

## 世界初、ダイヤモンド中の電子と光子の幾何学的な量子もつれの生成に成功 ～ノイズ耐性のある量子インターネットへの道を拓く～

### 本研究のポイント

- 量子インターネットを実現するためには、遠隔量子もつれを生成し、その量子もつれを様々な量子デバイスに供給する能力をもった量子中継器が必要である。
- 幾何学的な自由度を用いることで、異なる量子系と互換性の高いゼロ磁場でのスピン量子ビットと光子の量子もつれ生成に成功した。
- 幾何学的な性質によりもつれ状態が時間に依存しないため、ノイズ耐性のある量子インターネットへの道を拓く。

### 【研究概要】

横浜国立大学 大学院工学研究院／先端科学高等研究院の小坂 英男 教授、関口 雄平 助教らは、ダイヤモンド中の電子をゼロ磁場環境で制御することで、電子と自然放出される光子の幾何学的な量子もつれ<sup>注1)</sup>の生成に世界で初めて成功しました。

研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV中心）（図1）の電子がゼロ磁場で形成する幾何学的な自由度と、同様に幾何学的な性質をもつ光子の偏光の自由度が、自然放出によって量子もつれを形成することを実証しました（図2）。これによって放出された光子を遠隔ダイヤモンド中の核子に量子テレポーテーション<sup>注2)</sup>の原理で転写することで量子中継<sup>注3)</sup>の鍵となる遠隔量子メモリー<sup>注4)</sup>間の量子もつれを生成することが可能になります（図3）。この手法は、従来必須であった光子の時間、周波数、および空間の精密なモード整合を必要としないためノイズ耐性が高いことに加え、磁場を加えないため超伝導のような異種材料からなる量子デバイスとの互換性にも優れています。

本成果は、量子コンピューター、量子シミュレーター、および量子センサーを含む量子デバイスを量子的につなぐ通信基盤である量子インターネットの要素技術として新たな可能性を開きます。

本研究成果は2021年12月15日（英国時間）に、Nature Researchが発行するCommunications Physicsのオンライン版で公開されます。

### 【研究の背景と経緯】

量子情報テクノロジーの革新により、量子コンピューター、量子暗号通信<sup>注5)</sup>、量子センサーなどの量子情報機器が従来の情報処理では到達できない性能を発揮し始めています。これに並行し、これらの量子情報機器を量子的に接続する量子インターネットの実現が期待されています。個々の量子情報機器は単体で超高速な計算、無条件に安全な情報通信、超高感度な測定を可能にしますが、量子インターネットは、これらアプリケーションの情報処理媒体となる量子系を量子もつれによって拡張してそれらの性能を飛躍的に向上させます。

これを実現するための鍵は、遠隔地間で量子もつれを生成することと、その量子もつれ

を様々な量子デバイスに供給する量子インターフェースの技術です。ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）中心は、1秒を超える長い寿命をもつスピン<sup>注6)</sup>量子メモリーを備え、マイクロ波や光波とも相互作用するため、量子中継を担う物理系として優れた性質をもちます。しかしながら、従来の手法では、NV中心のスピンを制御するために強い磁場を印加しており、異なる量子系との接続が困難でした。例えば、超伝導は、磁場によって超伝導状態が破壊され正常な動作ができなくなります。従来の情報技術と同様に、量子情報技術にもレジスタ、メモリー、伝送などの様々な要素があるため、異なる物質や量子ビット<sup>注7)</sup>間をハイブリッド接続することは実用上でも重要です。従って、超伝導量子ビットやシリコン量子ビットなど異種量子ビット間の互換性を担保するために、ゼロ磁場で動作する遠隔量子もつれ生成の技術の開発が課題となっています。

### 【研究の内容】

研究グループは、ダイヤモンドNV中心に局在する電子スピンの自由度を量子ビットとして用い、同様に偏光と呼ぶ空間の自由度をもつ通信光子の量子ビットとの量子もつれ生成に成功しました。

量子もつれの起源は、電子スピンと軌道に内在するスピン軌道相互作用です。この相互作用によって形成される軌道励起準位の1つでは、スピンと軌道がもつれているため、軌道が自然放出した光子はスピンと自然にもつれることができます。これを量子もつれ発光と呼びます。磁場や電場など余計な外場の無い環境では、励起準位が理想的な状態にあるため、高い忠実度の量子もつれが生成できることが期待されていました。

研究グループは、マイクロ波の偏波自由度を駆使した独自のスピン量子ビット制御技術を用い、量子もつれ発光後のスピン量子ビットと光子量子ビットの量子相関測定を可能にしました。実験では、87%以上の高い忠実度で量子もつれが生成されていることを示しました。これまでの研究では、印加した磁場により量子もつれが時間とともに変化する問題がありました。この従来法で遠隔量子もつれを生成するためには、遠隔地間で精密な時間同期が必要となります。一方、今回示した手法は、幾何学的な空間自由度を利用しているため、量子もつれが時間とともに変化しません。同研究グループが以前に発表した、光子からダイヤモンド中の核子への量子テレポーテーション転写（\*参考情報）を組み合わせれば、従来は必須であった光子の時間、周波数、および空間の精密なモードマッチングを必要としないノイズ耐性のある遠隔量子もつれ生成が可能となります。

さらに研究グループは、電子スピンのマイクロ波と光波の両方からアクセスできる性質を利用し、マイクロ波光子と通信光子の偏光状態の条件付きベル測定<sup>注8)</sup>やマイクロ波光子から通信光子への偏光状態の量子テレポーテーションが可能であることを示しました（図4）。これらの技術を応用すれば、例えば超伝導量子ビットから吐き出されるマイクロ波光子から通信光子という周波数の大きく異なる量子への変換という量子インターフェースの役割を原理的に実現可能です。通信光子はマイクロ波光子に比べてエネルギーが5桁大きく、光ファイバーなどを用いて室温中を伝搬しても量子性が壊れないという利点があります。一方、GHz帯のマイクロ波は、10ミリケルビン程度に冷却しないと量子性が壊れてしまいます。つまり、マイクロ波から通信光子に変換することで、超伝導量子ビットはシリコン量子ビットの量子状態をそのまま光ファイバーなどで伝送し、異種量子ビット間で量子接続し、ハイブリッド量子ネットワークを構成することが可能となります。

### 【今後の展開】

今回、ゼロ磁場の遠隔もつれ生成に必要な要素技術が完成したことから、今後は量子もつれ発光と量子テレポーテーション転写を組み合わせることで、量子中継ノードのシステム実証を行っていきます。

量子中継が実現すると長距離での量子通信が可能になり、世界中でつながる絶対安全な暗号通信や、超高速な分散型量子計算、そして量子計算機を量子通信でネットワーク接続した量子インターネットの実現へ一歩近づきます。

### 【付記】

本研究は、科学技術振興機構（JST）「戦略的創造研究推進事業（CREST）」（課題番号 JPMJCR1773）、JST「ムーンショット型研究開発事業 目標6」（課題番号 JPMJMS2062）、日本学術振興会「科学研究費助成事業」（課題番号20H05661、20K20441）、総務省「ICT重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」（課題番号JPMI00316）の支援を受けました。

### 【参考情報】

プレスリリース 2019年6月27日「世界初、光子からダイヤモンド中の炭素への量子テレポーテーション転写に成功」

<https://www.ynu.ac.jp/hus/koho/22445/detail.html>

<参考図>

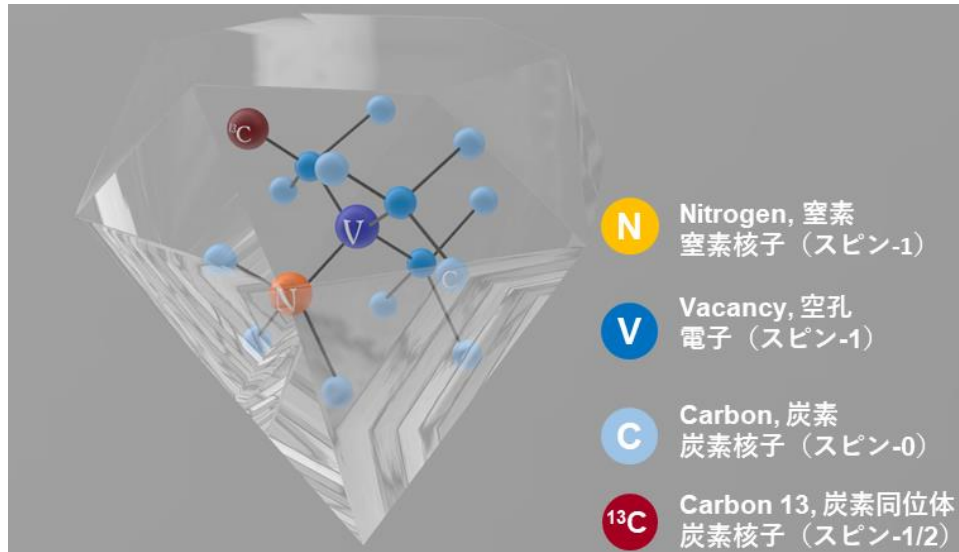


図1 窒素空孔中心 (NV中心)

ダイヤモンドに不純物や格子欠陥が入ると、光学的性質が変わってさまざまな色が着く。この欠陥構造は色中心 (カラーセンター) と呼ばれ、処理条件によって選択的に形成できる。NV中心はその一種で、ダイヤモンド中で炭素原子から置き換わった窒素原子と、炭素原子が1つ欠損した空孔とが隣接した構造をしている。空孔内の電子や窒素原子、炭素同位体原子の核子は特有のスピンと呼ぶ量子的な特性をもち、それぞれ電子スピン、核スピンと呼ばれる。

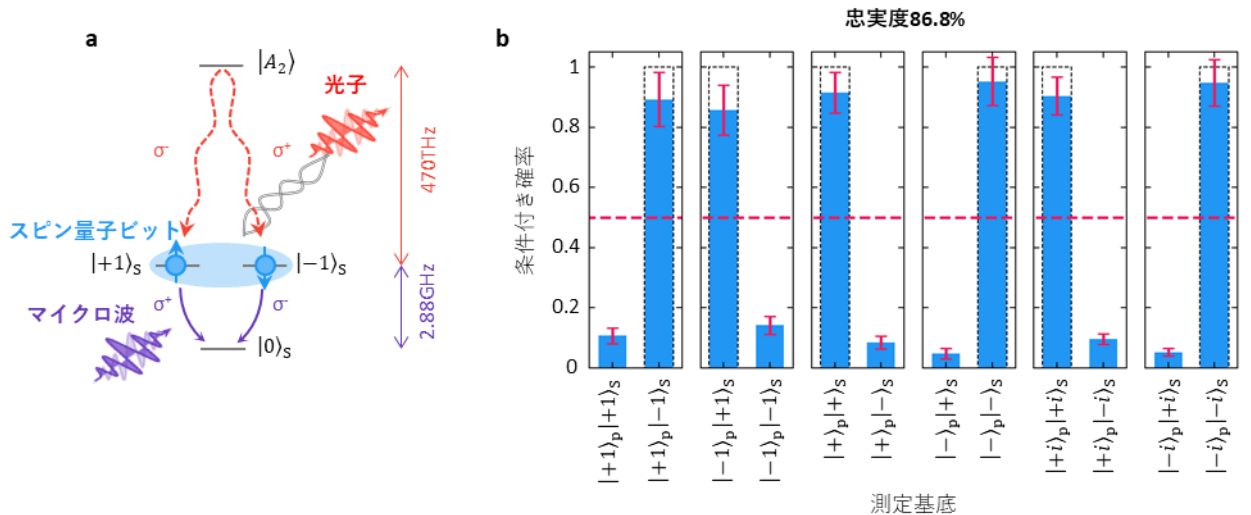


図2 量子もつれ発光と量子相関測定

(a) NV中心の電子準位構造。軌道励起準位の一つである $A_2$ 準位が自然放出する際、放出した光子と残されたスピン状態に量子相関が生じる。スピン量子ビットは、マイクロ波偏波を制御して操作される。(b)光子とスピン量子ビットを同時測定したときの条件付き確率。量子もつれ状態は、理想的には点線で表される相関をもつが、実験結果はこれによく一致する。忠実度は87%を達成した。

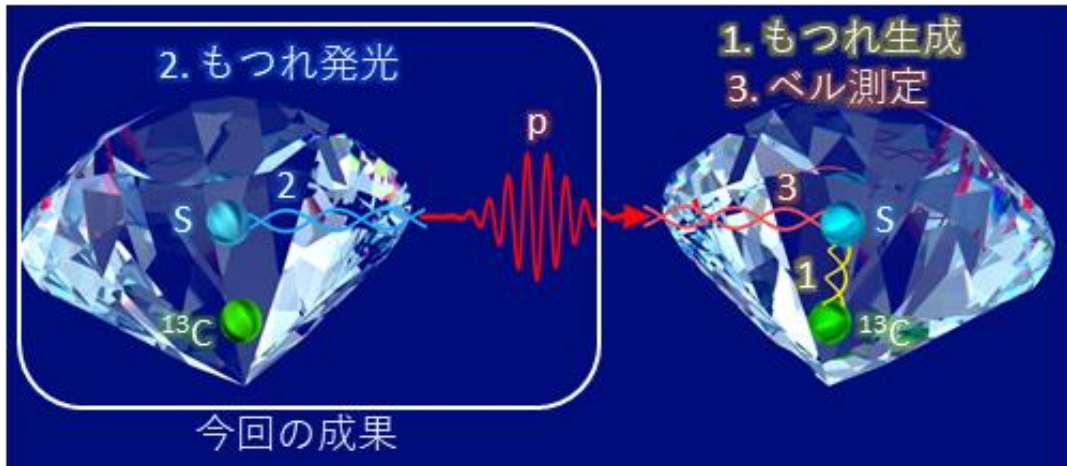


図3 遠隔ダイヤモンド間の量子もつれの生成手順と今回の成果の概念図

遠隔ダイヤモンド間の量子もつれの生成は、3つのステップからなる。(1)光子の受け手側で、光子を転写するための核子( $^{13}\text{C}$ )と電子の量子もつれを用意する。(2)量子もつれ発光によって、電子ともつれた光子を伝送する。(3)伝送された光子と電子のベル測定が成功した場合、光子の情報が核子へテレポーテーション転写される。従って、量子もつれ発光によって生み出された量子もつれが遠隔ダイヤモンド中に形成される。今回の成果は、(2)の要素技術の実証である。

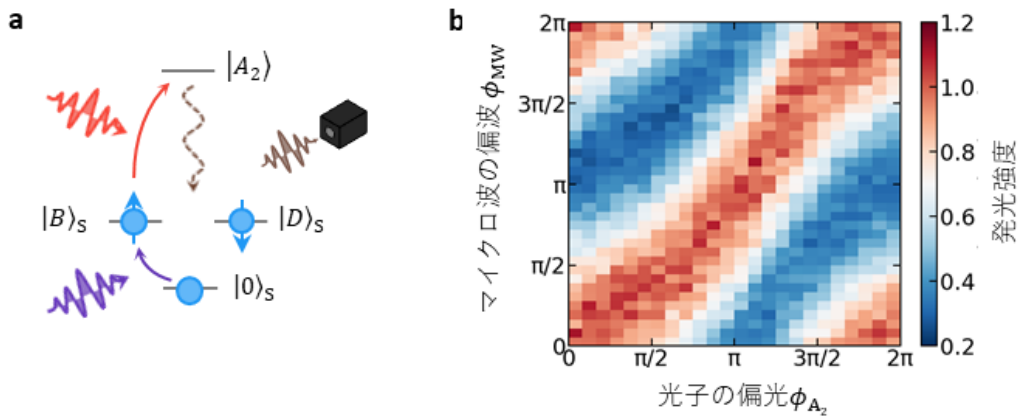


図4 マイクロ波の偏波と光の偏光の相関

(a) NV中心の電子準位構造。スピンの0に準備された状態はマイクロ波の偏波に依存する明状態Bに励起される。次に入射する光の偏光に依存する明状態がマイクロ波の明状態と一致すれば、 $A_2$ 準位へ励起されて発光が検出される。(b) マイクロ波と光の偏光の相関が実験的に観測された。

## <用語解説>

### 注1) 量子もつれ

量子もつれとは、2つの量子の間に量子的な相関がある状態であり、この状態にある2つを別々に記述することはできない。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と一対一に対応する結果を得るもの。代表的なものにベルの4状態というものがある。

### 注2) 量子テレポーテーション

量子テレポーテーションとは、量子情報のある量子から別の量子に転送する手段である。主に3つのステップからなる。

(1) 2量子間の量子もつれを準備する。この時、2量子間の距離は問わない。

(2) 転送したい量子状態(情報)を用意し、量子もつれの片方の量子状態との間のベル測定を行う。

(3) ベル測定の結果に応じて量子もつれの反対側の量子状態に操作を加えると、操作を加えた量子に状態(情報)が転送される。

ここで注意する点は、あくまで量子情報が転送されており、情報媒体となる物質や物理量を転送する訳ではないということである。

### 注3) 量子中継

光子が届かない遠方に量子情報を送るための手段。光は伝達媒体である光ファイバーを透過する際減衰作用を受けるため、光子の伝達成功率は距離に応じて下がってしまう。通常の光通信ではこの減少した光子を通信途上で補完するという中継方法が取られているが、量子通信においては送受信される情報が原理上複製できないことから同様の方法は取れない。ここでいう量子中継とは、これまでの中継とは本質的に異なった、いわゆる量子テレポーテーションを動作原理とする新たな中継方法のことを指している。

### 注4) 量子メモリー

量子情報を長時間保持することができる量子ビット。ダイヤモンドNV中心の電子スピンは1秒以上、核スピンでは1分以上のメモリー時間がこれまでに報告されている。

### 注5) 量子暗号通信

量子状態が複製できないという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ができる。量子鍵配送のイニシャルを取りQKDとも呼ばれる。現在、光子を通信媒体として技術の開発が進んでいる。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6) スピン

こまのような自転回転に例えられる磁気的な性質をもった量子状態。上向き(↑)と下向き(↓)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。NV中心の電子スピンは複数のスピンの組み合わせによって1体のスピンであるかのように振る舞う特殊な状態にある。その結果、単に上向きや下向きといった磁気的

な性質のみならず、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もつ。

#### 注7) 量子ビット

量子コンピューターや量子暗号通信などの量子情報処理における基本単位。通常の計算機ではビットは0か1のどちらかを表すが、量子コンピューターの基本単位となる量子ビットは、0と1の「重ね合わせ状態」を取ることができる。また、この重ね合わせ状態は異なる量子ビット同士で量子的な相関（量子もつれ）をもつことができる。

#### 注8) ベル測定

2つの量子状態に対して個別の測定はせずに、2つの量子状態の相関のみを測定する方法。2量子もつれ状態であるベルの4状態の中の1つに区別する。量子テレポーテーションに欠かせない要素技術。

#### <論文タイトル>

“Geometric entanglement of a photon and spin qubits in diamond”

(光子とダイヤモンド中スピンの幾何学的な量子もつれ)

DOI : 10.1038/s42005-021-00767-1

#### <お問い合わせ先>

##### <研究に関すること>

小坂 英男 (コサカ ヒデオ)

横浜国立大学 大学院工学研究院 教授/先端科学高等研究院 主任研究者 (兼務)

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台7-9-5 総合研究棟S棟306号室

Tel/Fax : 045-339-4196

E-mail : kosaka-hideo-yp[at]ynu.ac.jp

##### <JST事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町7-K's五番町

Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066

E-mail : crest[at]jst.go.jp

#### <報道担当>

横浜国立大学 総務企画部 学長室 広報・渉外係

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台7-9-1

Tel : 045-339-3027 Fax : 045-339-3179

E-mail : [press\[at\]ynu.ac.jp](mailto:press[at]ynu.ac.jp)

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : [jstkoho\[at\]jst.go.jp](mailto:jstkoho[at]jst.go.jp)