

ダイヤモンド中の単一スピン

小坂 英男

宝石の最高峰であるダイヤモンドは、電子デバイスとしても最高峰の性能を示すことがわかってきた。電子のスピンという量子的な性質は、信号の演算や記憶の保持だけでなく光信号とのインターフェースという点でも優れている。ダイヤモンドの特殊な電子状態を利用し、ダイヤモンド中の電子とこれに入射する光子が量子的に“もつれ”している時にだけ吸収させることに成功した。これにより、量子通信や量子計算などの量子情報技術の基本原則となる“量子テレポーテーション”が可能となる。

■自然のもつれの力

ダイヤモンドは周期表で第14族（炭素族）の一番上に位置する炭素で構成される。同族のシリコンは現代の電子デバイスの主役であるが、炭素は全ての生物・有機物の基本構成材料である。物性科学の最近のトレンドの一つは、炭素に電子デバイスとしての特殊な機能を見出すことにある。炭素の素晴らしさは、ダイヤモンド、グラファイト、フラーレン、カーボンナノチューブ、グラフェンなどと多様な形状と特異的な物性をとることにある。これらは3次元、2次元、1次元と整理することができるが、3次元に分類されるダイヤモンドもその中の一つの欠陥（ダイヤモンドを構成する炭素の一つが欠落した空孔）は0次元であり、最も単純でありながらも極めて特異的な性質を示す。あらゆる物質の中で最も硬いダイヤモンドも、欠陥中の電子は光を当てると“柔らかく”なり、この対比がここでは重要な役割を果たす。つまり、結晶の中に強く閉じ込められていた電子に光を当てると軌道の自由度を持ち、もともと持っていたスピンの自由度と強く関連した“量子もつれ”状態を形成する。この量子もつれ状態が、光の構成要素である光子と電気の構成要素である電子の間の量子的な相関関係を見事に仲介するのである。これを量子もつれ検出と呼ぶ。従来の量子もつれ検出は、光子同士をタイミングを合わせて衝突させる方法や、電子同士を近寄らせて同じ箱に入れてみる方法しかなかった。これに対し、私たちが実験に成功した光子と電子の量子もつれ検出は、光子を電子に当てて吸収されるかどうかを判別するだけでよい。ダイヤモンド中に内在する自然のもつれの力を巧みに利用したものである[1]。

■吸収によるもつれ検出

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ある。図1に示した電子の $|+1\rangle$ と $|-1\rangle$ はスピン状態を、光子の $|\sigma^+\rangle$ と $|\sigma^-\rangle$ は偏光状態を表し、それぞれ量子ビットの基底を決める0と1に対応する。電子と光子をさまざまな状態の組み合わせでぶつけた時に吸収される

確率を総当り対戦表の形で表示したのが図1の棒グラフである。真ん中の4つが0.5の確率になっており、その他がほぼゼロとなっていることがわかる。これは、電子と光子が量子的にもつれた状態にあるときにのみ吸収が起こることを示す。

■量子テレポーテーション

この量子もつれ検出を用いた量子テレポーテーションの動作原理を図2に示す。A、B、Cは離れた場所にある3つの電子の状態を示す。いずれの電子も、下にある2つが量子ビットの2状態 ($|+1\rangle$ と $|-1\rangle$) に対応している。この2状態をつなぐ第3の状態 ($|A_2\rangle$) 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 $|A_2\rangle$ に上げると、自然に $|\sigma\rangle$ (あるいは $|\sigma^+\rangle$) 偏光状態の光子を放出 (発光) して電子は $|+1\rangle$ (あるいは $|-1\rangle$) スピン状態になる。これがいわゆる光子と電子の量子もつれ状態である。次に、Aから発光した光子をBにある電子にぶつくと、光子が電子ともつれた状態にあれば吸収される。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、量子スワッピングあるいは量子テレポーテーションと呼ぶ。一旦核となるもつれを作っておけば、光子の発光と吸収を繰り返すだけで、光子が届かないほど遠く離れた電子間にも量子もつれを作ることができる。これは将来の様々な応用につながると期待される。

本実験で得られた知見は、例えば量子通信の距離を光ファイバー伝送の限界である100 km程度から飛躍的に延長するための量子中継器の実現につながる。情報通信は現在、盗聴やサイバー攻撃の危機にさらされており大きな社会的問題になっているが、長距離の量子通信ネットワークを構築できれば、量子力学という物理法則によって安全性が保証された安心な情報化社会を持続的に発展させることができる。炭素の特性を生かした先端的電子デバイスの好例と言える。

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 水落憲和准教授、東京大学 中村泰信教授との共同研究である。実験を行った新倉菜恵子研究員に感謝する。

参考文献

[1] Hideo Kosaka and Naeko Niikura, “Entangled absorption of a single photon with a single spin in diamond”, *Physical Review Letters*, **114**, 053603 (2015).

ダイヤモンドで電子と光子の“もつれ”を検出

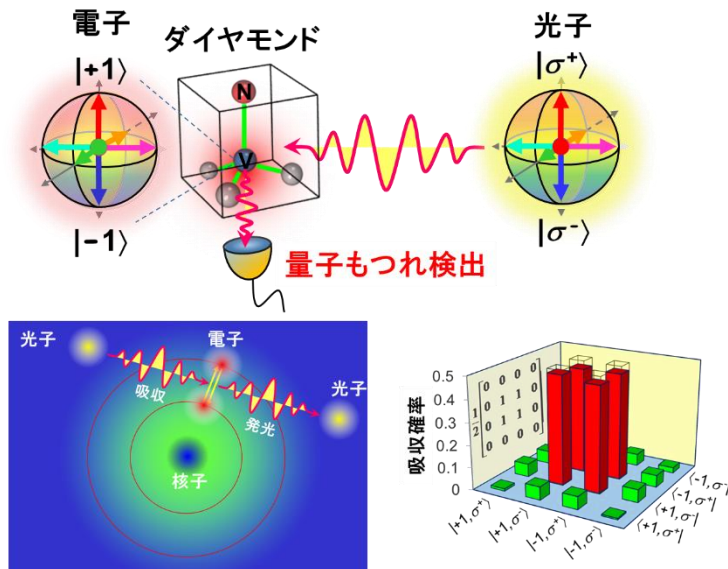


図1 ダイヤモンドを用いた電子と光子の量子もつれ検出実験の概要。ダイヤモンドに内在する量子もつれを利用し、電子と光子の量子もつれを検出。ほぼ完全な量子もつれ検出を実証した。

発光と吸収だけで量子テレポーテーション

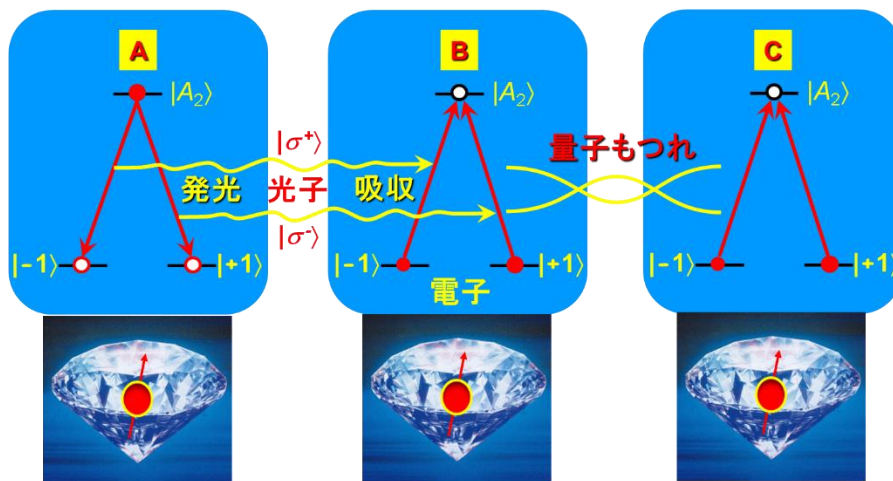


図2 発光と吸収を用いた量子テレポーテーションの動作原理。A,B,C3つのダイヤモンドにそれぞれ電子があり、BとCはあらかじめもつれているとする。Aから発光した光子は、Bに吸収されることでCへ量子テレポーテーションされ、AとCがもつれる。