

平成 29 年 4 月 27 日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所

真にランダムな偏光をもつ単一光子の発生・検証に 世界で初めて成功

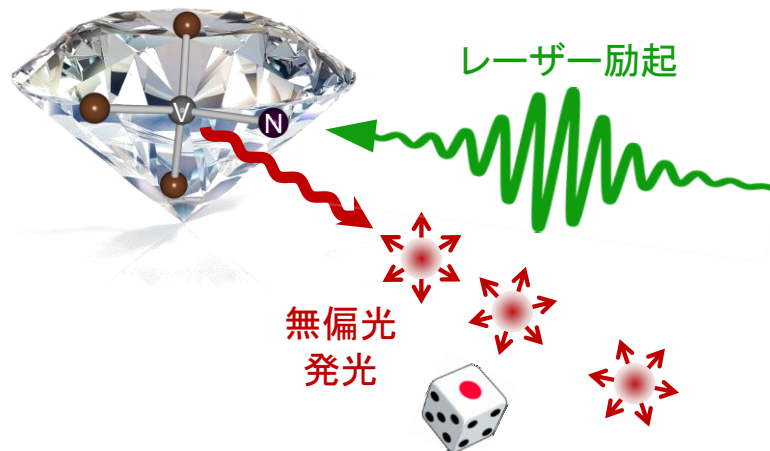
— 光子を用いた量子サイコロ —

【発表のポイント】

- 静的にも動的にも真にランダムな偏光状態にある単一光子の発生を、ダイヤモンドを用いて実現。
- 光子を用いた物理的真性乱数の発生や量子暗号の技術開発、および量子力学の基礎問題の検証に重要な貢献。

【概要】

東北大学電気通信研究所・枝松圭一教授、阿部尚文研究員らの研究グループは、静的にも動的にも真にランダムな偏光^(注1)状態にある単一光子^(注2)の発生を、ダイヤモンドを用いて実現することに成功しました。今回の成果は、光子を用いた真性乱数^(注3)発生器(例えて言えば量子サイコロあるいは量子コインスともいうべきもの)の実現や量子暗号の技術開発、および量子力学の基礎問題の検証に重要な役割を果たすことが期待されます。



ダイヤモンド中の不純物欠陥(NV 中心)を用いた無偏光単一光子発生の概念図。

量子コンピュータや量子暗号など、現在の古典情報通信技術を凌駕する可能性をもつ次世代情報通信技術として期待されている量子情報通信技術において、単一の光子は特に重要な役割を有します。量子情報通信における情報の基本単位である量子ビットは、単一光子の偏光を用いて実現されており、従来は、純粋状態と呼ばれる特定の偏光をもつ状態のみが主に利用されてきました。一方、個々の光子の偏光が全くランダムで特定の偏光をもたない、すなわち静的にも動的にも「無偏光^(注4)」な状態にある単一光子は、物理的な真性乱数の発生や量子暗号通信^(注5)への応用、あるいは量子測定などの量子力学の基礎問題の検証においてたいへん有用であると期待されています。しかしながら、そのような静的かつ動的な無偏光性を示す単一光子の発生はこれまで確認されていませんでした。本研究では、結晶面を工夫したダイヤモンド結晶中の不純物欠陥(NV 中心)から発生する単一光子が、静的にも動的にもほぼ完全なランダム性をもつ無偏光状態にあることを検証することに世界で初めて成功しました。

この研究成果は、2017年4月26日(英国時間)に発行されたオープンアクセス科学誌「Scientific Reports」(Nature Publishing Group)に掲載されました。

【問い合わせ先】

東北大学電気通信研究所

担当 枝松圭一, 阿部尚文

電話 022-217-5070, 5073

E-mail eda@riec.tohoku.ac.jp

【研究の背景】

現在の暗号通信において、通信の安全性に重要な役割を果たす乱数はソフトウェアによって発生させた疑似的な乱数となっています。そのため、先の E. J. Snowden 氏による告発の報道^(注6)のように、乱数を発生させるプログラムに意図的に脆弱性を持たせることで、その脆弱性を用いて暗号化されたデータを解読することができる可能性があります。また、盗聴者が疑似乱数の規則性を発見して、暗号化されたデータが解読される危険性もあります。そのため、電氣的なノイズや今回実現した光子の偏光のランダムな状態である無偏光状態のように物理的にランダムな現象を利用して、ハードウェア的に真の乱数を発生させることが望まれており、一部では商用化もされています。光子の偏光を「真の乱数」として利用する場合、全ての偏光状態が等確率で起こること(静的ランダム性)に加え、時間的に隣り合う光子の偏光の間に相関が全くないこと(動的ランダム性)を検証する必要があります。従来、光子の偏光状態に関する静的ランダム性の評価は行われていましたが、動的ランダム性の評価法はこれまで知られておらず、その確立と検証実験が望まれていました。

また、ミクロな世界を支配する物理学の基本原理解である量子力学では、粒子と波動の相補性(二重性)や、重ね合わせの原理、測定における不確定性関係など、古典物理学とは異なる特徴的な関係が知られています。このような量子力学の原理を用いて、量子コンピュータや量子暗号など、従来の情報通信技術を凌駕する可能性をもつ「量子情報通信」技術の開発が進められています。今回検証に成功した真にランダムな無偏光状態は、量子情報通信技術や量子力学の基本的な問題の検証にも大変有用であると期待されています。例えば、既に一部で実用化が進む量子暗号通信においては、その秘匿性を確保するために真の乱数が必要になります。また、上述した不確定性関係の検証などにおいても、真にランダムな無偏光状態を用いた検証実験が待たれています。

【研究の成果】

今回、研究グループは静的かつ動的な無偏光状態を、ダイヤモンド中の不純物欠陥である窒素-空孔中心(NV 中心、図 1)を用いて実現し、その特性評価を行いました。NV 中心は、室温で単一光子発光を実現できることから、量子情報通信技術の分野で注目されています。単一の NV 中心に顕微鏡の対物レンズを通してレーザーを照射すると、NV 中心の電子が高いエネルギー状態に励起されます。電子の励起状態には E_x および E_y と呼ばれる 2 つの状態があり、それらから各々水平偏光(H 偏光)および垂直偏光(V 偏光)の単一光子が発生します。室温においては、熱によってこの 2 つの電子状態がランダムに混合されてから発光することから、発生する単一光子は H 偏光と V 偏光がランダムに混合された無偏光状態となることが期待されます。また、このような無偏光状態にある単一光子は、特定の方向(NV 中心の軸方向)から観測する必要があります。本研究では、このような特定の方向から NV 中心を観測できるよう結晶面を工夫したダイヤモンド試料を用いて、特定の軸方向をもつ単一 NV 中心から発生する単一光子の無偏光性の評価を行いました。

実験では、このようにして発生した光子の偏光の静的ランダム性を高い精度で検証したことに加え、動的なランダム性の評価方法を提案・検証しました(図 2)。特に、量子光学^(注7)的な動的無偏光性の評価方法は、本研究において初めて提案・実現したものです。このようにして、観測した光子が静的にも動的にもほぼ完全なランダムな偏光をもつ理想的な無偏光

状態にあることを、世界で初めて実証しました。

【今後の展開】

今回の成果では、ダイヤモンド中の不純物欠陥である単一 NV 中心を用いて、静的にも動的にも真にランダムな偏光をもつ単一光子の発生を実現するとともに、その動的無偏光性の評価方法を提案・実証しました。今後は、今回実現した無偏光単一光子を用いて、量子測定における不確定性関係(誤差・擾乱関係)などの量子力学の基礎問題の検証実験や、量子暗号などに用いられる物理的な真性乱数発生装置への応用等に取り組んでいきたいと考えています。

【研究助成資金等】

- 日本学術振興会 科学研究費補助金(基盤研究(A), 課題番号:22244035, 研究代表者:枝松圭一)
- 総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)(課題番号:121806010, 研究代表者:小澤正直)
- 東北大学 学位プログラム推進機構 国際高等研究教育院(現 学際高等研究教育院) 博士研究教育院生 研究費(博士研究教育院生:阿部尚文)
- 文部科学省 卓越した大学院拠点「情報エレクトロニクスシステム教育研究拠点」(東北大学, 拠点リーダー:川又政征)

【掲載論文】

“Dynamically unpolarized single-photon source in diamond with intrinsic randomness”

(ダイヤモンドを用いた固有のランダム性を利用した動的無偏光単一光子源)

Naofumi Abe, Yasuyoshi Mitsumori, Mark Sadgrove, and Keiichi Edamatsu

Scientific Reports (Nature Publishing Group) 7, 46722; doi:10.1038/srep46722 (2017)

オープンアクセス Web ページ: <http://www.nature.com/articles/srep46722>

【参考図】

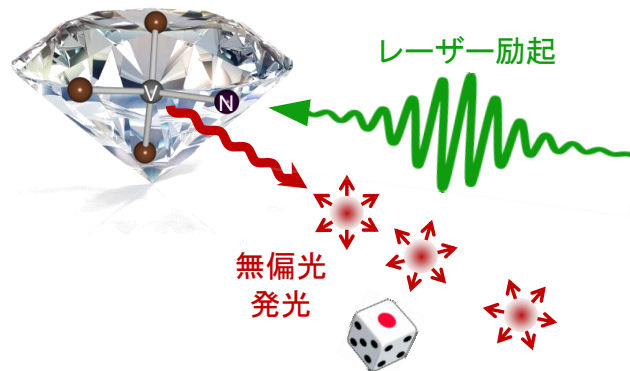


図 1. ダイヤモンド中の不純物欠陥 (NV 中心) を用いた無偏光単一光子発生の概念図。図中の原子構造において、N と記した球が窒素原子であり、V と記した球が空孔を表す。(111)面をもつダイヤモンド試料を用いて、N-V 軸が[111]方向を向く NV 中心を選択してレーザーで励起し、発生した光子を[111]方向から観測する。

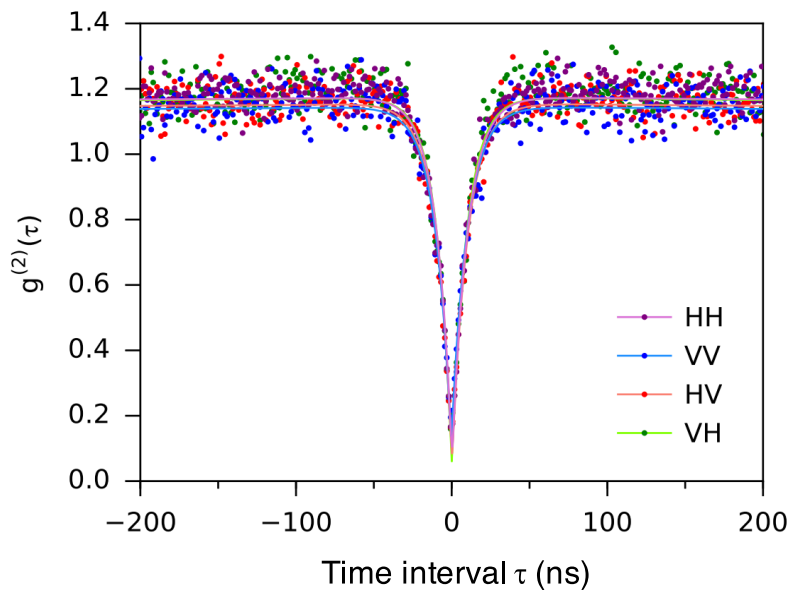


図 2. 2 次の自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ (注⁸) を用いた動的無偏光性の評価。時間的に隣り合う 2 つの単一光子の偏光の組み合わせ (HH, VV, HV, VH の 4 通り。H は水平偏光, V は垂直偏光) について、 $g^{(2)}(\tau)$ を 4 種類測定した。 $\tau=0$ 周辺の凹み (アンチバンチング) が、測定された光子が $\tau=0$ 付近で単一の光子となっていることを表す。4 種類の $g^{(2)}(\tau)$ が全て等しいことから、隣り合う光子同士の間には時間的な偏光相関がないことがわかる

【用語説明】

注 1) 偏光

光の波(電磁波)としての電場の振動方向を偏光という。代表的な偏光状態に直線偏光, 円偏光, 楕円偏光がある。直線偏光は, 電場の振動方向が時間的に一定な偏光であり, 一定の方向に進む光に対して, 互いに垂直な 2 つの独立した偏光方向(例えば電場が水平方向に振動する水平(H)偏光と垂直方向に振動する垂直(V)偏光)がある。単一光子に対するこれらの2種類の偏光状態を用いて, (電子のスピンの場合と同様に)量子情報の基本単位である「量子ビット」を構成することができる。

注 2) 光子

光の量子。光量子ともいう。

注 3) 真性乱数

全く規則性のない, 本来の意味での乱数を「真性乱数」という。これに対し, 何らかの数学的規則に基づく計算プログラム(ソフトウェア)によって作り出された擬似的な乱数を「擬似乱数」と呼ぶ。注 6 も参照されたい。

注 4) 無偏光

偏光が直線偏光, 円偏光, 楕円偏光の特定の偏光に定まっておらず, これらがランダムに混合された偏光。

注 5) 量子暗号通信

主に単一光子の偏光によって秘密鍵を配布し, その秘密鍵を用いて行う暗号通信。量子鍵配送ともいう。既存の暗号は盗聴者が現実的な時間内で暗号が解読できないことによって暗号の安全性を保証する計算量的安全性なのに対して, 量子暗号通信は, 無限の計算能力とメモリを有している盗聴者であっても解読することができない, 情報理論的安全性を有するとされる。

注 6) E. J. Snowden 氏による告発の報道

英紙「The Guardian」等が報じた E. J. Snowden 氏によって告発された, 米 国家安全保障局(NSA)と英 政府通信本部(GCHQ)がインターネット上の暗号化通信を密かに解読していたとされる一連の報道。特に「BULLRUN」計画は, NSA の職員が, 米 国立標準技術研究所(NIST)による疑似乱数発生アルゴリズムの技術標準「Dual_EC_DRBG」の作成に関与し, 暗号解読ができるようにバックドア(脆弱性)を仕込み, これを用いているインターネット上の暗号化通信を密かに暗号解読していたとされる。このようにソフトウェアによる疑似乱数発生器は, 暗号解読を企む者によって意図的に脆弱性を仕込まれる可能性がある。それに対して, 物理的なノイズによって乱数を発生させるハードウェア乱数発生器はこのような可能性が低いと考えられる。

注 7) 量子光学

光を古典的な波と考えるのではなく, 光の場(電磁場)を量子化して, 光を量子として扱う物理学。

注 8) 2 次の自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$

2 つの光子が時間間隔 τ だけ離れて観測される割合を表す関数。測定する光が単一光子か否かなど, 光の時間的統計性を評価する際に調べられる。単一光子に対して $g^{(2)}(\tau)$

を測定すると, $\tau=0$ では 2 つ以上の光子は観測されないため, $\tau=0$ 付近に $g^{(2)}=0$ となる
凹み(アンチバンチング)が観測される。