

4次元 Time-bin 量子もつれによる CGLMP 不等式の破れの観測

Violation of the CGLMP Inequality with 4 Dimensional Time-bin Entanglement

○生田 拓也^{1,2}、武居 弘樹¹ (1. NTT 物性研、2. 阪大工)

○T. Ikuta^{1,2}, H. Takesue² (1. NTT Basic Research Labs, 2. Osaka Univ.)

E-mail: ikuta@procyon.comm.eng.osaka-u.ac.jp

【背景】

多次元の量子もつれ状態は、2次元2粒子もつれ状態に比べ情報密度の増大、雑音耐性の向上[1]などの利点が知られており、軌道角運動量[2]や時間-エネルギー不確定性[3,4]に基づく多次元もつれ光子対の発生が近年盛んに報告されている。今回、カスケード接続した遅延マッハツェンダー干渉計(MZI)を用いる事で、高次元でのベルの不等式の一つである CGLMP 不等式[5]の破れを、4次元 Time-bin 量子もつれで初めて観測したことを報告する。

【多次元 Time-bin 量子状態の射影測定】

d 次元の2粒子もつれ状態を用いて CGLMP 不等式の破れの観測を行うには、次式で表される測定基底への射影が必要となる[5]。

$$|\theta\rangle = \frac{1}{\sqrt{d}} \sum_k \exp(ik\theta) |k\rangle \quad (1)$$

時間-エネルギー量子もつれ光子対に対して、式(1)の測定を実装する方法が提案されている[4]。Fig. 2 に本方法を4次元 Time-bin 状態に応用する場合の構成を示す。Time-bin 状態の時間スロット間隔をTとした時に、経路差による遅延時間T、位相差 θ を持つ MZI 1、同じく遅延時間2Tと位相差 2θ を持つ MZI 2を用意し、二つを直列接続する。この MZI に4次元 Time-bin 量子もつれ光子を入力すると、出力では7つの時間位置で受信する可能性が生ずる(Fig. 2)。このうち、図中の紫色で示されている時間位置に着目すると、遅延時間に比例した位相差を持った、入力光子の時間位置が $k \in \{0,1,2,3\}$ である状態 $|k\rangle$ の重ね合わせになっている。従って、この時間位置での光子検出事象を抜き出すことで、d=4 の場合の式(1)の射影測定が実現できる。また同様に、n個の MZI を用意してカスケード接続することで、 2^n 次元の場合にまで拡張することも可能である。

【実験系】

波長 1551.1nm の CW 光を LN 強度変調器を用いて、変調速度 1GHz、パルス幅 100ps の4連パルスに整形する。その後、PPLN 導波路を用いた二次高調波発生により、整形したパルスから

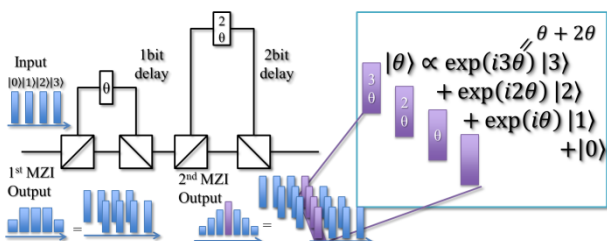


Fig. 2 Concept of projection measurement with cascaded delay Mach-Zehnder interferometer

780nm ポンプパルスを発生させる。これをもう一つの PPLN 導波路に入力することで、パラメトリックダウンコンバージョンにより、次式で示す4次元量子もつれ状態を生成する。

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 |k\rangle_A |k\rangle_B \quad (2)$$

生成された量子もつれはフィルターを用いて波長分離され、異なる受信者 Alice(1555nm)と Bob(1547nm)のもとで、先述の2段カスケード接続遅延 MZIと超伝導細線単一光子検出器(SNSPD)を用いて、式(1)の測定基底に射影される。

【実験結果】

実験結果を Fig. 1 に示す。Alice 側干渉計の位相を区間 $[0, 2\pi]$ において41分割、Bob 側を区間 $[\pi/8, 15\pi/8]$ において8分割して測定した同時計数をプロットしている。4連パルスあたりの平均光子数は約 0.01[photon]、SNSPD の量子効率率は19%(Alice)、17%(Bob)、ダークカウントは7Hz(Alice)、2Hz(Bob)であった。Fig. 1 右上に Bob 側干渉計の位相を $\pi/8$ と設定した場合の同時計数フリンジを示す。前述の射影測定を用いて明瞭な4次元のフリンジが観測可能であることが確認できた。また Bob 側で非直交基底での測定を行っても、量子相関が保たれていることが示されている。

Fig. 1 の結果から S 値を計算すると、古典論による上限値 2 を大きく上回る $S=2.741 \pm 0.040$ を得た。このように標準偏差の約 18 倍で CGLMP 不等式の破れを確認した。

【参考文献】

- [1] T. Durt, et al., Phys. Rev. A, **67**, 012311 (2003)
- [2] A. C. Dada, et al., Nature Phys., **7**, 677-680 (2011)
- [3] R. Thew, et al., Phys. Rev. Lett., **93**, 010503 (2004)
- [4] D. Richart, et al., Appl. Phys. B, **106**, 543-550 (2012)
- [5] D. Collins, et al., Phys. Rev. Lett, **88**, 040404 (2002)

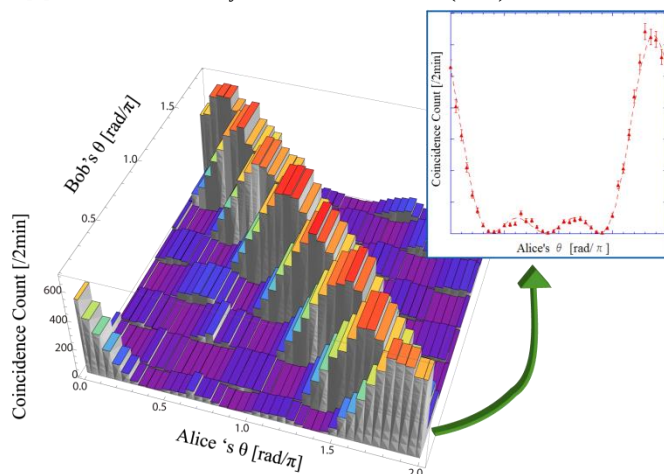


Fig. 1 Coincidence as function of Alice and Bob's phase