

NEWS LETTER

Vol. 03

2010年12月20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	-----	5
〈光子量子回路系 I〉研究代表者：竹内 繁樹	北海道大学	-----	6
〈光子量子回路系 II〉研究代表者：小芦 雅斗	大阪大学	-----	7

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〉	-----	8
研究代表者：藤原 彰夫 大阪大学		
〈縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現〉	-----	8
研究代表者：上妻 幹男 東京工業大学		
〈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〉	-----	9
研究代表者：森 道康 日本原子力研究開発機構		
〈単一NV中心における多量子ビット化へ向けた研究〉	-----	9
研究代表者：水落 憲和 大阪大学		
〈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〉	-----	10
研究代表者：大野 圭司 独立行政法人理化学研究所		

<研究項目A: 固体素子系量子サイバネティクス>

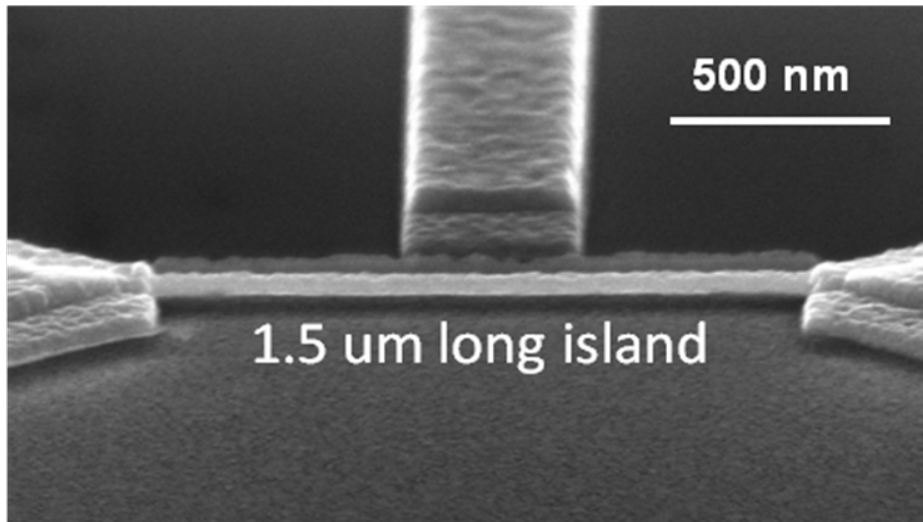
計画研究 A01: 超伝導量子サイバネティクスの研究

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)

微小な機械的共振器の研究成果

我々は超伝導量子ビットと微小な機械的共振器を組み合わせた系の研究を進めている。このような系は顕著に巨視的な機械振動のモードを、量子コヒーレントに状態操作する可能性を秘めている。今季はこの方面の研究成果をいくつか紹介する。

アルミ薄膜より構成される単電子トランジスタの島電極が、機械的共振器となる構造を作成し、その特性を評価した[1]。下図はその電子顕微鏡写真である。ジョセフソントンネル接合は、中に浮いた島電極の両端に作られている。島電極の下と横にはそれぞれゲート電極が設けられている。



機械振動はゲート電圧の変化を生ずるので、単電子トランジスタを流れる電流に変調を起こす。我々は DC 輸送特性を解析することで、機械振動の周波数特性を解析する簡便な実験方法を考案した。

損失は量子コヒーレンスを破壊する要因である故重要な研究課題である。我々は微小な多結晶質のアルミ機械的共振器の振動の減衰を調べた[2]。共振周波数と共振の急峻さ(Q ファクター)の温度特性(0.1K~4K)を入念に評価した。1K 以下で、共振周波数の対数的温度依存性と、線形な損失の温度依存性が観測された。このような現象は既存の理論では説明できず、新たに量子2準位系と結合したモデルを提唱した。2 準位系は共振器中の1次元フォノンと結合している推測できる。

[1] *"Detection of mechanical resonance of a single electron transistor by dc current"*

Applied Physics Letters, 96, 263513, 2010

[2] *"Damping in high-frequency metallic nanomechanical resonators"*

Physical Review B81, 184112, 2010

3スピン量子ビット系の実装を目指した3重量子ドットデバイス

量子ドット中の電子スピンは量子ビットを構成する上で有力な系である。本研究では、微小磁石を用いた傾斜磁場法で将来的に3スピン量子ビット系を実装することを目指し、必要な磁場プロファイルを満たす微小磁石の設計および対応する横型3重量子ドットの作製と評価を行った。

傾斜磁場法では、面内方向に外部磁場を印加し、さらに微小磁石からの漏れ磁場中で高周波電場によって電子の波動関数を空間的に振動させることで、電子スピンに対して実効的な面直交流磁場を与える。これによって1ビット操作に対応する電子スピン共鳴が可能となる。また微小磁石の形状を工夫することで各ドットに対して異なる漏れ磁場面内成分を与え、異なる共鳴周波数で任意のドットを操作することができる。

微小磁石を設計する際の要請としては、第一に全ての隣接するドットに対して十分なゼーマン分離エネルギー差を与えることが挙げられる。横型量子ドットの作製に広く用いられている GaAs 系半導体では、電子スピンに対する有効静磁場は多数の核スピンの統計揺らぎによる変動成分を含んでいるため、各ドットに対して異なった共鳴周波数を実現するために前述の条件を満たす必要がある。第二の要請は全てのドットにおいて十分な傾斜磁場強度を確保することである。傾斜磁場強度は電子スピンのラビ周波数に比例するため、高速な1ビット操作を行うにはより大きな傾斜磁場が望ましい。

以上を踏まえ、本研究では3重量子ドットに対して個別に電子スピン共鳴を実現可能な微小磁石対を設計した。また、同様の設計の微小磁石対で25ビット程度まで系の拡張が可能であることを示した。さらに微小磁石と組み合わせることが可能な横型3重量子ドットを作製し、希釈冷凍機中で電気伝導測定を行った結果、3重量子ドットの形成を確認した。今後は横型3重量子ドットと設計した微小磁石を組み合わせ、3量子ビットの動作確認を行っていく予定である。

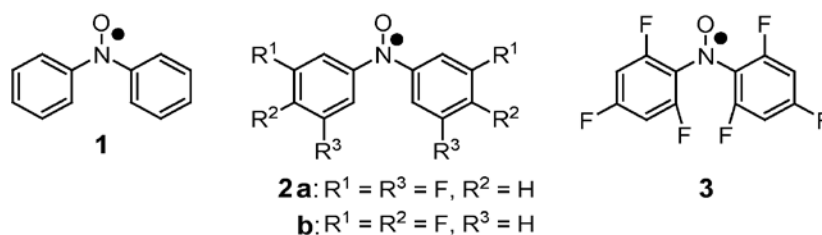
<研究項目 B: 分子スピン量子サイバネティクス>

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)

(Client Qubit 数を増大した分子スピンバス量子サイバネティクス系の探索)

分子スピン系は、自然が与えた電子スピンと核スピンの混在する系であるが、分子を構成する核上電子スピン密度分布は、分子構造の群論的な対称性及び π 共役電子網のトポロジータ的な対称性によって決まる。分子スピンバス系において、核スピン ($I \neq 0$) を client qubit として活用するためには、(1) 核スピンの well-defined qubit であること、すなわち構成核スピンの化学的に同定されていること、その超微細結合テンソル (あるいは超微細結合定数) が決定されていること、(2) ラジオ波などのパルス電磁場によって核スピンの容易な回転ができること、(3) 新規な物質開発であっても、これまで蓄積された合成化学技術が比較的容易に適用できること、(4) 天然存在比が大きな核スピンであること、(5) 溶液状態でのバス系のデコヒーレンス時間を長くもつために、分子全体及び局所構造及びサイズが制御できることなどが、分子設計上鍵となる。これらの 5 つの課題を解決し、client qubit 数をできるだけ多くもつ synthetic electron-spin bus 系を開発するために、tailor-made 的な合成が可能となる分子骨格を探索した結果、diphenylnitroxide (DPNO) **1** (図中の分子 **1**) を選択した。2010 年度 3/4 後半期では、DPNO 骨格に、上記 (2)–(4) の条件を満足する核スピンとして ^{19}F 核を選び、骨格に導入した誘導体 (新規物質) を合成し、 g 因子、超微細構造定数の大きさ及び符号を、電子スピン-核スピン二重・三重共鳴法によって決定した。上記 (1) に関連して、誘導体の電子構造・分子構造とスピンハミルトニアンパラメータとの相関は、量子化学計算によって検討した。今回 client qubit として同定した誘導体 **2a**、**2b**、**3** を、図に示す。その結果、等方的な媒体中では、無置換体 DPNO **1** は 3-client qubit 系、 ^{19}F 核メタ置換体 **2a** は **1** と同様に 3-client qubit 系、 ^{19}F 核オルト・パラ置換体 **2b** は 6-client qubit 系、 ^{19}F 核オルト・メタ・パラ置換体 **3** は 4-client qubit 系となることが分かった。この結果は、長い間通説とされてきた超微細結合定数の予想とは異なり、開殻系分子設計に新しい指針を与えるものである。



〈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、原子間相互作用によるスペクトルの広がりを抑えるために3次元光格子に導入することに成功した。実際、狭線幅な光学遷移を用いて励起スペクトルを測定することにも成功し、レーザー線幅で決まる鋭いスペクトルを得ることに成功した。また、1格子点に2個の原子が存在するサイトを分光した結果、単一のサイトからの共鳴から大きくシフトしたスペクトルを得ることができた。これから、原子間相互作用に関する直接的な情報を得ることができた。

また、光格子中の冷却原子を用いたハバードモデルの量子シミュレーション研究にむけて、イッテルビウム原子の二つのフェルミ粒子の混合系をフェルミ縮退領域まで冷却することができた。特に、この系は、二つのフェルミ粒子はスピン $5/2$ と $1/2$ をもち、しかもそれが核スピン由来であるため、 $SU(6) \times SU(2)$ という高いスピン対称性を有するものであり、特異な磁性を発現する可能性があるということで大いに注目されている。この研究は、Physical Review Letters **105**, 190401(2010)に出版されると同時に Editor's Suggestion に選ばれたほか、AIP の Viewpoint で、"Exotic many-body physics with large-spin Fermi gasses" として、Congjun Wu 博士により2ページにわたり紹介された (Physics **3**, 92(2010))。

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)

開放型プレーナートラップにおいて、従来型のトラップに適用されてきた手法では検出できないイオンの余剰な運動を高感度に検出する方法を開発しました。余剰な運動があるとイオンは十分に冷却されず振動量子状態を思うように制御できなくなるため、高感度に検出して原因となる浮遊電場を打ち消すような電場を加え補正する必要があります。プレーナートラップでは、従来の手法が適用できないという問題がありましたが、トラップポテンシャルを変調してレーザー光の進行方向に関係なく垂直方向の運動を検出する方法を提案し、この方法で電場の補正が可能なことを実験で示しました。

これまで原子のエンタングル状態生成において用いられてきた手法は、パルス幅や強度などのパラメータに敏感に依存するものでしたが、断熱的手法を用いるとパラメータの変化に敏感に依存しないというロバスト性が期待されます。今回これを実験により初めて示しました。2個のイオンのディッケ状態の生成に用いる光パルスの幅や最大ラビ周波数を変えた実験を行い、フィデリティの変化が10%以内にとどまっていること、また分離不可能条件が常に満たされて、イオンがエンタングルしていたことが確かめられました。イオンを用いた自然放出の影響のない量子情報処理の実現にむけて、RF磁場を用いたゲート実験を行い、1個のイオンの内部および振動状態を用いた Cirac-Zoller ゲートのデモンストレーションを行いました。また、スピン依存力を発生する Molmer-Sorensen 法を用いて、2個のイオンのエンタングル状態生成実験を行い、忠実度 0.76 で Bell 状態の生成に成功しました。

〈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。

今回、本計画班研究代表者の竹内教授、ならびに英国ブリストル大学オブライアン・ジェレミ(O'Brien Jeremy)教授が共同で、その「光子を用いた量子情報科学技術-マイクロな領域を支配する基本物理原理である量子力学を利用した新技術の開発」に対し、2010 年大和エイドリアン賞を受賞いたしました。本賞は、英国王立協会フェローからなる審査委員会による選考により、日本と英国のグループによる顕著な共同研究業績に対して贈られます。今回は本共同研究を含む 6 件の日英間共同研究グループに対し、2010 年 12 月 2 日に英国王立協会において授与されました。

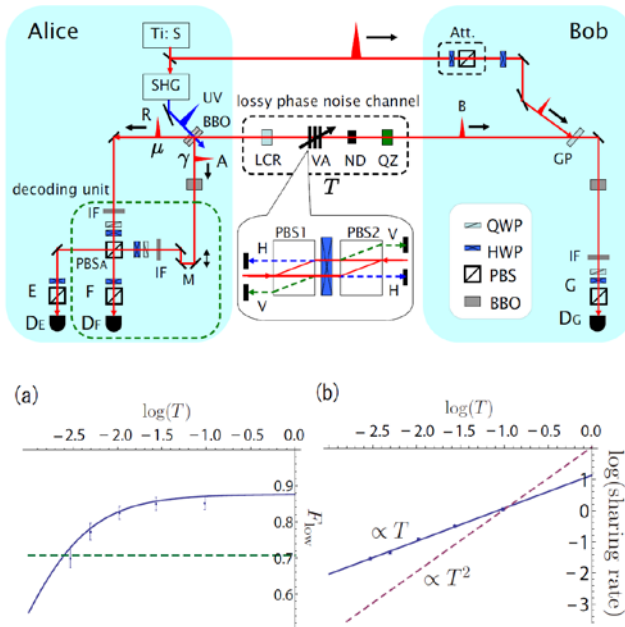
竹内教授は、2001 年豪州クィーンズランド大学に短期滞在時にオブライアン教授と知り合い、以来親交を深めました。オブライアン教授は 2006 年にブリストル大学に移動、現在はヨーロッパを代表する量子情報科学技術の研究者であり、現在ブリストル大学量子フォトニクスセンターセンター長を務めています。この受賞が、本新学術領域研究のさらなる飛躍に繋がるとともに、ブリストル大学を初めとする英国科学界と本新学術領域研究の交流の輪が広がる機会となると期待されます。



英国王立協会における授賞式での写真。左から竹内教授、エイドアン卿夫人、オブライアン教授。

計画研究 D02:光を基軸とした多キュビット量子制御
 研究代表者／小芦 雅斗（大阪大学・基礎工学研究科・准教授）

量子通信の様々なタスクを行うには、遠く離れた場所に量子もつれを配信することが必要であり、雑音のある現実的な量子通信路での配信技術が重要となる。ゆっくり変化する雑音に対しては、量子情報を複数の光子に書き込むことで利用できるデコヒーレンスフリー部分空間(DFS)を用いた保護法が知られている。しかし、透過率 T の通信路で n 個の光子の DFS を利用すると、全ての光子が届く必要性から効率が $O(T^n)$ で低下してしまう欠点がある。我々は、2光子DFSを用いながら、効率を $O(T^2)$ から $O(T)$ に改善する新しい手法を提案し、実証実験を行った。この手法では、量子もつれ状態の持つ対称性を利用して、雑音を被った光子を実効的に入れ替えることにより、単一光子をより損失に強いコヒーレント状態に置き換えることを可能にしている。その結果、忠実度 ~ 0.8 で透過率に比例した成功確率を達成することに成功した。



<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)

量子推定理論とは、測定を介して観測者が物理系から取り出せる情報の限界を非可換統計学の観点から研究する分野である。我々は最近、量子パラメータ推定理論の観点から、量子トモグラフィーによる2順位量子状態の推定効率について研究した。この結果、トモグラフィーが最適な推定方式を与えるのは、各パラメータ方向に対し、物理的に極めて不自然な重みを用いて分散・共分散行列を評価したときかつそのときに限ることを証明した。(quant-ph:1010.3813)

研究課題 :縮退イッテルビウム原子集団を用いたクラスター量子計算の実現
研究代表者 / 上妻 幹男(東京工業大学大学院理工学研究科・准教授)

本公募研究において我々は、以下の5つの方針にもとづき、クラスター量子計算を実現することを目指していく。

- 1.電子スピンの2000倍のコヒーレンス時間をもつ核スピンを qubit として起用する。具体的には、 ^{171}Yb の基底状態がもつ $1/2$ 核スピンを対象とする。
2. Qubit となる Yb 原子集団を、対物レンズ表面、約 $1\ \mu\text{m}$ の平面内にアレイ状に配列する。ソリッドイマージョン効果を利用した高分解能蛍光顕微技術により、量子ビットの配列状況の精査を可能にする。
3. 通常は原子時計にしか用いられない禁制遷移を利用した「核スピン依存光トラップ」という新しい機構によって、演算に必要なクラスター状態を生成する。ポテンシャルの実時間操作は、空間位相変調器を用いて実現する。
4. クラスター計算成功の鍵は、高い量子効率をもって個々のスピンを射影測定することができるか否かにかかっている。微小光共振器を用いた Cavity QED 技術を駆使して、高速、かつ高効率の射影測定を実現する。具体的には、光格子中の特定の原子を $^3\text{P}_2$ 準安定状態に励起し、 $^3\text{D}_3$ 準位との間の許容遷移を利用して Cavity QED を行うことで、放出レートが増強された蛍光を μs のオーダーで観察し、射影測定を実現する

我々は、これまでの研究を通して、単一 Yb 原子がもつ核スピンの量子状態を測定し、さらに自在に制御する技術を構築してきた。具体的には、バイアス磁場を用いた単一核スピンの射影測定[3]、単一光子をアンシラとして用いた測定強度の制御 [4]、微小光共振器内における数秒に及ぶ単一 Yb 原子トラップ、0.98 以上の Fidelity をもつ量子トモグラフィー[5]、Two-mode cavity QED による単一核スピン射影測定[6] などである。これらの技術をもとに、2次元光格子中の Yb 原子を用いたクラスター量子計算の実現を目指していく。

[1] R. Raussendorf and H. J. Briegel, Phys. Rev. Lett. **86**, 5188 (2001).

[2] O. Mandel et al., Nature (London) **425**, 937 (2003).

[3] M. Takeuchi et al., Phys. Rev. A **81**, 062308 (2010).

[4] N. Takei et al., Phys. Rev. A **81**, 042331 (2010).

[5] A. Noguchi et al., arXiv: 1005.3584 (2010).

[6] Y. Eto et al., arXiv: 1012.1724 (2010).

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)

ジョセフソン接合にマイクロ波を照射すると、シャピロステップと呼ばれる階段状の電流電圧特性が得られる。ステップが現われる電圧は、外部から与えたマイクロ波の周波数と普遍定数($\hbar/2e$)で結ばれているため、電圧がマイクロ波の周波数のみで決まることになる。マイクロ波の周波数が高精度で制御可能なため、電圧も驚異的な精度で規定することができる。このことを利用して世界の電圧標準が定められている。

本研究では、量子ドットと超伝導体の混合量子系を、量子コンピューター素子や量子標準の原理へ応用することを目指している。特に、量子ドット内における電子のスピンの状態と超伝導体の位相との結合から生まれる量子状態の活用が重要だと考えている。そのため、超伝導体を強磁性体で隔てた「強磁性ジョセフソン接合」の研究が有用である。強磁性ジョセフソン接合は量子コンピューター素子への応用も提案されている。以前、強磁性ジョセフソン接合に交流磁場を加えた系において階段状の電流電圧特性が得られることを見出した^[1]。この場合は、上述のシャピロステップとは異なり、電圧ステップが強磁性共鳴周波数のみによって与えられるため、磁性に関する新たな量子標準の原理となりうる。スピン状態と超伝導体の位相を活用するためにも、外場の下での量子コヒーレンスの研究が不可欠である。

今回、強磁性ジョセフソン接合内に誘起される電磁場とスピン波との複合励起状態を見出した^[2]。ジョセフソン接合に直流電圧を印加すると交流ジョセフソン電流が流れ、接合内に電磁場が誘起される。接合は共振器として振舞い、共振モードと交流ジョセフソン電流の周波数が一致するとき、各共振モードに対してジョセフソン電流の直流成分が現れる。この現象は Fiske 共鳴と呼ばれている。今回得られた結果は、通常の Fiske 共鳴とは異なり、接合内に励起された各共振モードに対して、複数の共鳴状態が現れる。交流ジョセフソン電流によって接合内に励起された電磁場が磁化に作用し、スピン波が励起されたためである。そして、電磁場とスピン波とが混合励起状態を作っていることが分かった。我々の結果は、実験によって検証され始めている^[3]。

[1] S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, J. Phys. Soc. Jpn, 77, 053707 (2008)

[2] S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, arXiv:1009.3551.

[3] I. Petković, Ph.D. thesis, Université Paris-Sud, 2009.

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 NV 中心による量子レジスタ内及び量子レジスタ間の多量子ビット化へ向けた基盤技術の確立を目指した研究を行っている。研究の進捗状況は以下の通りである。

量子レジスタ内での多量子ビット化では NV 中心の電子スピンと結合した核スピンによる多量子ビット化を図り、複数個の同位体炭素(^{13}C)による複数量子ビット系において量子情報処理の実証研究を行っている。

またスケーラブルな系の構築のためにはそれぞれの単一 NV 中心からの発光やスピンの初期化等を独立に並行して操作することが重要となるが、そのための基盤技術として電流注入による発光とスピンの初期化を試みている。

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）

量子ドット核スピンの双方向電圧制御

量子ドット内の核スピン自由度をドットの電子スピン量子ビットに対する量子メモリとして利用することを目標に研究を進めている。最近我々は大きく偏極した核スピンの偏極方向互いに反対向きの2つの方向、外部磁場に平行、あるいは反平行、に制御することに成功した。偏極方向はDCソース・ドレイン電圧を変えるだけで選択可能で、さらにパルスRFを用いたNMR制御も可能である。偏極のコヒーレンス時間は1ミリ秒と長く、核スピン偏極は長寿命量子メモリとして機能しうることを示すことができたことになる。

具体的には、2重量子ドットのスピントロッキング状態で観測されるリーク電流を検出プローブとし、特定の電子スピン核スピン散乱の時間的繰り返しによりドット内の核スピンを一方方向へ偏極させ、さらに試料近傍に設置したコイルによりrf帯の交流磁場を印加することでNMRの手法により偏極核スピンをコヒーレントに制御した。リーク電流が核スピン偏極に依存し変化することを利用し、NMR制御の後、核スピン状態が再び初期化されるまでの時間を測定することで核スピン状態の検出を行う。電子スピン核スピン散乱に関わる電子スピン状態として、従来から可能であったT+3重項状態から1重項状態へのスピン散乱に加え、新たにT-3重項状態から1重項状態へのスピン散乱が可能になった。2種の散乱を電圧で選択的に誘起することにより、核スピンの偏極方向を制御することが可能となった。