

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

世界初！量子通信網に道を開く新原理を実証

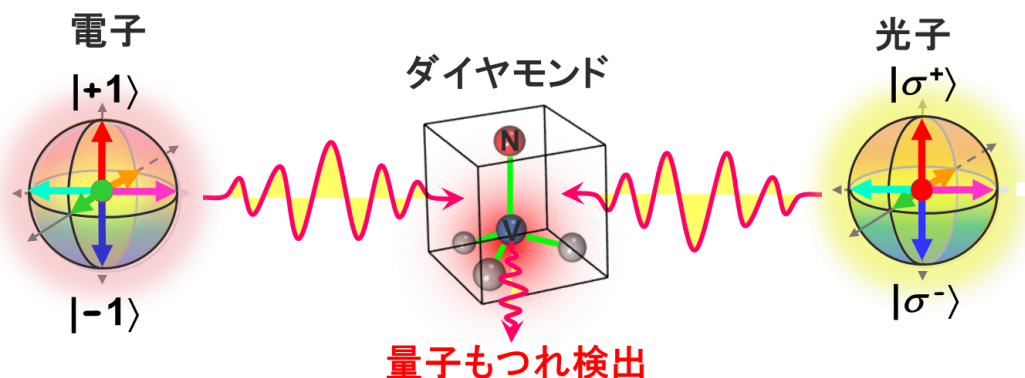
～発光と吸収だけで量子テレポーテーションを可能に～

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と新倉菜恵子研究員は、光子^[注1]の発光と吸収だけで量子通信や量子計算^[注2]に用いられる量子テレポーテーション^[注3]を可能にする新原理を実証することに、世界で初めて成功しました。

今回の成功は、量子メモリー素子となるダイヤモンド中の単一欠陥の電子に内在する量子もつれ^[注4]を利用し、発光と吸収という自然現象だけで光子と電子の量子もつれを検出した画期的な発見です。

今回得られた結果は、量子中継^[注5]の基本原則である量子テレポーテーションを極めて単純な原理で実現し、電子の量子状態を光子が届かない遥か遠方に高速かつ確実に再生できることを示唆するもので、物理法則で安全性の保証された量子通信網の飛躍的長距離化・高速化に道を開くものと期待されます。

本研究成果は、2015年2月5日（米国 NY 時間）発行の米国物理学会誌「Physical Review Letters」に掲載されます。なお、本研究は情報通信研究機構（NICT）高度通信・放送研究開発委託研究、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）ならびに科学研究費補助金基盤研究A（課題番号 24244044）の支援のもとに行われました。



<発表雑誌>

雑誌名：Physical Review Letters

論文題目：Entangled absorption of a single photon with a single spin in diamond（ダイヤモンド中の単一スピンの単一光子のもつれ吸収）

著者：Hideo Kosaka and Naeko Niikura（小坂英男、新倉菜恵子）

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 小坂 英男

Tel/Fax:045-339-4196 Email:kosaka@ynu.ac.jp <http://kosaka-lab.ynu.ac.jp>

量子通信網に道を開く新原理を実証

～発光と吸収だけで量子テレポーテーションを可能に～

<研究背景>

量子通信は、基本的な物理法則である量子力学の性質を利用し、盗聴者の計算能力や技術レベルに依存しない強固な安全性を保証する暗号通信技術です。量子でできた暗号鍵を自動配信（QKD）することで、ネット上の個人情報を安心してやり取りできるようになります。既に光子が届く100 km程度の距離では東京 QKD ネットワーク^[註6]など実用化へ向けた運用試験が進められているものの、数100 km以上の都市間ネットワークを構築する決定的な方法が見つかっていませんでした。例えば、従来の方法で1000 kmの量子通信を行おうとすると、一回線でおおよそ1000年に1ビットの情報しか送信できません。この理由は、光子が光ファイバー中を伝わる距離がおおよそ100 kmに制約されているためです。この制約を克服するためには、量子テレポーテーションと呼ぶ原理で光子が一度では届かない遠方に量子状態^[註7]を再生する量子中継が不可欠です。このためには、光子が届く数10 km毎に配置した量子ノード間に量子もつれを生成し、量子ノード内で量子もつれを検出する必要があります。従来の量子中継方式は、量子もつれ光子源などを用いて量子もつれを生成し、単一光子検出器と光学素子の組み合わせで量子もつれを検出するものでした。しかしながら、この方式では中継毎の高い失敗確率が原理的に存在し、距離が延びるにつれて通信レートが急激に劣化するという致命的な問題の根本的克服はできませんでした。

<今回の成果>

今回、小坂教授らの研究グループが考案した手法は、上に述べた従来の手法とは全く異なる動作原理に基づく新しい量子中継方式です。特殊な光源や検出器に頼ることなく、量子メモリーとなる電子そのものに内在する量子もつれを利用することにより、量子もつれの生成と検出を行います。量子もつれ生成は発光した光子と残った電子が自然にもつれるように、また量子もつれ検出は光子と電子がもつれて吸収されるように工夫を行います。このような自然現象の利用で、特別な量子操作の必要もなく量子テレポーテーションによる量子中継が行えることを実験によって明らかにしました。

この方式では、光ファイバーを伝わって量子ノードに到達した光子を無駄にすることなく中継に利用することが可能です。つまり、中継毎の失敗確率を原理的にゼロに抑えることができます。その結果、光ファイバー中で光子がなくなるのを避けるために中継区間を可能な限り短くすることで、通信レートを最大限まで上げることが可能になります。仮に光子送信レートを毎秒1ギガビットとすると、中継区間を50 kmに抑えたとしても1000 kmの量子通信路一回線で毎秒100メガビットの情報が送信できます。

＜動作原理と実験内容＞

この方式による量子中継の原理は次のようになります。説明のために、3地点の1中継を想定し、左からA, B, Cと名前を付けます(図1)。BとCの電子があらかじめもつれているとします。Aから光子が発光すると、ある工夫でその光子はAに残した電子ともつれています。その光子が光ファイバーを伝わってBに届き、この光子とBの電子がもつれていれば吸収が起こります。吸収がおこったことを何らかの方法で検知することにより、AとCがもつれます。この量子もつれを用いて暗号鍵を生成し、1ビットの暗号通信が行えます。

上に示した方式では、発光と吸収によるもつれ生成と検出が鍵をにぎります。その動作原理を示したのが図2です。これは上で説明したA, B, Cにある電子の3つの状態を示しています。いずれの電子も、下にある2つが量子ビットの2状態(↑と↓)に対応しています。この2状態をつなぐ第3の状態(A_2)が高いエネルギーにあります。先に説明したように、BとCの電子はあらかじめもつれた状態にあります。ここで、Aの電子を上の状態にしておく、そのうち下に落ちて下の状態(↑と↓)になると同時に同じ状態(↑と↓)の光子を発光します。これがいわゆる光子と電子の量子もつれ状態です。次に、この発光した光子を光ファイバーを介してBの電子にぶつけます。もしBの電子がAから来た光子と同じ状態なら吸収され、上の状態になります。この瞬間にAとCの電子はもつれた状態になります。結果的に、最初にあったBとCのもつれが、AとCのより遠くのもつれに拡大したことになります。このことを、あらかじめCの電子ともつれていたBの電子がAに瞬間移動したように捕らえると、量子テレポーテーションとなります。実際の量子中継では、上記の過程をBCを中心として左右に延長していきます。この方式では、中継点での量子メモリーは一区間分の光の往復時間だけ状態を保持していればよく、中継区間の距離を短くすればするほど、光子も電子も損失がなくなり効率の高い量子通信が行えるのが特徴です。

次に、今回行った実験の説明を行います。実験にはダイヤモンド中の欠陥の一種である窒素空孔欠陥(NV中心)を用いました。その電子はスピン^[注8]と呼ぶ状態をもち、1秒近く量子状態を保持できると同時に光子の吸収効率も高く、量子通信の中継用量子メモリーとして最適です。電子スピンの↑と↓が、先に説明した量子ビットの2状態に対応します。また、これらの2状態どちらからも光子の吸収で遷移できる第3の状態(A_2)が存在します(図2)。あらかじめ電子の状態を光照射でさまざまな状態に設定し、これとは独立に設定したさまざまな状態の光子をぶつけた時の吸収確率を測定しました(図3)。その結果、電子と光子がもつれた状態にあるときにのみ吸収が起こることを実証しました。この動作原理の源となるのは、物質に内在するスピン軌道相互作用^[注9]という量子もつれを導く力です(図4)。先に示された発光による光子と電子の量子もつれ生成も同様の力を利用していますが、今回発光の逆過程である吸収でも、量子もつれが検出できることを示したことは大きな意義があります。

＜今後の展開＞

先の説明では核となる量子もつれが必要でしたが、これにはやはり物質に内在する量子もつれが利用できます。原子を構成する電子と核子のスピンは超微細相互作用[注10]という量子もつれを導く力につながっています(図4)。この量子もつれを核とし、発光による量子もつれ生成と吸収による量子もつれ検出で量子テレポーテーションを繰り返すことで、量子もつれの距離を延ばすことができます。これにより、物質本来の量子もつれを起源とした量子通信ネットワークの実現を目指して研究を進めます。

＜総括＞

今回の成果は、従来の電子そのものの持つもつれの力を引き出すことにより、従来の量子中継である「たまたま繋がる」確率的中継方式から、「確実に繋がる」決定的中継方式に転換するための鍵となります。一旦核となるもつれを作っておけば、後はただ待つだけで光子の発光と吸収を繰り返し、光子が届かないような遠距離にも暗号の鍵となる量子状態を再生できるようになります。情報通信は盗聴だけでなく、さまざまなサイバー攻撃の危機にさらされており社会的問題になっていますが、国家的あるいは世界的な規模の量子通信ネットワークを構築できれば、物理法則によって安全性が保証された安心で健全な情報化社会を継続的に発展させることができます。

＜謝辞＞

本研究は情報通信研究機構(NICT)高度通信・放送研究開発委託研究、最先端研究開発支援プログラム(FIRST)ならびに科学研究費補助金基盤研究A(課題番号24244044)の支援のもとに行われました。なお、NICT委託研究は日本電信電話株式会社(NTT)物性科学基礎研究所 清水薫主幹研究員、国立情報学研究所(NII)根本香絵教授、大阪大学 水落憲和教授、東京大学 中村泰信教授との共同研究です。

＜その他＞

本論文に関するハイライト記事が、Physics (physics.aps.org)に2015年2月5日(米国NY時間)付けで論文と同時にオンライン掲載されます。

<添付資料>

量子テレポとは？

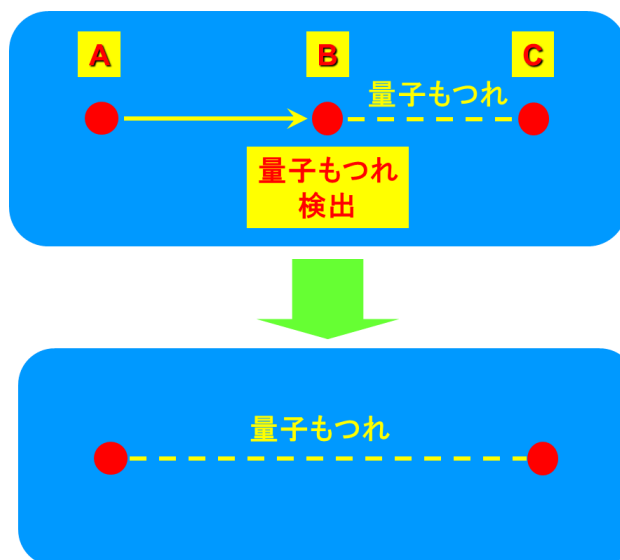


図1 量子中継の動作原理となる量子テレポーテーションの概略説明
あらかじめもつれた量子 B と C に、別の量子 A をぶつける。
量子もつれ検出に成功した瞬間に A の状態が C に転写される。

発光と吸収だけで量子テレポ？

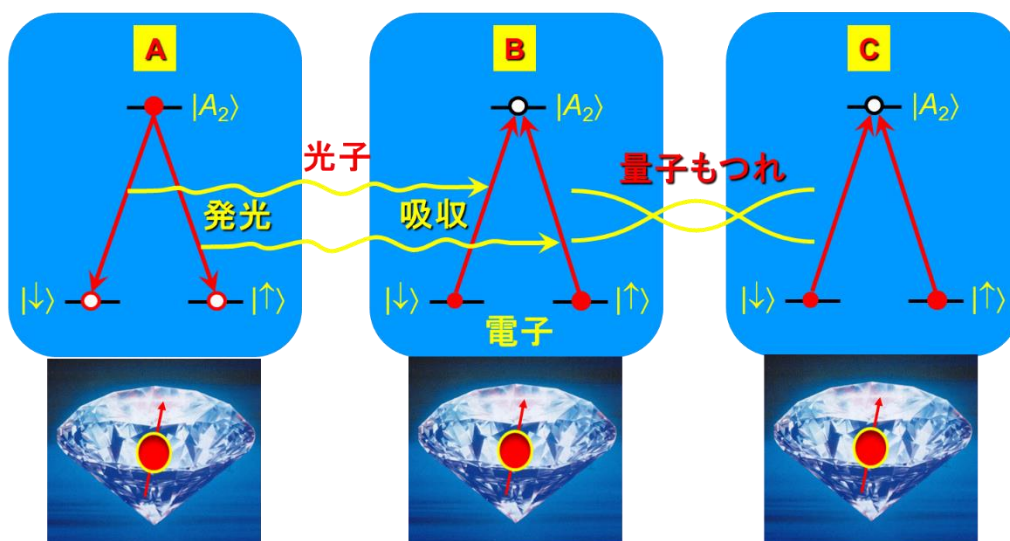


図2 発光と吸収を用いた量子テレポーテーションの動作原理
ダイヤモンド A から発光した光子は、ダイヤモンド B に吸収されることで、
ダイヤモンド C への量子テレポーテーションが完了する。

ダイヤモンドが光子と電子のもつれを仲立ち

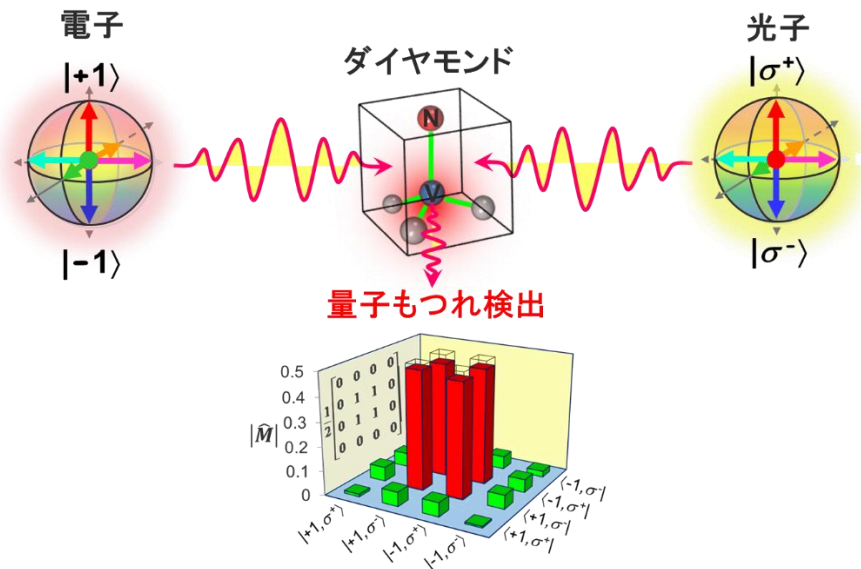


図3 ダイヤモンドを用いた電子と光子の量子もつれ検出の概要
 ダイヤモンドに内在する量子もつれ機構を利用し、電子と光子の量子もつれを検出。ほぼ完全な量子もつれ検出を実験で実証。

原子の中は量子もつれの宝庫

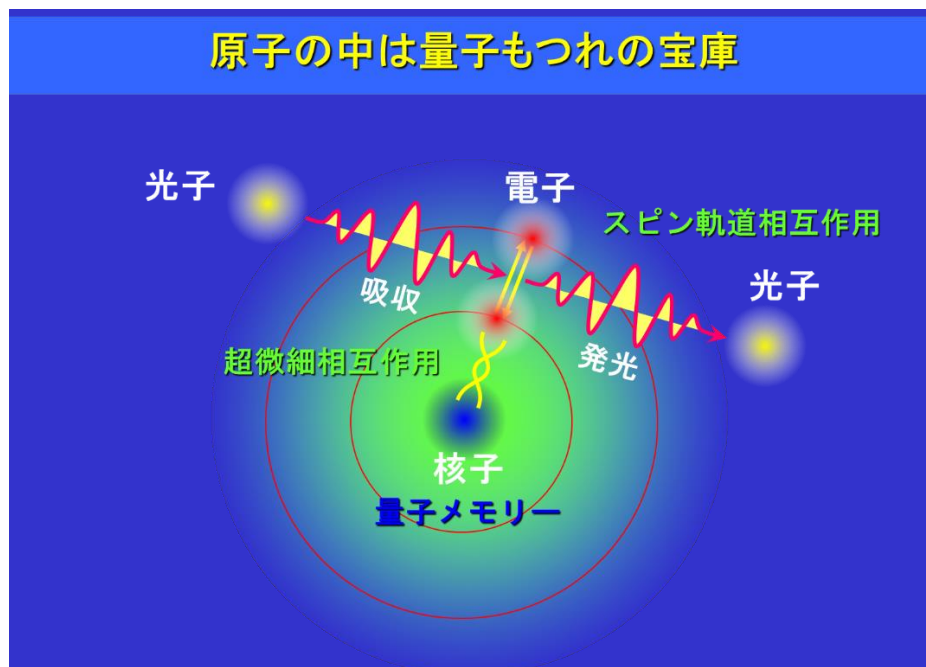


図4 原子に内在する量子もつれの起源となる力
 原子を構成する電子と核子は超微細相互作用、電子と光子はスピン軌道相互作用で量的にもつれることができる。

<用語解説>

注1) 光子

電子が電気あるいは電流の基本単位となる粒子であるように、光子は光の基本単位となる粒子である。いずれも典型的な素粒子であり、量子でもある。電子は量子メモリーに適す一方、光子は量子伝送に適す。光子はエネルギーや力を媒介する素粒子として知られるが、ここでは量子状態を媒介する量子として光子を用いる。

注2) 量子通信、量子計算

量子通信とは、量子力学の原理を応用し、共通の秘密鍵を離れた2者間に安全に配送する技術。この秘密鍵を用いて秘匿通信を行うことができる。量子鍵配送のイニシャルをとり QKD と呼ばれる。この技術の延長線上には、量子の超並列処理特性を利用した量子計算がある。

注3) 量子テレポーテーション

量子中継の基本原理。量子もつれ^[注4]にある二つの量子を用意し、この片方と別の量子との間の量子もつれを測定することで、直接は相互作用していない他方の量子に量子状態を再生するもの（図1参照）。

注4) 量子もつれ

2つの量子の間に量子的な相関がある状態。量子的な相関とは、片方を測定したとき、その測定の種類に関わらず他方も同じ測定をしたとき一対一に対応する結果を得るもの。

注5) 量子中継

光子が届かない遠方に量子を送るための手段。通常の通信で行われる光子数を増やす中継とは本質的に異なり、一光子を多段に用いて量子を次々と転送していく。いわゆる量子テレポーテーション^[注3]を動作原理とする。

注6) 東京 QKD ネットワーク

情報通信研究機構 (NICT) の主導で首都圏エリアに形成された量子通信網のテストベット。量子中継はまだ導入されておらず、現状では光子が光ファイバー中を伝わる限界の100km程度以内の距離に留まる。現在も運用試験が日夜行われている。

注 7) 量子状態

0 や 1 といった 2 状態だけでなく、 $0 + 1$ や $0 - 1$ といった量子的な重ね合わせを許す状態。一般的に光子や電子といった素粒子がもつ状態だが、分子やマクロな系でも量子状態を持ちうる。

注 8) 電子スピン

こまのような自転回転に例えた電子の量子状態。上向き (\uparrow) と下向き (\downarrow) だけでなく、これらの量子的重ね合わせ状態である $\uparrow + \downarrow$ 、 $\uparrow - \downarrow$ など位相の自由度をもつ。光子の振動の方向を意味する偏光と似た量子的な性質を持つ。

注 9) スピン軌道相互作用

電子のスピンと軌道の間働く量子的な力。光子は物質に吸収されるとき、電子の軌道と一対一の関係にあるので、この力は光子と電子の間の量子もつれの起源となる。

注 10) 超微細相互作用

電子と核子の間働く量子的な力。弱いながらも電子スピンと核スピンを量子もつれ状態に導くのに十分な効果がある。