

Entanglement ibrido per un nuovo tipo di
qubit ottico
Hybrid entanglement for a new type of optical
qubit

candidato: Luca Salvatore Costanzo (lucascostanzo@hotmail.it);
relatore: Alessandro Zavatta (alessandro.zavatta@ino.it);
correlatore: Francesco Marin (marin@fi.infn.it).

8 luglio 2013

Scopo di questo lavoro di tesi è stata la generazione dello stato *entangled* ed ibrido

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_t |\alpha\rangle_{t'} + |0\rangle_t |\alpha, 1\rangle_{t'}), \quad (1)$$

con gli indici t, t' ad indicare due differenti modi temporali. Il vettore $|\alpha\rangle$ rappresenta uno stato coerente, i vettori $|0\rangle, |1\rangle$ stati di Fock di vuoto e di singolo fotone ed il vettore $|\alpha, 1\rangle$ uno stato SPACS (*Single Photon Added Coherent State*), risultato dell'operazione di aggiunta, tramite l'operatore di creazione a^\dagger , di un singolo fotone allo stato coerente e dunque, tenendo conto della normalizzazione, definito come

$$|\alpha, 1\rangle = \frac{a^\dagger}{\sqrt{1 + |\alpha|^2}} |\alpha\rangle. \quad (2)$$

Lo stato *entangled* dell'eq.(1) si dice ibrido poichè combina risorse tipiche dell'informazione quantistica a variabili discrete (qubit codificato su stati di Fock) ed a variabili continue (un qubit basato su stati coerenti). È stato dimostrato che sistemi ibridi di questo tipo costituiscono risorse importanti

per il processamento dell'informazione quantistica in quanto consentono di eseguire operazioni logiche su qubit in modo deterministico.

Concettualmente e sperimentalmente il punto di partenza è stato lo stato a *singolo fotone delocalizzato temporalmente*

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \left[a_t^\dagger + a_{t'}^\dagger \right] |0\rangle_t |0\rangle_{t'} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_t |0\rangle_{t'} + |0\rangle_t |1\rangle_{t'}) \end{aligned} \quad (3)$$

che ha la stessa struttura dello stato cercato ma nel modo t' stati di vuoto e singolo fotone.

Per generare questo stato è necessario pompare un cristallo non lineare con un laser impulsato e sfruttare l'emissione spontanea di *down conversion* sui due canali di *segnale* e *idler*. Un interferometro Mach-Zender con un ritardo τ tra i due bracci pari all'inverso del *repetition rate* di pompa è montato lungo la direzione di emissione di *idler* ed un rivelatore SPCM¹ è posto all'uscita del MZ stesso. Un fotone emesso in corrispondenza dell'incidenza al tempo t di un impulso di pompa sul cristallo e che percorre il braccio lungo dell'interferometro, giungerà all'SPCM contemporaneamente ad un eventuale fotone emesso in corrispondenza del successivo impulso di pompa, dunque al tempo $t' = t + \tau$, che avrà invece percorso il braccio corto²; poichè un click al rivelatore non permette di distinguere tra quale dei due fotoni sia stato rivelato al ramo di *idler*, si avrà un ket della forma (3) al ramo di *segnale* (non è possibile infatti sapere se la coppia di fotoni di *idler-segnale* sia stata emessa al tempo t o t')³.

Il passo successivo è stato iniettare sul cristallo non lineare uno stato coerente in corrispondenza del secondo modo, cioè contemporaneamente al secondo impulso di pompa. Adesso lo stato incidente a cui devono essere applicati gli operatori di creazione, propri del fenomeno di emissione non lineare, non è il vuoto come nell'eq.(3) ma il ket $|0\rangle_t |\alpha\rangle_{t'}$. Lo stato generato prende allora la

¹*Single Photon Counting Module.*

²Le cose non cambierebbero se il fotone emesso al tempo t percorresse invece il braccio corto, poichè un fotone ipoteticamente emesso all'istante $t' = t - \tau$ precedente potrebbe avere percorso il braccio lungo ed ancora avrei due eventuali fotoni contemporaneamente all'SPCM.

³Si sta trascurando l'eventualità che l'emissione sia invece avvenuta ad entrambi gli istanti t, t' . Questa ipotesi è ben giustificata dalla scarsa probabilità dell'evento congiunto.

forma cercata

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[a_t^\dagger + \frac{a_{t'}^\dagger}{\sqrt{1+|\alpha|^2}} \right] |0\rangle_t |\alpha\rangle_{t'} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|1\rangle_t |\alpha\rangle_{t'} + a_{t'}^\dagger |0\rangle_t |\alpha, 1\rangle_{t'} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

In questo lavoro di tesi, oltre alla generazione sperimentale dello stato sono state effettuate misure delle distribuzioni di quadratura tramite rivelazione omodina bilanciata; è stato allora realizzato un *software* basato su un algoritmo di massimizzazione della funzione di verosimiglianza (*Maximum Likelihood*) che, a partire da queste misure di quadratura, ricostruisce la forma della rappresentazione dell'operatore densità nella base degli stati di Fock. Una volta ricostruita la matrice densità dello stato generato, ne è stato fatto un confronto con la forma attesa a livello teorico; l'utilizzo di una quantità come la *fidelity* ha permesso di quantificare la somiglianza tra le due e poter affermare di aver raggiunto un buon accordo tra risultati sperimentali e teorici.