

# 光子を用いた量子計測とその展望

竹内 繁樹

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 (〒615-8510 京都市西京区京都大学桂)

## Prospects of quantum metrology using photons

Shigeki TAKEUCHI

Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

Kyotodaigakukatsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8510

Quantum information science has been attracting significant attention recently. It harnesses the intrinsic nature of quantum mechanics such as quantum superposition, the uncertainty principle, and quantum entanglement to realize novel functions. Recently, quantum metrology is emerging as another appealing application of quantum information science. In this talk, we will report our recent progresses on the development of novel quantum entangled-photon sources and application to quantum measurements.

**Key Words:** Photon, Quantum metrology, Quantum sensing, Entanglement, Optical Coherent Tomography

### 1. はじめに

量子重ね合わせ状態や、不確定性原理、量子もつれ(Quantum Entanglement)といった、量子力学の本質的な性質を利用した新たな機能の実現をめざす、量子情報科学が近年急速に進展している。その応用の一つとして、量子計測が最近注目されている。広範に利用される光計測との関連から非常に重要である「光子を用いた量子計測」においては、光子間の量子もつれが重要な役割を担う。本公演では、光子を用いた量子計測について、「量子もつれ顕微鏡」、および量子光を利用した光コヒーレントトモグラフィ(OCT)に関する最近の研究成果を紹介する<sup>1)</sup>。

### 2. 量子もつれ光子対とは

通常の(古典的な)物体は、ある瞬間には一つの状態で存在している。一方、電子や光子などの量子力学的な粒子は、ある瞬間に複数の状態の「重ね合わせ状態」として存在することができる。量子もつれ状態とは、複数の粒子が相関をもった状態の重ね合わせ状態を言う。1990年代に入り、量子暗号通信や量子コンピュータなどの研究が立ち上がりとともに、量子もつれ状態は、それまでの哲学的な論考のツールだけでなく、古典力学の限界を超えた機能を実現するためのリソースとして注目されるようになった。光子に限っても、さきほど例で挙げた光の経路(モード)の他、偏光や光子数、周波数(波長)など、さまざまな状態に関する量子もつれ状態が実現されている<sup>2)</sup>。

### 3. 干渉計と量子もつれ光子対

光学干渉を利用した光の位相測定は、距離や物質の密度を精密に計測する手段として広く用いられている。しかし、レーザー光などの、通常の光(量子光学分野では、「古典光」と呼ぶ)を光源に用いる場合、光の粒子的な性質に起因するノ

イズ(ショットノイズ)と、信号の大きさが等しくなるところが限界になる。ノイズの大きさは、プローブ光に含まれる光子数  $n$  に対して  $\sqrt{n}$  で与えられるため、検出可能な位相差  $\Delta\phi=1/\sqrt{n}$  が限界(標準量子限界)になる。これに対して、 $N$  光子がもつれ状態を用いる場合の検出限界の位相差  $\Delta\phi$  は、もつれ状態にある  $N$  光子を  $k$  組用いた場合、 $\Delta\phi=1/(N\sqrt{k})$  と与えられ、総光子数を等しくして比較した場合、標準量子限界を、 $\sqrt{N}$  倍向上できる<sup>3)</sup>。言い換えれば、 $1/N$  の光量で、同じ精度が得られる事になる。このように標準量子限界を超えた位相測定感度は、「位相超感度(Phase super sensitivity)」と呼ばれる。位相超感度は、古典と量子を分ける重要な指標ともなっている。

### 4. 量子もつれ顕微鏡

「量子もつれ顕微鏡」とは、量子もつれ光を光源として利用した顕微鏡である。我々は最近、経路もつれ状態にある光子対を用いた微分干渉顕微鏡である「量子もつれ顕微鏡」を提案、実現し、その信号雑音比が、古典光を光源とした微分干渉

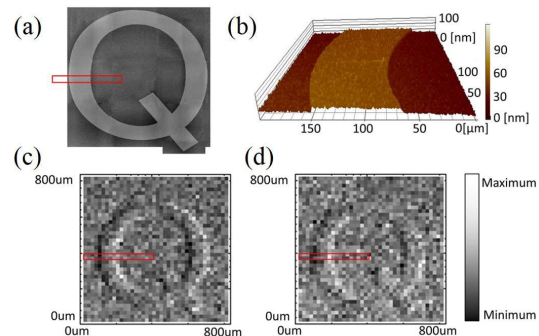


図1 量子もつれ顕微鏡の実験結果<sup>4)</sup>。(a),(b) 検証に用いたガラスサンプルの原子間力顕微鏡像。(c) もつれ光を用いた場合の画像 (d) 古典光(1光子干渉)により得た画像。

顕微鏡を超えることを実証した<sup>4)</sup>。

実験では、我々は2光子 NOON 状態 (N=2) を参照光として用いた。サンプルには、光リソグラフィを用いて作成した、厚さ 17nm で Q という文字を浮き彫りにしたガラス板を用いた(図 1(a)、(b))。図 1(c)と(d)は、それぞれ、量子もつれ光と、単一光子列を参照光として用いて得た2次元走査像である。両者とも、参照光強度としては、ピクセルあたり 920 光子でそろえている。つまり、図 1(c)では、460 対の 2 光子 NOON 状態を、図 1(d)では 920 個の単一光子を用いている。Q 字の浮き彫りの段差は、図 1(c)でははっきりしているのに対し、図 1(d)ではぼやけている。より詳細な解析から、図 1(c)の信号雑音比は図 1(d)より 1.35 倍高く、この値は、2 光子干渉の明瞭度等を考慮した理論予測と一致している。

## 5. 量子光コヒーレンストモグラフィ

次に、量子光の OCT への適用について紹介する。OCT は、広帯域光の低コヒーレンス干渉を用いて、媒質の深さ方向の情報を得画像化する技術である<sup>5)</sup>。図 2(a)のように、マイケルソン干渉計の一方の経路にサンプルを設置し、他方の経路の鏡の位置を掃引すると、サンプル中での反射面からの戻り光と、光路長が一致した部分でのみ干渉信号が得られる。この信号をもとに、サンプルの内部構造を画像化することができる。眼底検査ではすでに不可欠な技術として広く用いられている。しかし、その OCT の深さ方向分解能を制限する要因として、群速度分散が問題となる。分解能を向上するために光源を広帯域化するほど、群速度分散により干渉信号が広がってしまうというジレンマが存在する。

その壁を打破する方法の一つとして、周波数もつれ状態にある光子対を光源とし、それらの 2 光子量子干渉を用いる「光量子コヒーレンストモグラフィ(QOCT)」がある<sup>6,7)</sup>。図 2(b) にあるように、

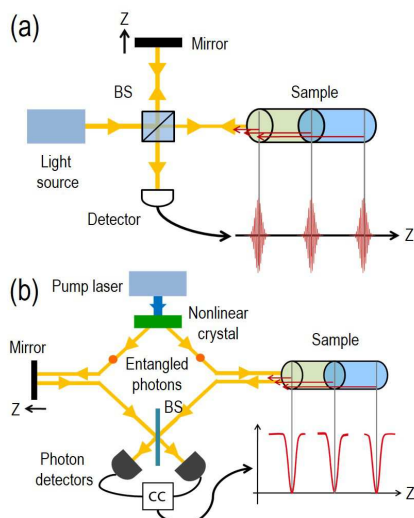


図 4 (a) OCT 概念図 (b) QOCT 概念図<sup>7)</sup>。

OCT 低いコヒーレンス光源の部分が、ポンプレーザーと非線形光学結晶によって構成されるもつれ光子源になっている。その光子対の一方をサンプルに照射し、もう一方の光子の経路長を変化させながら、半透鏡(BS)に入射する。半透鏡にそれら 2 つの光子が同時に到達した場合、2 光子量子干渉の結果、光子は必ず 2 つそろって半透鏡から出力され、この時、半透鏡のそれぞれの出力に設置した光子検出器の間では、同時計数は生じない。一方、2 つの光子の半透鏡への到達時刻が異なる場合には、1/2 の確率で同時計数が生じる。このため、参照光子用のミラーの位置に対して同時計数率をプロットすると、サンプル中の内部構造に応じて、図 2(b)に示すように同時計数率にディップが表れる。このように、OCT と同様に、サンプルの内部構造を画像化することができる。このとき、周波数もつれの為に、2 光子量子干渉縞(ディップ)の幅は、偶数次の群速度分散の影響を受けないという大きな特長がある。最近我々は、0.54  $\mu\text{m}$  という高分解能領域での QOCT の群速度分散耐性の実証に成功している<sup>8)</sup>。

## 謝 辞

これらの研究は、大阪大学田中秀和教授、榊原昇一様、物質・材料研究機構栗村直主任研究員グループ、名古屋大学西澤典彦教授、南京大学 Peiheng Wu 教授グループ、浜松ホトニクス廣畑様をはじめとする共同研究者のご協力のもと、研究室の岡本亮准教授、小野貴史博士研究員(当時、現在 Univ. Bristol)、岡野真之博士研究員(当時、現在 UC Berkeley) はじめ、スタッフ、学生各位と行った研究です。この場をお借りして感謝申し上げます。

またこれらの研究に対する、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CREST JPMJCR1674)を初め、日本学術振興会科学研究費補助金(26220712, 21102007)、内閣府最先端研究開発支援プログラム、科学技術振興調整費のご支援に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 竹内繁樹: 日本物理学会誌 **69** (2014) 853.
- 2) S. Takeuchi, Jpn. J. Appl. Phys. **53** (2014) 030101.
- 3) T. Nagata, R. Okamoto, J. L. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi: Science **316** (2007) 726.
- 4) T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi: Nature Communications **4** (2013) 2426.
- 5) D. Huang, et. al.: Science **254** (1991) 1178.
- 6) A. F. Abouraddy, et. al.: Phys. Rev. A **65** (2002) 053817.
- 7) M. Okano, et. al., Phys. Rev. A **88** (2013) 043845.
- 8) M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura and S. Takeuchi: Sci. Rep. **5** (2015) 18042.