

東京大学大学院工学系研究科／ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

量子の非局所性を厳密に検証

～新方式の量子暗号・量子コンピューターの実現へ～

1. 発表者： 古澤 明（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授、
同ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 教授兼務）
不破 麻里亜（同大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程 1年）

2. ポイント：

- ★ アインシュタインが約 100 年前に提唱し、長年物理学における課題であった「量子の非局所性（注1）」を世界で初めて厳密に検証
- ★ 量子（光子）を粒子としてではなく波（電磁波）として測定
- ★ 検証に用いた技術は、新方式の超高速量子暗号・超高効率量子コンピューターに応用可能

3. 概要：

東京大学大学院工学系研究科の古澤明教授と不破麻里亜大学院生（博士課程 1年）らの研究チームは、アインシュタインが提唱した「ピンホールで回折した単一光子は空間的に広がるが、異なる 2 点で同時に観測されない『量子（光子）の非局所性（注1）』」を世界で初めて厳密に検証することに成功しました。光子の非局所性は、1909 年にアインシュタインが量子力学の不可解な例として提唱して以来、「物理学の 100 年論争」を巻き起こしてきました。それ以来、多くの物理学者達は高効率な測定による厳密な検証にしのぎを削ってきました。しかし、これまで用いられてきた光子を粒子として検出する方法では、検出効率が低い上に、光子の有無しか観測できなかったため、厳密に検証することは原理的に不可能でした。今回、研究チームは、光子の電磁波としての側面に着目し、電磁波を高効率に測定するホモダイン測定技術（注2）を構築し、電磁波の複数の属性を観測して、より多くの情報を得ることを可能にしました。その結果、光子の非局所性を高精度かつ厳密に検証することに初めて成功しました。この成果は基礎科学の大きな成果であるばかりでなく、光子の粒子性と波動性の両方を用いた新方式の超高速量子暗号や超高効率量子コンピューターへの応用を可能にします。

本研究は豪グリフィス大学のハワード・ワイズマン教授との共同研究による成果で、文部科学省・先端融合領域イノベーション創出拠点の形成プログラムなどの支援のもとに行われました。

4. 発表内容：

《背景》

原子や光子などの非常に小さなスケールの世界、つまり量子の世界では、私たちの常識ではなかなか理解しがたい現象が確認されています。例えば、ある光子がピンホールを通過すると放射状に広がりますが、半球面スクリーン上で光子を検出すると、スクリーン上の 1 点で

しか検出されません(図1)。約100年前、この現象から、アインシュタインは、「ピンホールで回折して空間的に均等に広がった光子が、スクリーン上の1点のみでしか検出されない現実があるのは、ある1点で光子が観測された瞬間、その他の点での同時観測を妨げるような遠隔相互作用が存在しなければいけない」と考えました。そして、この作用を“spooky action at a distance”(離れた場所の間で起こる奇妙な相互作用、超常的遠隔相互作用)と呼び、当時の理論では説明できなかつたため、その存在を疑い続けました。現在、この現象は「光子の非局所性」と呼ばれています。

光子の非局所性は、多くの人慣れ親しんできた世界観では説明できない現象であるため、その存在を証明するためには厳密な検証が求められます。長年、非常に多くの物理学者が光子の非局所性の存在やその解釈に挑み、「物理学の百年論争」とも言える論争には決着がついていない現状です。しかし、従来の実験では、光子を粒子として検出していたために検出効率が低く、「測定抜け穴(loophole)」と呼ばれる制約があり、十分説得力を持つ検証が困難でした。ところが、2010年に豪グリフィス大学のハワード・ワイズマン教授らは、単一光子にホモダイン測定を適応し、「アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン・ステアリング(Einstein-Podolsky-Rosen steering、以下EPR steering、注3)」と呼ばれる検証方法を用いることで光子の非局所性を厳密に検証することが可能になると理論提案していました。

《今回の成果》

東京大学大学院工学系研究科の古澤明教授と不破麻里亜大学院生(博士課程1年)らの研究チームは、光子の波動性に着目し、電磁波の複数の属性を高効率に観測できるホモダイン測定を行うことで、従来は達成困難であった光子の非局所性の厳密な検証に世界で初めて成功しました。

今回は、生成した光子をピンホールで回折させる代わりに、入射する光の一部を反射し、一部を透過する、部分反射ミラーで2つの光路に分けることで、光子が通過できる経路数を無限から2つへと減らしました。非局所性の検証において本質的な「光子の空間的な広がり」を残しつつ、実験装置を簡略化することに成功しました。そして、部分反射ミラーの反射光と透過光の両方をホモダイン測定しました(図2)。ここでのポイントは、「部分反射ミラーの片側(透過光)のホモダイン測定の観測属性(位相)を変更すると、観測属性と得られた結果(振幅の符号)に応じてもう片側(反射光)の量子状態に変化が生じる」ことを確認したことです。つまり「空間的に離れた2地点の片方の観測属性と結果に応じた影響がもう片方に及んで、それに対応する量子状態が現れた」ことを意味します。この現象こそ、アインシュタインによって100年前に提唱された光子1つがもたらす非局所性そのものです。研究チームは、非局所性の存在を示す十分な根拠を得るために、電磁波の6つの異なる属性でその効果を検証しました。さらに、これを定量的に評価するEPR steering不等式の破れを検証し、光子の非局所性の厳密な検証に成功しました(図3)。

今回の実験が成功した背景には、本研究チームが長年開発してきた要素技術の集大成があります。特に重要な鍵となったのは、高効率な単一光子生成に加え、粒子的性格の強い量子である光子に、波の側面に着目して測定することにより検出効率を高め、光子の位相情報を駆使してより多くの情報を得ることにより、厳密な非局所性を検証したことなどがあげられます。

《社会的意義と今後の展望》

アインシュタインが非局所性の概念を提唱してから約100年という長い間、その現象の存在に関する厳密な検証を目指して多くの物理学者たちが格闘してきました。今回の実験において、光子1つの波動性を高精度に制御し、それを高効率に読み取る新たなテクノロジーを用

いて「量子の非局所性」の存在を厳密に検証したことは基礎科学の大きな発見であるといえます。

今後、この手法を活用し、光子の粒子性と波動性の両方を用いた新しいタイプの量子暗号や量子コンピューターの開発に取り組んでいく考えです。

古澤研究室は、文部科学省による拠点形成事業「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」の1つである「先端光量子科学アライアンス (APSA)」のメンバー。

5. 発表雑誌：

雑誌名：英国科学雑誌「Nature Communications」〈2015年3月24日（英国時間）オンライン版で公開〉

論文タイトル：Experimental proof of nonlocal wavefunction collapse for a single particle using homodyne measurements

著者：Maria Fuwa, Shuntaro Takeda, Marcin Zwierz, Howard Wiseman, and Akira Furusawa

DOI 番号：10.1038/ncomms7665

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
教授 古澤 明

7. 用語解説：

注1 非局所性：光子の非局所性とは、「空間的に広がった光子 1 つをある場所で観測すると、その影響が遠隔地におよぶ現象」の事です。例えば、ピンホールを通過して広がった光子が 1 点で観測されると、他では観測が妨げられてしまいます（図1）。この光子 1 つが持つテレパシーのような作用は、1909年にアインシュタインによって初めて疑問視され、多くの人が慣れ親しんできた世界観では説明できない現象として長年の物理学の謎でした。

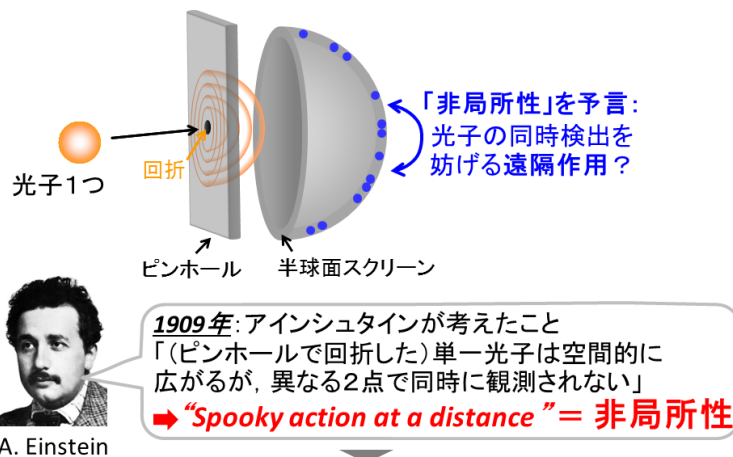
注2 ホモダイン測定：FM ラジオにおける情報伝送方式をベースにしており、光の電磁波としての性質を利用して、被測定光に載せた情報を読み取る方法です。ホモダイン測定で、観測する電磁波の属性は「位相」です。FM ラジオで情報を伝達するためには、まず情報を載せる光（搬送波）の各位相を、観測すべき信号の分だけシフトさせます。これを搬送波のコピーを干渉させることで、元の信号の振幅と位相関係を復元する手法がホモダイン測定です。観測する位相（観測位相）を変えながら対応する振幅を得ることで、光子の有無のみを検出する従来手法より多くの情報を得ることができます。さらに、被測定光と搬送波のコピーを干渉させる際に、被測定光の信号を増幅するので、光子 1 つのような極微弱光でも高効率に測定することができます。ゆえに、原理的には 100%の測定効率を得ることができます。

注3 アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン-ステアリング：ある地点での測定が遠隔地に与える影響を定量的に評価することで、量子の非局所性を検証する一般的な方法として、豪グリフィス大学のハワード・ワイズマン教授によって 2007年に提案されました。2007年に

初めて提唱された方法は、2つの量子の間の非局所性を検証する方法論でした。ここでは、遠隔地にある2つの量子の片方を観測（測定）し、もう片方の量子状態を推定することで、観測によって遠隔地の量子状態が変化したか否かを検証します。複数の異なる観測を行った時に、常に遠隔地で観測に対応した量子状態の変化が見られれば、測定の影響（すなわち非局所性）が存在する根拠を示すことができます。測定の影響を確率論を用いて定量的に評価したのが「アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン-ステアリング不等式」です。この不等式を破ることが、非局所性が存在する厳密な証拠となります。本研究では、この手法を空間的に2ヶ所に広がった1つの光子に適用しました。

8. 添付資料：

単一光子の非局所性の概念提唱



抜け穴なき検証が求められる、物理学の長年の謎

図1: 単一光子の非局所性の概念

量子である光子がピンホールを通過すると放射状に広がります。これを半球面状のスクリーンで検出すると、スクリーン上の1点でしか光子は観測されません。この状況に対し約100年前アインシュタインは、「ピンホールで回折した光子は空間的に均等に広がるので、スクリーン上のどこにでも等しい確率で現れるはずだ。しかし、1カ所で検出されたら他で検出されないで、ある場所で観測された影響が他の離れた場所に及ぶような奇妙な相互作用が存在するのではないか」と主張しました。つまり、アインシュタインは、ある1点で光子が検出されると、そのほかの点での検出を妨げる何らかの作用が存在するのではないかと考え、この作用を“spooky action at a distance”（離れた場所の間で起こる奇妙な相互作用、超常的遠隔相互作用）と呼びました。現在ではこれは量子の非局所性と呼ばれています。量子の非局所性は、約百年近い物理学の謎であり、厳密な検証が求められてきました。

今回の光子の非局所性の検証方法

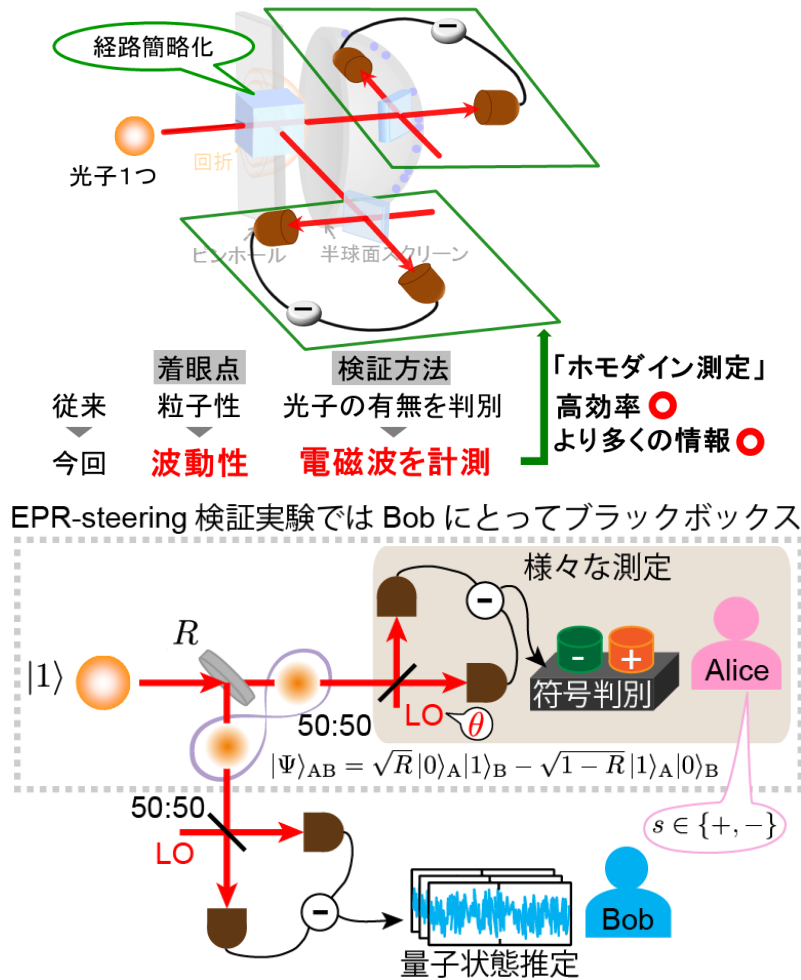


図 2: 今回行った光子の非局所性検証実験概念図

(上) アインシュタインの思考実験の検証方法。本研究では、生成した光子を部分反射ミラーで2つ（の光路）に分けることで、ピンホールの代わりにしました。このようにすれば実験装置を簡略化できるからです。そして、両側で光子の有無を観測する代わりに、電磁波の測定であるホモダイン測定を行いました。ホモダイン測定を用いることの強みは、高効率な上により多くの情報を得ることが可能となることです。ここで片側のホモダイン測定の位相を変更すると、それに応じてもう片側の状態が変化していることを確認しました。

(下) EPR-steering 法を用いた検証方法。Alice はホモダイン測定結果の符合のみを判別し、Bob は量子状態を推定します。Alice の観測位相と結果に応じて、Bob の量子状態が変化すれば、測定が遠隔地に与える影響、すなわち非局所性が存在する根拠を示すことができます。

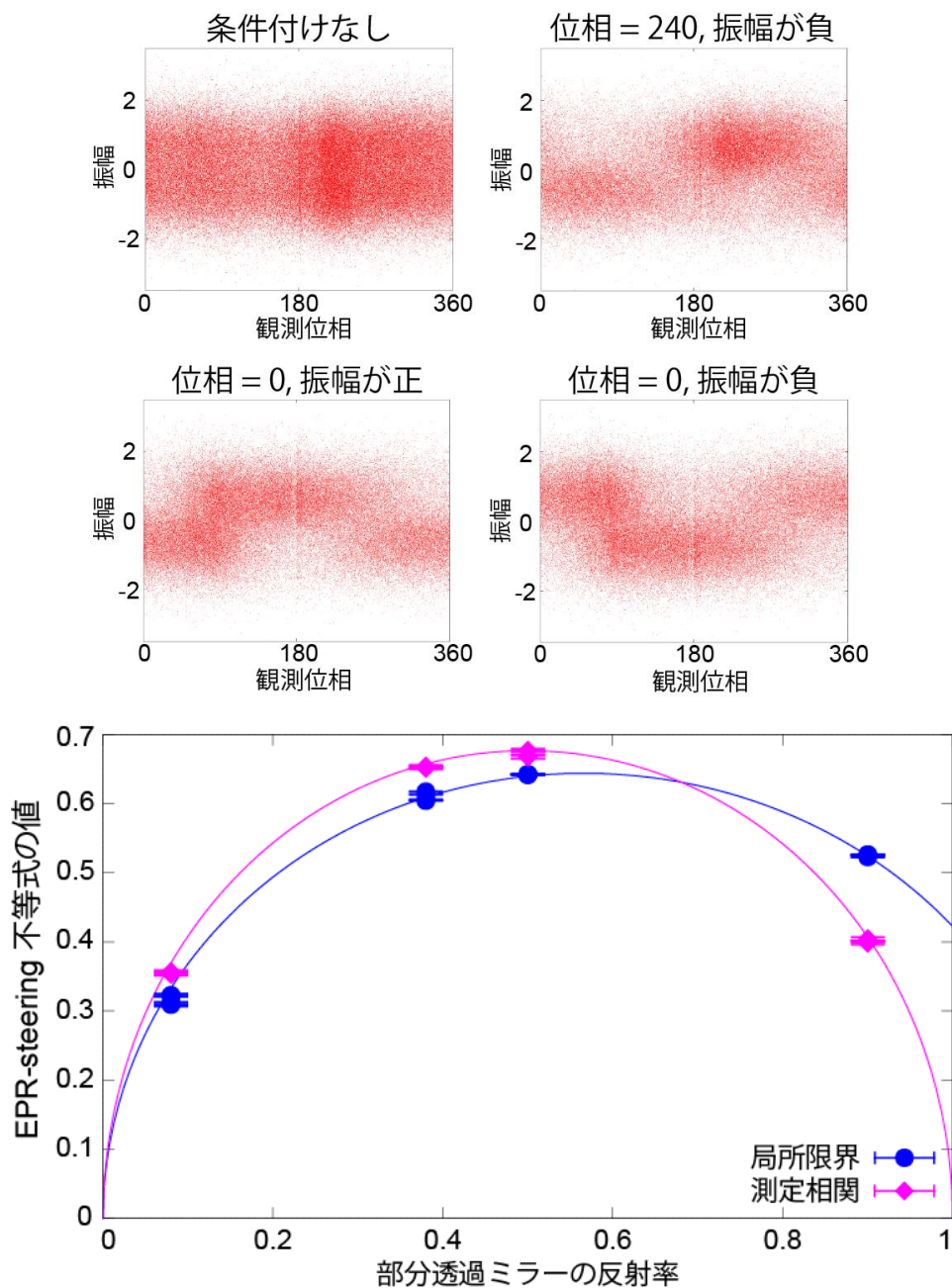


図 3: 今回行った光子の非局所性検証実験結果

(上) Bob がホモダイン測定を用いて推定した量子状態。Alice の測定によらない Bob の量子状態には、位相依存性がありません。これは、部分反射ミラーで光子が確率的に反射されて Bob に届いたり届かなかったりする点で、光子が粒子的に振舞うからです。これに対し、Alice の観測位相と結果に対応する量子状態には位相依存性が現れます。これは、光子が波として空間的に Alice と Bob の間に広がって存在し、波動的に振舞うからです。

(下) EPR-steering 不等式の理論値と実験値。測定された相関 (マゼンタ色) が、局所相関 (青色) を上回れることが、非局所性が存在することの厳密な根拠となります。部分反射ミラーの反射率は 8%, 38%, 50%, 90% の 4 つの値を用い、再現性を確認するため各反射率に対して 4 回検証を行いました。反射率が 8%, 38%, 50% のとき、すなわち測定を行っている Alice 側により多くの光子が分配されるときに非局所性が検証しやすくなります。

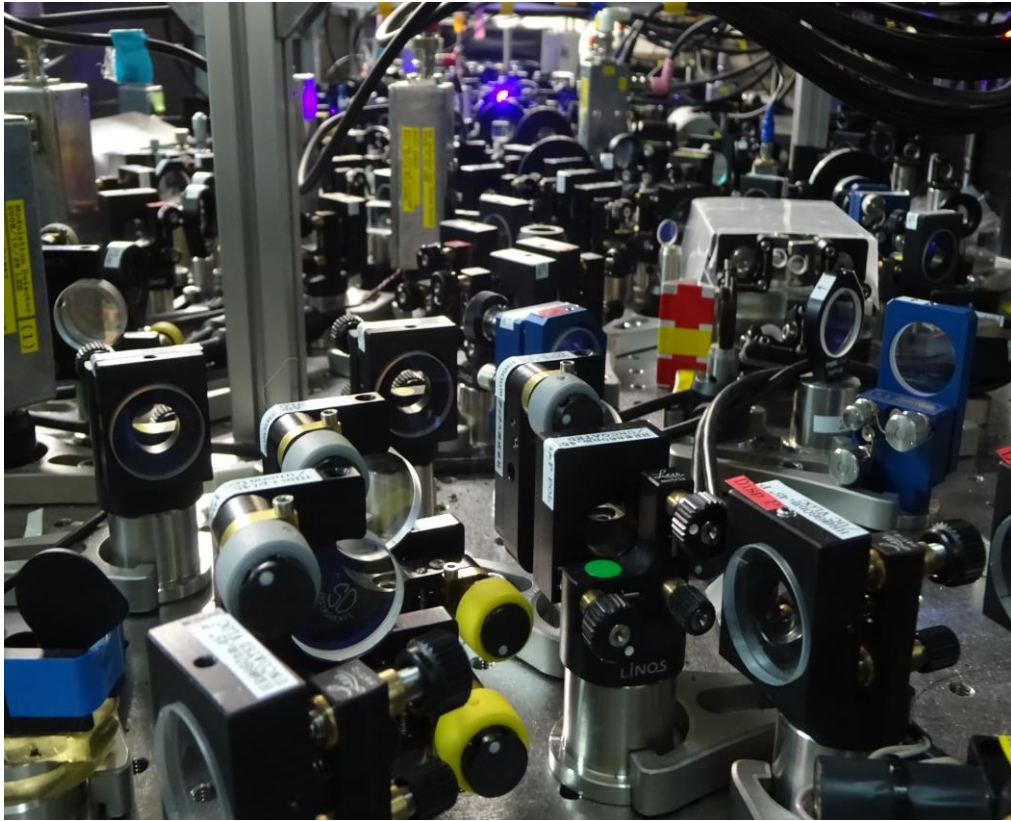


図 4:今回用いた実験装置

用いた光学系の拡大図。500 枚以上のミラーから構成されています。光路は、10 万分の 1 ミリの精度で調整し、装置の安定性を確保するために 10 を超える動的制御機能を導入しました。