

# 光子を自在に操り、コンピュータや計測の限界を超える

京都大学 大学院工学研究科 竹内 繁樹

## 1. はじめに

皆さんもご存じのように、自然界のすべての物質は、限られた種類の原子から構成されています。その原子も、原子核とその周りを取りまく電子から出来ています。同様に、光も光子と呼ばれる単位が基本であることが分かっています。この光子を自在に操ることで、コンピュータや計測の限界を超えようとする私たちのこれまでの取り組みである「光子を用いた量子情報通信処理・量子計測の先駆的研究」に対し、この度、大阪科学賞を授与いただくことができました。この研究の背景や今後の展望について、できるだけ分かりやすく解説します。

## 2. 光子とは何か

いまから 200 年ほど前の 19 世紀に、ファラデーをはじめとする偉大な科学者により、電気や磁気に関する様々な性質が明らかにされます [1]。それを電磁気学として体系的まとめ、確立したのがマクスウェルでした。彼は、電場と磁場が互いに影響し、波として伝搬することを予言、1888 年にヘルツにより実証されます。またその速度が光速と一致することから、光も電磁波の一種であるとされていました。しかし、光を金属に照射した際に電子が放出する現象(光電効果)について、合理的な説明が出来ていませんでした。

ここで、登場するのがアインシュタインです。アインシュタインは、光が、エネルギーの基本的な単位である光量子(light quanta)から構成されているという仮説により、光電効果などの現象を説明することに成功しました。現在では、光子を一つずつ発生する単一光子源や、光子検出器が研究、開発されています。

## 3. 光子の不思議な性質

いま、2つのスリットに、光子を一つずつ入射し、後ろのスクリーンでその光子の検出位置を記録します(図1)。最初は、スクリーン上のデタラメな位置で検出されるように見えるのですが、光子の数が増えるにつれ、その光子の分布に明確な縞模様が現れてきます。これは、左側のスリットと右側のスリットを通過した2つの波による干渉によって現れる現象です。しかし、光子は確かに一つずつしか入射していません。光子が、私たちが普段目にするボールのよう

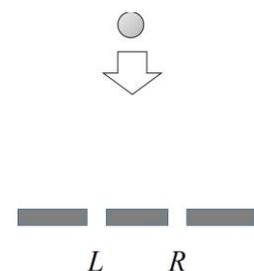


図1 2重スリットに入射された光子

な「粒子」(古典的粒子と呼びます)として振る舞うのであれば、図 1 の L か R のスリットのどちらか一つを通過し、干渉効果は見られないはずで

す。この不思議な振る舞いを説明するための理論が、量子力学です[2]。光子は、左側のスリットを通過した状態(L)と、右側のスリットを通過した状態(R)の「重ね合わせ」状態となり、その2つの状態間の干渉により、スクリーン上で観測される「確率」が変化すると考えます。

実は、このような不思議な振る舞いをするのは、光子に限りません。電子や、原子も、2重スリットに入射すると、同様に干渉縞を作ることが分かっています。近年では、もっと大きな分子、たとえば分子量が 720 にも達する、 $C_{60}$  フラーレンでも干渉縞が確認されています。現在では、量子力学こそが自然を支配している法則だと考えられています。

#### 4. 重ね合わせ状態を操る、量子コンピュータ

現在のコンピュータは、0または1の何れかの値をとる「ビット」を基本単位として計算をすすめます。パソコンの内部では、電圧が 0V の状態を「0」、5V の状態を「1」です。この、0と1のどちらかの状態しか取れないという状況は、さきほど述べた、古典的粒子が、2つのスリットのどちらかしか通過できない、という状況と同じです。

1985 年にドイツは、重ね合わせ状態をとれる「量子ビット」を基本単位とするコンピュータ、量子コンピュータを提案します。その後、1992 年に、ショアとともに、ある特殊な問題を、通常のコンピュータよりも少ないステップ数で解決できることを示しました。さらに、1994 年にショアは、巨大な数の因数分解を、量子コンピュータは高速でとけることを数学的に証明しました。

なぜ量子コンピュータが、通常のコンピュータよりも早く(少ないステップ数で)計算ができるのでしょうか。さきほどの2重スリットの実験で、光子1つの場合は、L または R の2つの状態の重ね合わせでした。いま、2つの光子を入射した場合、それら「2つの光子」は、両方 L、最初の光子が L で次の光子が R、その逆、両方 R の 4 つの状態の重ね合わせになります。同様に、 $n$  個の光子を入射した場合、その状態は  $2^n$  個の状態の重ね合わせになります。たとえば、たった 100 個の光子でも、10 の 30 乗という莫大な状態の重ね合わせになります。比較的小数個の量子ビットに対する演算で、莫大な状態空間を利用した並列処理が可能になるのが、量子コンピュータの秘密です。より詳しい仕組みについては、参考文献 [2] 等を参照してください。

#### 5. 光子を用いた量子回路、量子コンピュータ

私の研究は、1992 年にドイツがショアと発表した、「量子アルゴリズム」を実際に実現したいという思いから始まりました。当時は、量子コンピュータ実現の話をする、「見ているだけ

で重ね合わせ状態が破壊され、動かないのではないか」という意見をいただくような状況でした。

先程述べたように、電子や原子など、量子ビットの候補はさまざまにあります。その中でも光子に着目したのは、量子状態を長距離伝送が可能であることや、一つ一つの光子の状態制御や検出が可能になりつつあったためです。当時の所属であった三菱電

機(尼崎市)、ならびに科学技術振興機構(当時は新技術事業団)のさきがけ研究のご支援をいただき、1998年、量子コンピュータのアルゴリズムを実証することに成功しました。たった4ビットの問題に対してですが、単一量子を用いた実験としては当時世界で初めてのものでした。この実験では、1つの光子を、多数の経路や偏光の重ね合わせ状態にすることでアルゴリズムを実現しました。しかし、将来より多くの量子ビットでの実現を行うには、光子一つの状態を別の光子の状態を変化させる、「光子間スイッチ」を実現する必要があります。

私たちは、2つの光子を半透鏡に入射した際に生じる「2光子量子干渉」という現象に着目しました。半透鏡とは、光を半分反射し、半分透過する特殊な鏡です。半透鏡に2つの光子が別々の面から入射した場合を考えます。古典的な粒子であれば、図2に示したような、4つの状況が出現するはずですが、光子の場合、「両方の光子が反射した状態」と、「両方の光子が透過した状態」が打ち消し合うような干渉を起こし、2つの光子が別々の面から出力されることがないのです。私たちのグループは、この現象を、半透鏡の透過率(反射率)を調整して、光子間のスイッチに応用する提案と実証をおこないました。

光子間のスイッチができれば、次の課題はそのスイッチを組み合わせて「回路」を作ることです。私たちは、入力された2つの光子の偏光が、両方とも垂直偏光(H)もしくは水平偏光(V)の場合だけを、その2つの状態の重ね合わせを壊さずに抜き出す、「量子もつれフィルター」を実現しました。量子もつれ合いとは、2つ以上の粒

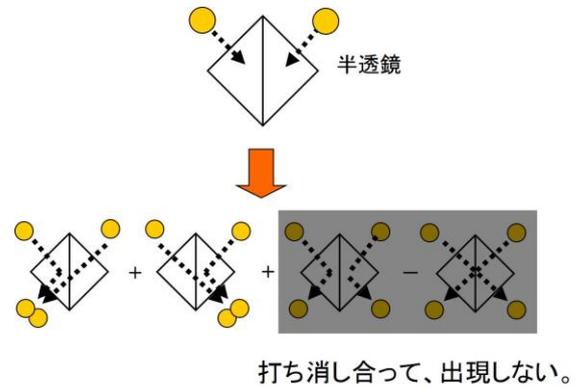


図2 2光子量子干渉

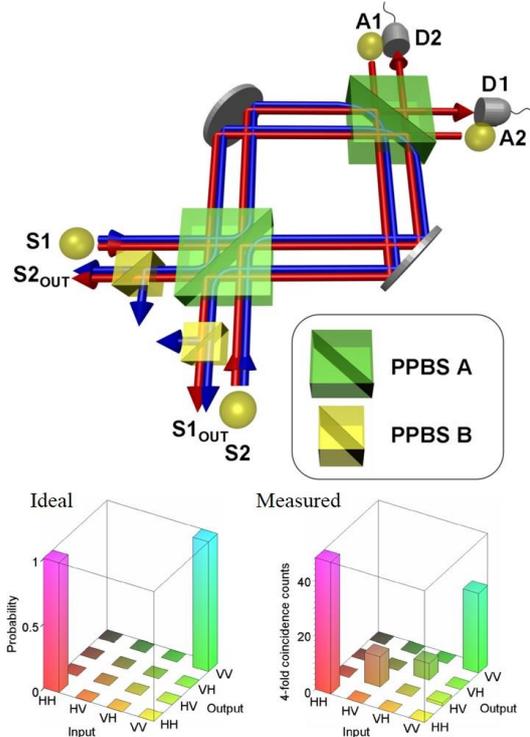


図3 光量子回路 量子もつれフィルター  
Science, 323, 483 (2009).

子について、相関した状態(一方が H なら他方が H など)の複数について重ね合わせにある状態を言い、量子コンピュータや量子暗号で大変有用なことが分かっています。

## 6. 量子もつれを用いた計測

このような、光子の量子状態を自在に操る技術の展開は、量子コンピュータだけに留まりません。最近私たちは、量子もつれ状態にある光子対を光源とする微分干渉顕微鏡、「量子もつれ顕微鏡」を世界で初めて提案・実現することに成功しました(図4)。通常のレーザー光を用いた場合よりも、同じ光量で、より高い精度や深さ方向分解能をもつことを実証しています。

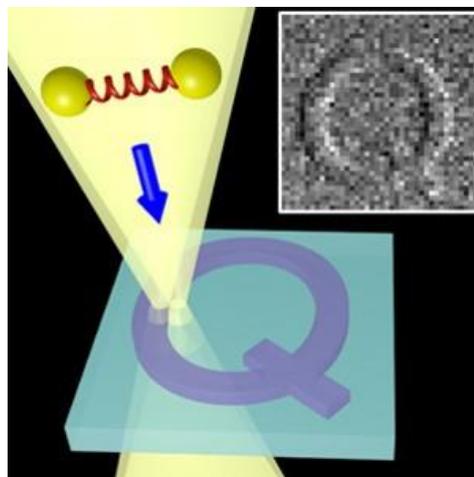


図4 量子もつれ顕微鏡のイメージ  
Nature Comm. 4, 2426 (2013).

## 7. 「量子の時代」の研究者への誘い

このように私たちは、一つ一つの光子を制御するだけでなく、複数の光子の量子状態を自由に制御し、またそれを計算や計測に応用する研究を進めてきました。現在も、より多くの光子、エネルギーなど光子の様々な物理量について、自在に制御し、コンピュータや計測などへと応用するための研究を私たちは推進しています。

光子だけでなく、電子や人工原子など、様々な「量子」について、その状態を自在に制御する研究が進められ、それらの間で状態を変換する「量子トランスデューサー」の研究が大変ホットになっています。皆さんが活躍する、10年後、20年後には、自然の真の姿である「量子状態」の制御と応用は、より深く、より広がっていることは間違いありません。一方で、これらの研究は、量子力学に基づく世界、私たちの生きている世界の本質という、非常に基礎的で根源的な問題とも密接に関連しています(量子力学の多世界解釈など)。

今日の講演で、少しでも量子情報科学という楽しい分野に興味をもっていただければ、大変光栄です。ぜひ、この分野に挑戦し、自らの手で未知の景色を切り拓いてみませんか。

最後にこの場をお借りして、全ての共同研究者の先生方、スタッフ、学生の皆様に心より感謝とお礼を申し上げます。また、三菱電機、北海道大学、大阪大学、京都大学、科学技術振興機構、日本学術振興会、総務省他、関係機関各位のご支援にも心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 藤宗 寛治著: 電気にかけた生涯: ギルバートからマクスウェルまで ちくま学芸文庫(2014).
- [2] 竹内 繁樹著: 量子コンピュータ 超並列計算のからくり 講談社ブルーバックス(2005).

# 用語集（竹内繁樹氏）

## 光子

光のエネルギーの最小単位で、素粒子の1つ。1ワットの光（可視光）は、毎秒約 $10^{19}$ の光子から出来ています。

## 量子情報通信処理

量子の性質を利用することで、従来の光や電気信号を用いた方法の限界や機能を超えた情報通信や情報処理です。後述する量子コンピュータのほか、物理学の原理にもとづき盗聴を防ぐ量子暗号通信、従来の容量限界を超える量子通信などが提案されています。

## 量子計測

量子の性質を利用する事で、従来法の限界や機能を超えた感度や機能をもつ計測方法です。たとえば、従来のレーザー光を用いた場合、光干渉計による位相の測定精度は、その光に含まれる光子数（＝光強度） $n$ に対して $1/\sqrt{n}$ が限界であり、標準量子限界と呼ばれ、従来はこれが物理学的な限界と考えられていました。しかし、量子もつれ合い（後述）にある光子を用いると、この限界を超えられることが分かってきました。

## 量子コンピュータ

量子力学的な重ね合わせの原理を利用して、莫大な数の並列演算を実施する、まったく新しい原理に基づく計算機です。因数分解など、既存のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて全く解けない問題を解くことができるとして、注目されています。

## 光量子回路

古典的な情報処理では、0または1の値をとる「ビット」に対して、「ゲート」と呼ばれる素子を組み合わせた「回路」により処理を行います。一方、量子情報処理では、0と1の重ね合わせ状態をとる「量子ビット」に対して、「量子ゲート」操作を行う素子を組み合わせた「光量子回路」が用いられます。

## 量子もつれあい

量子もつれあい（Quantum Entanglement）とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが（量子において複数の状態が同時に成立する）量子重ね合わせ状態にあることを言います。例えば2光子もつれ合い状態とは、「干渉計の一方の経路に2光子状態が存在し、他方の経路には光子がない」という状態と、「干渉計の一方の経路には光子がなく、他方の経路に2光子状態が存在する」という、全く異なる2つの状態の量子重ね合わせ状態です。