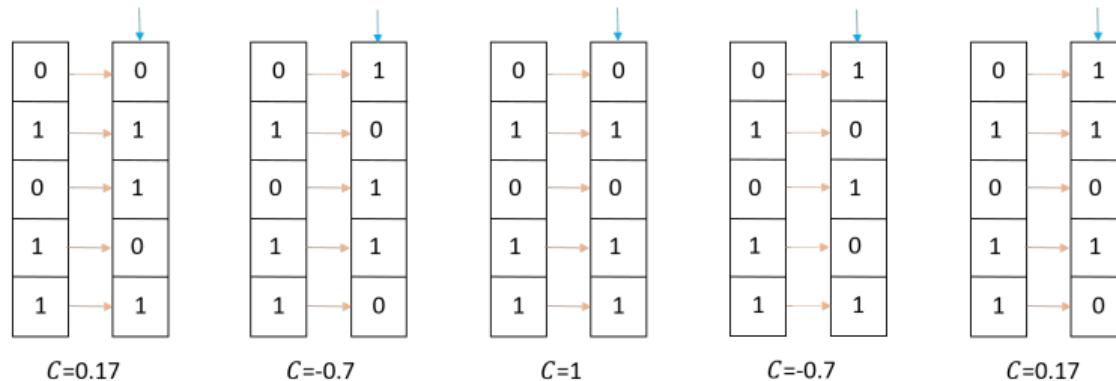
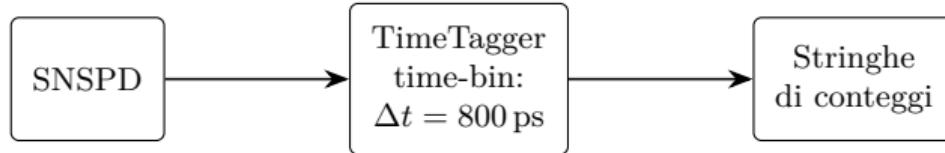
BS: Beam Splitter, VA: Variable Attenuator. NLC: Non Linear Crystal, CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing, DM: Dichroic Mirror, SNSPD: Superconducting Nanowire Single Photon Detector

Setup sperimentale



BS: Beam Splitter, VA: Variable Attenuator. NLC: Non Linear Crystal, CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing, DM: Dichroic Mirror, SNSPD: Superconducting Nanowire Single Photon Detector

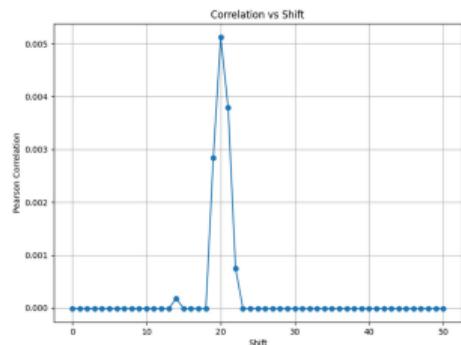
Analisi dati



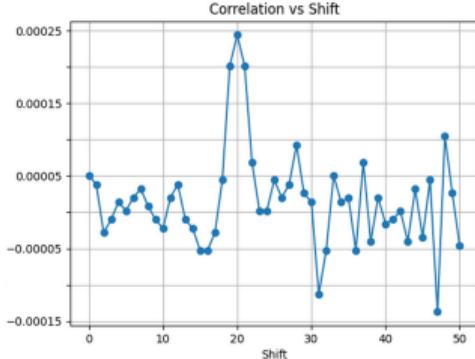
Si calcola $C_P = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$ shiftando le stringhe per trovare picco di correlazione.
Posizione individuata: distanza fra *signal* e *idler*.

Analisi dati

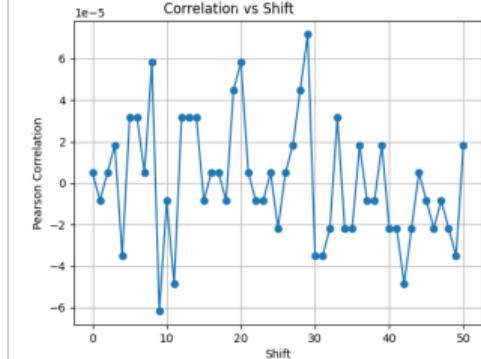
Picco di correlazione inizialmente individuato in assenza di rumore.



$$\mu_B \sim 10^{-9} \text{ (fotoni/bin)}$$



$$\mu_B \sim 10^{-6} \text{ (fotoni/bin)}$$



$$\mu_B \sim 10^{-4} \text{ (fotoni/bin)}$$

All'aumentare del rumore, individuare il picco è sempre più difficile.

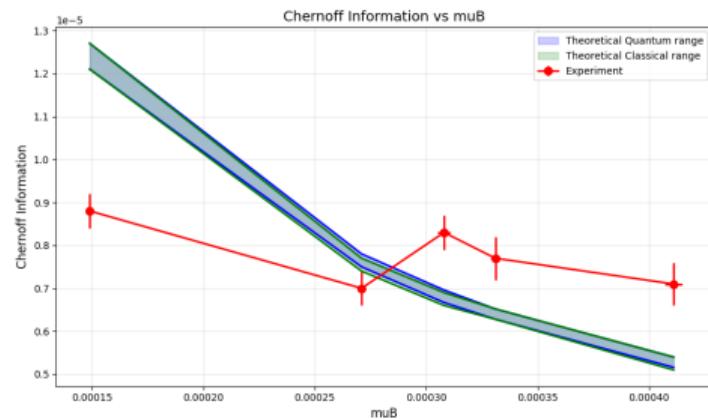
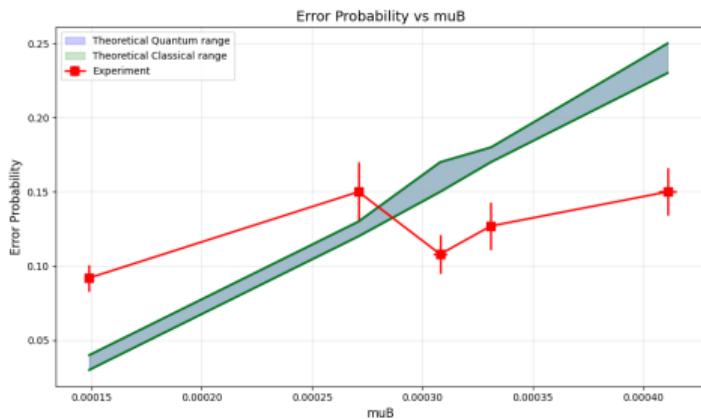
→ su N misure, $\#\text{err}$ trovano un picco diverso:

$$p_{\text{err},\text{exp}} = \frac{N - \#\text{err}}{N}$$

Risultati

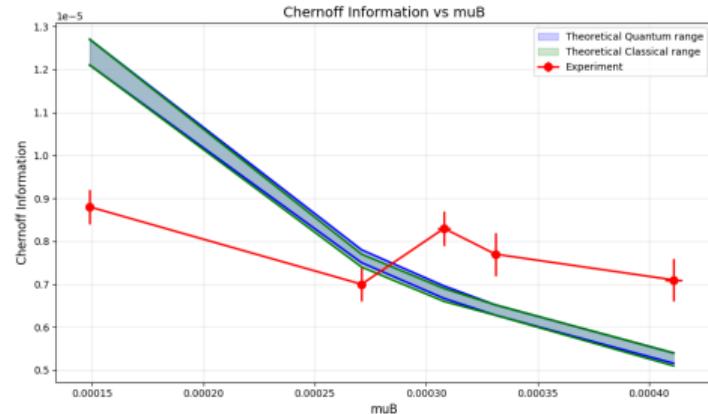
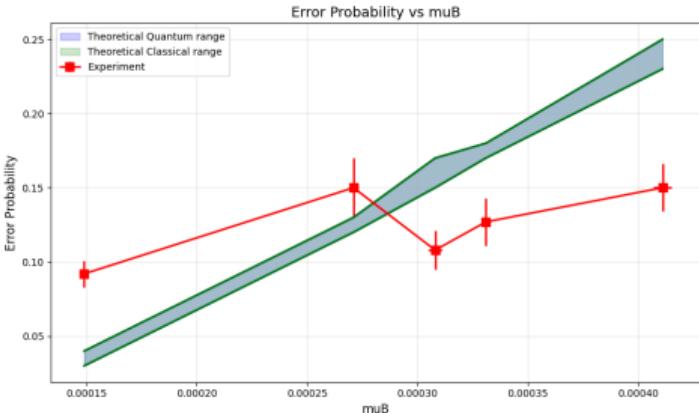
Si è studiato l'andamento (protocollo quantistico) di $p_{err,exp}$ e di ξ_{TR} con μ_B .
Parametri:

$$\mu_s = (9.83 \pm 7) \cdot 10^{-5} \quad \kappa = (1.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-4} \quad \eta_{idler} = (9.4 \pm 4) \cdot 10^{-4}$$



Risultati preliminari sono comparabili a valori teorici.
Differenza (probabilmente) dovuta a instabilità dei parametri nel tempo.

Risultati



Zona esplorata presenta $Q \simeq 1$:

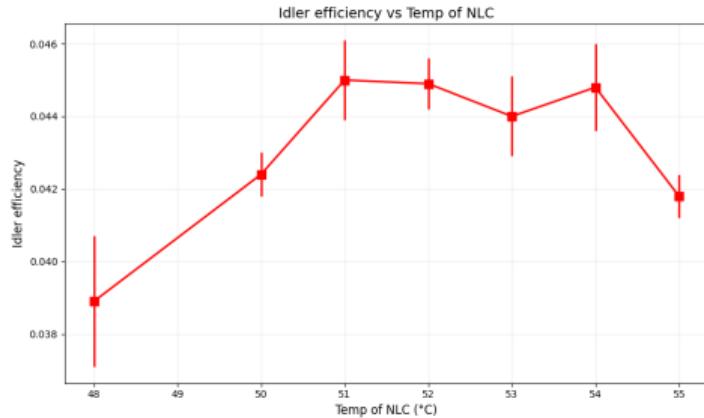
- $\eta_{idler} \ll 1$
- μ_s e μ_B mantenuti bassi per non surriscaldare gli SNSPD

$$\mu = (9.83 \pm 7) \cdot 10^{-5} \quad \mu_B \in [1.49, 4.11] \cdot 10^{-4}$$

$$\kappa = (1.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-4} \quad \eta_{idler} = (9.4 \pm 4) \cdot 10^{-4}$$

Passi successivi

- Aumentare η_{idler} : controllo accoppiamento fibre ed efficienza SNSPD
- Studio teorico a bassi μ_s e μ_B per trovare zone ad alto \mathcal{Q}
- Misure su protocolli classico e quantistico e confronto



Grazie per l'attenzione