

## 量子もつれ光子対の回折・干渉と量子リソグラフィ

清水 亮介\*・枝松 圭一\*\*

## Diffraction-Interference and Quantum Lithography of Entangled Photon Pairs

Ryosuke SHIMIZU\* and Keiichi EDAMATSU\*\*

We present quantum diffraction-interference experiments of entangled photon pairs generated by spontaneous parametric down-conversion, in connection with the concept of "quantum lithography." The photon pairs exhibit diffraction-interference patterns associated with half the classical wavelength of the constituent photons. We show that these phenomena originate from the spatial entanglement between the photons.

**Key words:** photon, entanglement, interference, diffraction, correlation

## 1. フォトニック・ドブロイ波長と量子リソグラフィ

最近の量子情報通信技術の進展に伴い、量子もつれ（エンタングルメント）を積極的に利用した新しいアプリケーションが注目を集めている。そのひとつとして、量子もつれ光子対における量子的回折・干渉効果を利用し、従来の古典的回折限界を超えた光学的解像度を得る技術、いわゆる「量子リソグラフィ」があげられる<sup>1-5)</sup>。本稿では、量子リソグラフィの原理と、その検証実験となる量子もつれ光子対による二光子回折・干渉実験の概要について述べる。

真空中での波長が  $\lambda$  の電磁波の光子は運動量  $p = h/\lambda$  をもち、古典的電磁波としての光の波長  $\lambda$  は、1個の光子のもつドブロイ（de Broglie）波長とみなすことができる。運動量  $p$  をもつ  $n$  個の光子からなる系の運動量は  $np$  であるとすれば、その系におけるドブロイ波長  $\lambda_n$  は、

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

となり、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)<sup>6)</sup>とよぶ。定性的には、この  $1/n$  に短くなったドブロイ波長を利用して、古典的な光の回折限界を超えた結像を得るアイデアが量子リソグラフィである。

## 2. 光子対の空間相関と回折・干渉

このようなフォトニック・ドブロイ波長を伴う量子回折・干渉を発現するためには、光子群を個々の光子に分割することなしに、一体として回折・干渉させることが必要である。例えば、パラメトリック下方変換により発生した量子もつれ光子対とホン・オウ・マンデル（Hong-Ou-Mandel）の干渉<sup>7)</sup>を利用し、マッハ・ツェンダー（Mach-Zehnder）型干渉計の二光路（A または B）のどちらかを二光子が一緒に通過するような、光路に関する量子もつれ状態

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

をつくりだすことによって、二光子状態のフォトニック・ドブロイ波長を観測することができる<sup>8)</sup>。ここで、 $|2\rangle_A |0\rangle_B$  は二光子が光路 A を、 $|0\rangle_A |2\rangle_B$  は光路 B を通過した状態を表す。これを一般化すると、二光子の間に強い空間的相関（空間に関する量子もつれ）があり、二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も、そのフォトニック・ドブロイ波長に対応する二光子回折・干渉が観測されるものと期待される。他方、パラメトリック下方変換によって生じた光子対には、空間的な強い量子相関があることが知られている<sup>9)</sup>。この空間相関は、シグナルとアイドラーの2つの光子が共通のポンプ光子から同じ場所で発生することに対応し、位相整合条件などによって定

\*科学技術振興機構 CREST, 東北大学電気通信研究所・量子光情報工学研究分野 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

\*\*東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1), 科学技術振興機構 CREST E-mail: eda@riec.tohoku.ac.jp

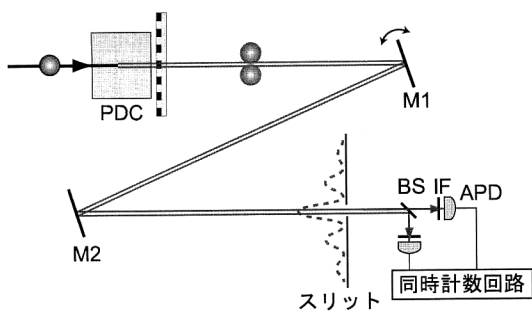


図1 パラメトリック下方変換光を用いた二光子回折・干渉実験の概念図。PDC：パラメトリック下方変換器，M1～2：ミラー，BS：ビームスプリッター，IF：干渉フィルター，APD：光子計数用アバランシフォトダイオード。二光子検出の場合は2つのAPDの出力を同時計数回路を通して計数し，一光子検出の場合は一方のAPDの出力のみを（同時計数回路を通さずに）計数した。

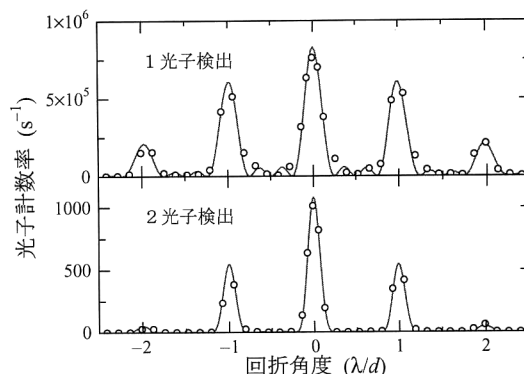


図3 パラメトリック変換光子対と同一中心波長のレーザー光による回折・干渉パターン。上段は一光子検出，下段は二光子検出。

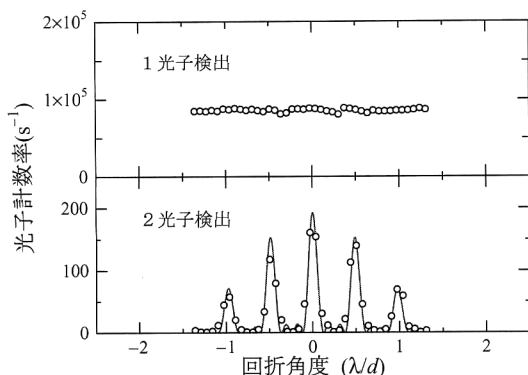


図2 パラメトリック下方変換光子対による回折・干渉パターン。上段は一光子検出，下段は二光子検出による結果を表す。白丸は測定点，実線は二光子間の空間相関を考慮したフーリエ光学解析により再現した回折・干渉パターン。

まるシグナルおよびアイドラー光子の波数差の幅の逆数程度の幅をもつ。したがって，このような光子間の空間相関長よりも大きな物体による回折・干渉には，空間的な量子相関の効果が表れることが期待される。

筆者らは，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二光子回折・干渉実験を行った<sup>10)</sup>。図1にその概要を示す。この実験では，パラメトリック下方変換器(PDC)の後に透過型回折格子(格子間隔  $d = 250 \mu\text{m}$ )を配置し，その回折パターンを十分後方に配置した二光子検出器(2個のアバランシフォトダイオードと同時計数回路で構成)で検出した。図2に，格子間隔がパラメトリック下方変換によって生じた光子対の空間相関長より十分大きい条件下，すなわち回折格子をPDCの直後に配置した場合

の実験結果を示す。図3は，同じ中心波長 ( $\lambda = 860 \text{ nm}$ ) をもつレーザー光の，回折・干渉パターンである。まず，二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，パラメトリック下方変換光では，二光子状態のフォトリック・ドブロイ波長  $\lambda/2 = 430 \text{ nm}$  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。さらに，一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まったく観測されない。これは，空間相関をもった光子対は一光子検出による干渉を示さないことを表しており<sup>\*1)</sup>，光子対の量子もつれの性質が一光子検出の場合にも顕著に現れた例である。

このような，パラメトリック下方変換光子対の示す量子回折・干渉波形は，二光子間の空間相関を考慮したフーリエ光学解析を用いて定量的に議論することができる<sup>10)</sup>。図4に，光子対の空間的相関の広がりをガウス分布と仮定し，その幅 ( $g$ ) と回折格子の格子間隔 ( $d$ ) の比を変化させたときの，一光子および二光子回折・干渉波形のシミュレーション結果を示す。二光子間の空間相関のない古典的な場合(図の下方のグラフ)から，強い相関のある場合(図の上方)に向かって， $g/d$  の値がほぼ1になるあたりで古典的回折・干渉から量子的回折・干渉への移り変わりが起こっていることがわかる。実際に，光子対の空間相関の広がりを格子間隔と同程度にした場合の回折・干渉パターンは，一光子および二光子検出の場合ともに，強い空間相関をもつ光子対(図2)と空間相関のない古典光(図3)の中間的な結果を示すことが観測されている<sup>10)</sup>。

\*1) このことは，例えばヤングの二重スリットあるいはマッハ・ツェンダー干渉計において二光子が必ず同じスリットまたは光路を通る状態に対しては，一光子干渉項(生成，消滅演算子を各1個ずつ含む)が消えることを考えると直観的に理解できる。

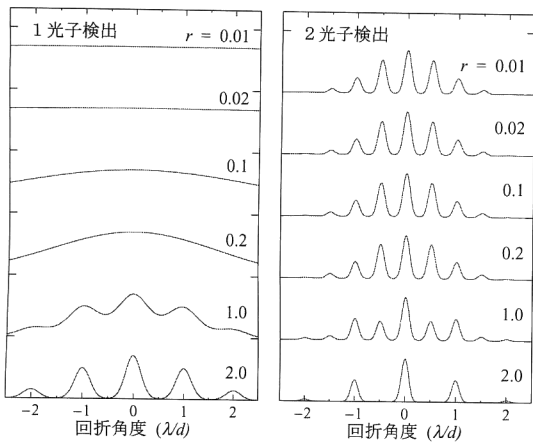


図4 光子対の空間相関をガウス分布と仮定し、その半値全幅( $g$ )と回折格子の間隔( $d$ )の比( $r=g/d$ )を変化させたときの回折・干渉パターンのシミュレーション。左図は一光子検出、右図は二光子検出。おのおのの回折・干渉パターンは、0次のピークで規格化した。

### 3. 量子リソグラフィーへの課題

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量子もつれ光子対は、それらの間の量子的相関に基づく非古典的な回折・干渉現象を示す。特に、古典的波長に比して短縮されたフォトニック・ドブロイ波長を利用して、古典的回折限界を超えた光学的結像を実現する「量子リソグラフィー」は、その魅力的なアプリケーションのひとつである。しかし、その実現には解決すべき多くの課題が残されている。最大の課題のひとつが、一光子線形吸収に比べて二光子非線形吸収が大きいという、これまでにない感光物質の開発である。このような物質に関する研究はまだ始まったばかりではあるが、これまでのところ適当な物質は発見されておらず<sup>3)</sup>、物質科学の面からの今後の研究の進展が期待される。

もうひとつの課題は、多光子または短波長領域での量子もつれ光源の開発である。パラメトリック下方変換によって生じた量子もつれ光子対では、たとえそのフォトニック・ドブロイ波長が古典的波長の2分の1であるとしても、それはポンプ光の古典的波長に等しいにすぎず、ポンプ光による古典的回折限界を超えた光学解像度を得ることはできない\*2。多光子に関する量子もつれ光源の可能性のひとつとして、パラメトリック増幅を利用する方法も考えられるが、この方法では光子数が増えるに従ってその空間的量子もつれが不完全になり、期待される干渉縞のビジビ

リティーが20%程度に低下してしまうことが知られており<sup>11)</sup>、応用上あまり有利な方法とはいえない。また、多光子における光路に関する量子もつれを実現する方法<sup>12-15)</sup>もいくつか提案されているが、条件つき測定に基づくもの<sup>12-14)</sup>あるいは非常に大きい光学非線形物質を必要とするもの<sup>15)</sup>であるなどの難点があり、すぐに量子リソグラフィーへの応用に結びつくものとはいえないのが現状である。

これに対し、パラメトリック下方変換過程を用いることなくポンプ光と同じ波長での量子もつれ光子対を発生する光源が開発されれば、真にポンプ光の古典的回折限界を超える光学解像度が得られることになる。そのひとつに、三次の光学非線形性を用いたハイパーパラメトリック散乱過程を利用する提案<sup>3)</sup>がなされており、その実現が大いに期待されている。筆者らは最近、CuCl結晶における励起分子状態に共鳴したハイパーパラメトリック散乱を利用し、ポンプ光と同じ約390 nmという近紫外領域における量子もつれ光子対の生成にはじめて成功したが、この研究についてはまた機会を改めてご紹介させていただくこととしたい。

大阪大学大学院基礎工学研究科の伊藤正教授には、本稿で紹介した実験に対し多くの協力をいただいた。本研究の一部は総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度」の支援を受けて実施されたものである。

### 文 献

- 1) A. N. Boto, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **85** (2000) 2733-2736.
- 2) P. Kok, *et al.*: Phys. Rev. A, **63** (2001) 063407.
- 3) D. V. Strekalov and J. P. Dowling: J. Mod. Opt., **49** (2002) 519-527.
- 4) G. Björk, *et al.*: Phys. Rev. A, **64** (2001) 013811.
- 5) L. L. Sánchez-Soto, *et al.*: Opt. Spectrosc., **94** (2003) 666-674.
- 6) J. Jacobson, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **74** (1995) 4835-4838.
- 7) C. K. Hong, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **59** (1987) 2044-2047.
- 8) K. Edamatsu, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **89** (2002) 213601.
- 9) M. D'Angelo, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **87** (2001) 013602.
- 10) R. Shimizu, *et al.*: Phys. Rev. A, **67** (2003) 041805(R).
- 11) G. S. Agarwal, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **86** (2001) 1389.
- 12) H. Lee, *et al.*: Phys. Rev. A, **65** (2002) 030101(R).
- 13) P. Kok, *et al.*: Phys. Rev. A, **65** (2002) 052104.
- 14) J. Fiurášek: Phys. Rev. A, **65** (2002) 053818.
- 15) C. C. Gerry, *et al.*: Phys. Rev. A, **65** (2002) 013804.

(2003年12月15日受理)

\*2 とはいえ、例えば窓材の吸収などによって、ポンプ光が直接到達できない場所へ長波長の量子もつれ光子対を到達させ、そこで短波長のポンプ光と同じ解像度を得るなど、限定的な応用の可能性は考えられる。