

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

Observation and manipulation of two-photon entanglement in Franson-type experiments  
(フランソン型の実験における二光子エンタングルメントの観測と制御)

氏名 佐中 薫

量子暗号、量子コンピューターなど将来の新技术に向けて、量子間のエンタングルメント（量子的なもつれ合い状態）の発生及び制御は、決定的に重要な役割をはたす。光の量子単位である光子を用いた量子エンタングルメントは、そのコヒーレンス（干渉性）の良さから、環境に対するデコヒーレンスに強く、この量子情報技術の確立に向けた最も有望な方法の一つである。このような光子間の量子エンタングルメントを高い効率で発生させ、またその量子状態を自由に操作できるようになれば、このような技術が実現に向けて大きく前進することになる。

二光子間に量子エンタングルメントを発生する方法として有望な方法の一つは、非線型結晶を用いたパラメトリック下方変換によって発生した相関をもった光子対を、光路差が大きな干渉計に入射させて、その時間的な相関から、二光子間に量子エンタングルメントを発生させる方法である（フランソン型の実験）。我々は、従来の実験において用いられてきたバルク結晶に代わりに、紫色光光源の目的で発展した導波路型非線型素子を用いて、この二光子エンタングルメントを発生させる実験を行った。フランソン型の実験における量子エンタングルメントは、この非対称の干渉計を通過して来た光子対が、まとまりとして干渉する二光子干渉のビジビリティ（明瞭度）を用いて評価することができる。観測された二光子干渉のビジビリティはおよそ 80%であり、古典電磁気学で説明可能な 50%を大きく越えていた。このことは量子光学でのみ説明可能な量子エンタングルメントの状態が形成されたことを示している。従来この種の実験はガスレーザーのようなハイパワー・レーザーを用いて行われていたが、我々の成果は、数ミリワット程度の非常に弱い光源でも、量子エンタングルメントを高効率

で発生することが可能になったことを意味している。

我々はさらに、この発生した二光子の量子状態制御のため、二光子の偏光状態に注目した。従来のフランソン型の実験においては2つの光子の偏光状態は常に同じであった。量子エンタングルメントを光子の偏光状態について発生させることができれば、その操作性は各段に向上する。われわれは(図1)のような実験セットアップを用いて、二光子間に偏光エンタングルメントを発生させる実験を行った。我々の方法は干渉計を構成する光学素子の配置の工夫と、フランソン型の実験で用いられる二光子の条件付測定によって実現される。形成された偏光エンタングルメントの偏光相関(H: 水平偏光、V: 垂直偏光)を測定した(図2a)。二光子の偏光相関は出力側の偏光版を用いて確かめることができ、HHとVの観測確立はそれぞれ  $P_{HH} = 0.44 \pm 0.03$ 、 $P_{VV} = 0.41 \pm 0.02$  であった。さらに二光子が重ね合わせ状態にあることを確かめるため、二光子干渉の測定をおこなった(図2b)。この干渉のビジビリティの値は  $V = 0.44 \pm 0.16$  であった。これらの値を用いた信頼度  $F = (P_{HH} + P_{VV} + V)/2$  の値により、二光子の偏光エンタングルメントを評価することができる。実験値を代入して得られた値は  $F = 0.65 \pm 0.10$  となり、この値が十分 0.5 を十分に越えていることから、実際に二光子間に偏光エンタングルメントが発生していることが確かめられた。偏光エンタングルメントはこれまでに3つの方法で実現されていたが、我々は新たな4番目の方法を提示したことになる。

また我々は(図1)の実験セットアップが、いくつかの条件付きで、制御NOTゲート(Controlled-NOT gate)と呼ばれる量子論理ゲートとして働くことができることに着目し、その動作を検証した。光子の偏光状態 H、V をそれぞれ量子ビットの状態 0、1 に対応させ、入力側、出力側の偏光版を用いてその相関を確かめることができる。我々の方法では、確率 1/4 でしか演算を行うことができないので、予想される論理演算の真理表は(表1a)のようになる。実際に観測された値は(表1b)のようになり、予想される値と良い一致を示した(全体の確率が1/4になるように規格化)。このようなゲートを用いれば、確率的ではあるが、光子間のコヒーレンスを保ったまま二光子の量子状態を自由に操作することが可能になる。

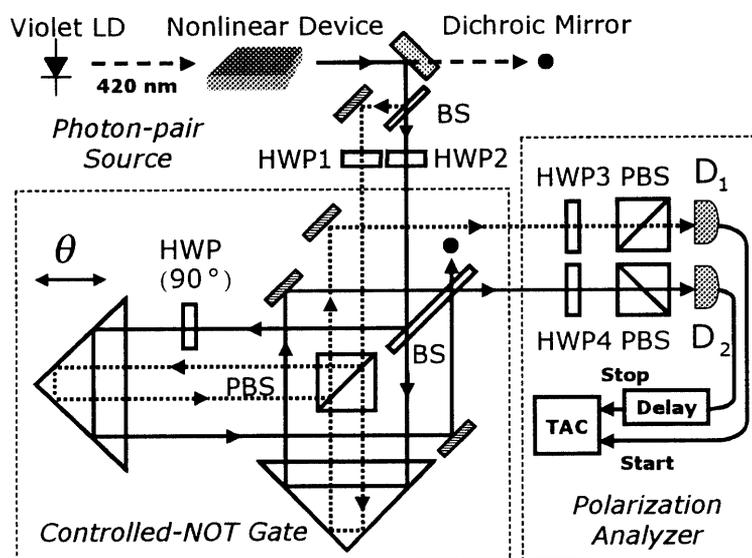


図1. フランソン干渉実験による二光子偏光エンタングルメントの発生のセットアップ。

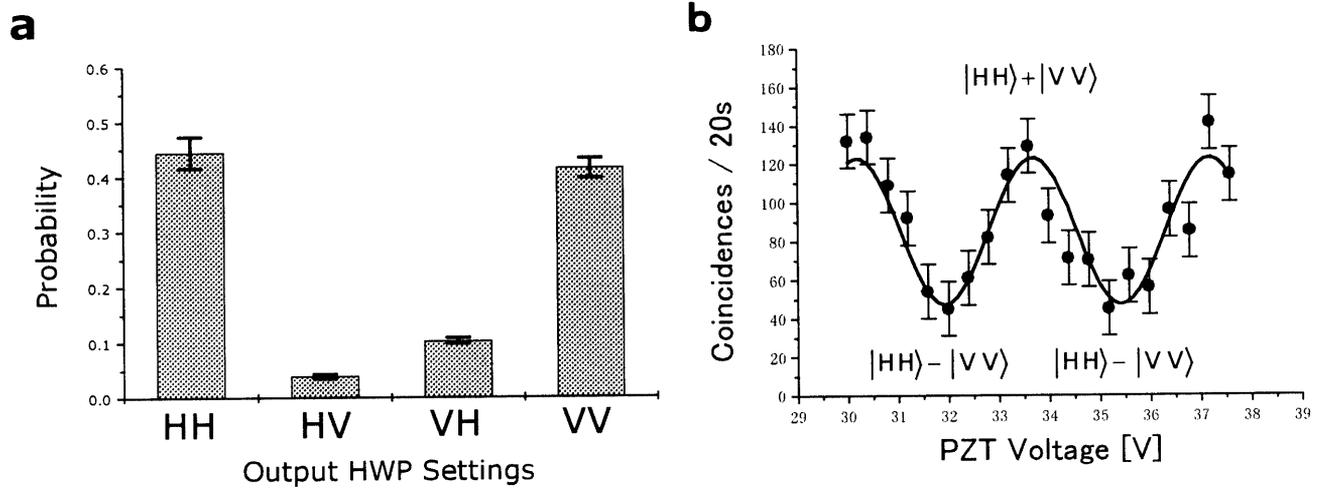


図 2. (a) 観測された二光子の偏光状態相関 (H: 水平偏光、V: 垂直偏光)。 (b) 観測された二光子干渉。

**a** Input HWP Settings

Output HWP Settings	HH	HV	VH	VV
HH	0.25	0	0	0
HV	0	0.25	0	0
VH	0	0	0	0.25
VV	0	0	0.25	0

**b** Input HWP Settings

Output HWP Settings	HH	HV	VH	VV
HH	0.244 (6)	0.004 (0)	0.002 (1)	0.001 (0)
HV	0.002 (0)	0.243 (3)	0.000 (0)	0.004 (1)
VH	0.001 (1)	0.002 (1)	0.006 (2)	0.236 (10)
VV	0.002 (0)	0.001 (0)	0.241 (11)	0.009 (1)

表 1. 我々のシステムによる、二光子の偏光状態の変換確率。光子の偏光状態 H、V がそれぞれ量子ビットの状態 0、1 に対応。(a) 理論値 (b) 実験値