



| | |
|--------------|---|
| Title | 量子もつれ合い光子対を用いた量子干渉・回折実験 |
| Author(s) | 枝松, 圭一 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 2003, 123, p. 3-8 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/3677 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

量子もつれ合い光子対を用いた量子干渉・回折実験

基礎工学研究科 枝 松 圭 一¹

E-mail: eda @riec.tohoku.ac.jp

1 はじめに

近年、量子力学の原理を直接応用した量子情報・通信技術(例えば、量子暗号通信、量子コンピュータなど)の研究が爆発的勢いで進展している。これらの技術の中核となるのが量子もつれ合い*と呼ばれる、量子力学的多粒子系がもつ一見不思議な性質である。特に、パラメトリック下方変換*と呼ばれる非線形光学過程を利用することで、良質な量子もつれ合い状態にある光子の対を比較的簡単に作り出すことができるようになり、上述した量子情報通信の実験研究が飛躍的に進展した。また、このような量子情報通信に関連した応用研究の一方で、量子もつれ合い状態にある光子対は基礎的な研究分野においても多くの新しくかつ興味深い現象を与えてくれる。ここではその一例として、古典的な波動光学では理解することのできない、もつれ合った光子対状態の量子干渉・回折実験について紹介する。

2 光子のド・ブロイ波長

「光子」は、電磁波のエネルギー量子である。真空中を振動数 ν 、波長 λ 、位相速度 $c = \nu\lambda$ で伝播する電磁波の光子は、エネルギー $E = h\nu$ 、運動量 $p = E/c = h/\lambda$ をもつ。この関係から、古典的電磁波としての光の波長 λ は、1個の光子のもつド・ブロイ (de Broglie) 波長と解釈することもできる。では、2つあるいはそれ以上の複数の光子がまとまった状態ではどうであろうか？原子のような質量をもつ粒子の場合と同様に、運動量 p をもつ n 個の光子からなる系の運動量は np であるとみなそう。すると、その系における「ド・ブロイ波長」 λ_n は、

$$\lambda_n = \frac{h}{np} = \frac{\lambda}{n} \quad (1)$$

となり、1個の光子の波長(すなわち古典的電磁波としての波長)の $1/n$ になると考えられる。これを、 n 個の光子群の「フォトニック・ド・ブロイ波長 (photonic de Broglie wavelength)」[1]と呼ぶ。通常の原子、分子等の物質におけるド・ブロイ波長は、物理化学的な力により強く束縛された複合粒子における物質波としての波長を意味するが、光子間にはそのような束縛力は存在しないにもかかわらず、このような物質波におけるド・ブロイ波長と同じ概念が適用できることはたい

¹現所属：東北大学電気通信研究所

へん興味深い。また、この $1/n$ に短くなった波長をうまく利用することができれば、古典的な光の回折限界を超えた結像を得ることができる等、応用上も注目されている。

3 量子もつれ合い光子対の2光子干渉実験

このようなフォトニック・ド・ブROI波長を実際に観測するためには、光子群を個々の光子に分割することなしに、塊のまま干渉させれば良いであろう。しかし、通常の光の干渉実験で光を2光路に分けるために用いられるビームスプリッタ (beam splitter: 半透過鏡) では、光子群は確率的に無秩序に分割されてしまい、意図した干渉は得られない。しかし、パラメトリック下方変換によって生じた量子もつれ合い光子対を用いれば、通常のビームスプリッタを用いた巧妙な方法が存在する。

図1に、2光子状態の光子群としての干渉を観測するための実験装置の概要を示す[2]。この装置はマッハ・ツェンダー (Mach-Zehnder) 型干渉計を基本にしているが、2光子の入射部分と検出部分に工夫がある。パラメトリック下方変換によって発生させた光子対を一旦別々の光路に導いた後、干渉計の第1のビームスプリッタ (BS1) の2つの入射ポートへ2光子を同時に入射する。

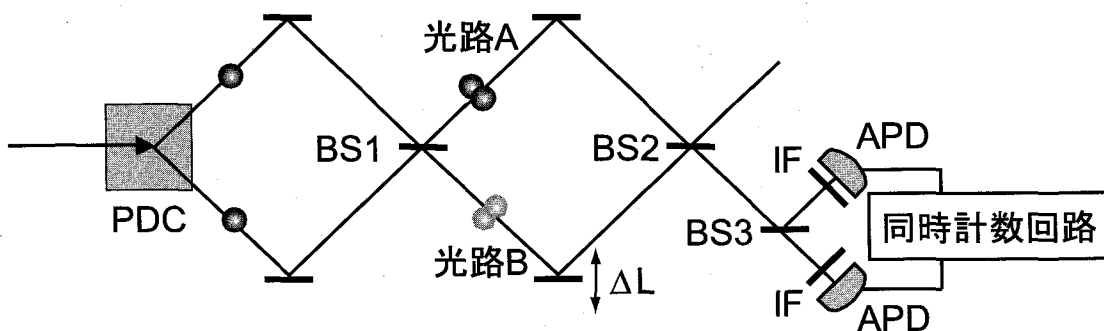


図1. 2光子干渉実験装置の概念図。PDC: パラメトリック下方変換のための非線形光学結晶 (KNbO₃)、BS1~3: ビームスプリッタ、IF: 干渉フィルタ、APD: 光子検出アバランシェフォトダイオード。

すると、2光子は一緒になってBS1の2つの出力ポートのどちらか一方から出射され、2つに分かれることはない。これは、2つの光子がボーズ統計に従う粒子 (Boson) として干渉した結果であり、ホン-オウ-マンデル (Hong-Ou-Mandel) の干渉[3]と呼ばれている。このようにして、干渉計の2つの光路 (AおよびB) のどちらかを2光子が一緒に通過するような重ね合わせ状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|2\rangle_A |0\rangle_B + |0\rangle_A |2\rangle_B) \quad (2)$$

を作り出すことができる。ここで、 $|2\rangle_A |0\rangle_B$ は2光子が光路Aを、 $|0\rangle_A |2\rangle_B$ は光路Bを通過した状態を表す。この重ね合わせ状態は、第2のビームスプリッタ (BS2) で再び混合される。BS2も通常のビームスプリッタであるから、2光子を個々の光子に分けてしまう場合も存在するが、第3のビームスプリッタ (BS3) とその後方に設置された2個のアバランシェフォトダイオード (APD) および同時計数回路 (coincidence counter) で構成される「2光子検出器」によって、2光子がBS2の片方の出射ポートから一緒に出力された場合のみを観測する。

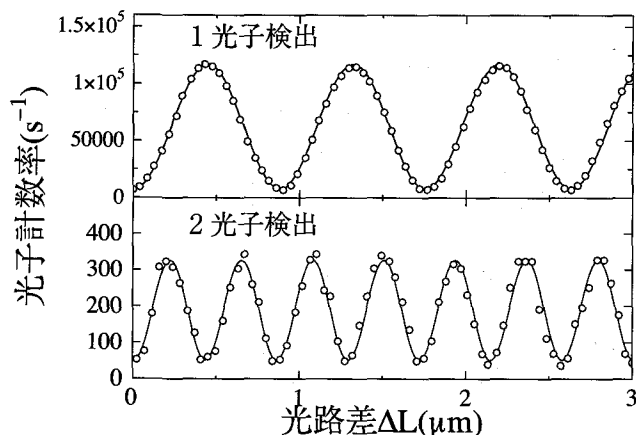


図2. 干渉計の光路差が0 μm 付近での2光子干渉実験結果。横軸は干渉系の光路差、縦軸は光子計数率。上段のグラフは1光子検出、下段は2光子検出による干渉波形を表す。

このようにして、パラメトリック下方変換によって発生させた2光子状態の光子群としての干渉を測定することが可能である。図2に、測定結果の一例として、干渉計の光路差が0 μm 付近の時の1光子検出（上段：BS1の片方の入力ポートへの光子の入射を遮り、片方のAPDの出力のみを計数）および2光子検出（下段）による干渉パターンを示す。1光子検出ではパラメトリック下方変換光の中心波長である $\lambda = 860 \text{ nm}$ 周期の通常の干渉が見られるのに対し、2光子検出ではその半分の430 nm 周期の干渉が観測される。すなわち、2光子状態のフォトリック・ド・ブローイ波長 $\lambda/2$ に対応する干渉周期が観測されたことになる。また、干渉計の光路差を数100 μm 程度以上に長くした場合、1光子検出では干渉が観測されなくなってしまう（図3上）。これは、パラメトリック下方変換光のスペクトル幅が広く、コヒーレンス長が数十 μm と短いためである。それに対し、2光子検出では光路差が長くなっても430 nm 周期の干渉が明瞭に観測される（図3下）。これは、対となって発生した2光子のエネルギー（ $h\nu_s, h\nu_i$ ）の和は常にポンプ光子のそれに等しい（ $h\nu_p = h\nu_s + h\nu_i$ ）という、2光子間の量子相関に起因する。この実験では、パラメトリック下方変換のためのポンプ光としてコヒーレンスの長い単一周波数レーザーを用いているため、2光子干渉では1光子単独の場合よりも長いコヒーレンス長が得られたのである。

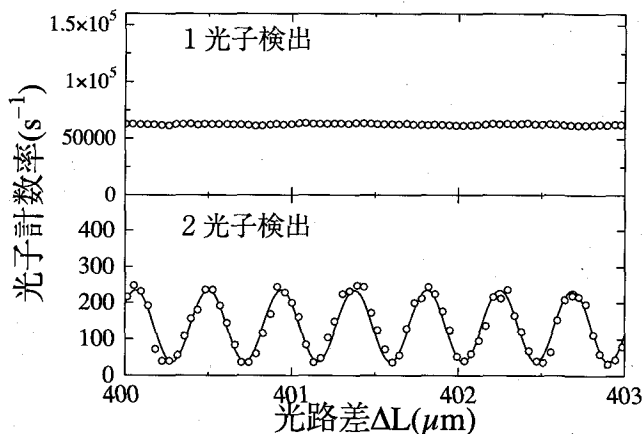


図3. 光路差が400 μm 付近での二光子干渉波形。

4 量子もつれ合い光子対による回折と干渉

上述したように、パラメトリック下方変換によって発生させた2光子が一体となって同じ光路を通るようにして干渉させれば、1光子の場合の半分のフォトリック・ド・ブローイ波長に対応する干渉周期が観測されることがわかった。では、同じように2光子あるいは多光子が一体となって物体を回折したり干渉したりする際には、どのような現象が生じるのであろうか。実は、パラメトリック下方変換によって生じた光子対は、エネルギー（振動数）や偏光に関するだけでなく、光子対の発生する時間や空間についても強い量子相関（時間や空間に関する量子もつれ合い）をもつことが最近わかってきた。これは、ポンプ光子がシグナルとアイドラの2光子に分かれる過程が、ほぼ同

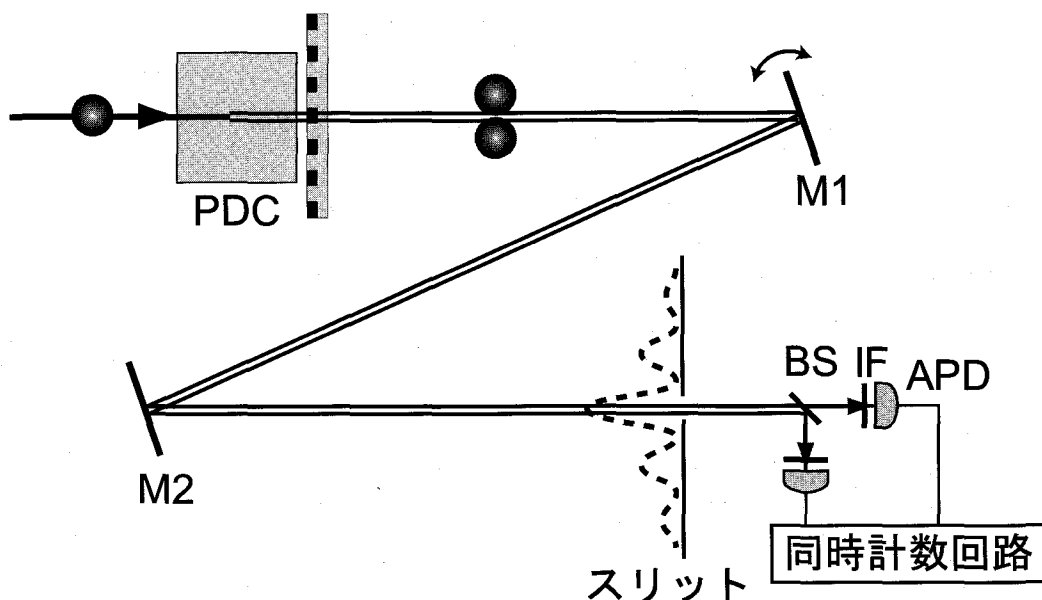


図4. 空間相関効果の検証実験の概念図。M1~2:ミラー。M1の角度を変化させることにより回折パターンを測定する。

時かつ同じ場所で起こることを意味する。このような強い空間相関をもった光子対が回折・干渉する際には、その空間相関による量子効果が現れることが期待される。また、このような効果を利用することにより、従来の古典光学的回折限界を超えた微細加工（量子リソグラフィ）を実現するアイデアも提案されている[4]。

我々は、このような光子対の空間相関の効果を検証する実験として、パラメトリック下方変換光子対と回折格子を用いた2光子回折・干渉実験を行った[5]。この実験では、図4に示すように、パラメトリック下方変換素子の直後に透過型回折格子を配置し、その回折パターンを十分後方に配置した2光子検出器で検出する。ここで、パラメトリック下方変換によって生じた光子対が同一の窓を一緒に通るように、回折格子の窓の間隔は十分に大きくとる。図5および6に、その結果を示す。図5はパラメトリック下方変換によって発生した光子対、図6は同じ中心波長（ $\lambda = 860 \text{ nm}$ ）

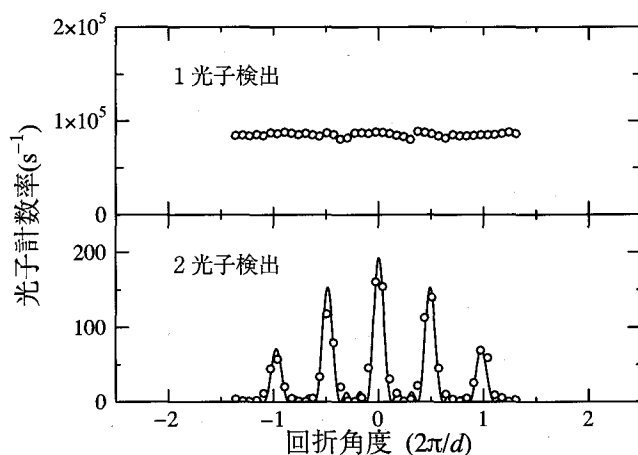


図5. パラメトリック下方変換光子対による回折・干渉パターン。上段は一光子検出、下段は二光子検出による結果を表す。

をもつレーザー光の、各々上段は1光子検出、下段は2光子検出による回折・干渉パターンである。2光子検出における結果を両者で比較すると、パラメトリック下方変換光ではレーザー光に比べて回折光の間隔が半分になっている。すなわち、前述した2光子干渉計における結果と同様、パラメトリック下方変換光では2光子状態のフォトリソ・ド・ブローイ波長 $\lambda/2 = 430 \text{ nm}$ に対応した回折・干渉パターンが観測されることがわかる。同じ2光子検出による回折パターンを測定しているにもかかわらず、レーザー光では通常の

回折間隔しか観測されないのは、レーザー光では光子間の時間的、空間的相関がなく、同時検出された2光子が同じ窓を通過してきたものとは限らないことに起因する。さらに、1光子検出においては、レーザー光が古典的に予想される通常の回折・干渉パターンを示すのに対し、パラメトリック下方変換光では干渉が全く観測されない。これは、空間相関をもった光子対は1光子検出による干渉を示さないことを表しており、量子もつれ合い光子対の非古典的な性質が1光子検出の場合にも顕著に現れた例である。

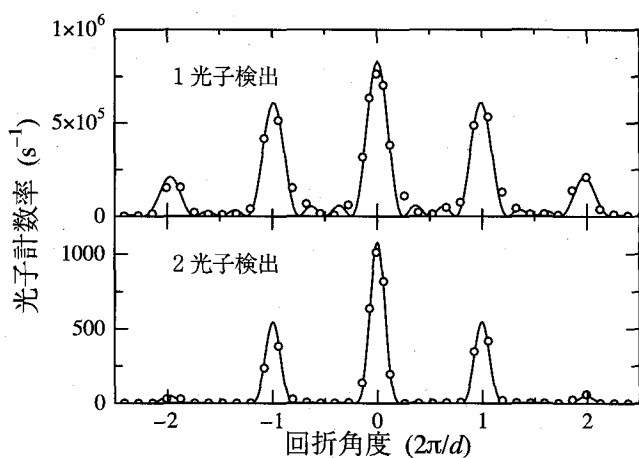


図6. 図5のパラメトリック変換光子対と同一中心波長のレーザー光による回折・干渉パターン。

5 結 び

以上のように、パラメトリック下方変換によって発生させた光子対は、それらの間のエネルギー、偏光、時間、空間等の量子的相関に基づく特有の量子回折・干渉現象を引き起こす。これらは光の量子性や量子もつれ合い光子対状態が引き起こす多彩な現象のほんの一部にすぎないが、光の量子的性質が作り出す物理現象の面白さと、その実験研究の一端を感じ取って頂ければ幸いである。また、ここで紹介した実験には「低温」に関連した事項はいっさい出てこなかったことを訝しく感じられた方もいらっしゃるかと思う。実際そうであるので心苦しい限りであるが、執筆者らのグループは現在、半導体からの量子もつれ合い光子対の生成実験に取り組んでおり、そこでは液体ヘリウム温度での実験がたいへん重要である。手前勝手ではあるが、その実験結果についても近い将来にご紹介することができれば、本稿をその序論と見なして頂くことでお許しいただけるのではないかと考えている。

本稿で紹介した実験結果は、大学院基礎工学研究科博士課程（当時）の清水亮介君の努力によるものである。また、大学院基礎工学研究科の伊藤正教授には研究に対する多大のご協力と有益な議論をしていただいた。この場をお借りして感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] J. Jacobson, G. Bjork, I. Chuang, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **74**, 4835 (1995)
- [2] K. Edamatsu, R. Shimizu, and T. Itoh, Phys. Rev. Lett. **89**, 213601 (2002)
- [3] C.K. Hong, Z.Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987)
- [4] A.N. Boto, P. Kok, D.S. Abrams, S.L. Braunstein, C.P. Williams, and J.P. Dowling, Phys. Rev. Lett. **85**, 2733 (2000)
- [5] R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, Phys. Rev. A **67**, 041805 (2003)

用語説明

量子もつれ合い (entanglement)

2 粒子以上からなる量子系において、全体の状態が個々の粒子の状態の直積では表せない状態を、量子もつれ合い状態という。このような状態においては、量子力学的多粒子系がもつ本質的な非局所的性質が顕著に現れる。例えば、量子力学の黎明期に、Einstein, Podolski, Rosen が量子力学に対する反証に用いようとして提案した状態 (EPR 状態) 等はその例である。

パラメトリック下方変換 (parametric down-conversion)

2 次の非線形光学感受率を持つ物質に振動数 ω_3 の光 (ポンプ光) を入射すると、光学感受率が ω_3 で変調され、 ω_1 および ω_2 ($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$) の 2 つの振動数の光が発生する。これをパラメトリック下方変換と呼ぶ。特に、 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3/2$ の場合を縮退パラメトリック変換と呼ぶ。光を量子化した描像で見れば、振動数 ω_3 の光子から、振動数 ω_1 および ω_2 の光子対が生成されることになる。この現象は、力学系 (例えばブランコ) や電気回路で一般に見られるパラメーター励振 (parametric excitation) の一種である。