

もつれ光子対を用いて相関をもつ光子と電子の対を生成、検出することに成功 - 絶対安全な量子情報通信の長距離化に前進 -

1. 発表者:

黒山 和幸(東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程2年生)

松尾 貞茂 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教)

樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授/ 理化学研究所 創発物性科学研究センター量子情報エレクトロニクス部門 部門長)

2. 発表のポイント:

- ◆量子力学の重要な性質である量子もつれ相関(注1)を持つ1対の光子から、1個の電子と1個の光子の対が生成できることを世界で初めて実証しました。
- ◆量子コンピュータの量子ビットの候補である GaAs 量子ドット(注 2)の中の 1 個の電子と、 これともつれ相関を持つ 1 個の光子を同時検出することに成功しました。
- ◆量子テレポーテーションを原理として光と量子ドット中の電子を利用した長距離量子情報通信への応用が期待されます。

3. 発表概要:

量子物理学における最も特徴的な性質である量子もつれ相関は、その黎明期より活発に研究がなされてきました。これまで量子もつれ相関は、光子同士や電子スピン同士といった同種の粒子間で主に生成され、研究されてきました。しかし、光子対の量子もつれ相関を光子と電子スピンの対へ転写できることは実証されておらず、未だ挑戦的な基礎物理学の課題として残されていました。これを実証すべく東京大学大学院工学系研究科の樽茶教授、松尾助教、黒山大学院生(博士課程2年生)らは、大阪大学産業科学研究所の大岩教授、藤田助教らと共同で、単一の偏光もつれ光子対から、GaAs量子ドット中に単一の電子スピン、空間的に離れた場所に単一光子、というもつれ対を生成、検出する実験手法を考案しました。これまで本研究グループでは、GaAs量子ドットに単一の偏光した光子を照射し、これと相関をもつ電子スピンを生成、検出する実験に成功していました。

本研究では、上記実験に、単一の偏光光子を単一の偏光もつれ光子対に替えて、光子対の一方の光子を量子ドットに照射して単一の電子、残りを離れた場所にある光子検出器に照射して単一光子を生成、検出するという実験を行い、光子と電子の対が生成できることを実証しました。これは先の単一偏光光子を用いた実験を参照すると、単一のもつれ光子と電子の対が生成できていることを意味しています。この結果は、懸案となっていた、もつれた光子対から異なる種類の基本粒子の量子もつれが生成できることを示す、世界初の実証実験です。本成果は、光を用いた量子通信の通信距離制限を打開すると期待され、中継器への応用も見込まれます。

本研究は科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)の助成を受けて実施されました。

なお、本研究結果は、2017 年 12 月 5 日(英国時間)に英国科学誌 Scientific Reports に掲載されます。

4. 発表内容:

量子もつれ相関は古典物理では現れない非局所的な相関を持っており、これまでにさまざまな系を用いてこの性質が調べられてきました。古くは Einstein-Podolsky-Rosen の逆説問題により量子もつれ相関が実在する物理現象なのかという問題提起が行われましたが、その後 A.Aspect らによって、光子を用いて非局所的な相関の存在が初めて示されました。それ以降、さまざまな基本粒子について量子もつれ相関の観測結果が報告されており、近年では固体中の電子スピンのもつれ相関の生成と制御にも成功しています。また、量子もつれは、量子情報の中心概念であり、その生成、制御、検出は量子コンピュータ、量子通信などに広く応用されています。

量子もつれ相関は電子スピンや光子偏光(注 3)といった粒子の物理量の相関として現れることが報告されています。同種の粒子のもつれ相関が異なる粒子の間のもつれ相関に転写されることは、量子力学の自然な帰結であり、量子情報への応用において大変有用ですが、未だ実験実証されていません。本研究グループでは、GaAs量子ドットを用いて、単一の偏光光子から単一の電子スピンへの変換と偏光の量子もつれ相関を持つ光子対の生成技術を組み合わせることで、偏光もつれ光子対から偏光光子と電子スピンという異なる基本粒子のもつれ対を生成、検出する実験系を考案しました。これまでに、光子の偏光と電子のスピンの間に量子もつれ相関が観測されたことが報告されていますが、これらは固体系からの光子の放出を使用した方法であり、光子対の量子もつれ相関の転写にはなっていません。もつれ光子対を用いた実験は本研究が世界で初めての試みです。

これまでの研究で、単一光子によって GaAs 量子ドットに生成された単一電子を捕捉する技術、GaAs 量子ドット中のスピンを判定する技術を組み合わせることにより、単一の偏光光子から単一の電子スピンへ角運動量が転写されることを実証しました。本研究では、光源として、単一の偏光光子ではなく、自発パラメトリック下方変換(SPDC、注 4)という方法で発生させた、偏光量子もつれ相関を持つ光子対を用いました。実験の内容としてはまず、光子対の一方の光子を量子ドットに照射して、その中に単一の電子を生成し、これを量子ドット近傍に設けた電荷計で検出します(図 1)。また、残りの光子を離れた場所にある単一光子検出器によって検出します。この実験の偏光光子対には同時発生の性質があることから、量子ドットで電子が生成される事象と同時に電子と相関を持つ光子が離れた場所にある検出器で観測されることが予想されます(図 2)。

光子で生成された電子は、電荷計を用いて 10 マイクロ秒の時間幅(時間窓)で検出されます。上記実験では、光子対照射を繰り返して電荷検出の信号を多数回取得し、時間窓において、電荷検出が起きたのと同時に光子が光子検出計によって検出されるような事象を観測しました(図 3)。しかし、この同時検出では、電荷検出に必要な各データ点当たりの最小の積算時間が有限であるために、同一の光子対から作られた電子と光子の対ではない事象も誤りとして入ることが問題でした。そこで、電荷検出を条件としない場合に光子が検出される確率と電荷検出を条件とする場合に光子が検出される確率を厳密に比較しました(図 4)。その結果、電荷検出の条件が有る場合に限り検出確率が増大し、1個の光子の検出確率が顕著に増加することを確認しました。この増加分が同一の光子対から生成した電子と光子の対によるものであり、単一の光子対から、相関をもった光子と電子の対が生成されていることを示しています。今までの実験で偏光光子から電子スピンへの変換ができることが確認されていることから、上記の結果は、単一光子偏光・電子スピンの非局所的な量子もつれ相関が形成されていることをも示唆しています。

今後は、電子スピンの技術を取り入れることにより光子一電子対の偏光ースピン相関を検証 する実験を行う予定です。

本研究により、量子テレポーテーションを原理として光と量子ドット中の電子を利用した長 距離量子情報通信への応用が期待されます。

5. 発表雑誌:

雜誌名:「Scientific Reports」(2017年12月5日)

論文タイトル: Single electron-photon pair creation from a single polarization entangled photon pair

著者: 黒山和幸*、Marcus Larsson、松尾貞茂、藤田高史、Sacha R. Valentin、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、大岩顕、樽茶清悟*

DOI 番号: 10.1038/s41598-017-16899-w

アブストラクト URL: www.nature.com/articles/s41598-017-16899-w

6. 注意事項:

日本時間12月5日(火)午後7時(イギリス時間5日(火)午前10時)以前の公表は禁じられています。

7. 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 樽茶清悟 (タルチャ セイゴ) 〒113-8656 東京都文京区 7-3-1

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教 松尾貞茂 (マツオ サダシゲ) 〒113-8656 東京都文京区 7-3-1

8. 用語解説:

(注1) 量子もつれ相関

量子もつれ相関を持つ粒子は、それらが相互作用を及ぼさない程度に空間的に離れていたとしても、 互いの状態に影響を及ぼしあうことが可能です。この事実から量子もつれは非局所的な相関を持つ と理解されています。

(注2) 量子ドット

電子が 0 次元的に閉じ込められるような構造のこと。半導体基板の成膜技術とナノサイズの加工技術を施すことによりそのような構造が実現できます。

(注3) 偏光

光は進行方向に対して垂直な方向に振動していますが、その振動方向に規則性を持った光のことです。直線偏光や円偏光と呼ばれる種類があります。

(注 4)自発パラメトリック下方変換(Spontaneous Parametric Down-Conversion)

1つの光子が物質と非線形に相互作用をすることで自発的に2つの光子に分かれ、もつれ光子対を生成します。

9. 添付資料:

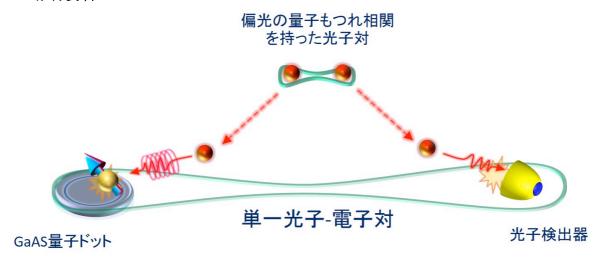


図1. 本実験の概要図

単一の光子・電子対の生成の概念図。偏光に量子もつれ相関のある光子対を同時に生成する。その 片方を量子ドットに照射し、電子に変換する。量子ドットでは実時間に電荷を電気的に検出する ことが可能である。さらに残された光子は光子検出器で実時間に検出する。このとき光子対の同 時性から、もし光子と電子が同時に検出されれば、単一の光子対から生成された光子・電子対であ ると決定できる。

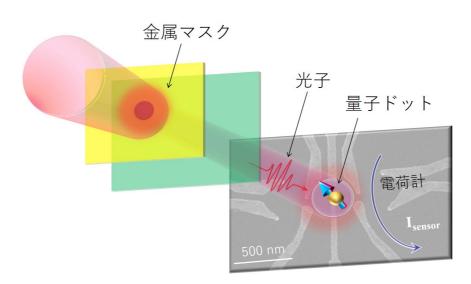


図 2. 量子ドットへの光子照射の様子

半導体のナノ加工技術により作製した量子ドット測定試料の電子顕微鏡写真。写真中央の丸く囲った部分に量子ドットが形成される。量子ドットの右側に電荷計を配置し、量子ドットの電子数を実時間に測定する。また、基板の表面には量子ドットと同じ大きさの金属マスクが乗せられており、量子ドットにのみ選択的に光が照射される構造を形成している。

電荷検出信号の各点当たりの積算時間(時間窓)

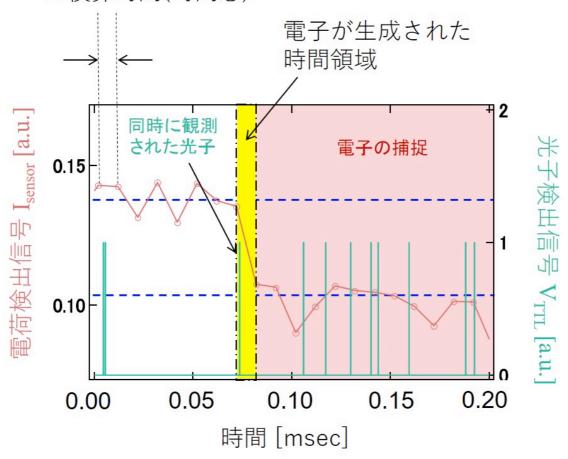
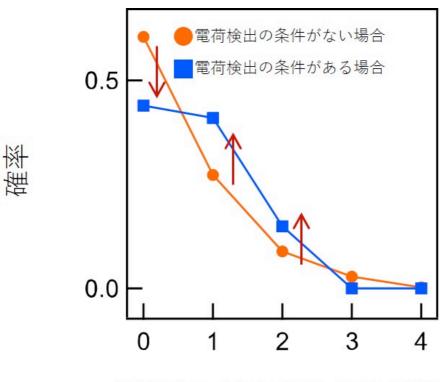


図3. 電荷検出信号と光子検出信号の実時間トレース

量子ドットの電荷検出信号(I_{sensor})と残された光子の光子検出信号(V_{TTL})の時間トレース。一点鎖線で囲まれた時間領域(10 マイクロ秒の幅)で、電荷検出信号が立ち下がっているがこれは光子照射により生成された電子が量子ドットに捕捉されたことを示している。さらに、電子が生成された時間領域において 1 個の光子が検出されていることが分かる。この時間トレースは光子と電子が同時に検出されており、単一の光子対から光子-電子対を生成していることを示唆する結果である。しかし、電荷検出に必要な各データ点当たりの積算時間(時間窓)は有限であるために、電子の生成を行った光子と相関のない光子が電子の生成が行われた時間領域に検出されてしまう事象も起こることがある。



時間窓に検出される光子数

図 4. 電荷検出の条件がない場合とある場合の時間窓における光子検出確率

電荷検出の有無とは関係なくデータ点の積算時間に光子が 0、1…4 個検出される確率(丸のプロット)と量子ドットで電子の生成が起きた時間領域に光子が検出される確率(四角のプロット)を比較すると検出される光子の統計分布に差異があることが分かる。光子数 3、4 は得られた時間トレースが少ないために議論できないが、後者の確率は光子数 0(光子が検出されない)で前者の確率より低下し、光子数 1、2で増大していることがわかる。つまり、電子生成が起きた時間領域内に光子が検出される確率が大きくなっている。これは、光子対の同時性が片方を電子に変換した光子ー電子の対に反映されているからである。以上の議論から、得られた光子ー電子の対のうちある割合は単一の光子対から生成されていることが分かる。