

ダイヤモンド中の単一スピンと光子もつれの吸収

小坂英男

量子メモリーとなるダイヤモンドに内在する量子もつれの利用により、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、量子通信や量子計算に用いられる量子テレポーテーションを可能にする新原理を実証した。これにより、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・高速化に道が開けてきた。

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ある。量子でできた暗号鍵を自動配信 (quantum key distribution, 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る。すでに光子が届く100 km程度の距離では東京QKDネットワークなど実用化へ向けた運用試験が進められているものの、数百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なかった。たとえば、従来の方法で1000 kmの量子通信を行おうとすると、1回線でおよそ1000年に1ビットの情報しか送信できない。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よぶ原理で光子が一度では届かない遠方に量子状態を再生する

量子中継が不可欠である。このためには、光子が届く100 kmごと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る。

私たちの考案した量子中継方式は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う。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う。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た。本方式では、1000 kmの量子通信路1回線で毎秒100 Mbitの情報が送信でき、量子中継のない場合に比べ18桁もの速度向上につながる。

■吸収による量子テレポーテーション

動作原理を示したのが〈図1〉である。A, B, Cは離れた場所にある3つの電子の状態を示している。いずれの電子も、下にある2つが量子ビットの2状態(|+1〉と|-1〉)に対応している。この2状態をつなぐ第3の状態(|A₂〉)

が高いエネルギーにある。あらかじめBとCの電子をなんらかの方法でもつれた状態にしておく。ここで、Aの電子を上励起状態にしておくと、そのうち下に落ちて下の状態(|+1〉と|-1〉)になると同時に逆の角運動量をもつ(|σ⁻〉と|σ⁺〉)状態の光子を発光する。これがいわゆる光子と電子の量子もつれ状態である。つぎに、この発光した光子を光ファイバーを介してBの電子にぶつける。もしBの電子がAから来た光子と逆の角運動量なら吸収され、上の励起状態になる。この瞬間にAとCの電子はもつれた状態になる。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る。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とらえると、量子テレポーテーションとなる。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く。この方式では、中継点での量子メモリーは1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ある。

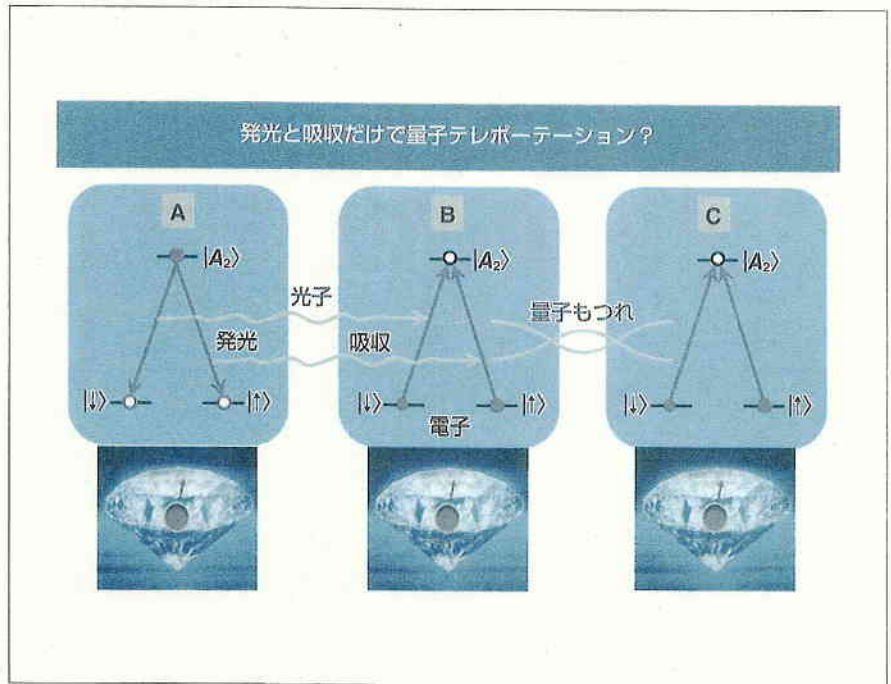
つぎに実際に行った実験の説明を行う¹⁾。実験にはダイヤモンド中の欠陥の一種である窒素空孔欠陥(NV中心)を用いた。その電子はスピンとよぶ状態をもち、1s近く量子状態を保持できると同時に光子の吸収効率も高く、量子通信の中継用量子メモリーとして最適である。電子スピンの|+1〉と|-1〉が、先に説明した量子ビットの2状態に対応する。また、これらの2状態どちらからも光子の吸収で遷移できる第3の状態(A₂)が存在する〈図1〉。

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ときの吸収確率を測定した(図2)。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という量子もつれを導く力である。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るが、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には大きな意義がある。

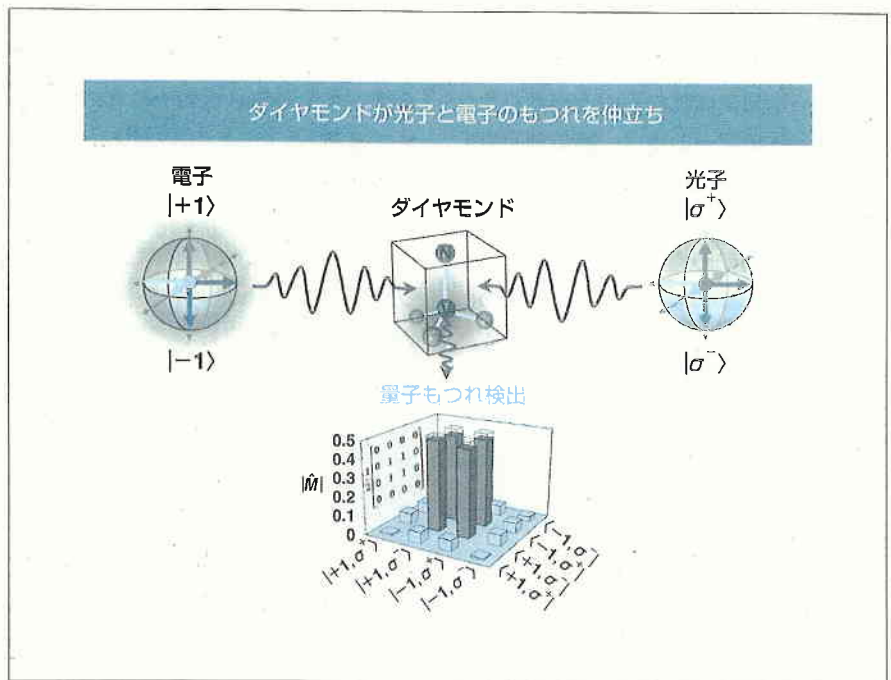
本実験結果は、電子そのもののもつれを力を引き出すことにより、従来の量子中継である「たまたまつながる」確率的中継方式から、「確実につながる」決定的中継方式に転換するための鍵となる。いったん核となるもつれをつくっておけば、あとはただ待つだけで光子の発光と吸収をくり返し、光子が届かないような遠距離にも暗号の鍵となる量子状態を再生できるようになる。情報通信は盗聴だけでなく、さまざまなサイバー攻撃の危機にさらされており社会的問題になっているが、国家的あるいは世界的な規模の量子通信ネットワークを構築できれば、物理法則によって安全性が保証された安心で健全な情報化社会を継続的に発展させることができる。

★ ★ ★

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・



〈図1〉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。



〈図2〉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。

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・水落憲和准教授、東京大学・中村泰信教授との共同研究です。実験を行った新倉菜恵子研究員に感謝いたします。

参考文献
1) H. Kosaka and N. Niikura: *Phy. Rev. Lett.* **114**, 053603 (2015).