

平成 19 年 4 月 5 日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所

## 半導体を用いた高純度の量子もつれ光子の発生に成功

### －半導体を用いた量子通信・量子計算デバイスへの道を拓く－

#### <概要>

東北大学電気通信研究所 枝松圭一教授の研究グループは、量子通信・量子計算デバイスへの利用が期待される、高純度な「量子もつれ」をもつ光子（光の粒子）対を、半導体を用いて発生させることに世界で初めて成功しました。

電子や光の量子力学的性質を利用して現在の情報通信技術の限界を突破する「量子情報通信技術」が近年注目されています。その基本となる技術が、1対の電子や光子などの粒子が互いに影響を及ぼしあう「量子もつれ」と呼ばれる状態の発生・制御技術です。様々な粒子のうち、特に光子は「量子もつれ」により情報を授受する媒体として、最も有望視されています。量子もつれ状態にある光子のペアでは、片方の光子の偏光（光子のスピン）の測定結果から他方の光子の偏光を知ることができ、このような性質を用いて遠く離れた空間での量子的情報の伝達が可能となります。そのため、量子もつれ発生とその制御は量子情報通信で必須となる最も重要な技術です。また、量子もつれ光子を発生・制御する技術の実現にあたっては、制御性や集積化に優れた半導体を用いる方法が熱望されていました。

本研究グループは、これまでに塩化第一銅単結晶にレーザー光を照射することによって放出された2個の光子が「量子もつれ」をもつことを実証し、半導体を用いた量子もつれ光子の発生に世界で初めて成功しています。しかし、その実験結果を解析する際に量子もつれをもつ光子対以外の光子による影響を統計的処理によって除く必要があったため、そのままでは実際の量子情報通信に応用することはできませんでした。今回は、その成果をさらに高度化し、量子もつれをもつ光子対以外の光子の寄与を大幅に小さくして、統計的処理を施すことなく、高純度の量子もつれをもつ光子対を発生することに成功したものです。その結果、量子情報通信に直接応用可能な量子もつれ光子を発生する半導体デバイスへの道を拓いたこととなります。

この研究成果は、東北大学電気通信研究所（枝松圭一教授グループ）が、JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO 型研究「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」（研究総括：大野英男東北大学電気通信研究所教授）および JST 戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究テーマ「光電場のナノ空間構造における新機能デバイスの創製」（研究代表者：石原一大阪府立大学大学院工学研究科教授）の支援を受けて、共同で進めている研究の一環として得られた研究成果で、本研究成果は 2007 年 4 月 6 日（米国時間）に発行されるアメリカ物理学会誌「Physical Review Letters」に掲載される予定です。

(お問い合わせ先)

東北大学電気通信研究所

量子光情報工学分野 教授 枝松圭一

電話 022-217-5070 FAX 022-217-5071

## <研究の背景>

近年、現在の情報通信技術の限界を、電子や光の量子的性質を巧みに利用して突破する「量子情報通信技術」が注目されています。その基本となる技術が、「量子もつれ」(注1)の発生と制御技術です。なかでも、光の量子である「光子」(注2)の偏光(スピンの)(注3)は、量子の情報をやりとりするための媒体として最も有望視されており、光子における量子もつれの発生と制御技術の確立は将来の量子情報通信技術の実用化のために不可欠なものです。従来、量子もつれをもつ光子の発生は、高出力レーザーと非線形光学材料を組み合わせた比較的大規模な装置で実現されていましたが、半導体を用いて量子もつれ光子を直接に発生・制御することが可能になれば、これまでに蓄積された半導体技術をいかして、電流(電子)を用いて量子もつれ光子を発生・制御する技術の開発へもつながり、その実現が期待されています。

## <研究の経緯>

東北大学とJSTの研究グループは、これまでに塩化第一銅(CuCl)と呼ばれる結晶にレーザー光を照射することによって放出された2個の光子が偏光(スピン)に関する「量子もつれ」をもつことを実証し、半導体を用いた量子もつれ光子の発生に世界で初めて成功しており、その結果をNature誌(2004年)に発表しています。しかし、その実験結果を解析する際には、量子もつれをもつ光子対以外の光子による影響を統計的処理によって除く必要があったため、そのままでは実際の量子情報通信に応用することはできませんでした。また、その後他の研究グループから発表された半導体を用いた量子もつれ光子の発生の報告例においても、量子もつれ光子対以外の光子による影響が大きく、実際の量子情報通信に応用できる高純度な量子もつれ光子対を発生する半導体光源は得られていませんでした。今回は、本研究グループの従来の研究成果をさらに改良・高度化し、量子もつれをもつ光子対以外の光子の寄与を大幅に小さくして、統計的処理を施すことなく、偏光(スピン)に関する高純度の量子もつれをもつ光子対を発生することに成功したものです。

## <成果の内容>

### (1) 量子もつれ光子対の発生方法

図1に示すように、本研究では塩化第一銅(CuCl)の単結晶に波長約390nmのパルスレーザー光を照射することで励起子分子(注4)を生成し、その励起子分子が消滅する際に励起光に近い波長と方向をもって同時に放出される2個の光子間の偏光の相関を観測しました。理論的には、励起子分子の角運動量(広義のスピン)の状態を反映して、放出される2光子の偏光(スピン)の間に量子的な相関すなわち量子もつれが生じます。例えば、放出された一方の光子が垂直方向に偏光していれば他方も垂直偏光、一方が水平方向に偏光していれば他方も水平偏光となり、それらのうちのどちらの状態になるかは同じ確率で起きるといふ、偏光に関する量子もつれが存在することが期待されます。

### (2) 実験結果とその特長

今回の実験では、高い繰り返し周波数(1ギガヘルツ)をもつパルスレーザーを用いることにより、発生する量子もつれ光子対の数( $N_1$ )に対するそれ以外の光子の数( $N_2$ )の比( $N_2/N_1$ )を大幅に減少させ、従来と比べて高い純度をもつ量子もつれ光子対の発生に成功しました。そして、このように発生した2個の光子を、偏光子、分光器および光電子増倍管からなる2組の検出装置で検出し、それらの間の時間相関と偏光相関を測定しました。その結果、図2に示すように、直線偏光で測定した場合は、偏光の向きが共に垂直あるいは共に水平のときのみ、同時に光子を検出する計数が大きく増大することを確認しました。さらに、円偏光で測定した場合は、互いに逆回りの円偏

光の場合にのみ同時計数が大きく増大しました。このような偏光相関の測定結果は、古典的な状態からは決して得られないもので、発生した光子対が理論的に予想された量子もつれ状態にあることを示しています。前述したように、今回の実験結果では、量子もつれ光子対以外の光子による寄与（時間差が 0 以外のところに現れる雑音のような成分）が非常に小さく、その寄与を統計的なデータ処理により差し引くことなく、以下に述べる量子もつれの解析をすすめることが可能となりました。

### (3) 量子もつれの評価

量子もつれのより定量的な評価のため、ベルの不等式（注5）と呼ばれる量の評価しました。その結果、発生した光子対が高い程度( $S=2.34$ )で古典的限界( $S \leq 2$ )を破り、量子もつれ状態の持つ非局所性を表していることが確認されました。また、様々な偏光の組み合わせによる偏光相関の測定結果から、光子間の量子もつれを定量的に評価した結果、その量子もつれの忠実度（注6）として 85%という高い値を得ました。古典的には量子もつれの忠実度は 50%を超えることはないため、この結果は本研究で発生した光子対が古典限界を超えた高い量子もつれを有することを示しています。このように、量子もつれ光子対以外の光子による寄与を人為的に差し引くことなく、ベルの不等式の破れと高い忠実度を検証したことで、半導体から発生した光子対が、量子情報通信に利用可能な高純度の量子もつれ状態になっていることを実験的に検証することに世界で初めて成功しました。

### <今後の展開>

本研究で開発した量子もつれ光子対の発生方法は原理的に非常に高い効率をもっていますが、現在は試料表面の不完全性などによって、量子もつれ光子の検出の効率は必ずしも高くありません。今後、試料の改良や違う物質での研究を進めることにより、高純度かつ高効率の量子もつれ光子対の発生・検出を実現したいと考えています。さらに、発光ダイオードや半導体レーザーのように、半導体に電流を流すことによって直接量子もつれ光子を発生させる技術の開発も大いに期待されます。

### <研究助成資金等>

- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金 学術創成研究「超高効率量子もつれ光源および検出器の創成と量子もつれ回復プロトコルの研究」（研究代表者： 枝松圭一 東北大学電気通信研究所教授）
- ・ 科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 (ERATO)「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」（研究統括： 大野英男 東北大学電気通信研究所教授）
- ・ 科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)「光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製」（研究代表者： 石原一 大阪大学大学院基礎工学研究科助教授）

### <掲載論文名>

Goro Oohata, Ryosuke Shimizu, and Keiichi Edamatsu, “Photon polarization entanglement induced by biexciton: experimental evidence for violation of Bell’s inequality” (励起子分子により誘導された光子の偏光量子もつれ：ベルの不等式の実験的検証)

Physical Review Letters (フィジカル・レビュー・レターズ) 2007年4月6日号

### <関連論文>

Keiichi Edamatsu, Goro Oohata, Ryosuke Shimizu and Tadashi Itoh, “Generation of

ultraviolet entangled photons in a semiconductor” (半導体による紫外域量子もつれ光子の発生)  
Nature (ネイチャー) 2004年9月9日号

### <用語説明>

#### 注1) 量子もつれ

複数の粒子間に量子力学的な相関がある状態。量子絡み合いともいう。量子もつれを持つ粒子間では、一方の粒子の状態と他方の粒子の状態を独立に切り離して考えることはできず、一方の状態を測定すると、空間的に離れた他方の粒子の状態も定まってしまう、この特異な性質を利用して盗聴されない(量子暗号)量子情報通信や、現行のコンピューターで1万年かかる計算を1秒でやってしまう量子計算などで非常に重要な役割を果たす。

#### 注2) 光子

光の量子。光量子ともいう。

#### 注3) 偏光

光の波(電磁波)としての振動方向を偏光という。振動方向が直線的な場合を直線偏光、振動の1周期の間に振動方向が1回転する場合を円偏光という。1個の光子の偏光は光子のスピンとも見なされ、その状態は量子情報の基本単位である量子ビット(キュービット)として利用できる。偏光の量子ビットは外乱に強く、この情報保持能力を生かした量子情報通信が期待されている。

#### 注4) 励起子分子

半導体が光によって励起され生成された電子と正孔がクーロン力で結合したものを「励起子」といい、励起子が2個で相関を持ったペアになった状態を「励起子分子」という。最も安定な励起子分子は、励起子の角運動量(広義のスピン)が互いに逆向きになって結合したものである。従って、励起子分子から放出される光子は、2個の励起子の角運動量を反映した量子もつれをもつことになる。

#### 注5) ベルの不等式

古典的局所理論(互いに相互作用を及ぼさない離れた場所での物理状態が、各々の点での物理状態に分けて記述できると考える理論)と量子もつれ状態とが相いれないことを示すための不等式。1964年にJ.S. Bellによって提唱された。古典的局所理論の予想では、偏光相関の測定結果から得られるSパラメータと呼ばれる量が2を超えることはなく、Sが2より大きければ非局所性(局所理論では説明できない性質)をもつことの証明になる。

#### 注6) 忠実度

量子もつれの程度を評価する量のひとつ。英語ではFidelity。最大の量子もつれを有する状態にどれだけ近い状態かを数値で表す。最大の量子もつれをもつ理想的な場合は忠実度が100%であり、量子もつれをもたない古典的な状態では、忠実度は最大でも50%にしかならない。

<図と説明>

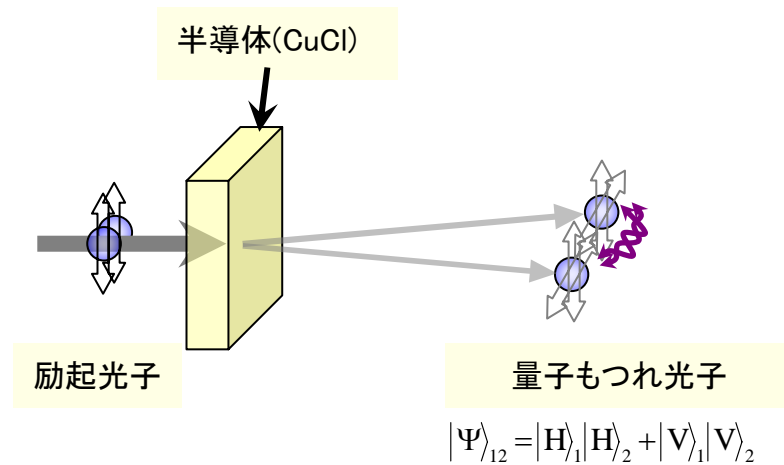


図1:半導体(CuCl)を用いた量子もつれ光子発生実験の概念図。  
パルスレーザーを半導体結晶(CuCl)に照射することにより、半導体中に励起子分子を2光子共鳴励起させる。入射光子はこの励起子分子と共鳴し、散乱によって量子もつれを有する光子対が生成される。  
図中の数式は、半導体から散乱された光子対の状態を示す式(波動関数)であり、散乱された光子対が、共に水平の直線偏光状態として観測されるか、あるいは共に垂直の直線偏光状態として観測される、という「量子もつれ」状態にあることを示している。ここで、数式中の左辺 $|\Psi\rangle_{12}$ は散乱された光子対の状態であり、右辺の $|H\rangle_1$ 、 $|V\rangle_2$ 、などのうち、 $|H\rangle$ は水平の偏光状態、 $|V\rangle$ は垂直の偏光状態を示し、添え字の1, 2は光子対のそれぞれの光子を示す。

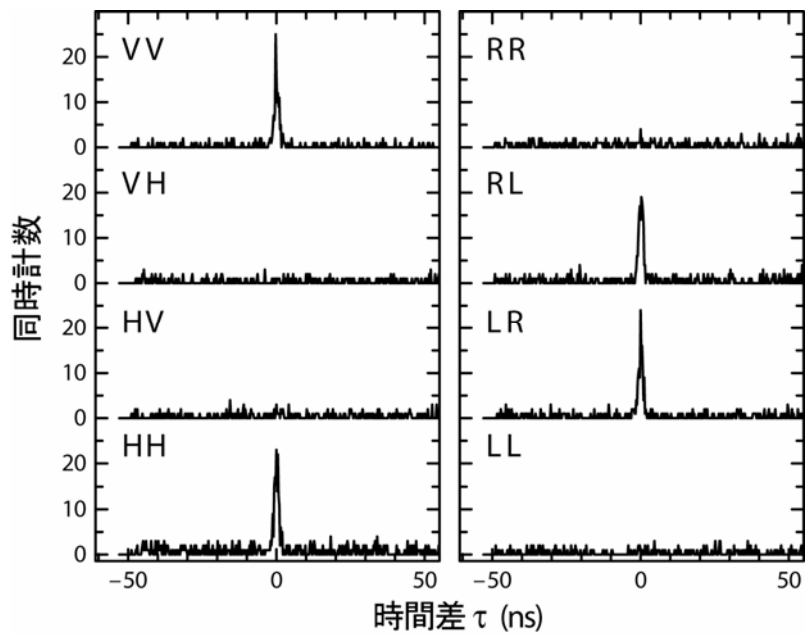


図 2 : 発生した光子対の偏光相関の測定例。横軸は 2 光子の時間差、縦軸は 2 光子を検出した計数である。図中の VH 等の記号は、初めの文字が一方の光子の偏光方向、2 番目の文字が他方の光子の偏光方向であり、V が垂直偏光、H が水平偏光、R が右回り円偏光、L が左回り円偏光を表す。2 個の光子が平行な直線偏光の場合 (VV および HH) および逆向き円偏光 (RL および LR) の場合のみ、2 光子の時間差 0 における計数が大きくなっている。すなわち、1 つの励起子分子から同時に放出された 2 つの光子が偏光に関する強い相関をもっていることがわかる。時間差が 0 以外の時に観測される雑音状の信号は、異なる励起光パルスによって生じた別々の励起子分子から放出された光子間の偶然の 2 光子計数である。