



東北大学

平成 24 年 7 月 23 日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所

束縛された量子もつれの活性化に成功 —新たな量子情報通信技術への道を拓く—

<概要>

東北大学電気通信研究所 枝松圭一教授、金田文寛研究員らの研究グループは、量子通信、量子計算に必要な「量子もつれ」の一種である「束縛された」量子もつれを、利用可能な形に「活性化」する実験に世界で初めて成功しました。

量子通信や量子計算機など、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打破する「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、複数の電子や光子などの粒子の間に存在する「量子もつれ」と呼ばれる状態の発生・制御技術です。量子もつれには、量子情報通信で直接利用可能な量子もつれ（ここではこれを「利用可能」量子もつれと呼ぶことにします）と、そのままでは利用できない「束縛された」量子もつれとが存在します。量子情報通信において、束縛された量子もつれを利用するためには、それを利用可能な量子もつれに変換する必要があります。これを、束縛された量子もつれの「活性化」と呼びます。束縛された量子もつれは、利用可能量子もつれよりもさらに一般的な形態の量子もつれであり、その活性化が実現できれば、量子もつれの利用に関してさらに多くの応用を拓くものとして期待されています。そして近年、束縛された量子もつれの活性化に関する理論的提案がなされ、その実験的検証が強く期待されていました。

本研究グループは、光の粒子である光子を 4 個同時に発生させ、それらの間に束縛された量子もつれを作り出しました。そして、別に発生させた 2 個の光子の間に利用可能量子もつれを作り、その助けを借りることで、はじめの 4 個の光子間の量子もつれを活性化できることを実証しました。この結果は、束縛された量子もつれの活性化に関する世界初の成功例であり、量子情報通信における量子もつれの利用技術に新たな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および電気通信大学、広島大学の研究グループの共同研究の成果で、2012 年 7 月 30 日(米国時間)に発行されるアメリカ物理学会誌「Physical Review Letters」(オンライン版)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

量子光情報工学研究室 教授 枝松圭一

電話: 022-217-5070 FAX: 022-217-5071

研究員 金田文寛

電話: 022-217-5073 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。量子もつれには、量子情報通信で直接利用可能な「利用可能」量子もつれと、そのままでは利用できない「束縛された」量子もつれとが存在します。量子情報通信において、束縛された量子もつれを利用するためには、それを利用可能な量子もつれに変換する必要があり、これを、束縛された量子もつれの「活性化」と呼びます。束縛された量子もつれは、利用可能量子もつれよりもさらに一般的な形態の量子もつれであり、その活性化が実現できれば、量子もつれの利用に関してさらに多くの応用を拓くものとして期待されています。そして近年、束縛された量子もつれの活性化に関する理論的提案がなされ、その実験的検証が強く期待されていました。

<研究の経緯>

本研究グループは、光の量子である「光子」(注2)を用いた量子もつれの発生、制御、検出技術において多くの成果をあげています。本研究では、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金(学術創成研究費)の支援を受け、複数個の光子を高効率に同時に発生させ、その偏光(注3)に量子もつれを保持させた上、それを正確に制御する技術開発を進めました。その結果、6個までの光子をこれまでにない高効率で同時に発生させ、それらの中に高度に制御された量子もつれ状態を作り出す技術を開発することに成功しました。この技術を用いて初めて、束縛された量子もつれの活性化の検証実験が可能になりました。

<成果の内容>

(1) 束縛された量子もつれの発生方法

図1に示すように、本研究ではまず、A, B, C, Dの4光子を同時に発生させ、それらの偏光の間に、束縛された量子もつれを生成しました。もう少し詳しく述べると、まず、通常の「利用可能」な量子もつれをもつ光子対を2つ(A, BおよびC, Dの対)発生させます。一对の光子がもつ量子もつれの種類は「ベル状態」と呼ばれる4種類のうちの1つになります。このとき、A, BおよびC, Dの対が同じ種類のベル状態になり、そして4種のうちのどのベル状態になるかはランダムになるようにすると、4光子の状態は「Smolin状態」と呼ばれる、束縛された量子もつれ状態になることが知られています。本研究では、このようにして、束縛された量子もつれ状態を発生させ、そこにある「利用可能」量子もつれの量がゼロか、あったとしても非常に小さいことを確認しました。

(2) 束縛された量子もつれの活性化

図2に示すように、上で述べた4光子の他に、量子もつれ状態(上述したベル状態のうちの1つ)にあるもう一对の光子(B', C')を用意します。そして、BとB'およびCとC'の間に、ベル測定(2光子がどのベル状態にあるかを測定すること)を行い、その結果をAおよびDに古典通信チャンネル(普通の通信)で知らせます。ベル測定の結果を受け、AおよびDは自分の光子にその結果に応じた処理を施します。そうすることで、AとDの間には、「利用可能」な量子もつれが復活します。この手続きを、束縛量子もつれの活性化と呼びます。すなわち、4光子の間の「束縛された」量子もつれ状態が、もう一对の光子の量子もつれの助けを借りて、A, D間の「利用可能」な量子もつれに変換(活性化)されたこととなります。この活性化の手続きでは、B(B

と B')および C (C と C') における各々の場所での測定 (局所的操作) と, 古典通信のみが使われていることが特長です。このような活性化の手続きは, 理論的には提唱されていましたが, それを実験的に確認したのは本研究が世界最初となる成果です。

<今後の展開>

束縛された量子もつれは, 利用可能量子もつれよりもさらに一般的な形態の量子もつれですが, その利用方法はこれまで知られていませんでした。特に, 従来の量子計算や量子通信のプロトコル (例えば量子テレポーテーションなど) の多くは, 「利用可能」な量子もつれを利用することを前提としており, 束縛量子もつれの利用は考えられていませんでした。束縛量子もつれの活性化の成功は, 量子もつれの利用に関してさらに多くの応用を拓くものであり, 量子情報通信技術におけるたいへん重要な成果です。

今回は, 4 光子の間に束縛された量子もつれを作り出し, 別に発生させた 2 個の光子の間の利用可能量子もつれの助けを借りることで, はじめの 4 個の光子間の量子もつれを活性化できることを実証しました。次のステップとしては, 4 光子間の束縛量子もつれ状態を 2 つ (合計 8 光子) 作りだし, それらの間から利用可能な量子もつれを取り出す, さらに高度かつ有用な操作 (超活性化) の実現に取り組みたいと考えています。

<研究助成資金等>

独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金 学術創成研究費「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)

<掲載論文名>

“Experimental Activation of Bound Entanglement” (束縛量子もつれの実験的活性化)

F. Kaneda, R. Shimizu, S. Ishizaka, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu

Physical Review Letters (フィジカル・レビュー・レターズ)

オンライン版 2012 年 7 月 30 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。1 個の光子の偏光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。

<図と説明>

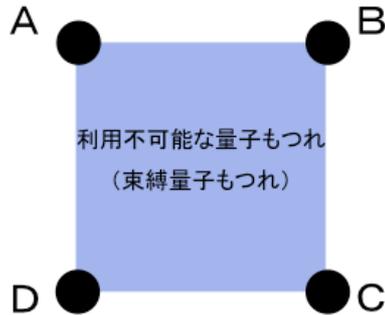


図1. 束縛量子もつれの概念図. A, B, C, Dの4者は各々, ある量子もつれ状態にある光子をひとつずつ持っている. しかし, その量子もつれ(束縛量子もつれ)はこのままでは量子情報通信で利用できない。

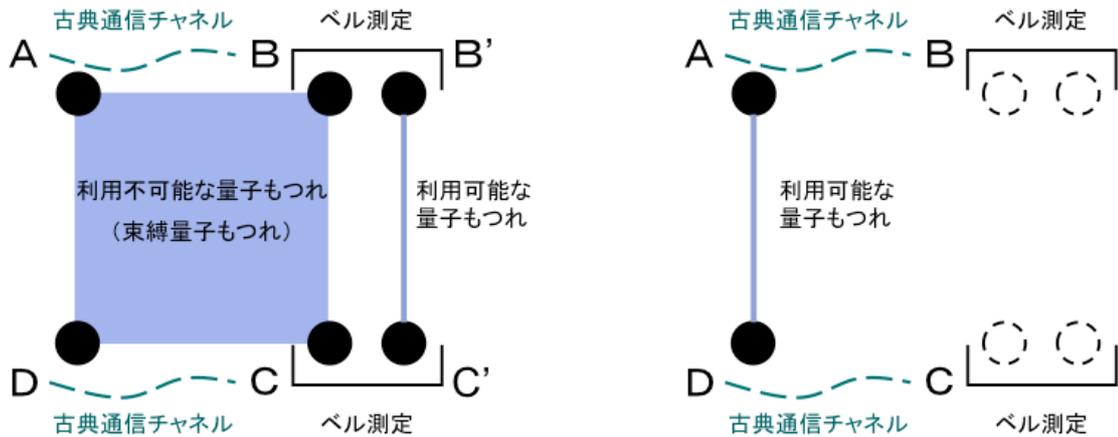


図2. 束縛量子もつれの活性化の概念図. (左)B, Cは別の量子もつれ状態にある光子(B'およびC')を共有し, 自身が持つ2光子との間で各々ベル測定を行う. ベル測定の結果は古典通信でA, Dへと伝えられる. (右)この操作により, 利用不可能であった量子もつれは, 利用可能な量子もつれと相互作用し, 「活性化」される. その結果, 利用不可能であったA, Dの光子間の量子もつれが量子情報通信で利用可能な形に変換される。