「パリティ」（丸善）2002 年 3 月号掲載

多光子状態の不思議な干渉
–フォトニック・ド・ブロイ波長と量子リソグラフィ–

枝松 圭一
大阪大学大学院基礎工学研究科物性物理科学分野

量子的相関をもった複数の光子を個々の光子に分けずに光子群として干渉させると，個々の光子とは異なった干渉の振る舞いを示すようになる。このような多光子状態の不思議な干渉は，光子の持つ量子的性質によるものであるが，フォトニック・ド・ブロイ波長という概念で直観的に理解できる。この光の量子的現象は，古典的回折限界を越えた空間分解能での結像技術や微細加工技術に応用されようとしている。

「光」の本質の解明は，古来より多くの物理学者を魅了してやまないテーマであり，幾多の議論と実験的検証が重ねられて来た。その結果，現在では，光が波動性と粒子性とを併せ持つ量子的存在であることが一般に広く認識されている。しかしながら，光の量子（光子）的性質が本質的に際だつような実験や応用技術となると，これまで一般にはあまり知られていなかったように思える [1]。ここでは，古典的な波動光学では理解することのできない多光子（実現されているのは２光子）状態の干渉実験とその物理的解釈について紹介するとともに，その応用としての量子リソグラフィ (quantum lithography) のアイデアについても述べる。

多光子状態とフォトニック・ド・ブロイ波長

「光子」は，電磁波のエネルギー量子である。プランク (Max Planck)[2] やアインシュタイン (Albert Einstein)[3] が指摘したように，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。この意味で，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) 波長とも見なせる。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，

$$\lambda_n = \frac{h}{np} = \frac{\lambda}{n} \tag{1}$$

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)」[4] と呼ぶ [5]。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，応用上も大きな興味がもたれている。

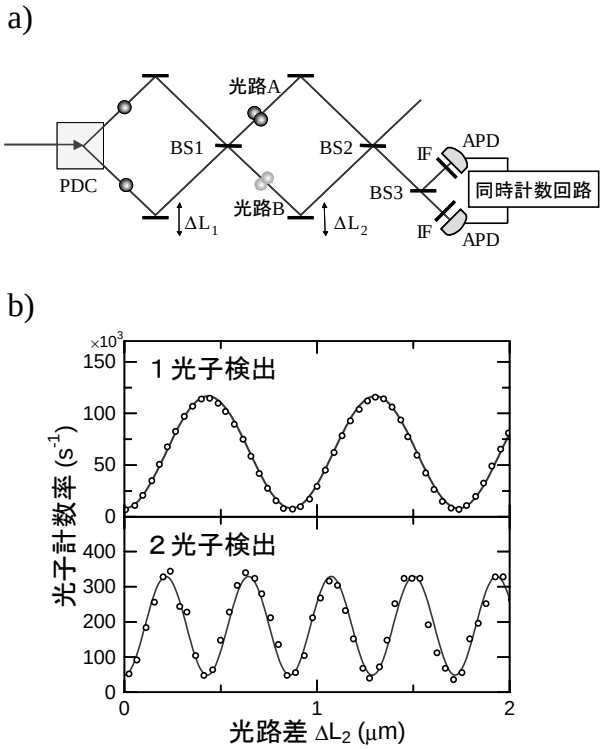

FIG. 1: マッハ・ツェンダー干渉計を用いた２光子干渉実験。(a) ２光子干渉実験装置の概念図。PDC:パラメトリック下方変換器（$KNbO_3$ 結晶），BS1∼3:ビームスプリッタ，IF:干渉フィルタ，APD:アバランシェフォトダイオード。(b) ２光子干渉の実験結果。横軸は干渉計の光路差で，縦軸は１光子検出（上段）および２光子検出（下段）における光子計数率を表す。

２光子干渉の実験

このようなフォトニック・ド・ブロイ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。それを回避するための特殊なビームスプリッタを構築する提案も行われている [4] が，２光子状態に限れば，通常のビームスプリッタを用いたうまい方法が存在する。

図１ (a) 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 [6]。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が通常とは異なる。量子相関をもった２光子状態は，非線形光学結晶を用いたパラメトリック下方変換 (parametric down-conversion) によって発生させる。その２光子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。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つに別れることはない。これは，２つの光子がボース粒子 (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 [7] 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の状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|2\rangle_{\mathrm{A}}|0\rangle_{\mathrm{B}} + |0\rangle_{\mathrm{A}}|2\rangle_{\mathrm{B}}\right) \tag{2}$$

を作り出すことができる。ここで，$|2\rangle_{\mathrm{A}}|0\rangle_{\mathrm{B}}$ は２光子が光路 A を，$|0\rangle_{\mathrm{A}}|2\rangle_{\mathrm{B}}$ 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」[8] 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。

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１ (b) に，測定結果の一例として，干渉計の光路差が 0μm 付近の時の１光子検出（上段）[9] 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 λ=860nm 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 430nm 周期の干渉が観測される。すなわち，２光子状態のフォトニック・ド・ブロイ波長 $\lambda/2$ 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 100μm 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。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 430nm 周期の干渉が明瞭に観測される。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。すなわち，２光子干渉のコヒーレンス長はポンプ光子のそれ [10] によって決まり，１光子単独の場合よりも長いコヒーレンス長が得られるのである。

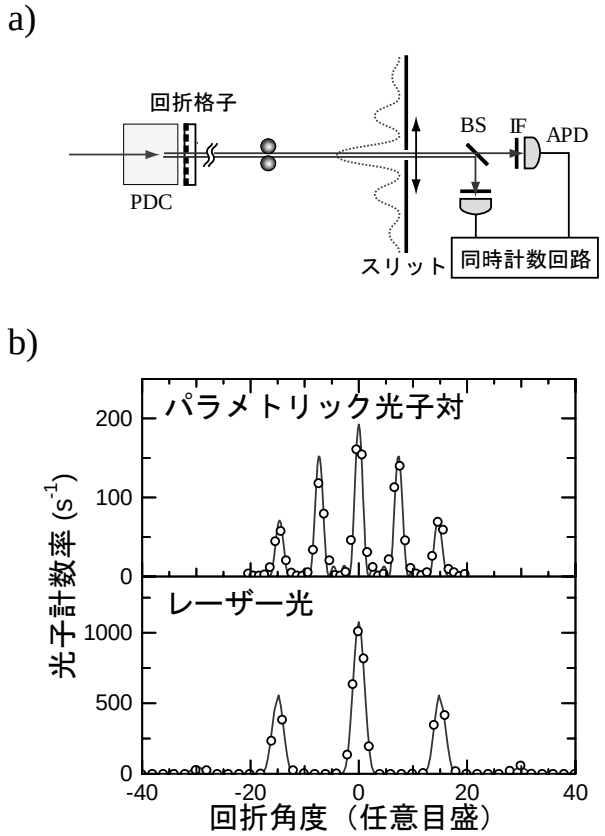

FIG. 2: 量子リソグラフィの原理検証実験。(a) パラメトリック下方変換光子対と回折格子による量子リソグラフィの検証実験の概念図。略号の意味は図１ (a) と同じ。(b) パラメトリック光子対（上段：中心波長 860nm）およびレーザー光（下段：波長 860nm）における，２光子検出による回折パターンの測定結果。

量子リソグラフィ

リソグラフィ(lithography) とは直訳すれば石版印刷のことで，今日の科学技術分野では光または電子線を用いた半導体の微細加工技術を指す。光を用いた従来のリソグラフィでは，光の回折による空間分解能の限界のため，光の波長程度以下の微細加工を実現することは困難であった。しかし最近，上述した多光子状態のフォトニック・ド・ブロイ波長を利用することで，従来の古典的回折限界を超えた微細加工を実現するアイデア，すなわち量子リソグラフィの提案・検証がなされた [11, 12]。図２に，回折格子を用いた量子リソグラフィの原理検証実験の概要と結果を示す [13]。図２ (a) 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（図１ (a) と同様な装置で構成）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２ (b) にその結果を示す。上段はパラメトリック下方変換によって発生した光子対，下段は同じ中心波長 (λ=860nm) を

もつレーザー光の２光子回折パターンである。両者を比較すると，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２光子状態のフォトニック・ド・ブロイ波長 $\lambda/2$=430nm に対応した回折パターンが観測されるのである。このことは，空間分解能を古典的回折限界の２倍に向上させることが可能であることを示しており，量子リソグラフィの原理が検証されたことになる [14]。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。前述したように，光子群のフォトニック・ド・ブロイ波長を測定するためには，光子群が別々の光路に分かれることなしに干渉することが必要なのである。

最後に，フォトニック・ド・ブロイ波長の概念と光の量子論的描像との関係に触れておく。上述した結果はすべて，光の量子論的取扱いによって厳密に説明される現象である。フォトニック・ド・ブロイ波長の概念は，光の量子論的取扱いと矛盾するものではないが，それ以上の新しい物理を提示するものでもない。にもかかわらず，フォトニック・ド・ブロイ波長の概念が有用なのは，上述したような多光子状態の回折・干渉現象を直観的に理解するのに役立つからに他ならない。このような物理現象の直観的理解が，革新的アイデアの創出に重要な役割を果たすことも多いのではないだろうか。

本稿で紹介した実験結果は，大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程の清水亮介君の努力によるところが大きい。また，伊藤正教授には多くの有益な議論をしていただいた。なお，実験の一部は総務省公募研究「量子情報通信技術の研究開発」の支援を受けて実施されたものである。

---

[1] 近年発展が著しい量子情報・量子通信の分野では，光の量子性が本質的な役割を果たす多くの研究が爆発的な勢いで進行している。
[2] M. Planck, Ann. d. Physik **4**, 553 (1901).
[3] A. Einstein, Ann. d. Physik **17**, 132 (1905).
[4] J. Jacobson, G. Björk, I. Chuang, and Y. Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **74**, 4835 (1995).
[5] 質量をもつ系での通常のド・ブロイ波長と区別するため，「フォトニック」という語を付加している。
[6] K. Edamatsu, R. Shimizu, and T. Itoh, quant-ph/0109005 (2001).
[7] C.K. Hong, Z.Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987).
[8] BS3 の片方の出射ポートに２光子が一緒に出力されたときは同時計数されないので，APD の光子計数効率が 1 であっても，この２光子検出器の効率は 1/2 である。
[9] BS1 の片方の入力ポートへの光子の入射を遮り，片方の APD の出力のみを計数したもの。
[10] 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長の長い単一周波数レーザーを用いている。
[11] A.N. Boto, P. Kok, D.S. Abrams, S.L. Braunstein, C.P. Williams, and J.P. Dowing, Phys. Rev. Lett. **85**, 2733 (2000).
[12] M. D'Angelo, M.V. Chekhova, and Y. Shih, Phys. Rev. Lett. **87**, 013602 (2001).
[13] R. Shimizu, K. Edamatsu, and T. Itoh, 投稿準備中.
[14] この技術を実用化するためには，２光子あるいは多光子状態に対して大きな光化学変化または光物理変化の感度を有する感光物質の開発が必要である。