

世界初！万能量子コンピュータ実現に道を開く

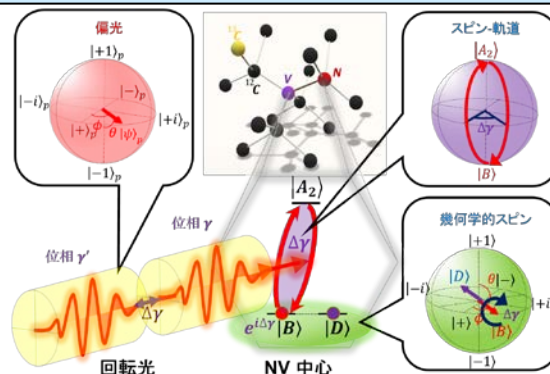
光スピン制御の高効率・高精度化に成功

～量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に～

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と石田直輝（修士課程 2 年）らの研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）に存在する単一電子スピンを位相変調されたレーザー光を用いて、高効率かつ高精度な操作を実証することに、世界で初めて成功しました。電子スピンとレーザー光間のエネルギーを等しくすることで、高忠実度化にネックだった光パルスの矩形波制限を取り払うことに成功しました。

本成果によって、任意波形整形された光パルスを用いてさらに高精度な光スピン操作が可能となります。これによる万能量子コンピュータや量子通信の高速化により量子テクノロジーの実用化を一気に加速します。

本研究成果は、2018 年 5 月 11 日（米国時間）発行の科学雑誌「Optics Letters」に掲載されました。なお、本研究は科学研究費補助金 基盤研究 S（課題番号 16H06326）、基盤研究 A（課題番号 24244044）、新学術領域「ハイブリッド量子科学」（課題番号 16H01052）、文部科学省ポスト「京」萌芽的課題 1「基礎科学のフロンティア—極限への挑戦」、科学技術振興機構（JST）CREST（課題番号 JPMJCR1773）、情報通信研究機構（NICT）高度通信・放送研究開発委託研究の支援のもとに行われました。



<発表雑誌>

雑誌名：Optics Letters Optics Letters, vol. 43, pp. 2380–2383 (2018)

論文題目：Universal holonomic single quantum gates over a geometric spin with phase-modulated polarized light（位相変調された偏光による幾何学的スピンの万能ホロノミック単一量子ゲート）

著者：Naoki Ishida, Takaaki Nakamura, Touta Tanaka, Shota Mishima, Hiroki Kano, Ryota Kuroiwa, Yuhei Sekiguchi and Hideo Kosaka*（石田直輝、中村孝明、田中統太、三島将太、加納浩輝、黒岩良太、関口雄平、小坂英男*）

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 小坂 英男

Tel/Fax:045-339-4196 Email:kosaka-hideo-yp@ynu.ac.jp <http://kosaka-lab.ynu.ac.jp>

万能量子コンピュータ実現に道を開く

光スピン制御の高効率・高精度化に成功

～量子コンピュータや量子通信の高速化を可能に～

<研究背景>

原子や電子、光子などのミクロな物質では量子力学という物理学が支配しています。これらのミクロな粒子、すなわち量子の持つ性質を積極的に利用した情報処理が量子情報処理です。量子情報処理には、たとえば、現在のコンピュータとは全く異なる計算原理に基づく量子コンピュータや、完全に安全な盗聴検出を可能にする量子暗号通信があります。この量子情報処理を実現させる量子系として、ダイヤモンドに内在する電子スピン^[註1]が近年注目されています。ダイヤモンド中の電子スピンは情報の保持と集積化の観点で優れていることが知られており、ダイヤモンドに集積配列された電子スピンを量子制御するためには、スピン一つ一つを個別に、自在に、正確に制御する技術が求められます。レーザ光の局所電場を利用することで電子スピンの個別アクセスが可能ですが、これまでに提案、実証されている制御手法では、制御パラメータが多く、またパルス波形が単純な矩形波に制限されてしまうという問題がありました。

<今回の成果>

横浜国立大学大学院工学研究院の小坂英男教授と石田直輝（修士課程 2 年）らの研究グループは、ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）に捕獲された単一電子スピンをレーザ光を用いて、高効率かつ高精度な操作の実証に成功しました(図 1)。これまでは、電子スピンとレーザ光の間にエネルギー差をつけて、電子スピンの任意操作を行っていました。しかし、この方法では電子スピンの制御に用いる光パルスが矩形波に制限されてしまうという問題がありました。本研究ではエネルギー差の代わりに光の位相自由度を利用することでこの問題を解決し、実験で実証しました(図 2)。今後、任意波形整形された光パルスを用いれば、集積化されたマルチスピン系の複雑なダイナミクスまでも考慮した、高精度なスピン制御の実現が期待されます。本成果によって、万能量子コンピュータや量子通信の高速化をもたらし、今後の量子情報実験を加速させることが期待されます。

<動作原理と実験内容>

本来、レーザ光により生じる電場は、磁気的な性質を持つ電子スピンとは直接相互作用しませんが、電気的な性質を持つ電子軌道^[註1]とは相互作用するため、スピン・軌道相互作用

を利用して電子スピンを間接的に制御する必要があります。また、我々が用いた量子ビット^[注2]は基底間にエネルギー差を持たない縮退量子ビットであるため、補助的なエネルギー準位を利用したホロミック^[注3]な量子制御を行いました。これにより、操作エラーやノイズに耐性のある量子制御が可能となりました。

＜今後の展開＞

本成果によって、集積化された複数のスピン系がもたらす複雑なダイナミクスまでも考慮した、高精度な光スピン制御が実現する可能性を示しました。これらの技術を利用し、量子もつれ生成や測定、量子テレポーテーションといった発展的な量子情報技術の実証へ応用を進めていきます。

＜総括＞

量子ビットの基底間や、または量子ビットとレーザー光の間のエネルギー差というパラメータをなくすことで、量子ビットが勝手に状態を変えてしまう原因である動的位相^[注4]を完全に排除することに成功しました。さらに、これまでマイクロ波やラジオ波で培われてきた波形整形技術を光にも適用する事で、レーザー光の局所性と任意波形パルスによるノイズ耐性を内包した、堅牢な量子制御の実現が期待されます。

＜謝辞＞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究 S (課題番号 16H06326)、基盤研究 A(課題番号 24244044)、新学術領域「ハイブリッド量子科学」(課題番号 16H01052)、文部科学省ポスト「京」萌芽的課題 1「基礎科学のフロンティアー極限への挑戦」、科学技術振興機構 (JST) CREST (課題番号 JPMJCR1773)、情報通信研究機構 (NICT) 高度通信・放送研究開発委託研究の支援のもとに行われました。なお、基盤研究 S は京都大学化学研究所 水落憲和教授および物質・材料研究機構 寺地徳之主幹研究員と、CREST は産業技術総合研究所 加藤宙光主任研究員および物質・材料研究機構 寺地徳之主幹研究員との共同研究です。

<添付資料>

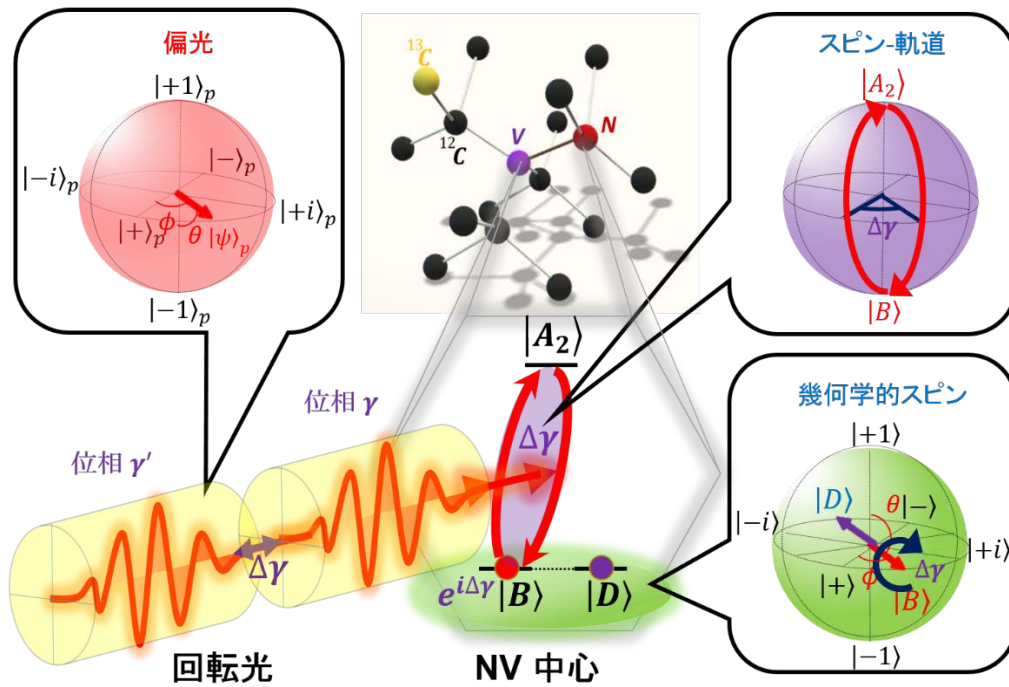


図1：ダイヤモンド中の窒素空孔中心（NV 中心）とレーザー光による電子スピノ制御の概略図

ダイヤモンド中の炭素が窒素と空孔に置換されたものを NV 中心と呼びます。空孔には電子スピノが局在しています。レーザー光は集光できるため、狙った電子スピノだけを選択的に制御することができます。

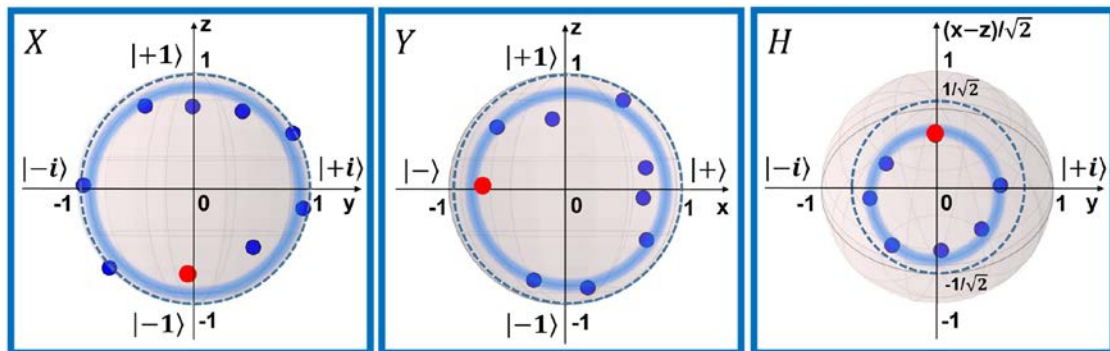


図2：光による電子スピノ幾何学回転の軌跡を光による電子スピノ状態トモグラフィ測定によって可視化

電子スピノを $-z$ 、 $-x$ 、 $+z$ 状態に初期化（赤点）した後、それぞれ x 、 y 、 $(x+z)/\sqrt{2}$ を軸として回転した状態の x 、 y 、 z 成分を読み出し、再構成しています。プロット点はスピノの方向を表しています。球面上の点は純粋な（量子性を保持した）状態を示しており、原点に近づくほど不定な（量子性が失われた）状態を意味します。

<用語解説>

注1) 電子スピンと電子軌道

電子の自転運動に例えられる量子状態を電子スピンと呼び、電子の公転運動に例えられる量子状態を電子軌道と呼ぶ。電子スピンは磁気的な性質をもつのに対し、電子軌道は電気的な性質をもつ。

注2) 量子ビット

量子情報における最小単位のこと。量子力学的な二準位系の状態ベクトルで表される。

注3) ホロノミック

曲率をもつ平面内をベクトルが平行移動で巡回したときに、ベクトルの向きが元に戻らない性質。量子力学的なホロノミーを幾何学位相と呼ぶことができる。

注4) 動的位相

量子状態がもつエネルギーによって回る位相のこと。