

# 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 氏



## はじめに

今回は、「光子」を自在に操って成した研究に対して大阪科学賞を授与いただきました。その「光子」についてご紹介する前に、まず「光」についてお話します。光は古代から人々の関心をよぶ大切なものでした。たとえば、聖書でも、天地創造の後、神はまず「光あれ…」と言われたと記述されています。古代ギリシャ時代には、「ものが見える」というのは、目に光が入ってくるのではなく、目から見えない触手のような光線（火）が発せられているのだと考えられていたようです。中世になりますと、イブン・アル＝ハイサムというイスラムの科学者により、視覚は、光が目で受信されることで生じることが解明されました。彼は、光の屈折や目の仕組みなども解明、『光学の書』を著すなど、傑出した科学者でした。ちなみに、今年ハイサムの光の研究から1000年、アインシュタインの相対性原理から100年の節目であるところからユネスコは「国際光年」と宣言しています。

## 光子とは何か

時代が下り、300年ほど前になると、「光は波」（ホイヘンス）、「光は粒子」（ニュートン）といった考えが提案されました。この2つの説は、2重スリット（図1）を用いた実験で検証が可能です。もし光が粒子であれば、スリットを抜けたところだけが明るくなるはずですし、光が波であれば、干渉によって縞状の明暗が生じるはずですが、1803年に、ヤングは有名な2重スリット実験により、干渉縞を確認しました。さらに1864年にマックスウェルは電磁気学を体系的に確立、光は電磁波の一種であることを理論的に明らかにしました。「光は波」と、誰もが決定的に信じて疑わない状況でした。

そのような状況の中で、「本当に光は波？」と疑問を提出したのが、アインシュタインです。彼は1905年に「光は波の性質をもったエネルギー

の基本単位である光量子（light quanta）の集まり」という仮説を唱え、これによって、当時説明が困難であった、「光電効果」（光を金属に入射した際に電子が飛び出す現象）を説明することに成功しました。その後、この光量子は、コンプトンによって実証されました。

アインシュタインが光量子を提唱した当時は、物質が原子から出来ていることにも懐疑的な議論がなされていましたが、いまでは原子一つ一つの操作ができるようになってきました。同様に、当時は仮説にすぎなかった「光子」も、このあと紹介するように、その一つ一つの操作ができるようになりつつあります。

## 光子の不思議な性質

先程述べたように、ヤングは、図1の2重スリットに光を入射して、干渉縞を観測しました。では、もし「光子」を一つずつ入射したらどうなるでしょうか。浜松ホトニクスが実施した、2重スリットの後方に、光子の到達位置を記録できるようなスクリーンを置いておこなった実験を紹介いたします。すると、光子の数が少ないうちは、スクリーン上でたらいめな位置で、光子は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、その点のパターンが次第に縞模様を形作り、光子の数が増えるほど明瞭になります。この「干渉縞」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。もし、私たちが普段目にするボールのような「粒子」（古典的粒子と呼びます）として光子が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方を通過し、その結果、干渉効果は見られないはずですが、

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。日常的には考えられないことですが、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)」を同時にとり、「重ね合わせ」状態となり、その2つの状態間の干渉の結果として、スクリーン上の到達位置がきまると考えるのです。その一つ一つの結果が集積し、観測されるのが縞模様というわけです。

実は、このような不思議な振る舞いをするのは、

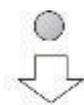


図1 2重スリットに入射された光子

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、同様に干渉縞をつく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<sub>60</sub> フラーレンでも干渉縞が確認されました。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。

### 重ね合わせ状態を操る、量子コンピュータ

ここで、私が「光子を用いた量子情報処理」の研究を開始したきっかけをご紹介します。1993年に京大大学院を修了後、三菱電機に入社しました。そこで出会ったのが、量子コンピュータという新しい概念でした。通常のコンピュータは、0または1のいずれかの値をとる「ビット」を基本として計算をおこないます。一方、量子コンピュータは、さきほど説明した、量子力学的な重ね合わせ状態をとる「量子ビット」を基本単位とするコンピュータで、1985年にドイツにより提案されます。その後、1992年に、ドイツは数学者のジョサとともに、ある特殊な問題を、通常のコンピュータよりも圧倒的に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解けることを数学的に証明しました。これにより量子コンピュータの研究が盛んに行われたのです。私は幸いなことに、ちょうどこの大きな変革期に、量子コンピュータと出会うことができました。

因数分解を少し説明します。323 = 17 × 19 は小中学生でも簡単に因数分解できますが、対象とする数字の桁数が増えると、計算は著しく困難になります。200桁の十進数だと、スーパーコンピュータで10年、1万桁なら1000億年かかります。詳しくは述べませんが、インターネットで用いられている「公開鍵暗号」は、桁数の大きな数の因数分解の困難さを利用しています。ところが量子コンピュータがもし実現すれば、200桁の数の因数分解は数分、1万桁は数時間で可能になると考えられています。

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(図2)、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<sup>n</sup>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で計算が可能になるのが、量子コンピュータの秘密です。

### 光子を用いた量子回路、量子コンピュータ

私の研究は、1992年にドイツがジョサと発

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。重ね合わせ状態は、観測により壊れてしまうことが知られています。そのため、当時は、量子コンピュータの話をする、物理の専門家からも「(量子コンピュータを) 見ているだけで、重ね合わせ状態がこわれて止まるのでは？」という意見をいただくような状況でした(注:後に私のおこなった実証実験からも明らかのように、量子コンピュータの内部での量子ビットが実際に0か1かを観測すると壊れますが、単に外から眺めているだけでは、壊れません)。そこで、私は机上の空論でなく実際にやって見せたかったのです。

当時、所属していた三菱電機(尼崎市)、および科学技術振興機構(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ことでした。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ドイツとジョサが提案した量子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

一つの状態別の光子の状態に変化させる「光子間スイッチ」を実現する必要があります。その実現に際して、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、ところが光子の場合、「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理論家のホフマン博士と一緒に、また反射率が偏光成分ごとに異なる半透鏡「部分偏光ビームスプリッター」を用いて2005年に実現に成功しました。

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機能をもった「回路」をつくることです。ちょうど、トランジスタが実現された後、それらを組み合わせて機能をもった「ラジオ」が作られたように、光子スイッチ素子を組み合

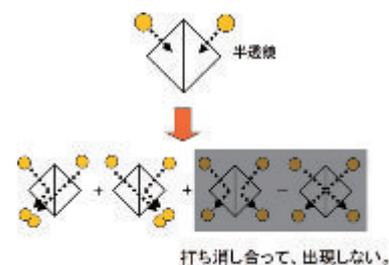


図2 2光子量子干渉

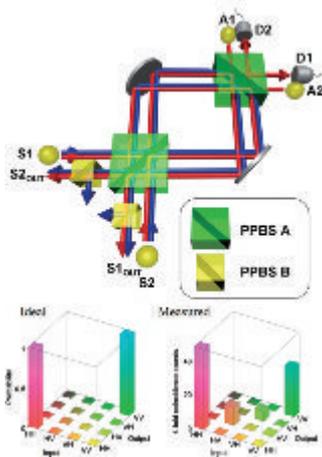


図3 量子回路  
量子もつれフィルター  
Science,323,483(2009).

わせた量子回路を作ろうと考えたのです。

図3は、私たちの実現した、世界最大級の量子回路「量子もつれフィルター」です。この量子回路は、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します。時間の関係で詳しく述べられませんが、量子もつれ合

とは、2つ以上の粒子の相関（一方がHなら他方がVなど）の複数のケースについての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。

### 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「光」を用いた場合、光子がデタラメに存在することに起因する本質的なノイズ(ショットノイズ)が存在します。一方、量子もつれ光は光子が対で存在するため、ノイズを押さえられます。私たちは、2つの光子がもつれあった状態を光源として利用し、通常の光を光源とした場合とくらべて、SN(信号とノイズ)比が1.35倍と改善されることを示しました(図4)。今後、より大きな光子数のもつれ状態等により、さらなるSN比向上が期待できます。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。

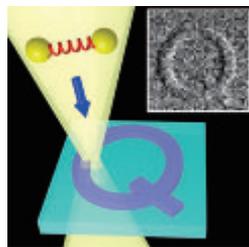


図4 量子もつれ顕微鏡のイメージ  
Nature Comm. 4,2426 (2013).

### 「量子の時代」の展望

以上、今回賞を授与いただきました、「光子を用いた量子情報通信処理と量子計測の先駆的研究」について紹介してきました。このような技術が今後応用される分野として、計測、通信、およびコンピューティングが挙げられます。

最初の計測については、先程紹介した干渉計の

感度の向上の他にも、さまざまな応用が考えられます。たとえば、光の「色(波長)」に関して相関をもつような量子もつれ状態を光源として利用する事で、現在眼底検査にもちいられています光コヒーレンストモグラフィ(OCT)の分解能を、10倍以上向上できる可能性があり、最近私たちはその原理検証実験に成功しています。ほかにも、光子を操作する、微小な光素子の研究もすすめています。それを利用すれば、現在、顕微鏡をもちいなければ検出できないような単一分子などの発光を、もっと効率良く、光ファイバで直接検出することも可能です。

次の通信に関しては、光子一つ一つを送信することで、秘密のパスワードを、安全に遠隔地間で共有する「量子暗号」が期待されています。私たちは三菱電機と共同で、2003年に世界最長(87km)の量子暗号通信システムを実現しました。2010年には、東京量子暗号ネットワーク実験が総務省を中心に実施され、実用化が大きく期待されています。

また、コンピューティングに関しても、従来困難であった分子軌道の厳密な計算などを、量子回路を用いてシミュレーションする研究などが進められています。そのために素子のハイブリッド化や集積化量子回路の実現をめざしています。

他には、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。

### 【受賞者紹介】 竹内 繁樹 氏

京都大学大学院工学研究科 教授

- 1991年 3月 京都大学理学部 卒業
- 1993年 3月 京都大学大学院理学研究科物理学第一専攻修了
- 1993年 4月 三菱電機株式会社中央研究所 研究員
- 1999年 10月 北海道大学電子科学研究所 講師
- 2000年 9月 北海道大学電子科学研究所 助教授
- 2007年 6月 北海道大学電子科学研究所 教授
- 2008年 4月 大阪大学産業科学研究所 招へい教授(常駐、兼任)
- 2014年 3月 京都大学大学院工学研究科 教授、現在に至る。