3-photon GHZ entanglement のレポート

古結尚

平成 10 年 10 月 26 日

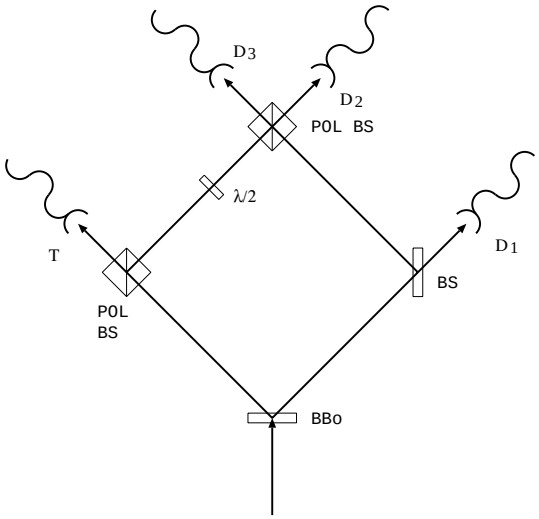

図 1: 実験配置図

1 この実験の意義

3-particle entanglement leads to a conflict with local realism for nonstatical predictions of quantum mechanics, where 2-particle entanglement arises a conflict for statistical predictions.[1]

2 実験

実験装置は図 1の通り。偏極した entangled photon のペアは波長 788nm の Ti-Sapphire レーザのパルス (約 200fs) を BBO(Beta-Barium-Borate) に通して作られる。一つのペアができる確率は、パルスあたり 10^{-4}程度。この実験で必要な条件 (2 photon-pair ができ、4 つの photon が別々の detector に入る) を満たす確率は 10^{-10}だが、レーザのパルスは $7.6\times10^{7}/\mathrm{sec}$ なので、150 秒に一回測定できる。

この装置から得られる 1-pair の状態は

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_a|V\rangle_b - |V\rangle_a|H\rangle_b\right). \tag{1}$$

3-photon GHZ 状態は

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_1|H\rangle_2|V\rangle_3 + |V\rangle_1|V\rangle_2|H\rangle_3\right). \tag{2}$$

これを導くために、以下を考える。まず、2-pair の状態は、(1) を掛け合わせて、

$$\frac{1}{2}\left(|H\rangle_a|V\rangle_b - |V\rangle_a|H\rangle_b\right)\left(|H\rangle'_a|V\rangle'_b - |V\rangle'_a|H\rangle'_b\right) \tag{3}$$

次の置換えができる。

$$|H\rangle_a \rightarrow |H\rangle_T, \tag{4}$$
$$|V\rangle_b \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|V\rangle_2 + |V\rangle_3\right), \tag{5}$$
$$|V\rangle_a \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|V\rangle_1 + |H\rangle_2\right), \tag{6}$$
$$|H\rangle_b \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_1 + |H\rangle_3\right). \tag{7}$$

4 つの detector にそれぞれ 1 つの photon しか入らない場合だけをとると、

$$-\frac{1}{4\sqrt{2}}\left\{|H\rangle_T\left(|V\rangle'_1|V\rangle_2|H\rangle'_3 + |H\rangle'_1|H\rangle'_2|V\rangle_3\right) + |H\rangle'_T\left(|V\rangle_1|V\rangle'_2|H\rangle_3 + |H\rangle_1|H\rangle_2|V\rangle'_3\right)\right\}. \tag{8}$$

二つの photon-pair が識別不可能な場合[1] だと、次のようになる。

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|H\rangle_T\left(|H\rangle_1|H\rangle_2|V\rangle_3 + |V\rangle_1|V\rangle_2|H\rangle_3\right) \tag{9}$$

この状態が波動関数の重ね合わせであることを実験で確かめる。

$$|+45^\circ\rangle_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H\rangle_1 + |V\rangle_1\right) \tag{10}$$

(9) に代入すると、

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|H\rangle_T|+45^\circ\rangle_1\left(|H\rangle_2|V\rangle_3 + |V\rangle_2|H\rangle_3\right). \tag{11}$$

これは"entangled entanglement"[2] でいわれていた状態。photon 2 と 3 の間の entanglement が示せれば、GHZ entanglement が実現できたことになる。entangled state(2) を 45°回した基底で見ると、

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|+45^\circ\rangle_2|+45^\circ\rangle_3 - |-45^\circ\rangle_2|-45^\circ\rangle_3\right). \tag{12}$$

[1] laser の pulse が無限に小さく、2 つのペアが区別できない場合にこの entanglement state が現れるが、この実験ではパルスが十分に長いので、区別できないことが確かめられている。[3]

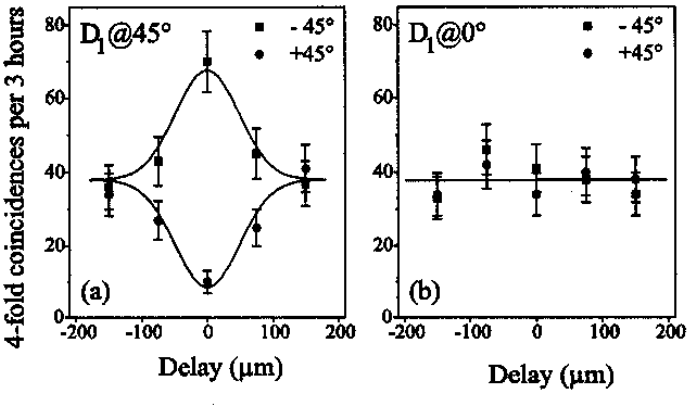

図 2: 実験データ

これは、photon 2 が$-45°$で見つかれば、photon 3 も同じ方向で見つかることを示唆している。$|+45°\rangle_2\,|-45°\rangle_3$と$|+45°\rangle_2\,|-45°\rangle_3$は打ち消しあってなくなる。この実験では$D_1$の前に$+45°$の偏極板、$D_2$の前に$-45°$の偏極板を置き、$D_1$の前には$+45°$か$+45°$の偏極板どちらかを置き、$D_1$と$D_2$の時間差を横軸にとり、$T, D_1, D_2, D_3$の同時係数を測定した。また、$D_1$の前に$0°$の位相板を置くと、$|V\rangle_2\,|H\rangle_3$しかとり出さないので、変化はないと予想され、実際に図 2(b) に見られるように変化はなかった。

3 この実験からわかったこと

i. BBO だと、$|V\rangle$ と $|H\rangle$ が出る、つまり type2 である。

ii. back to back の状況が再現できそうだ。

4 このレポートでわからなかったこと

i. 2photon-entanglement と 3photon-entanglement の違い。(§1)

ii. どういう条件で 2pair を同一視できるのか。

参考文献

[1] *Bell's Theorem, Quantum Theory, snd Conseption of the Universe*
M. Kafatos, (Kluwer Academics, Dordrecht, The Negerlands, 1989), pp.73-76

[2] G.Krenn, A.Zeilinger, Phys.Rev.A.**54**,1793(1996)

[3] M.A.Horne, Fortschr.Phys.**46**,6(1998)