

量子情報物理と光物性－光子で操る電子と核子の量子もつれ

小坂英男^A

^A横浜国立大学 大学院工学研究院 物理情報工学専攻

Quantum information and optical physics

- A photon steers entanglement between an electron and a nucleon -

Hideo Kosaka^A

^A *Department of Physics, Faculty of Engineering, Yokohama National University*

Abstract

We introduce our experiment on quantum teleportation based quantum state transfer from a photon to a nuclear spin in diamond. We utilize quantum entanglement between an electron and a nucleon in diamond to transfer the polarization state of a photon into the spin state of nucleon to store the quantum state based on the quantum teleportation scheme. The quantum state transfer is triggered or heralded by the absorption of a photon and the stored quantum state in a nucleon, which is not directly interacted with a photon, is maintained as long as more than 10 seconds. It will open a way toward building a long distance quantum communication network, where unconditional security is ensured by the physical principle.

はじめに

本講演では、ダイヤモンドにおける光子、電子、核子の量子もつれを利用し、量子通信に用いる光子を量子メモリーとなるダイヤモンド中に量子テレポーテーションの原理で転写して長時間保存する量子テレポーテーション転写の実験について紹介します。核子と量子もつれ状態にある電子に光子を吸収させるだけで、直接作用しない核子に光子の量子状態を転写し、10秒以上の長時間保存可能なことを示す画期的な実験です。本実験は、量子中継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、光子の量子状態を直接は届かない遥か遠方に高速かつ確実に再生かつ長時間保存できることを示唆するもので、物理法則で絶対的な安全性が保証された量子通信網の飛躍的長距離化・高信頼化に道を開くものと期待されます。

1. 背景

量子情報通信（以下量子通信と呼ぶ）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障する暗号通信技術です。量子でできた暗号鍵を配信（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100km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100km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1000kmの量子通信を行おうとすると、300億年（宇宙年齢の2倍）に1ビットの暗号鍵しか生成できません。この理由は、光子が光ファイバー中で伝送できる距離がおよそ100km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

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を再生する量子中継が不可欠です。量子中継では、一定の間隔で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測定を行います。従来の中継方式では、直接光子が届く区間毎に量子通信を行い、これを接続する中継ノードではいわゆる古典的な中継を行うものでした。しかしながら、この方式では各区間での絶対安全性は確保できるものの、中継ノードでの絶対安全性を保証することはできないという致命的な問題がありました。

2. 量子テレポーテーション転写

我々の考案した手法は、上に述べた従来の古典的な中継手法とは全く異なる完全に量子的な中継方式です。中継ノードは量子メモリとなるダイヤモンド中の核子を持ち、光子の量子状態は電子を介して核子に量子テレポーテーション転写されます。このような量子テレポーテーション転写を各区間で行い、古典測定ではなく量子測定を行うことで、盗聴者には絶対に情報漏えいのない量子中継が可能となります。中継のない量子通信を第一世代量子通信と呼びます(図1)。第二世代は200km程度と比較的短距離であるため一回だけの量子中継で十分であり、確率的量子中継という量子メモリを必要としない中継方式で実現できます。これに対し、第三世代と呼ばれる1000km程度と長距離になると、決定論的量子中継という量子メモリが必要な方式が要求され、これまでは実現の目途が立っていませんでした。本成果で示した量子テレポーテーション転写では、転写が決定論的に行われることから、この第三世代量子中継の実現に一步迫ったと言えます。

量子テレポーテーション転写にはあらかじめ原子内に量子もつれを用意する必要があります。これには物質に内在する量子もつれを利用します。原子を構成する電子と核子のスピンは超微細相互作用という量子もつれを導く力がつながっています(図2)。

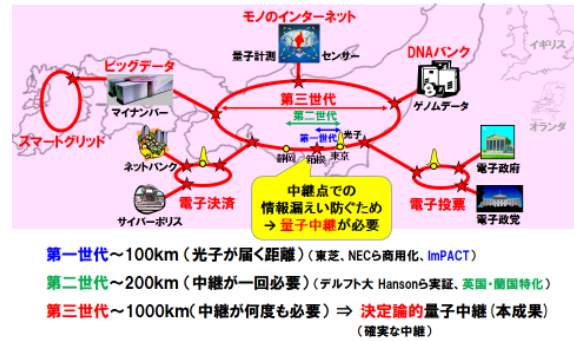


図1 量子通信の現状と本成果の意義。現状の量子通信は100km程度の短距離でしか絶対的安全性は確保できない。本成果により、距離を1000km以上に拡張しても物理法則で絶対安全性が確保された量子通信ネットワークを実用化できる。

我々はマイクロ波やラジオ波でこの量子もつれを純粋化することから始めました。次にこの量子もつれを種とし、先の我々の論文[1]で実証した吸収による量子もつれ検出の応用で光子の量子状態を核子に転写することに成功しました[2]。

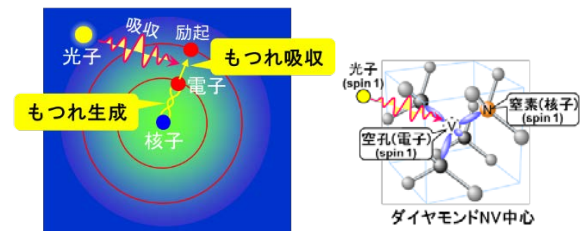


図2 ダイヤモンド内の量子もつれを利用した量子テレポーテーション。あらかじめ電子と核子を量子もつれ状態とし、その後に吸収した光子が電子を特定の軌道に励起した際、光子の量子状態は瞬時に核子に転写される。

3. 動作原理と実験の詳細

量子テレポーテーションの動作原理を図3に示します。あらかじめ量子1と量子2を量子もつれ状態に準備しておきます。本成果ではこれをマイクロ波やラジオ波の照射で実現しています。その後、量子3を量子1に衝突させます。その際に、量子1と量子3が特定の量子もつれ状態にあることを検出した際に、量子3の量子状態が量子2に転写されます。

次に実験の詳細を説明します。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。その窒素核子はスピンをもち、10秒間以上量子状態を保持でき、

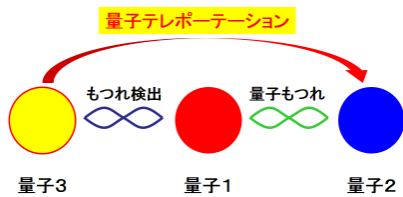


図3 量子テレポーテーションの動作概略。あらかじめ量子1と量子2を量子もつれ状態とする。その後、量子3が量子1と衝突する。量子1と量子3の量子もつれ検出が成功した瞬間に量子3の量子状態が量子2に転写される。

第三世代量子中継に不可欠な量子メモリーとして最適です。量子テレポーテーション転写の量子回路は、図4に示すように①電子と核子の初期化、②電子と核子の量子もつれ生成、③光子と電子の量子もつれ検出の3つの回路ブロックに分けることができます。一見不必要に見える電子を介して光子から核子に量子状態を転写することで、従来は確率的であった転写が決定論的となります。これが決定論的中継を必要とする第三世代量子中継の要素技術となります。

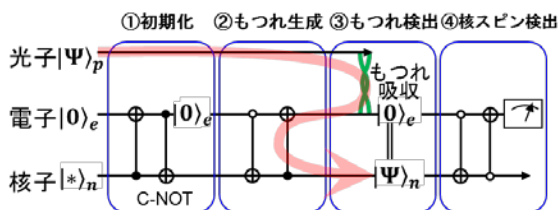


図4 量子テレポーテーション転写の量子回路。量子回路は、①電子と核子の初期化、②電子と核子の量子もつれ生成、③光子と電子の量子もつれ検出の3つの回路ブロックに分けることができる。電子を介して光子の量子状態を核子に転写することで、従来確率的であった転写が決定論的となる。実験では④核スピンの検出を行うことで光子から核子への量子転写の忠実度評価を行っている。

図5に示す実験データは、入射する光子の偏光位相を変えることで転写の忠実度を調べたものです。本実験により光子から核子への量子テレポーテーション転写の忠実度が90%以上であることを実証しました。

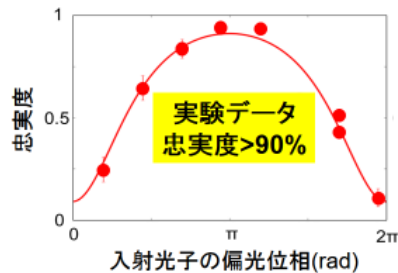


図5 量子テレポーテーション転写の実験データ。入射する光子の偏光位相を変えることで転写の忠実度を調べたものである。90%以上の忠実度を実証した。

4. 量子テレポーテーション中継システム

我々の提案する量子テレポーテーションによる量子中継システムの動作原理を図6に示します。まずは①ダイヤモンド内で局所的な電子と核子の量子もつれを生成します。次に②隣接する量子中継ノードのダイヤモンド NV からの発光による電子と光子の量子もつれ生成と③吸収による光子と電子の量子もつれ検出を行うことで、隣接ノード間に電子と核子の量子もつれを形成します。最後に④ダイヤモンド内で局所的な電子と核子の量子もつれ測定を行うことで送信者側から受信者側に渡る長距離量子もつれを形成します。

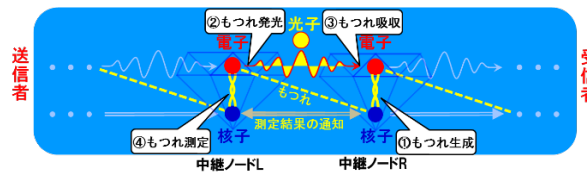


図6 量子テレポーテーション中継システムの動作原理。

5. 幾何学的量子ビット

本研究の基礎となる量子ビットは通常とは異なり、独自に考案した幾何学的量子ビットです。物質中には光子・電子・核子など量子が、相互作用しながら精密に動作する量子ナノシステムが自然に備わります。以下の2点の工夫でこれを制御します(図6)。第一に物質に内在する対称性の破れの利用です。結晶場により分裂した準位(図中の $|0\rangle$)を量子操作のための補助系とし、状態空間と操作空間を分離することで幾何学的量子ビットを構成します。また、光子、電子、核

子全てが $|0\rangle$ に落ちた全真空状態を共通の初期状態として利用します。第二に物質に内在する量子もつれ力(相互作用と選択則)を引き出すための空間反転対称性の回復です。伝送を担う光子が円偏光(スピン1の縮退した $|\pm 1\rangle$ 二準位)を論理量子基底とするように、処理を担う電子も記憶を担う核子もスピン1の縮退した $|\pm 1\rangle$ 二準位を論理量子基底とするべく、磁場を排除して空間反転対称性を上げます。これにより基底状態のエネルギーによる識別が不可能となり、決定論的な量子テレポーテーション転写が可能となるだけでなく、幾何学スピンエコーによる完全な時間反転操作が行え、量子メモリー時間を究極まで延ばせます[3]。

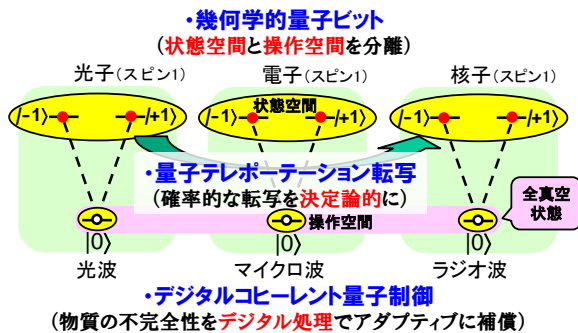


図6 ダイヤモンドに自然に備わる量子ナノシステム。伝送量子の光子偏光、処理量子の電子スピン、メモリー量子の核スピンの幾何学的量子構造。

5. 展望

量子テレポーテーションの準備として量子もつれが必要ですが、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という量子もつれを導く力でつながっています。この量子もつれを種とし、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今後研究を進めます。

6. まとめ

物質に内在する量子もつれを利用した量子テレポーテーションの原理により、従来の量子中

継である確率的な量子中継方式から、決定的な量子中継方式への転換を可能としました。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(24244044)、基盤研究S(16H06326)、新学術領域研究(16H01052)、挑戦的萌芽研究(16K13818)及び光科学技術研究振興財団研究助成の支援のもとに行われました。なお、NICT委託研究は清水薫主 NTT物性科学基礎研究所幹研究員、William Munro 同主幹研究員、根本香絵 国立情報学研究所教授、水落憲和 大阪大学教授、中村泰信 東京大学教授との、基盤研究Sは寺地徳之物質・材料研究機構主幹研究員、水落憲和 京都大学教授、加藤宙光産業技術総合研究所主任研究員、松崎雄一郎 NTT物性科学基礎研究所研究員、堀切智之 横浜国立大学准教授との共同研究です。

参考文献

- [1] Hideo Kosaka, Naeko Niikura, "Entangled Absorption of a Single Photon with a Single Spin in Diamond" *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 053603 (2015).
- [2] Sen Yang, Ya Wang, Thai Hien Tran, S. Ali Momenzadeh, M. Markham, D.J. Twitchen, Rainer Stohr, Philipp Neumann, Hideo Kosaka, and Jorg Wrachtrup, "High fidelity transfer and storage of photon states in a single nuclear spin", *Nature Photonics*, **10**, 507-511 (2016).
- [3] Yuhei Sekiguchi, Yusuke Komura, Shota Mishima, Touta Tanaka, Naeko Niikura and Hideo Kosaka, "Geometric spin echo under zero field", *Nature Communications*, **7**, 11668 (2016).