

NEWS LETTER Vol. 05

2011年11月18日

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究（領域提案型）
領域代表者／独立行政法人 理化学研究所
蔡 兆申（ツァイ ツァオシェン）

QUANTUM CYBERNETICS

量子サイバネティクス

[量子制御の融合的研究と量子計算への展開]

<http://www.riken.jp/Qcybernetics/index.html>



QUANTUM
CYBERNETICS

目次

文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究
「量子サイバネティクス — 量子制御の融合的研究と量子計算への展開」

研究項目

<超電導系>	研究代表者: 蔡 兆申 独立行政法人理化学研究所	2
<半導体系>	研究代表者: 都倉 康弘 NTT 物性科学基礎研究所	3
<分子スピン系>	研究代表者: 北川 勝浩 大阪大学	4
<冷却原子系>	研究代表者: 高橋 義朗 京都大学	5
<イオントラップ系>	研究代表者: 占部 伸二 大阪大学	6
<光子量子回路系I>	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	7
<光子量子回路系II>	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	8

2010年度公募研究採択課題

<量子サイバネティクスにおける量子推定理論の新たな展開>	研究代表者: 藤原 彰夫 大阪大学	9
<量子ドット超伝導体の混合量子系における量子コヒーレンス理論>	研究代表者: 森 道康 日本原子力研究開発機構	10
<単一NV中心における多量子ビット化へ向けた研究>	研究代表者: 水落 憲和 大阪大学	11
<異種g因子2重量子ドットを用いた電子スピン・核スピン制御の研究>	研究代表者: 大野 圭司 独立行政法人理化学研究所	12

<研究項目A： 固体素子系量子サイバネティクス>

計画研究 A01： 超伝導量子サイバネティクスの研究

研究代表者 / 蔡 兆申 (独立行政法人 理化学研究所チームリーダー)

コヒーレント量子位相スリップ ジョセフソン効果と完全に共役な効果

ジョセフソン効果と完全に量子力学的に共役なコヒーレント量子位相スリップ(CQPS)効果の研究を進めている。これは磁束が細い超伝導細線をコヒーレントにトンネルして横切り現象であり、近年その存在が理論的に予言されていた。そのトンネル確率は $\sin(2\pi\phi/q\Phi_0)$ に比例し、この場合、 ϕ は細線両端の電荷の差である。これはジョセフソン効果での電流が $\sin(\pi\phi/q\Phi_0)$ に比例する現象に共役に対応している (ϕ はジョセフソン接合両端での巨視的量子波動関数の位相差)。したがって CQPS を利用すると、これまで開発されたジョセフソン効果を使った量子電圧標準や量子磁束系(SQUID)と完全に共役な、量子電流標準や量子電荷系の実現が期待される。これは単電子トンネル効果を使った電流ポンプや電荷系とは似て異なるものである。

我々は CQPS 効果の観測を目指し、様々の種類の超伝導薄膜を使った実験を行っている。

最近、細線構造を含む超伝導ループの分光実験で、我々は CQPS 効果の証拠を初めてつかんだと考えている。

計画研究 A02:半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究

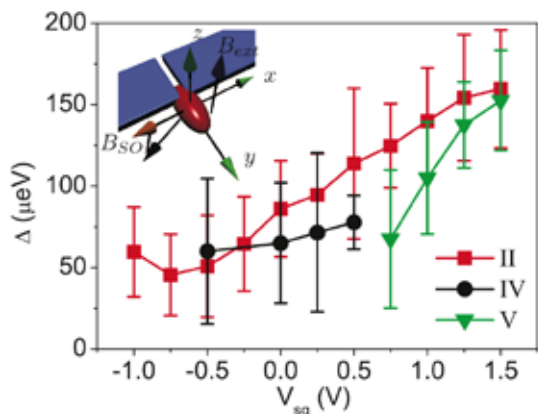
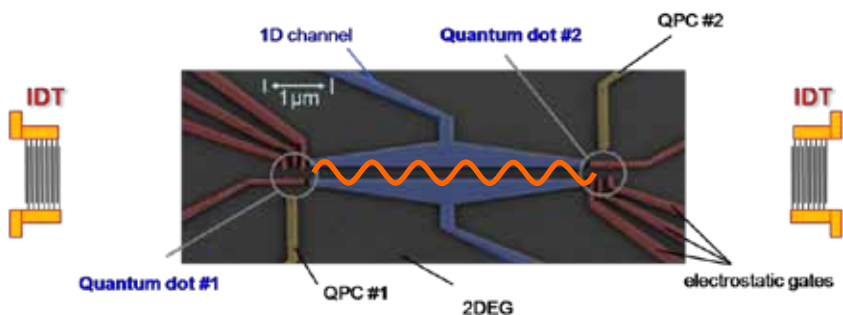
研究代表者 / 都倉 康弘 (NTT物性科学基礎研究所・部長)

GaAs 半導体基板の上にインターディジタルトランスデューサー(IDT)を取り付け、ここに高周波電圧を印加することにより表面弾性波(SAW)を発生させる技術を立ち上げた。この SAW を空乏化した量子細線に照射し、細線電流が量子化される様子を観察することにより、SAW と共に静電ポテンシャルの波が各波に 1 個の電子を捉えて伝播していることを確認した。その上で、SAWを用いて、量子ドット中の単一電子を一次元導波路を通して別の量子ドットへ移送する技術の開発に成功した。これは、導波路を介して量子ドット間を結ぶ量子ネットワークを形成する際に基盤となる技術である。[1]

InAs 量子ドットにソース・ドレイン電極を結合し、その間を流れるトンネル電流の微分コンダクタンスを測定する事によりスピン・軌道相互作用(SOI)の大きさを精密に評価した。さらに近傍に配置したサイドゲートにより SOI の大きさが大きく変調可能である事を初めて実証した。電子スピンの振動電場による高速なコヒーレント制御は SOI を大きくして可能となる一方、長いスピン位相緩和時間が必要な場合には SOI を最小にすれば良い。[2]

[1] S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A.D. Wieck, L. Saminadayar, C. Bäuerle, and T. Meunier, Nature, 477, 435 (2011)

[2] Y. Kanai, R.S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, Nature Nanotechnology, 6, pp511-516 (2011).



図上 導波路で結合された二つの量子ドット間を単一電子が表面弾性波により運ばれる
 図下 ソースドレインに挟まれた InAs 量子ドット(内挿図)のスピン軌道相互作用の大きさのサイドゲート依存性

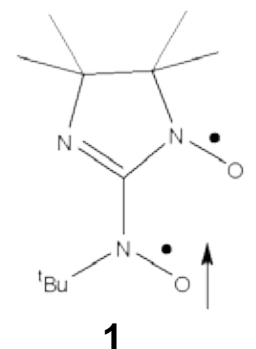
<研究項目 B: 分子スピン量子サイバネティクス>

計画研究 B01: 分子スピン量子制御

研究代表者 / 北川 勝浩 (大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)

超伝導量子ビットと結合可能な有機分子スピン三重項量子ビット系

最近、ruby ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) やダイヤモンド N-V センターの常磁性中心と結合させた超伝導巨視的量子ビット系の実験が報告され、超伝導量子ビットでの演算と常磁性中心アンサンブル系でのメモリーの可能性がホットな話題として議論されている[1-3]。今回、人工合成可能な電子スピン量子ビットリソースとして、マイクロ波などの電磁波照射に対しても robust で、上記の hybridization に適したゼロ磁場分裂テンソル(D テンソル)を有する有機分子スピン1を設計・合成した。有機三重項分子スピンの形成する結晶構造をX線構造解析で明らかにし、Dテンソル及びgテンソルを実験及び理論によって定量的に明らかにした。分子スピン1は、イミノニトロキシドラジカル骨格にニトロキシドラジカルを直接導入したもので、これまで報告されてきた類似分子スピンのうちで、ゼロ磁場分裂定数(D値)が2番目に大きな基底三重項有機分子である($D = -0.0639 \text{ cm}^{-1}$)。この値は、 -1.92 GHz に相当する。研究グループで開発した、スピン - 軌道相互作用の寄与を考慮した量子化学計算法によって、系1のDテンソル、gテンソルなど理論を計算したところ、実験値を再現した。系1のスピン物性はすべて明らかにされたので、hybridization の実験を試みる



ことができると思われる。

- [1] D.I. Schuster, A.P. Sears, E. Ginossar, L. DiCarlo, L. Frunzio, J.J.L. Morton, H. Wu, G.A.D. Briggs, B.B. Buckley, D.D. Awschalom, and R.J. Schoelkopf, *Phys. Rev. Lett.* 2010, 105, 140501.
- [2] Y. Kubo, F.R. Ong, P. Bertet, D. Vion, V. Jacques, D. Zheng, A. Dreau, J.-F. Roch, A. Auffeves, F. Jelezko, J. Wrachtrup, M.F. Barthe, P. Bergonzo, and D. Esteve, *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105, 140502.
- [3] X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W.J. Munro, Y. Tokura, M.S. Evertitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba, *Nature*, 2011, 478, 221-224.
- [4] S. Suzuki, T. Furui, M. Kuratsu, M. Kozaki, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, and K. Okada, *J. Am. Chem. Soc.* 2010, 132, 15908-15910.

<研究項目C:原子イオン系量子サイバネティクス>

計画研究 C01:冷却原子を用いた量子制御

研究代表者 / 高橋 義朗(京都大学大学院・教授・原子物理学)

本研究では、レーザー冷却された中性原子を光格子に導入した系を用いた量子計算や量子シミュレーション、量子計測、および核スピン集団を用いた量子フィードバック等の量子系の制御技術の開発を目指している。研究の進捗状況は以下の通りである。

まず、光格子を用いた量子計算機実現にむけた研究では、薄型ガラスセル領域にて生成したイッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮体を、3次元光格子に導入し、超流動-モット絶縁体転移を高分解能分光により詳しく調べることが成功していたが、その詳細を理論と比較することにより、これが量子臨界点近傍の振る舞いの研究に大いに有効であることを見出した。また、1格子点に2個および3個の原子が存在するサイトの分光結果をいわゆる confinement-induced resonance の形式に則り解析し、フェッシュバハ共鳴とは異なる新しいメカニズムによる磁場による原子相互作用の制御法に相当することを見出した。また、これがユニバーサルな3体束縛状態に対する重要な知見を与えうることを見出した。

また、光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション研究において、スピン自由度に由来する冷却法であるポマンチュク冷却について、 $SU(6)$ と $SU(2)$ の系を同じイッテルビウム原子系で準備し、直接比較して、スピン自由度の大きさによる違いを初めて実証することに成功した。

また、核スピン集団の量子フィードバック制御を行い、測定過程を用いながら、決定論的にスクイーズドスピン状態を生成することに成功していたが、フィードバック制御を多数回施すことにも成功し、量子トラジェクトリの観測を可能にした。さらに、この過程が、量子版のマックスウェルの悪魔に対応することを見出した。

計画研究 C02: 開放型イオントラップ系による量子情報処理
研究代表者 / 占部 伸二 (大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)

開放型イオントラップ系による量子情報処理

前回のニュースレターで報告した4準位系を用いた幾何学的位相量子ゲートの新たな実験を行った。前回は量子ビット準位としては、それほど一般的でないカルシウムイオンの準安定状態の副準位を用いていたが、今回はこれを、イオンを用いた量子情報処理の実験においては広く用いられている光遷移量子ビットを用いるかたちに拡張した。このため、関与する3つの遷移のうち一つにはRF遷移を用いる形でゲート操作を行う。ブロッホ球面上のXおよびZ回転ゲートを行い、光遷移のみを用いた場合と同様に、様々な回転角に対して可視度0.9 前回報告した4準位系を用いた幾何学的位相量子ゲートにおいては、量子ビット準位としては、それほど一般的でないカルシウムイオンの準安定状態の副準位を用いていた。今回これを、イオンを用いた量子情報処理の実験においては広く用いられている光遷移量子ビットを用いるかたちに拡張した。このため、関与する3つの遷移のうち一つにはRF遷移を用いる形でゲート操作を行う。ブロッホ球面上のXおよびZ回転ゲートを行い、光遷移のみを用いた場合と同様に、様々な回転角に対して可視度0.9程度で占有数が振動する様子が観測された。さらに、類似した物理系を用い、複数イオンのRF光子をドレスした状態とエンタングリング相互作用を組み合わせることにより、RF量子ビットに直接エンタングル状態を生成する方法の実現可能性を検討した。

<研究項目D：光系量子サイバネティクス>

計画研究 D01：光子量子回路による量子サイバネティクスの実現

研究代表者 / 竹内 繁樹（北海道大学電子科学研究所・教授）

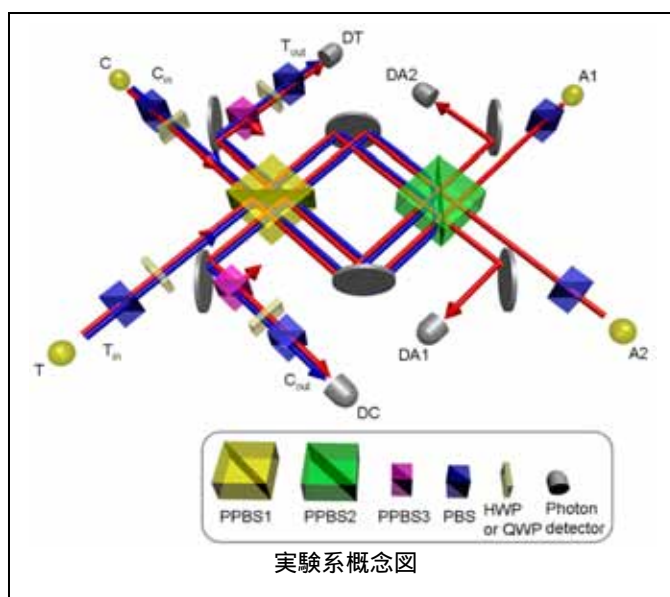
光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

これまで光を用いた量子情報科学の研究では、2つの光子を相互作用させる方法の実現が大きな課題の一つでした。これに対し、米国およびオーストラリアのグループ(Knill, Laflamme, Milburn)は、半透鏡で生じる量子干渉を利用して、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」が実現できること、またそのようなスイッチを組み合わせることで、光量子コンピュータが実現できることを示しました。この提案は大変注目されましたが、半透鏡上での光子間の良質な量子干渉が必要となること、また異なる光の経路を、百万分の1メートルの精度で一致させる必要があるなど、その技術的な困難さから、提案後 10 年間実現されていませんでした。

私たちは、光子源の改良や、独自に開発した特殊な半透鏡、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現しました(図)。その結果として、Knill らの提案した、光量子コンピュータの基本となる光量子回路を実現することに、初めて成功しました。得られた平均ゲート忠実度は 0.82 と、十分高い量子性を示しました。今回実現した制御ノットゲートは、オンデマンドもつれ合い光源や、もつれ合いの純化に使うことができます。また、巨大光非線形性を組み合わせた光量子回路は制御ノットゲート以外にも、量子情報処理、通信、センシングに幅広い応用が期待できます。

この研究は英国・ブリストル大学のオブライアン・ジェレミ教授、広島大学のホフマン・ホルガ准教授らと共同で行われました。

- [1] R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, S. Takeuchi, Proc. Natl. Acad. Sci. 108, 10067 (2011).

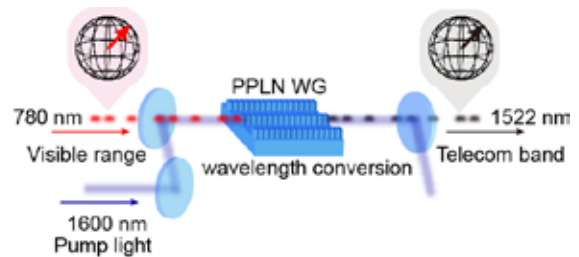


計画研究 D02: 光を基軸とした多キュービット量子制御

研究代表者 / 小芦 雅斗 (東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究センター・教授)

通信波長帯光子に量子情報を受け渡す量子インターフェースの実現

量子情報の情報処理や保存を行う技術の多くは、情報の運び手である光と結び付ける際に、可視光領域にある特定の波長を用いなければならない。一方、長距離量子通信には、光ファイバの損失が小さい近赤外領域の通信波長帯の光子が不可欠であるため、異なる波長領域をまたいで量子情報を変換する量子インターフェースが重要となる。我々は、光非線形結晶における



差周波発生を用いて周波数の下方変換を行う量子インターフェースを構築し、波長 780nm のピコ秒単一光子を 1522nm の光子に変換する実験を行った。変換された光の強度相関測定によって、入力単一光子の持つ非古典光としての性質が変換後も保たれていることを確認した。さらに、入力光子が別の光子と量子もつれを持つ状態を準備したうえで下方変換を行い、波長変換後も量子もつれが残っていることが確認できた。これは、我々の量子インターフェースにおいて、異なる波長の光子に量子情報が確かに受け渡されていることを示している。疑似位相整合を用いた差周波発生では、入力光の波長を広範囲の可視波長から選択可能であり、帯域幅も広くとれる利点があるため、我々の量子インターフェースは長距離量子通信の実現に向けて有用な技術であると考えている。

<2010年度公募研究採択課題>

研究課題 :量子サイバネティクスにおける量子推定理論の新たな展開
研究代表者 / 藤原 彰夫(大阪大学理学研究科・教授)

我々は、適応的最尤推定法の強一致性および漸近有効性(J. Phys. A: Math. Gen., **39**(2006) 12489)を検証する目的で、竹内グループ(北大/阪大)と共同で光子の偏光方向の推定実験を行っている。前回のNews Letter で報告した実験計画に基づき、真のパラメタ値 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 78.3^\circ$ に対する適応的推定実験が竹内グループで行われ、そこで得られたデータに対する詳細な統計解析を行った。その結果、光子数 $n = 300$ の段階で、推定値の分布が理論的に予測される正規分布に十分収束していることが 2 検定で確認できた。引き続きパラメタの期待値と分散の区間推定を行ったところ、分散については、いずれのパラメタ値においても理論値と良い一致を見たが、期待値については、推定値が真値から $\pm 0.17 \sim \pm 0.43^\circ$ の範囲でずれていた。信頼水準99% の信頼区間はいずれも $\pm 0.1^\circ$ より狭いので、この結果は実験系における何らかの系統誤差の存在を示唆しており、現在、この問題解決に向けて検討を進めている。

研究課題：量子ドットと超伝導体の混合量子系における量子コヒーレンス理論
研究代表者 / 森 道康 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構・副主任研究員)

本計画では、電子スピンと超伝導体秩序変数の位相との結合から生まれる量子状態について、高感度伝磁気測定などへ応用することも念頭に置き研究を進めてきた。この観点で、超伝導体と強磁性体の接合(強磁性ジョセフソン接合)は、磁気ランダムアクセスメモリー(MRAM)で用いられる磁壁運動の測定にも応用が可能であり、かつ量子ドットとの類似性もあるため、重要な研究対象の一つだと位置づけられる。超伝導体の量子コヒーレンスが現れる電流電圧特性を記述するために、ジョセフソン電流、抵抗、コンデンサーからなる等価回路モデルは有効である。これまで、単一磁区の強磁性体を考え、強磁性共鳴が階段状の電流・電圧特性を与えることを示した^[1]。この階段状の構造は、電子スピンと超伝導体の位相のコヒーレントな運動から生じ、各々の緩和が電流・電圧特性に与える変化は異なる^[2]。一方で、MRAMでは強磁性体中の磁壁をメモリーとして用いることが考えられており、それを高精度に制御することが重要である。しかし、電流や磁場で駆動された磁壁の運動は複雑であり^[3]、高精度で観測する手段が必要である。そのため、これまでの結果を、図1に示すような磁壁を含んだ超伝導と強磁性体の接合に拡張することを試みた。磁壁構造を簡単なモデルで記述することにより、超伝導電流に対する解析的表式を得ることが出来た^[4]。現在は、その解析的表式を等価回路モデルに適用し、数値的に電圧に対する運動方程式を解き、磁壁の運動が電流電圧特性にどのような条件で特徴的構造を作り出すかを調べている。そして、残りの期間で、量子ドットの場合について、帯電効果も含め、スピンと超伝導のコヒーレンスを制御・観測する可能性を探る。

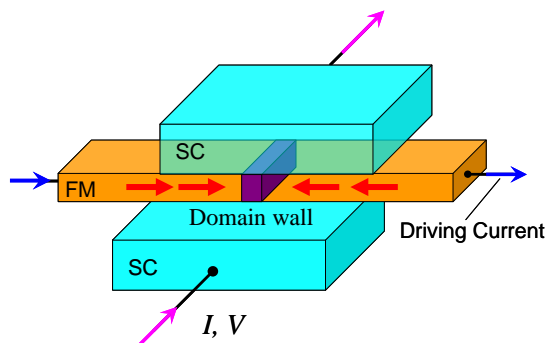


図1

- [1] S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, Supercond. Sci. Technol. 24, 024008 (2011).
- [2] S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, J. Phys. Soc. Jpn, 80, 074707 (2011).
- [3] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, Science 320, 190 (2008).
- [4] M. Mori, S. Hikino, W. Koshibae, and S. Maekawa, in preparation.

研究課題：単一NV中心における多量子ビット化へ向けた研究

研究代表者 / 水落 憲和 (大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻・准教授)

本研究ではダイヤモンド中の NV 中心を用いた多量子ビット化へ向けた研究を行っている。NV 中心の持つスピンは固体中のものとしては優れたスピンコヒーレンス特性を持つ。共焦点レーザー掃引顕微鏡と磁気共鳴装置を組み合わせたシステムを用いることにより、その単一スピンの操作と光学検出を室温で行うことができ、有力な量子ビット系として期待されている。

最近 NTT 物性科学基礎研究所と国立情報学研究所と我々 (大阪大学) の共同研究で超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド中の電子スピン集団とのコヒーレントな結合を実証する研究を行い、成果を論文発表した[1]。これはダイヤモンド中の NV 中心の約 3 千万個のスピン集団と超伝導量子ビットを組み合わせるハイブリッド系の量子状態を作り、2つの異なる巨視的な物質間に量子もつれ状態を生成することに成功したものである。まさに異種量子がコヒーレントに結合した新規な混合量子系の実現といえる。

今回の研究成果を応用することにより、操作性に優れる反面非常に壊れやすい超伝導量子ビットの量子状態を、NV 中心ダイヤモンドのスピン状態に保存することが可能になる。長時間安定した量子メモリーは、超伝導量子ビットで量子レジスタを作る要の技術の一つであるため、今回の結果は量子情報処理の実現へ向けた道を拓くものと期待される。

[1] X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, K. Semba, "Coherent coupling of a superconducting flux-qubit to an electron spin ensemble in diamond" *Nature*, 478, 221-224 (2011).

研究課題 :異種g因子2重量子ドットを用いた電子スピン・核スピン制御の研究
研究代表者 /大野 圭司 (理化学研究所研究員)

3 電子スピンのブロッケードの実現

これまで本研究ではスピンのブロッケード(SB)をドット内核スピンの偏極および検出に用いてきた。SB 状態とはソース電極-ドット -ドット -ドレイン電極、からなる 2 重ドット系において、各ドットに1つずつ局在する電子のスピンがひとたび平行(スピン 3 重項)状態になると、そのスピン状態が変わらない限りソース・ドレイン電流が流れなくなる現象である。電流が生ずるためにはドット 1 にいる電子が一旦ドット 2 に移らなければならない、このときドット 1 にいる 2 つの電子のスピンはパウリ排他率により互いに反平行(スピン 1 重項)でなければならない。各ドットに1つずつ局在するスピンが反平行である場合にはドット 1 の電子はドレイン電極へ抜けることができるが、その後再びソース電極からドット 1 へ注入されるスピンの向きはランダムであるため、遅かれ早かれ各ドットの電子スピンは平行状態になりその後の伝導が止まることになる。

これは、たった 2 つのスピンではあるものの、従来とは異なるユニークなスピン偏極状態の生成方法であるといえる。例えば一般的な強磁性状態はフント則等の電子間相互作用によって生成され、光ポンピングやスピン注入によるスピン偏極状態は外界からの角運動量注入によって生成されるのに対し、SB 状態では(スピン無偏極の)電子の流れの一部において必要なスピンを捕獲し、不要なスピンを逃がすことで局所的な“強磁性”を作り出している。この“取捨選択による強磁性”を 2 より多い任意の個数の電子で実現することは原理的には可能だが、そのためには電子と同じ数のよく制御された多重直列量子ドットが必要となる。今回2重ドットにおいてドット 1 の2つの異なる軌道準位を用いることで、3つサイトを占める3つの電子スピンの取捨選択強磁性を実現した。3つの電子スピンが揃った(4重項)状態における核スピンの効果も見つかっており現在解析を進めている。