

量子的な 2 光子対の伝搬に伴う Gouy 位相特異点発生

Propagational-Dependent Gouy Phase Singularity of Quantum Two-Photon Pairs

1265045 地主 拓末 (光制御・ネットワーク研究室)
(指導教員 小林 弘和 准教授)

1. はじめに

近年、量子もつれを用いた量子暗号技術や量子計算への応用に関する研究が盛んである。特に空間モードを有する量子もつれした光子は、理論上加算無限個の自由度をもつため注目されている。量子もつれを生成する代表的な手法として、非線形光学結晶 (NLC) を用いた自発的パラメトリック下方変換 (SPDC) があり、生成された 2 光子はシグナル光子・アイドル光子と呼ばれ、ポンプ光子との間でエネルギーなどの物理量が保存される [1, 2]。本研究により、高次動径モードを有する SPDC では位相特異点が発生することを発見した (図 1)。本稿では、SPDC で 2 光子対を計数するための予備実験を行なった。

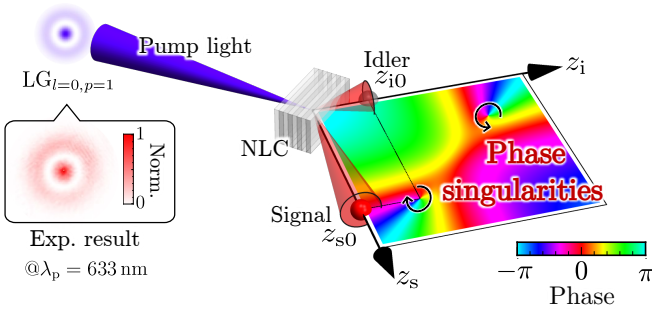


図 1: モード $LG_{l=0,p=1}$ の青色 (波長 $\lambda_p = 405$ nm) ポンプ光により生成された各光子が (z_s, z_i) だけ伝搬したときの光軸中心における波動関数の位相分布。位相特異点 (z_{s0}, z_{i0}) ではシグナル光子が光軸中心に存在する場合、アイドル光子は光軸中心以外で観測される。実験的には、波長 $\lambda_p = 633$ nm で $LG_{l=0,p=1}$ の生成を確認した。

2. バンドパスフィルタを用いた 2 光子対計数

本研究では、予備実験として中心波長 $2\lambda_p = 810$ nm の BPF を 1 枚設置したときと 2 枚設置した状態で計数することによって、異なる 2 種類の条件を与え、生成された 2 光子対を換算した。2 光子対の生成効率は結晶の温度 T に依存するため、光子計数の温度依存性を測定した。ここで、 $\lambda_p = 405$ nm はポンプ光の波長である。中心波長 $\lambda_p, 2\lambda_p$ の光子のみが十分大きい信号とする仮定により、光子計数器での計数 $N_i(T)$ (i : バンドパスフィルタ (BPF) の枚数, T : NLC の温度) は

$$\begin{cases} N_1(T) = \alpha_{405}[\eta_{405}N_{405}(T)] + \alpha_{810}[\eta_{810}N_{810}(T)], \\ N_2(T) = \alpha_{405}^2[\eta_{405}N_{405}(T)] + \alpha_{810}^2[\eta_{810}N_{810}(T)] \end{cases} \quad (1)$$

の関係を満たすはずである。ただし、 $(\alpha_{405}, \alpha_{810})$, (η_{405}, η_{810}) はそれぞれ中心波長 $\lambda_p, 2\lambda_p$ の光子の BPF 透過率とアバランシェフォトダイオード (APD) の量子効率とし、 $N_{405}(T), N_{810}(T)$ はそれぞれ中心波長 $\lambda_p, 2\lambda_p$ の光子数とした。 $N_1(T), N_2(T)$ を光子数計数器で測定し、透過率と量子効率が既知であれば式 (1) を連立することで $N_{405}(T), N_{810}(T)$ をそれぞれ求めることができる。本実験で使用した BPF は $\alpha_{405} = 5(1) \times 10^{-5}$, $\alpha_{810} = 0.95$ であり、光子検出器の量子効率は $\eta_{405} = 8.5 \times 10^{-2}$, $\eta_{810} = 0.53$ であった。

3. 生成された 2 光子対の測定実験

図 2 にバンドパスフィルタを用いた 2 光子対の測定実験系の概略図を示す。図 2 では、LD (波長 $\lambda_p = 405$ nm) でポンプ光を発振し、TC で温度調節 (温度 T) された NLC を通過させる。このとき、SPDC により NLC から通過した光子はポンプ光と 2 光子対の 2 種である。これら光子は BPF (1 枚または 2 枚) によって透過する光子数は各々異なる透過率で減少する。透過した光子を APD 受光面に集めるために、レンズで集光した。APD で受光した光子は電気変換され光子計数器にパルス信号で送信し、光子計数器で光子数を計数した。

図 3(a)(b) に、式 (1) によって得られた中心波長 λ_p , $2\lambda_p$ の換算された光子数をそれぞれ示す。2 光子の光子数 $N_{810}(T)$ はポンプ光の光子数 $N_{405}(T)$ に対して、 $N_{810}(T)/N_{405}(T) = 2 \times 10^{-5}$ 程度少なかった。また、 $N_{405}(T)$ には温度変化により変化が確認されなかったが、 $N_{810}(T)$ には温度特性によって概ね上に凸な光子数として顕著に現れた。これは、NLC 内の温度を変えることで屈折率も変化し、NLC 内でポンプ光の波長が変わることで 2 光子が生成される波長が変化したといえる。したがって、 $N_{810}(T)$ には温度特性が確認されるが、 $N_{405}(T)$ は生成される光子数が十分少ないため温度特性は確認されなかった。

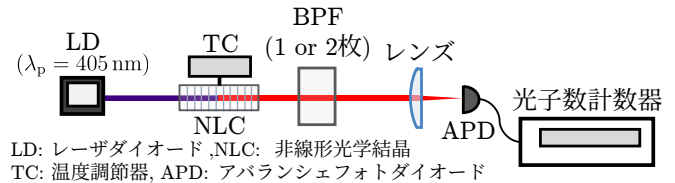


図 2: BPF を用いた 2 光子対の測定実験系の概略図。

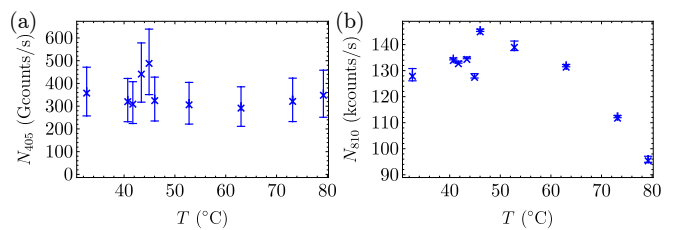


図 3: 式 (1) によって得られた中心波長 (a) λ_p , (b) $2\lambda_p$ の換算された光子数。

4. まとめ

位相特異点を有する 2 光子の伝搬を計測するための予備実験として、生成した 2 光子の光子数を式 (1) で計算し、2 光子対の出現を確認した。今後は周波数で 2 光子対を直接計測したい。また、生成された 2 光子対に対して伝搬距離操作を行ない、ポンプ光の空間モードを上げることで位相特異点を実験的に検証したい。

参考文献

- [1] Sit A et al., Optica **4**, 1006–1010 (2017).
- [2] A. Mair et al., Nature **412**, 313–316 (2001).