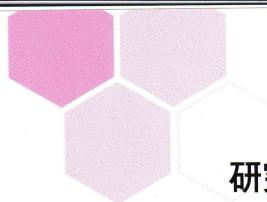


ダイヤモンドを用いた量子情報物理と 量子通信への展開

小坂 英男

応用物理 第83巻 第11号 (2014年) 抜刷



ダイヤモンドを用いた量子情報物理と 量子通信への展開

小坂 英男

量子テレポーテーションに代表される量子情報処理は、固体に内在する量子もつれを巧みに利用することで、発光・吸収といった素朴な現象を通じて容易に実現できる。本稿では、近年脚光を浴びているダイヤモンド中の窒素空孔中心をスピニキューピットとして用い、量子中継など量子情報通信や量子情報処理に応用可能な研究について紹介する。

Keywords: quantum information physics, quantum teleportation, quantum state transfer, quantum communication, quantum repeater, nitrogen vacancy center in diamond

1. まえがき

量子情報処理には量子通信と量子計算の2大テーマがあり、この2つはいわゆる矛盾の関係にある。ここで盾は量子暗号ネットワークである。この盾を破ろうとする盗聴者が量子コンピュータという矛で立ち向かってくる。そこでネットワーク管理者は盗聴者以上の量子計算機の開発能力を有する必要があるといういたちごっここの関係である。技術的にもこれらの間にはかなりの共通点があるが、幸い量子暗号ネットワークの開発が量子コンピュータの開発より先行している。量子暗号通信のことを業界では量子鍵配布（Quantum Key Distribution : QKD）と呼ぶが、2013年には（独）情報通信研究機構の主導で全長100km程度のTokyo QKDネットワークが開発され、運用評価が続けられている。量子暗号通信の利点は通信の安全性を量子力学の原理に基づき物理的に確保できることであるが、残念ながら現在のQKDネットワークは単一光子が光ファイバを伝播できる数百kmに制限され、それ以上の距離では安全性を物理的に確保することができない。そのため現状では量子リレーと呼ぶ古典的な中継で長距離ネットワークを構成する。やはり量子力学の原理に基づいた量子中継器（量子リピータ）を実現しなければ、盗聴者の持つ矛から守られた盾とはとても言えない¹⁾。しかしながら、量子中継器は小規模な量子コンピュータそのもので、その開発はさほど楽なものではない。

2. 量子情報物理の世界動向

2012年に量子情報分野の2名がノーベル物理学賞を受賞

した。フランス高等教育機関（Collège de France）のSerge Haroche博士と米国立標準技術研究所（NIST）のDavid J. Wineland博士で、いずれも光子と真空中の原子やイオンを用いたものである。一方で固体中の量子である超伝導量子、スピニ、励起子、分子なども固体特有の困難と戦ながらも発展してきた。近年の大きな潮流は、これまで個別に発展してきた上記分野間の融合が進み、異種量子間のインターフェース技術に取り組み始めたことだ。量子の扱い手は物（もの）と場（ば）に分かれるが、物の量子が融合するにつれ、場の量子も光波・マイクロ波・ラジオ波と、これまで個別に発展してきた技術領域の融合が進んでいる。この融合はまさに最新技術の粋を結集したもので、物の量子の融合がナノテクノロジー技術の発展に恩恵を受けているのに対して、場の量子の融合は光通信・無線通信・電子スピニ共鳴・核磁気共鳴など成熟した通信計測技術を背景に発展している。学問分野としても、物性と素粒子の両方にまたがる包括的分野となりつつある。量子とは物の特徴ではなく自由度の特徴を示すものなので、物性と素粒子を包括するのは当然である。各国の状況は、米国では国防高等研究計画局（Defence Advanced Research Projects Agency : DARPA）主導で長年にわたって大規模な研究資金が投じられ、ヨーロッパではイギリス、ドイツを中心に各国の研究費だけでなくユーロの資金が共同研究の形で配給されている。最近では中国の発展も目覚ましく、特定の大学を中心に巨大な研究拠点が構築されつつある。

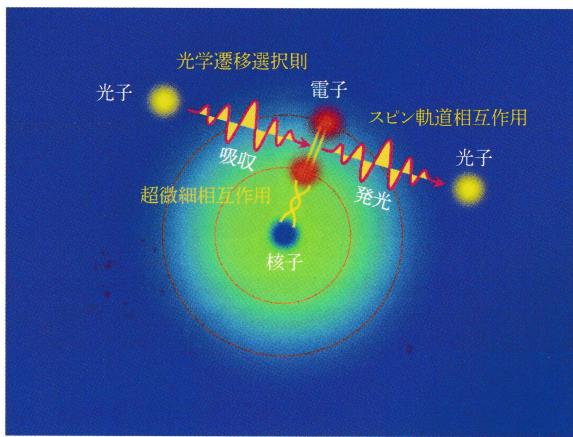


図 1 固体中の原子による光子の吸収・発光の量子モデル。光子の偏光と電子の軌道に働く光学遷移選択則、電子の軌道とスピンに働くスピン軌道相互作用、電子スピンと核スピンに働く超微細相互作用など固体に内在するさまざまな相互作用が原因となり、量子もつれ生成・測定、量子テレポーテーション、量子状態転写などが可能となる。

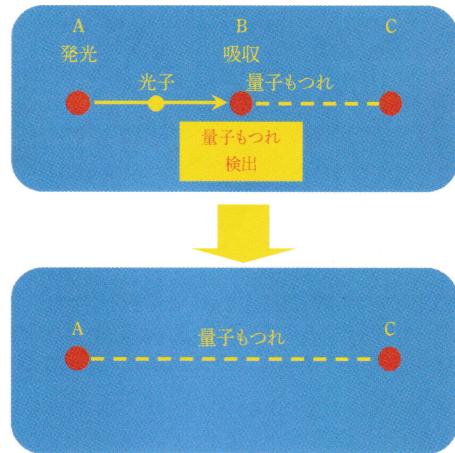


図 2 発光と吸収による量子中継の動作原理。あらかじめ離れた原子 BC 間に量子もつれ状態を準備、原子 A からの発光により原子 A と光子の量子もつれ状態を生成、光子の原子 B への吸収により原子 A と原子 B の量子もつれを検出。結果的に離れた原子 AC 間の量子もつれ状態が生成される。

3. 量子テレポーテーション

さて、量子中継器である量子コンピュータであり、その原理は量子もつれを用いた量子テレポーテーションである。奇をてらったネーミングで難しく聞こえるかも知れないが、原理的にはさほど難しいものではない。量子もつれは物質内ではごく自然に存在し、量子テレポーテーションの原理は図 1 に示すように原子からの発光や吸収を適切に制御し抽出することで可能である。まずはこれらの用語について簡単に説明する。

①量子状態：物質あるいは波動の位相がある程度揃った状態である。量子と粒子を混同してはいけない。量子は粒子とは限らないし、1つの粒子に複数の量子が存在する。つまり量子とは自由度にほかならない。ここでは量子ビット（キューピット）を想定しているが、連続量、位相状態、集団量子などのほかの形態の量子でも同じことである。

②量子もつれ状態：2つの自由度が量子的な相関をもった状態である。2つの粒子に限らず、スピンや軌道といった1つの粒子の自由度間の相関でもよい。量子的な相関とは、固有状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ のどちらかという相関だけでなく、 $|0\rangle + |1\rangle$ と $|0\rangle - |1\rangle$ のような重ね合わせ状態の位相の相関を意味する。 $|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B$ （規格化係数は省略）のような最大もつれ状態は、2量子の純粋状態を意味している²⁾。物質内では電子のスピン軌道相互作用、電子スピン間の交換相互作用、電子スピンと核スピンの超微細相互作用などがもつれ生成の起源となり、光学遷移選択則、磁気双極子遷移選択則などがもつれ生成の資源となる（図 1）。

③量子テレポーテーション：ある自由度の状態を別の自由度の状態に転写することである。名前の由来からすると、2つの自由度間には相当の距離が必要だが、広義では必ずしも距離を必要としない。このような距離のないテレポーテーションを含めて量子状態転写とも呼ぶ。もつれは C-NOT

(Controlled-Not : 制御付き NOT) と呼ぶ量子ゲート操作で $(|0\rangle_A + |1\rangle_A)|0\rangle_B \rightarrow |0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B$ のように生成できるが²⁾、この C-NOT は相互作用のある 2 量子間でエネルギー選択し $|1\rangle_A|0\rangle_B \rightarrow |1\rangle_A|1\rangle_B$ のようにパルス励起することにより容易に実現できる。

4. 量子中継

次に、本題の物性を利用した量子中継器の実現に向けた我々の取り組みについて紹介する。量子中継器は量子テレポーターそのものである。その原理は図 2 に示すように、あらかじめ 2 原子 BC 間にもつれを準備、別の原子 A とのもつれ状態を測定、結果に応じて A の量子状態を C に復元するものである。とても難しいように感じるが、いったん核となるもつれが形成できると、固体中の原子からの光子の発光と吸収の繰り返しによってこのもつれを拡大することができる。ただし、正確な量子中継には特定の条件下にある物質の共鳴発光と共鳴吸収が必要である。その条件とは、スピン縮退、スピン軌道相互作用、光学遷移選択則である。ここでは飛行キューピットとして光子、メモリキューピットとして電子のスピン、補助キューピットとして電子の軌道の自由度を用いる量子中継の例を以下に紹介する。

4.1 ダイヤモンド中のスピニキューピット

これまでさまざまな固体で量子実験をしてきたが、ダイヤモンドはスピニキューピットを扱ううえで絶好の固体である。局在スピンを取り巻くホスト自体が核スピンをもっていない（スピン透明である）ことがまずは重要で、周期表の偶数族がこれに対応する。またホストが余分なイオン性をもっていないことも電子を扱ううえで重要な条件で、4族が残る。さらに、ホストが余分な軌道自由度（フォノン）をもたない、つまり硬いことも重要で、最上位の炭素の中でも最も硬く表面の影響を受けにくいダイヤモンド構造が最適である。このホストの中で、電子

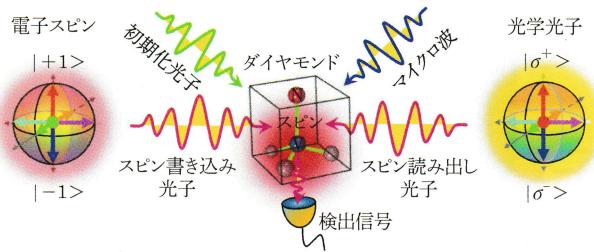


図3 ダイヤモンド中の窒素空孔中心を用いた電子スピンキューピットの量子操作の概念図。初期化光子およびマイクロ波によるスピン初期化、書き込み光子によるスピン書き込み、読み出し光子によるスピン読み出しができる。

がスピンをもち、その位相緩和時間が1秒以上と驚異的に長い窒素空孔 (Nitrogen-Vacancy : NV) 中心は、これ以上望むべくもない量子プラットフォームを提供してくれる。NV中心はダイヤモンドを構成する炭素の1つが置換された窒素と炭素の欠陥が隣接したものである(図1)。さらに、光子・スピン・軌道全てがスピン1の量子系(後述)であり、量子自由度としてこれら全てについて完全に縮退した ± 1 成分だけを利用する点で、学問的にも興味深いものである。これら以外にも、高い忠実度のスピン初期化が光照射で可能であること、高い純粹度で軌道とスピンのもつれた状態が存在することなど、もつれ生成・もつれ測定・テレポーテーションに必要な条件が全て揃っている。環境や生体への負荷が少ない材料であることも重要な要素である。非常に高価なのではないかと心配されるかもしれないが、ここで用いるダイヤモンドはCVD (Chemical Vapor Deposited) 合成された人工ダイヤで、天然のダイヤよりもはるかに高純度で安価である。熱伝導性がよいので、電子部品の基板として使用されているくらいである。NVはイオン注入により人為的に作れるが、今のところ人工ダイヤ中の天然(Native)のNVが最良の特性を示している。

4.2 スピン1の量子系

キューピットは2元の量子なのでスピン1/2に対応するパウリ行列を用いて状態を記述する。これに対してNV中心の電子は3重項と呼ばれるスピン1($s=1$)の量子で、3元スピン行列を必要とする。ところが結晶場のおかげで電子スピンのNV軸方向の成分を表す磁気量子数 m_s が0の状態は $m_s=\pm 1$ の状態に対して十分(ゼロ磁場分裂周波数 $D_0=2.87\text{ GHz}@RT$)低エネルギー側に分離している。このため、10 kHz程度の精度で縮退させた $m_s=\pm 1$ の2準位を擬似的なキューピット基底として見立てることが99.999%以上の精度で許される。このような縮退したスピン1の系には、以下に述べるさまざまな利点がある。
①キューピット基底がエネルギー縮退しているので、量子状態の保存の際に余分な位相回転をしない。
②キューピット基底間の量子数が2つ離れているので、外来スピンによるビットフリップが起こらない。
③位相ノイズに対しても耐性が高い。もちろん $m_s=\pm 1$ なので周囲のスピンなどによる磁場揺らぎの影響は受けるが、 $m_s=0$ を介した幾何

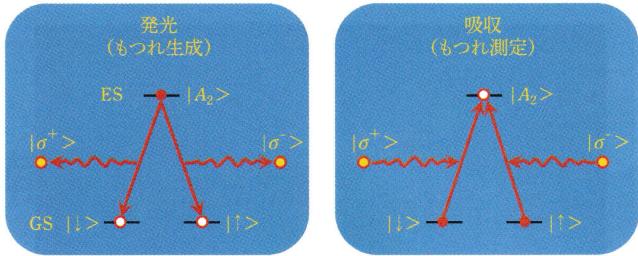


図4 縮退 Λ 型遷移における発光と吸収の過程による量子もつれ生成・測定の概念図。GSは軌道基底状態の電子スピン基底を、ESは軌道励起状態の A_2 準位を示す。矢印は電子スピン状態を、 σ^\pm は光子の円偏光状態を示す。

学的スピンエコーで補正でき、 D_0 以下の周波数のノイズに対して耐性がある。このように磁気的な外乱を受けにくい一方で、マイクロ波による制御性には難があるが、これを補うように光波による制御性に優れている。光子も偏光の自由度はスピン1の量子系であるが、電子スピンが $m_s=0$ を除外できたのと同様に、光子も縦波成分に相当する $m_s=0$ を真空中では無視できて2元系として振る舞う。巨大な D_0 のおかげで光子の偏光は電子の軌道(これもスピン1)に忠実に変換されるが、これまた巨大なスピン軌道相互作用($\sim 3\text{ GHz}$)のおかげで光子の偏光と電子のスピンが間接的に相互作用する。一方、基底状態は軌道成分をもたず電場揺らぎの影響を受けないため、秒を超える長い量子メモリ時間が得られる。

4.3 スpinキューピットの量子制御

量子制御は全てC-NOTと呼ぶ制御付き回転操作で構成できる(ユニバーサルゲートという)とされるが、これだけでは量子は操れない。料理に例えると下ごしらえ・お膳立て・味見に対応する初期化・書き込み・読み出しが重要である。図3にその概要を示した。 $m_s=0$ への初期化は単にグリーンレーザーを照射することで可能になる。次に D_0 と共に鳴るマイクロ波を印加し、 $m_s=\pm 1$ のスピンキューピット基底に移行させる。量子状態の光による書き込み・読み出しへは暗状態(Dark state)、明状態(Bright state)の原理を用いる^{3,4)}。電子スピンの縮退した $m_s=\pm 1$ 状態は、第3の準位とつながることにより、V型や Λ 型の遷移構造を示す。図4の Λ 型を例にとって説明すると、光子の偏光状態に対応する電子スピン状態が明状態、これと直交する状態が暗状態である。光照射により明状態のスピン成分が A_2 励起状態に遷移し、その後1/2の確率で明状態と暗状態に緩和する。明状態は引き続き励起することで再度 A_2 に遷移し、この繰り返しによって暗状態に収束する。たった5回ほどの光子吸収で99%暗状態になる。これを量子光学ではコーヒーレントポピュレーショントランジション、スピントロニクスではスピンドルビング、量子情報では蒸留と呼ぶ。これに対してスピン状態の読み出しへは、明状態遷移そのものによってできる。

さて肝心のC-NOTであるが、実は量子制御にこれ自体が必要なわけではない。C-NOTはもつれ生成ともつれ測定の要素機能として利用され、我々の量子系ではこれらもつれ生成

ともつれ測定が自然に実現できる。図4の左側は励起状態のうち A_2 からの共鳴発光で、光子とスピンの量子もつれ状態が自然に生成される⁵⁾。これとは逆に図4の右側は A_2 への共鳴吸収で光子とスピンの量子もつれ状態が自然に測定される。上記の書き込み・読み出し・もつれ生成・もつれ測定が可能なのは、 A_2 が $|E_+>|-1> + |E_->|+1>$ のように軌道とスピンの NV 軸方向への射影成分が ± 1 となる $|E_{\pm}>$ と $|\pm 1>$ の量子もつれ状態になっているからである。これらを組み合わせることで量子テレポーテーションによる量子中継が実現できる。

4.4 光子を介した量子もつれ

電磁相互作用は（仮想）光子を媒介して働く、といわれる。通常、原子同士は発光や吸収ではもつれ合わないが、上記のような特殊な状況下で共鳴発光と共鳴吸収をやり取りすれば、かなり効率よくもつれ合う。面白いのは、電荷ではなくスピンが、光子の電場成分でもつれ合う（相互作用する）ことである。この逆に電荷（軌道）が光子の磁場成分（マイクロ波光子）でもつれ合うこともあるかもしれない。共鳴発光や共鳴吸収といった共鳴散乱は実部の効果の実光子によりもつれ合うが、カー効果などの非共鳴散乱は虚部の効果のため、実際に発光や吸収をするわけではなく、仮想光子でもつれ合うことができる。

5. むすび

ダイヤモンドを用いた量子情報物理とその量子通信への応用について紹介した。今回は紙幅の関係で実験結果の詳細について触れることができなかったが、ダイヤモンドが固体の中で優等生であること、スピン1のリッチな物理が楽しめるここと、共鳴的な発光や吸収や散乱で自然に量子もつれを生成・測定できることなどを紹介した。

謝 辞

(独)日本学術振興会の基盤研究A、(独)科学技術振興機構(JST)のCREST、総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)、(独)情報通信研究機構(NICT)の委託研究においては研究代表として、内閣府の最先端研究開発支援プログラム(FIRST)(中心研究者:山本喜久)、文部科学省の新学術領域研究DYCE(中心研究者:五神真)では研究分担者として多大の研究支援をいただいた。研究にご協力いただいた多くの方々に感謝する。また、昨年度まで在籍した東北大学電気通信研究所でお世話になった中沢正隆

用語解説

スピン軌道相互作用

電子のスピンと、電子の軌道角運動量との相互作用。スピン軌道相互作用により、縮退していた電子のエネルギー固有値が分裂する。

交換相互作用

電子のような同種フェルミ粒子の間で働く量子力学的な相互作用。スピンの内積に比例する。

超微細相互作用

電子と原子核の間のクーロン力より生じる量子力学的な相互作用。交換相互作用と同様にスピンの内積に比例する。

スピン縮退

異なるスピン状態が同一のエネルギーをもつこと。ここではNVの電子スピンの $m_s = \pm 1$ 状態が同じエネルギーとなるように磁場を完全にゼロとした状態。

核スピン

原子核のもつ磁気モーメント。量子力学では電子スピンと同様に量子化されており、窒素の核スピンは通常1である。

パウリ行列

量子力学においてスピン角運動量を数学的に記述するために使用される行列。

教授、大野英男教授、枝松圭一教授、三森義康准教授、学生諸君、横浜国立大学において研究室の立ち上げに多大のご支援をいただいた河村篤男教授、梅原出教授に感謝する。最後に、ダイヤモンドの研究に熱心に取り組んでいた新倉菜恵子研究員に感謝する。

文 献

- 1) 小坂英男: 応用物理 75, 1335 (2006).
- 2) M.A. Nielsen and I.L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, 2000).
- 3) H. Kosaka *et al.*: Phys. Rev. Lett. 100, 096602 (2008).
- 4) H. Kosaka *et al.*: Nature 457, (2009).
- 5) L. Childress, J.M. Taylor, A.S. Sorensen, and M.D. Lukin: Phys. Rev. Lett. 96, 070504 (2006).

(2014年8月9日 受理)

Profile



小坂 英男 (こさか ひでお)

1989年京都大学理学研究科物理学第一専攻修士課程修了。99年論文博士(工学)。89年日本電気株式会社入社。03年東北大学電気通信研究所准教授。14年横浜国立大学 大学院工学研究院教授。量子情報物理、光物理、量子光学を専門とし、これまで励起子物理、面発光レーザ光機能素子、フォトニクス結晶、量子ドット、量子情報通信、スピントロニクスなど多岐にわたる研究を行ってきた。