

NEWS LETTER

Vol. 04

2011年7月5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	4
<分子スピン系>	研究代表者: 北川 勝浩 大阪大学	5
<冷却原子系>	研究代表者: 高橋 義朗 京都大学	6
<イオントラップ系>	研究代表者: 占部 伸二 大阪大学	7
<光子量子回路系I>	研究代表者: 竹内 繁樹 北海道大学	8
<光子量子回路系II>	研究代表者: 小芦 雅斗 東京大学	9

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>		10
	研究代表者: 藤原 彰夫 大阪大学	
<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>		11
	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>		12
	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>		13
	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)

—制御のいらぬ制御

最近我々のグループ[1]の研究成果は、Nature誌の“News and Views”欄に“量子制御”に関する論文[2]として紹介された。下は研究成果の要約である。

制御理論は科学・工学の様々な分野で利用されている。例えば、ある装置(デバイス)は一定の条件下で操作される必要があるが、環境からの揺らぎの影響により最適操作条件から逸脱してしまう場合、デバイス・パラメータを安定化し、デバイスの性能を向上させるために制御理論が適用される。この種の制御は閉ループ制御またはフィードバック制御と呼ばれている。閉ループ制御システムの基本構造は2段階から成っている:測定およびフィードバック制御の2段階である。第一段階では、システムの状態に関する情報を取得し、目標とする状態からどれほど逸脱しているかを知る。第二段階では、システムの状態を変化させ、目標とする望ましい状態へと導くために、システムに対し、ある“制御”、すなわち信号または力が加えられる。

古典物理学(量子論以前の)において、測定過程で引き出されるのはシステムの状態に関する情報のみであり、(理想的な条件の下で)対象システムの状態がそれにより変化することはない。この事実は過去一世紀にわたり、制御システム的设计における基本原理のひとつであった。量子力学においてはこの原理は破綻する:測定そのものが、それがいかに理想的であろうと、システムの状態を変えてしまうのである。古典物理学と量子物理学の間の根本的な相違は制御システム的设计に影響を及ぼす。量子論的(な対象の)制御の諸問題を扱うには、古典的(巨視的对象の)制御の諸問題を取り扱う場合とは異なった考え方を採り入れる必要がある。

測定に起因する不可避な反動に対処する最も分かりやすい方法は、影響による変化を計算し、それに応じて制御信号を設計することである。この方法は、1980年代後半から今日まで量子制御に関する多くの研究において用いられてきた。もうひとつの可能性、それは概念的にはさらに抜本的であろうが、システムの状態を操作するための唯一の手段として、測定によって生じた変化を利用することである。この場合には、閉ループフィードバック制御は測定段階のみから成るため、“制御”はもはや必要でなくなる。過去2、3年の間に、測定(過程)のみから成るフィードバック制御の実現性を検討する研究は、それほど多くないものの、いくつか行われてきた。

最初の研究では、実施される測定において特別な制約のないものが仮定されていた。つまり、多くの場合、強い測定の標準的な理論または代わりに弱い測定の理論のいずれかが適用されてきた。引用文献[1]の著者はこうしたアイデアをさらにすすめ、利用可能な制御パラメータとして測定強度を調整できることを使い、こうした量子制御システムのパフォーマンスを向上させた。彼らはさらに、単一の測定設定のみを使って、望みの量子状態を準備できるという、制御システムに関する伝統的な思考法では不可能であるかに見える概念を報告している。

References:

[1] S. Ashhab and F. Nori, Control-free control: manipulating a quantum system using only a limited set of measurements, Phys. Rev. A 82, 062103 (2010).

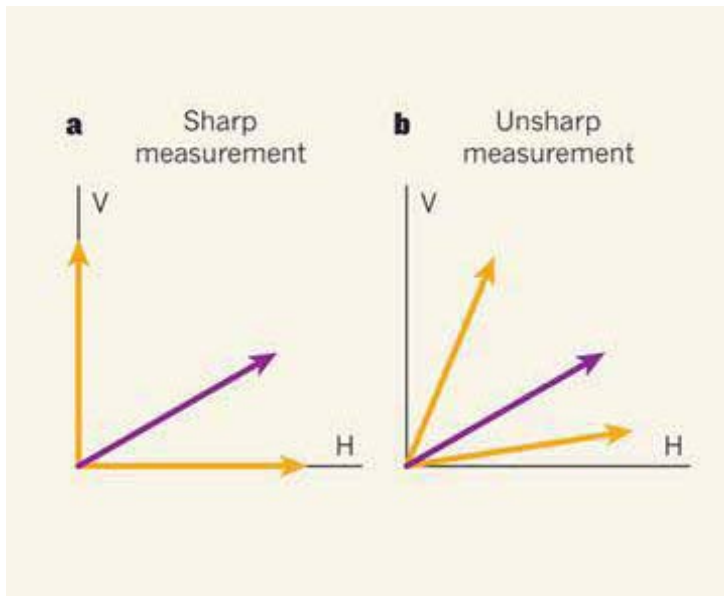
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.82.062103>

[2] Howard M. Wiseman, Quantum control: Squinting at quantum systems, Nature 470, 178 (2011).

<http://www.nature.com/nature/journal/v470/n7333/pdf/470178a.pdf>

<http://www.nature.com/nature/journal/v470/n7333/full/470178a.html>

図: 引用文献[2]より



この図の中の紫色の矢印は2次元量子システム—例えば光子の偏光—の初期状態を概略的に示している。ここに、方向Vは垂直偏光状態を、方向Hは水平偏光状態を表している。ここでの初期状態(紫色の矢印)はこれら状態のある特定の(VよりHにより近い)重ね合わせである。偏光の鋭いまたは強い(射影)測定の後では、(a)に示すように、光子はV(垂直)偏光状態またはH(水平)偏光状態のいずれかにある(オレンジ色の矢印)。不鋭度測定または弱い測定(ここでは鋭度または強度が50%)の後では、(b)に示されるように光子はいまだ重ね合わせ状態にあるが、'V'に関する測定の効果が状態をV(垂直)偏光状態(上側のオレンジ色の矢印)に向かわせる程度よりも'H'に関する測定の効果の方が状態(下側のオレンジ色の矢印)をH(水平)偏光状態により近く向かわせる。引用文献[1]の著者は、測定の強度を正しい値に調整することにより、測定により惹き起こされる状態の変化が最適化されることを示している。

—電子を含む半導体二重量子ドットを用いた電荷状態のコヒーレント振動

半導体二重量子ドット中の電荷やスピンを用いた量子ビットの研究が盛んに行われている。これまでに、我々のグループでは二重量子ドットの電荷状態に注目して、電荷状態のコヒーレント制御(1量子ビット演算)、2つの電荷量子ビットを並列に並べた系で、制御反転演算や交換演算(2量子ビット演算)を行ってきた[1, 2]。電荷量子ビットでは、ドットを流れる電流によって初期化・読み出しを行うため、実験は電極との結合が大きい多電子領域に限られており、そのため量子ビット操作の過程で励起準位が関与する可能性があった。今回は、少数電子領域においてもドットのトランスポート測定が可能であるように、スピン量子ビットと同様のゲート構造を採用することで電子数を1にし、コヒーレント操作を行った[3]。少数電子系の利点は、基底状態と励起状態のエネルギー差が数 meV 程度であり、初期化・操作・読み出しのいずれの過程においても、励起状態がトンネリングに寄与しないことである。したがって、1電子系の電荷量子ビットは、左右のドットの電子数を(N_1, N_2)として、(1,0) ($\equiv |L\rangle$)と(0,1) ($\equiv |R\rangle$)を基底としたより理想的な量子二準位系となる。実験では、ドレイン電極に高速パルス電圧を印加し、ドットを流れる電流を測定することでコヒーレント振動を観測した(図 a)。パルス印加時間を変えたところ、ドット電流が振動した(図 b)。このことは、1電子がコヒーレントに振動していることを意味する。

[1] T. Hayashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 226804 (2003).

[2] G. Shinkai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 056802 (2009).

[3] unpublished.

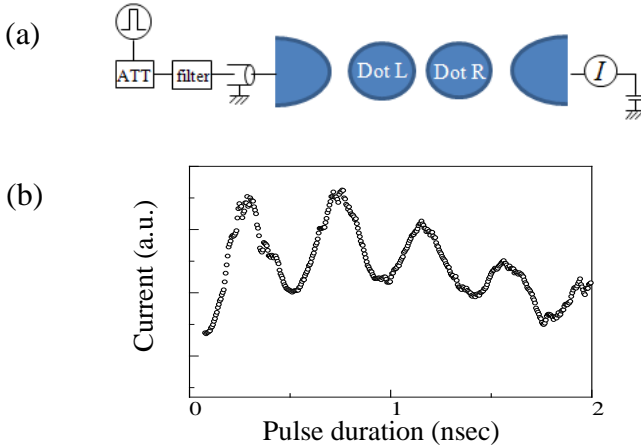


図 (a) 実験系の模式図。(b) 電荷状態のコヒーレント振動。

〈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)

—スケーラブルなスピン増幅

核スピンの磁気モーメントは非常に小さいので、検出感度は低く、状態観測が難しい。もし、あるレアな核スピンの一つの成分を周囲のアバンダントな核スピんに転写、蓄積することができれば、そのレアスピンからの信号を増幅することが可能である。この方法はスピン増幅と呼ばれており、これを用いることで、低感度の検出器でも状態の非破壊測定が可能となり、量子計算結果の読み出しがおこなえることが示されている。しかしながら、大量のアバンダントスピンに対してレアスピン成分の転写をおこなうための量子ゲート操作は難しく、これまで4倍程度の低利得しか実現されていなかった。本研究では、スピン拡散現象と磁場循環法を利用した「広義の」スピン増幅の実装方法を提案した。そして、光励起三重項電子を用いた動的核偏極によって高偏極化された固体核スピン系において、利得140の広義のスピン増幅を実現した。この広義のスピン増幅にも、量子状態トモグラフィーや磁気共鳴分光、量子メトロロジーの検出感度の飛躍的向上を可能にするというじゅうぶんに有用な応用があることを示した。100を超える利得のスピン増幅は、100個のスピン検出が可能なMRFM(磁気共鳴力顕微分光法)と組み合わせることで、たった一つのレアスピンの検出を可能にすることが期待される。提案された方法は優れたスケーラビリティを持ち、原理的にはさらなる高利得が望める。高利得のスピン増幅はこれまで熱雑音に埋もれてきた極微量サンプルのNMR分光を可能にする。今回デモンストレーションされた広義スピン増幅は、少しの改良で非破壊測定のためのスピン増幅に拡張できる。今回示されたスピン増幅の利得におけるブレークスルーは量子情報処理にとっても大きな進展と言える。

〈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、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に成功した。また、ホールバーニング分光を行い、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の分光結果が、磁気量子数に大きく依存することを見出した。

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、イッテルビウム原子のスピン自由度 $SU(6)$ に由来する冷却法であるポメラランチュク冷却を原子系で初めて実証することに成功した。さらに、アルカリ原子とイッテルビウム原子の混合量子縮退系を新たに実現し、量子磁性も含めた新しい方向性を見出した。

さらに、核スピン集団の量子フィードバック制御を行い、測定過程を用いていながら、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た。さらに、この過程の、量子情報論的意義を深く掘り下げて議論した。

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）

—STIRAP を用いた単一量子ビットゲート操作

これまで原子系で実現された量子ゲート実験はほぼ全て、系のハミルトニアンによる動力学的時間発展を用いて行われてきた。このような手法は励起パルス面積や周波数制御の詳細に依存し、励起光源の強度揺らぎや周波数変動、空間的な強度不均一性な影響などを直接受けるものであった。このような手法を断熱的な手法に置き換えることで、上記のようなノイズ要因に対するロバスト性が得られ、また多粒子エンタングル状態を含む大規模な状態準備が容易になると期待される。我々は単一 40Ca^+ イオンの電気四重極子遷移の一つの下準位と三つの上準位からなる tripod 系における 2 つの暗状態を用い、STIRAP(Stimulated Raman Adiabatic Passage)により断熱的操作を行うことにより、イオン系では初めて幾何学的位相因子のみによる単一量子ビットゲート操作を実現した。Z,X 回転において可視度 0.9 以上で占有数が増加することを確認した。

＜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）

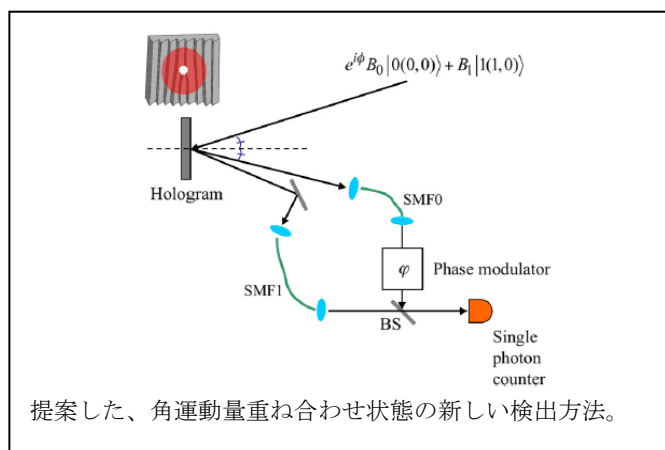
光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

光子と、半導体量子ドットなどの異種量子を強く相互作用させるためのデバイスとして、直径が光の波長以下になるまでテーパー状に引き伸ばした光ファイバ(ナノ光ファイバ)が知られています。しかし、このナノ光ファイバは、大気中でその透過率が、数時間程度で急速に劣化することが知られており、大きな問題となっていました。その原因は定量的に解明されていませんでした。今回、私たちは、高いクリーン度の環境で定量的な研究を行い、ナノ光ファイバの透過率低下の原因は、空気中の微小な塵の吸着が主因で、これまで主因と考えられていた吸湿による表面劣化の影響は見られない事を解明、透過率の減少を1週間で 2%以下に抑えることに成功しました[1]。光量子デバイスだけでなく、広帯域白色光発生や、バイオセンシングなどへの応用にとっても重要な成果です。

また、電機通信大学の宮本洋子先生らと共同で、光子の角運動量の重ね合わせ状態を、余剰な成分を排除して検出する新しい方法を提案、光子の軌道角運動量もつれを検証することに成功しました。偏光が2つの基底状態しかもたないのに対して、光子の軌道角運動量は、原理的に無限個の基底を取り得るため、高密度・高安定性な量子情報通信への応用が期待されます。しかし従来は、特殊な回折格子をずらす方法を用いており、対象外の軌道角運動量成分が最大 10%程度も混入するという問題がありました。今回、我々は、複数経路の重ね合わせ状態に変換し検出する方法を提案、発生させた軌道角運動量もつれ状態の光子対へ適用、ベルの不等式の破れを確認しました[2]。今後の多次元状態を用いた光量子情報処理への応用が期待されます。

[1] M. Fujiwara, K. Toubaru, S. Takeuchi, Opt. Exp. vol.19, 8596 (2011).

[2] Y. Miyamoto, D. Kawase, M. Takeda, K. Sasaki, S. Takeuchi, J. Opt. J. Opt. 13 064027 (2011).

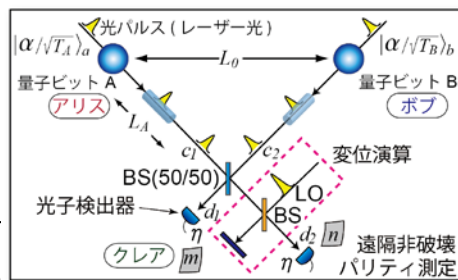


計画研究 D02:光を基軸とした多キュービット量子制御

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

—離れた量子ビットへの演算が切り開く量子情報処理の可能性

量子情報処理においては、二量子ビット演算が不可欠である。二量子ビット演算を行うには対象となっている量子ビット間に相互作用を引き起こす必要があるが、演算をしない時には相互作用を切ってデコヒーレンスを防ぐ必要がある。従って、量子ビット間の相互作用を制御することが、量子情報処理実現の鍵となる。そこで本研究では、空間的に離れた量子ビットに対する新たな二量子ビット演算方式「遠隔非破壊パリティ測定」を提案した。この



方式はレーザー光と物質量子ビットの基本的な相互作用に立脚しており、様々なタイプの量子メモリに対して適用可能である。この方式によって、量子情報処理に用いられる様々な二量子ビット操作（量子もつれ生成、ベル測定、パリティ検知測定など）が可能となる。量子ビット間の距離は自由に選べるので、遠く離れた送信者と受信者の持つ量子ビット間のゲート操作や、チップ上に配置された量子ビット間距離を大きくしてデコヒーレンスを防ぐのに利用できる。現実的な装置に基づく遠隔非破壊パリティ測定を仮定したとしても、長距離量子通信（量子中継）が実行可能であることが示されている。この量子通信の効率性は、遠隔非破壊パリティ測定に用いられる装置の進歩によって改善されるため、その進歩に応じて量子通信の到達距離が延長されるだろう。さらには、十分高い忠実度の遠隔非破壊パリティ測定が実装されれば、量子計算も実現可能となる。このように、遠隔非破壊パリティ測定は、量子情報処理の実現に向けた新しい道筋となると考えている。

<2010年度公募研究採択課題>

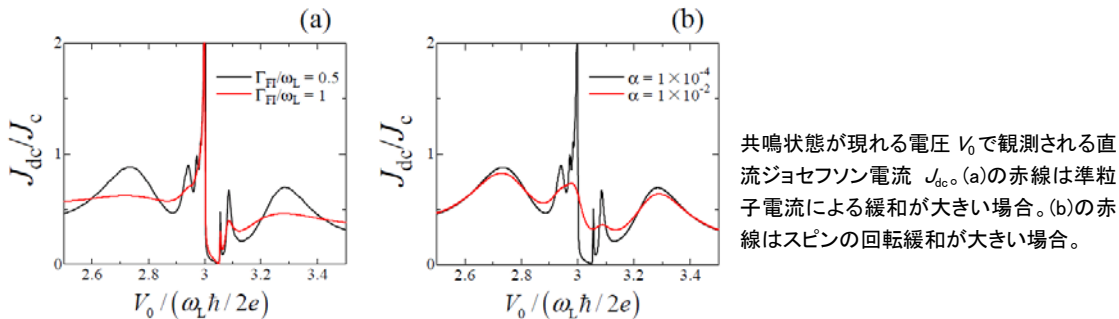
研究課題 :量子サイバネティクスにおける量子推定理論の新たな展開
研究代表者 / 藤原 彰夫(大阪大学理学研究科・教授)

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、研究代表者が先行研究において導出した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)の検証実験を竹内グループ(北大/阪大)と共同で行っている。特に本研究では、手始めとして光子の偏光角の推定問題を扱い、強一致性や漸近有効性が実際に確認できるか、確認できるとしたら、どの程度のサンプル数 n で収束するかを調べている。我々は実験室で行う光学実験に先立ち、数値実験に基づく様々な予備検討を系統的に行った。その結果、 $n=100\sim 300$ 程度でも十分に所望のガウス分布に収束することが分かった(適合度検定:危険率10%以上)。これは理論的に予測される漸近有効性がかなり早い段階で機能していることを意味する。我々は現在、竹内グループで得られつつある実験データの統計的解析を進めているところである。

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)

本研究では、量子ドットと超伝導体の混合量子系による量子ビットの提案を目指して、この系における量子コヒーレンス観測の可能性を理論的に研究してきた。特に、電子のスピン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。この観点から、超伝導体を強磁性体で隔てた「強磁性ジョセフソン接合」の研究を進めてきた。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が用いられる。強磁性ジョセフソン接合では帯電効果を無視し、電子スピンのコヒーレンスの観測に重点を置いた。

強磁性絶縁体を挟んだ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(Fiske 共鳴)。強磁性絶縁体の場合は、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るため、複数の共鳴状態が現れる。図に示すように、スピンのコヒーレンスはこの共鳴状態に反映される^[1]。強磁性金属の場合は、スピンの緩和が大き過ぎて共鳴状態が観測されないため、接合界面に絶縁層を挟んで間接的に観測しなければならない^[2]。これまでは、強磁性絶縁体は単一磁区で構成されていると考えた。現在、磁壁が入った場合についても計算を始めており、磁壁のダイナミクスとコヒーレンスを観測する方法について検討を始めた^[3]。さらに、単一磁区ではなく、単一スピン、つまり量子ドットの場合については、帯電効果も含め、スピンと超伝導のコヒーレンスの観測方法を理論的に提案し、最終目標である量子ドットと超伝導体の混合量子系による量子ビットの可能性を探っている。



- [1] S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa, J. Phys. Soc. Jpn, 80 (2011) in press.
- [2] A. F. Volkov and K. B. Efetov, Phys. Rev. Lett. 103, 037003 (2009).
- [3] S. Hikino, M. Mori, 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。これまで我々は複数個の核スピンと NV 中心の持つ電子スピン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きた。最近、複数の核スピンと電子スピンからなる単一 NV 中心の系において量子ネットワーク構築において重要となる要素技術の実証をすることができ、現在その評価と更なる最適化を行っている。

NV 中心の特徴として光によるスピンへのアクセシビリティを有する点も挙げられる。これから NV 中心が単一光子と単一スピンのインターフェースとしての役割を担う重要な素子源であると期待されている。我々は更なる展開として電荷と光のインターフェースとしての機能を NV 中心に新たに持たせることができるのではないかと考え、電流注入による単一光子発生の研究を行っている。これは学術的な関心に加え、単一光子源としての期待や将来のスケールアップ及び集積化にも資する基盤技術という点から重要であると考えられる。我々は最近その実証を行うことができきており、現在、機構の詳細な解析等を行っている。

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)

—DC パルス電圧による量子ドット核スピン偏極のダイナミクス

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。ドット内核スピンの偏極方向を素子の印加電圧で制御することに成功したことを前号で報告した。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。この成果をまとめた論文は Physical Review Letters 誌に受理され出版の準備が進んでいる。

核の偏極方向は DC ソース・ドレイン電圧を変えるだけで選択可能であるため、前号で報告した秒オーダーの電圧スイッチによる核の偏極・検出に代わり、ミリ秒からナノ秒オーダーまでの短時間 DC パルス電圧を印加した場合に起こる偏極核スピンのダイナミクスに注目した研究を進めている。ある特定の条件の下では、素子に印加するソース・ドレイン電圧 V_p においてドット内の核スピンは外部磁場と同じ(平行)方向に偏極し、別の電圧 V_{ap} においては逆の(反平行)方向に偏極することがわかっている。そこでまず V_p を十分長い時間印加した、偏極が飽和した状態を初期状態とし、極短い時間 V_{ap} を印加した後で初期状態がどのように変化したかを調べた。 V_{ap} パルス印加時間を増やすと共に、核の偏極度が最大値から徐々に小さくなりやがて反平行方向へ反転するという一般的な予想に反し、初期状態にミリ秒程度の V_{ap} 電圧パルス印加した場合において核の偏極度が 2 つの異なる値のいずれかを stochastic にとるとい興味深い振る舞いを見いだした。現在詳細な解析を進めている。