

NEWS LETTER

Vol. 06

2012年2月29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〉		9
	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〉		10
	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〉		11
	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〉		12
	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)

超伝導磁束量子ビット-共振器結合系における大きな分散シフト

コプレナー型共振器と超伝導量子ビットを結合させた系において、量子ビットの状態を dispersive に読み出す手法は、量子非破壊測定を可能にし、量子エラー訂正や量子フィードバック等の実験に応用され注目を集めている。我々はこれまで、共振器と磁束量子ビットをインダクタンス M で結合させ、量子ビットの状態を読み出す実験に取り組んできたが、読み出しの精度が常に 20%程度と低いことが問題となっていた。この原因の1つとして考えられるのが、読み出し用のマイクロ波パルスによる量子ビットのエネルギーの変調である。量子ビットがこの変調を受けることで、Landau-Zener トンネルや欠陥準位へのエネルギー放出が起こり、意図しない状態変化をもたらすことが懸念されている。この問題を打開するために、共振器と磁束量子ビットの結合に、キャパシタンス C を用いることを考えた。磁束量子ビットのエネルギー準位は、ゲート電荷に対して平坦であるため、読み出しの際に量子ビットが受けるエネルギー変調の振幅は、 M 結合の場合と比較して十分小さくなり、その結果、量子ビットの読み出し精度の改善につながることを期待される。我々は、共振器と磁束量子ビットが現実的な C で強結合すること、また、大きな分散シフトが得られることを解析的に示した上で、計算で得られたパラメータを基にデバイスを設計、作製し、測定によって得られたデータを解析した。

Si 基板上に Nb をスパッタし、電子線リソグラフィーと反応性ガスによるエッチングにより、共振周波数 $f_r=10.6$ GHz の Nb コプレナー型共振器を作製した。続いて、この共振器上に三層レジストを用意して、電子線リソグラフィーおよび Al の斜め蒸着によって磁束量子ビットを作製した。この磁束量子ビットは電圧が最大となる共振器端に配置され、磁束量子ビットの大きな島電極と共振器の中心導体は、設計値 4 fF の C を介して結合している。作製された試料は希釈冷凍機で冷却された(温度 10 mK)。

まず、磁束量子ビットの磁束バイアスをスイープしながら、ベクトルネットワークアナライザを用いて共振器の反射波スペクトラムを測定した。すると、磁束量子ビットのエネルギーが f_r と等しくなる所で、両者のエネルギーの反交差 (480 MHz) が観測され、強結合が実現していることを確認した。次に、磁束量子ビットを $|1\rangle$ 状態に励起し、分散シフトを測定したところ、 ~ 80 MHz という従来の M 結合の試料と比較して一桁程度大きな値が得られた。また、得られた Δ は、量子ビットと共振器の結合系より実験的に抽出したパラメータを基に計算した値 (~ 71 MHz) と良く一致している。この分散シフトを利用して、磁束量子ビットの読み出し実験を行ったところ、約 90 % のコントラストの Rabi 振動が観測され、 C を介した共振器と磁束量子ビットの結合の有効性が確認された。

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)

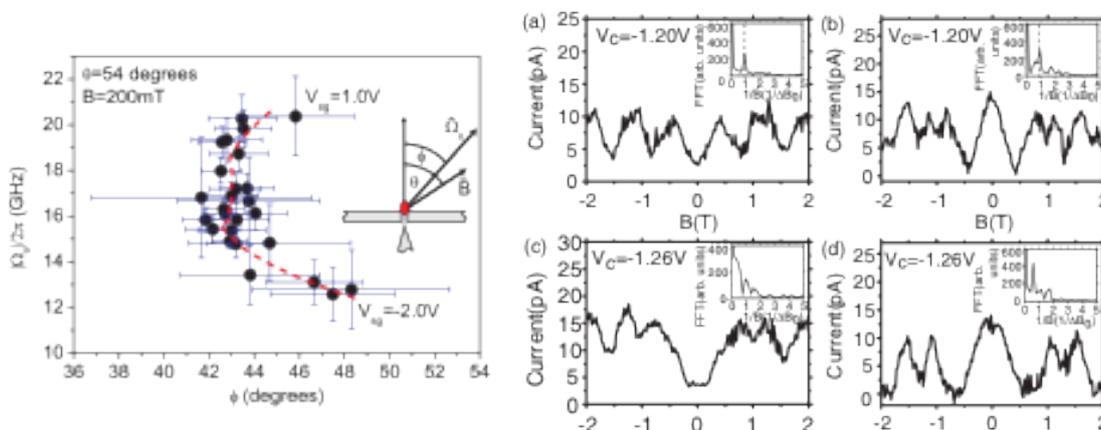
InAs 量子ドットにソース・ドレイン電極を結合し、その間を流れるトンネル電流の微分コンダクタンスを測定する事によりランダウ g 因子テンソルを精密に評価した。その結果近傍に配置したサイドゲートにより g-テンソルの大きさを大きく変調可能である事を初めて実証した。これにより従来量子井戸のアンサンブルスピンでのみ確認されていた g-テンソル制御による電子スピン共鳴 (g-TMR) が1電子スピンに対し実行可能であることを確認した。(左図)[1]

GaAs 半導体を用いた縦型量子ドットとトンネル結合した二つの電極の次元性が大きく違う(3次元と2次元)構造を提案し、有限バイアス条件でこの幾何学的配置に起因する電流抑制効果を初めて報告した。[2]またこの縦型量子ドットを並列に結合した素子を作成し、面内磁場の関数として電流が振動する事を見いだした。これは電極を介したアハラノフ・ボーム効果と解釈でき、その位相がゲート電圧により変化する様子を我々の提案したモデルに基づき説明する事ができた。(右図)[3]

[1] R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha, Phys. Rev. B 84, 041302(R) (2011).

[2] K. Yamada, M. Stopa, T. Hatano, T. Yamaguchi, T. Ota, Y. Tokura and S. Tarucha, Phys. Rev. B 84, 201303(R) (2011).

[3] T. Hatano, T. Kubo, Y. Tokura, S. Amaha, S. Teraoka, and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. 106, 076801 (2011).



左図 ゲート電圧と共に変化する InAs 量子ドットの g-TMR スピン回転軸方向とその大きさ。外部磁場の大きさと方向は一定としている。

右図 縦型並列二重量子ドットを流れる電流の面内磁場依存性。全電子数は1の条件で、左列が結合軌道、右列が反結合軌道の寄与。上列、下列はそれぞれ中央ゲート電圧が-1.20V と-1.26V の条件。2端子構造の為、外部磁場に対して電流は対称であるが、条件により振動の位相が変化する。

<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)

無雑音量子増幅

増幅は古典的なサイバネティクスの重要な要素であるが、量子世界では不確定性原理やクローン禁止定理のために異なる様相を示す。最近我々が実現したスケーラブルな広義のスピン増幅は、入力スピンに対して CNOT ゲートによる z 成分の量子非破壊(QND)測定を繰り返し行い、その情報を多数のスピンに書き込むようにすれば、真のスピン増幅となり得る。そこで、スピンと光子の量子増幅を下表のように比較し、スピン増幅の概念を一般的に明らかにした。まず、現在我々が実現しようとしているスピン増幅は、光の量子増幅として実用化されているレーザや、光の無雑音量子増幅として知られている縮退パラメトリック増幅ではなく、Yuen が提唱し未だ実現されていない光子数増幅に対応することが分かった。この表から、光の縮退パラメトリック増幅に対応するスピン・スクイジングがスピンの新たな無雑音量子増幅となり得ることが分かる。さらに、無雑音ではないが、レーザに対応する等方的なスピン増幅の存在が予想され、その実現法に興味を持たれる。今後これらの新たなスピン増幅の可能性も探求してゆく。

光子	スピン
無雑音量子増幅	
光子数増幅 光子数 N を増幅, 位相 を消去	スピン増幅 S_z 成分を増幅, S_x および S_y 成分を消去
縮退パラメトリック増幅 (スクイジング) 正弦成分 a_1 を増幅, 余弦成分 a_2 を減衰	スピン・スクイジング S_x 成分を増幅, S_y 成分を減衰
等方的量子増幅 (不可避な量子雑音を付加)	
レーザ, 非縮退パラメトリック増幅 a_1 も a_2 も増幅	等方的スピン増幅 S_x, S_y, S_z を全て増幅

<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は、単一サイトの原子の観測および制御が大変重要である。今回、それに向けて装置の開発を行った。まず、対物レンズを薄型ガラスセル領域に接近させた、光学アクセスが極めて制限された状況で、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生成することに成功した。さらに、1方向に強い閉じ込めが可能な非等方トラップを、2本のビームの干渉により生成し、生成したボース・アインシュタイン凝縮体を導入することに成功し、非等方なtime-of-flight画像による確認した。さらに、このパンケーキ型の2次元系を格子定数266nmの2次元光格子を印加する実験を行い、ほぼ設計通りの深い光格子ポテンシャルをえることに成功した。また、高いNAをもった対物レンズを薄型セル直上に設置し、実際に吸収イメージ画像を得ることに成功した。さらに、新しい格子点制御法となりうる、超狭線幅光学遷移と組み合わせたライトシフトアドレッシング法を開発した。

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、様々な興味深い格子を実現できる光超格子を、周波数制御された532nmの光と1064nmの光を用いて実現した。実験的には、比較的浅い光超格子ポテンシャルで超流動状態を生成し、それをtime-of-flightさせたときの物質波干渉の画像において、1064nmの光格子を同時に加えたときのみ、新たな干渉が現れることで確認した。

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)

開放型プレーナートラップでは、多数のトラップ領域から成る電極を作成し、異なる領域間のイオンの輸送実験を行った。これはイオンを用いた量子情報処理において多数個のイオンを操作する大規模集積化に必要な手法である。輸送中のポテンシャル形状が一定に保たれるような電圧をシミュレーションによって求め、複数の電極電圧を制御した結果、安定にイオンを輸送することができた。図1は電極表面から高さ約 200 μm に捕獲したイオンを z 軸方向に 1mm 移動させたときの画像である。

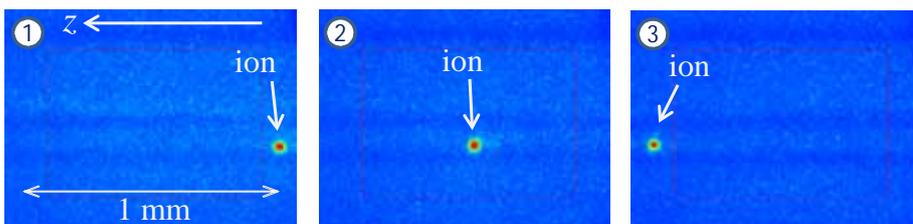


図 1

イオンにおいてエンタングル状態を生成するために、これまで主に光遷移が用いられてきた。波長の長い RF・マイクロ波遷移において直接エンタングルメントを生成する実験もごく最近報告されるようになったが、それらの実験は空間的に不均一な振動電磁場や大きな磁場勾配などの特殊な条件を必要としていた。今回、光によるスピン依存力エンタングリング相互作用の補助を必要とするものの、RF 遷移に直接エンタングル状態を生成する方法を提案し、また実験的に実演することに成功した。この方法によりカルシウムイオンの基底ゼーマン準位間 RF 遷移においてフィデリティ 0.68 でエンタングル状態を生成した。さらに、生成された状態がデコヒーレンスフリーである、つまり外界からのノイズに対してロバストであるという性質を持つことを示した。具体的には、生成したエンタングル状態のコヒーレンス時間が 200ms 以上となり、一イオンの場合のコヒーレンス時間と比べ一桁以上長くなることを示した。

<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）

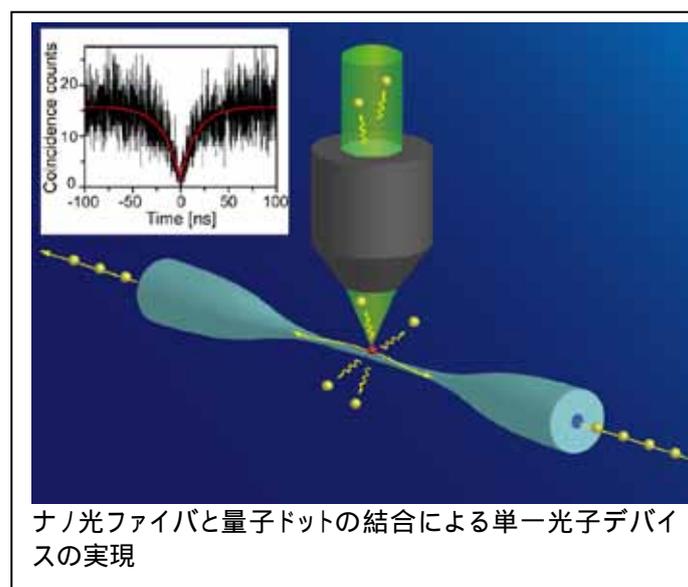
光子は、すぐれた制御性を持ち、また自然原子や分子、人工原子とのインターフェイスが容易です。また、これまでに線形光学素子と射影測定を組み合わせた最大規模の量子回路を実現されています。私たちの計画班では、量子サイバネティクスの概念に基づく量子制御複合テストベッドを実際に構築、最適な量子情報制御の創出とともに、異種量子間量子状態制御の実現や、量子制御内蔵光デバイスの創成も目指しています。

光子と、半導体量子ドットなどの異種量子を強く結合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状に引き延ばした光ファイバ(ナノ光ファイバ)が知られています。ナノ光ファイバは半導体量子ドットなどの単一発光体からの発光を効率よく集めることができると理論的に予測されており、量子情報処理における単一光子源デバイスとしての利用が期待されていました。単一発光体からの発光を集める方法として最もよく利用されるのが顕微鏡対物レンズを用いた手法です。しかしながら、単一発光体からの発光パターンが光ファイバへの結合には最適ではない事から、開口数(NA)1.4の高倍率対物レンズを使用しても総発光量の1%程度しか光ファイバ内に結合する事ができず、応用上の大きな課題となっていました。

今回、私たちは、単一の量子ドットから発せられる発光を直接光ファイバに結合する手法を開発しました。直径300nm・光損失10%以下という極めて良好な光学特性を有するナノ光ファイバ野作製に成功し、さらにその上に単一の量子ドットを配置する事で、量子ドットの全発光量の7.4%もの発光がナノ光ファイバを經由して直接シングルモード光ファイバに結合する事を見出しました。

単一光子源は光を用いた量子通信の光源に相当するもので、光干渉性の確保・既存の光通信インフラの活用などの実用上、「シングルモード光ファイバ」と結合させる事が極めて重要です。その点から、今回の成果は、安全な通信を実現する量子暗号通信や、これまでに解けない問題を解く量子コンピューター、また、より少ないエネルギーでの通信を実現する量子情報通信や光センシングデバイスへの応用が期待されます。

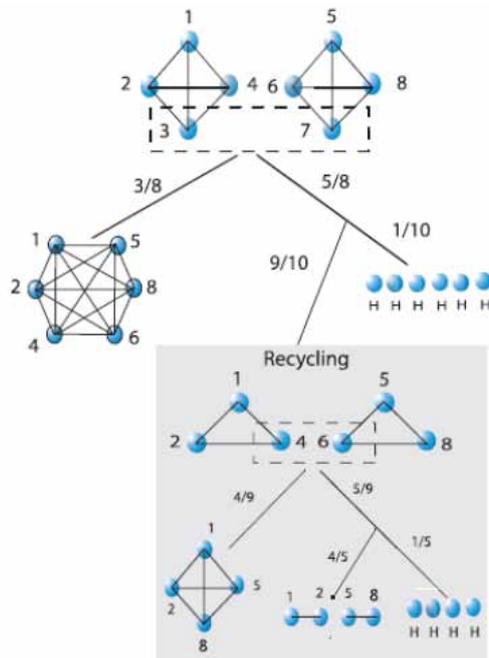
[1] M Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H.-Q. Zhao, S. Takeuchi, Nano Lett. 11, 4362-4365 (2011).



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 (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)

多体量子もつれは、量子情報の様々なタスクを実現する上で重要なリソースと考えられている。多数の粒子間の量子もつれを生成する場合、粒子を次々に追加して行くことで量子もつれ状態のサイズを徐々に大きくしていく方法は必ずしも効率的ではなく、とくに粒子の追加操作が確率的な場合にはそれが顕著である。より効率的であると考えられる fusion 操作では、既に量子もつれ状態にある粒子のグループ2つを融合してサイズが約2倍の量子もつれ状態を作る。今回我々は、光子の W 状態の場合にこの fusion 操作を行う簡単な手法を提案し、その効率を見積もった。W 状態は、網状の2粒子間量子もつれの構造のおかげで、損失に最も強い多体量子もつれ状態として知られているが、上記の逐次追加の方法では、原理的にリソースの消費量が指数的にになってしまう。今回提案した fusion 操作での最大効率を計算したところ、この消費量の増え方が指数的ではなくなるのがわかった。また、fusion 操作にリソースをリサイクルする機構を導入することで、この効率をさらに改善できることを見出した。



<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)

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進めてきた。前回のNews Letter では、実験系における系統誤差の存在の可能性を報告したが、その後、系統誤差の除去に成功し、極めて高い精度での世界初の検証実験に成功した。まず、光子の偏光方向を定める半波長板(HWP)の設定値 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 78.3^\circ$ を推定する適応的推定実験において、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。引き続き推定値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設定値においても、信頼水準90% という厳しい水準の信頼区間に理論値(Fisher情報量の逆数)が入っていることが確認できた。一方、期待値については、真値が信頼水準90% の信頼区間に入っているか、もしくは最大でも 0.04° 以内のずれに収まっていた。実験系の設定精度が $\pm 0.2^\circ$ であることを考慮すると、以上の結果は、極めて高い精度で理論予想を実験的に検証できたことを意味する。

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)

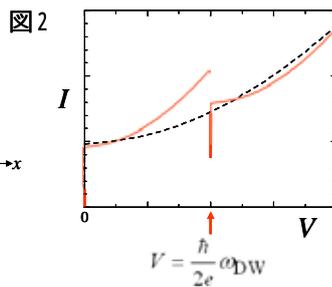
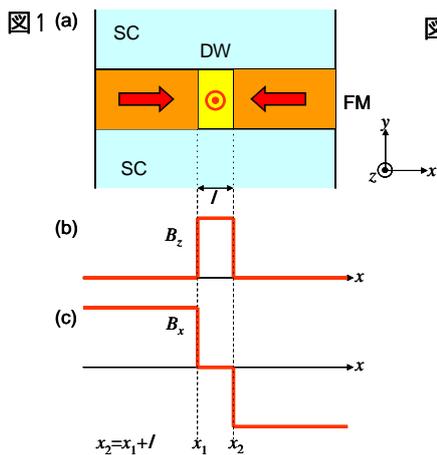
本計画では、電子スピンと超伝導秩序変数の位相との結合から生まれる量子状態の研究を、高精度電磁気測定への応用をも視野に入れ進めてきた。超伝導体を絶縁体や金属で隔てたジョセフソン接合は、世界の電圧標準として我々の生活を根本から支えている。そして、量子ホール効果を用いた抵抗標準と共に直流低周波の電気標準を与え、科学技術の基盤を支えている。あらゆる科学と技術において精度の高い計測技術が不可欠であることは言うまでもない。

一方、強磁性体中の磁壁をメモリへ応用する提案がなされている^[1]。電流や磁場で駆動された磁壁の運動は複雑であり、その様子を高精度で観測する手段が必要である。本計画では、磁壁のある強磁性体を介したジョセフソン接合(図 1(a)参照)の電流電圧特性の計算を行ってきた^[2]。磁場分布を図(b)および(c)のように設定し、接合間のゲージ不変な位相差からジョセフソン電流($I_J(t)$)を次式のように求めることができる。

$$I_J(t) = I_c \frac{\sin(\rho f_x / l)}{\rho f_x} \left[\sin(j_0 - \rho f_z / l) \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} + \sin(j_0 + \rho f_z / l) \frac{\partial}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] + I_c \frac{\sin(\rho f_z / l)}{\rho f_z / l} \sin j_0$$

$f_x(f_z)$ は、接合を貫く磁束の $x(z)$ 成分。この結果より、厚み()が一定の磁壁が単振動する場合、電流電圧曲線に図2で示すような階段状の構造が現れることが期待される。階段状の構造が現れる電圧は、磁壁の振動数(ω_{DW})と物理定数のみで結び付いていることから、磁壁運動の高精度測定の新しい原理となりうる。

「量子サイバネティクス」では、ジョセフソン効果と量子力学的に共役なコヒーレント量子位相スリップ効果の研究が進行している^[3]。これは磁束が細い超伝導細線を横切る現象であり、量子電圧標準と共役な量子電流標準の実現が期待されている。磁壁を微細化した極限が量子磁束と見ることもでき、今回の成果を帯電効果が重要になる小さい接合へと発展させるべく研究を進めている。



- [1] S. Parkin et al, Science 320, 190 (2008).
- [2] S. Hikino, M. Mori, W. Koshibae, and S. Maekawa, arXiv:1202.0382.
- [3] J.-S. Tsai, News Letter Vol. 5. p.2 (2011)

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)

ダイヤモンド半導体を用いた室温での電氣的単一光子発生

本研究ではダイヤモンド中の NV 中心を研究している。共焦点レーザー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、単一 NV 中心を光学的に検出できる。また、その単一 NV 中心が持つ単一スピンの操作と光学検出を室温で行うことができ、光とスピンのインターフェースとしての役割を持つ有望な量子情報処理系として注目される。我々は最近、その光やスピンの電氣的制御に向けて研究を進めている。今回我々はダイヤモンド半導体中の NV 中心を用い、構造や加工を工夫することにより、固体素子として初めて電流注入による室温での単一光子発生に成功した。これまで電流注入による単一光子発生は半導体量子ドットにおいて極低温で実現されてきたが、室温での実現は我々の研究が初めてである。エレクトロルミネッセンスの寿命はフォトルミネッセンスのものとは大きく異なっていた。注入電流量等の解析からは、エレクトロルミネッセンスは電子-正孔再結合により発光していることが示された。優れたスピン特性を持つ NV 中心で成功した点は重要で、この成果は NV 中心の単一スピンの電氣的な操作にも道を開くものと考えられる。半導体特性を用いた電氣的な光やスピンの操作は、将来的には微細加工による集積化を可能とし、この観点は多量子ビット化という観点からも重要である。現在論文審査中である。

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)

1 重項スピンプロケードと核スピンエンタングルメント

GaAs 量子ドットに含まれる 10^5 個程度の原子核が持つ核スピンの集団偏極状態は長いコヒーレンス時間を持ち、上向き・下向き偏極状態を 1 量子ビットとした場合の初期化(核スピン偏極の生成)、1ビットユニタリ操作と観測(NMR 操作と検出)はすでに実現している。もし 2 つのドットの核スピン偏極状態がエンタングルした状態が生成できるならば、それは核スピン偏極量子ビットの 2 ビットユニタリ操作に相当し、DiVincenzo の基準をすべて満たす核スピン偏極ベースの量子情報処理の枠組を構築できる可能性がある。

2 重量子ドットにおけるスピンプロケードでは 2 電子スピンの 3 重項 $T(T_+, T_0, T_-)$ に固定されており、これが 1 重項 S に散乱されるとリーク電流として観測される。したがってその電子スピンは常に S か T かの観測にさらされていると考えることができる。そのため電子スピン核スピン相互作用を考える場合、電子スピン 1 個と核スピン 1 個とのスピン状態の交換よりも、電子スピンペアの 4 状態 (S, T_+, T_0, T_-) と核スピンペアの 4 状態 (s, t_+, t_0, t_-) とが交換する、という記述が観測の結果を考慮しやすい。電子スピンは各ドットに局在しているため、核スピンペアは一方のドットに含まれる核スピン 1 個と、他方のドットに含まれる核スピン 1 個からなるペアと考えられる。電子・核スピン散乱を伴う $T_+ \rightarrow S$ 遷移では電子スピンの T_+ から S へ変化し、“ S になった”ことが観測されたなら、核スピンペアのうち s であったもののどれかが“ t_+ になった”ことになる ($T_+ \rightarrow S \otimes S \rightarrow t_+$)。この電子・核スピン散乱と“ S になった”ことの観測が繰り返されることで、 t_+ 核スピンペアの比率が増え、結果 2 つのドットの核スピンは共に同方向へ偏極する。

これとは逆に、もしも 2 電子スピン状態が S に固定されており、これが T に散乱されるとリーク電流として観測される状態(1 重項スピンプロケード)があると仮定すると、電子・核スピン散乱を伴う $S \rightarrow T_+$ 遷移と“ T_+ になった”ことの観測を繰り返すことにより、 s 核スピンペアの比率が増えることになる。このときの核スピン状態は一方のドットに含まれる核スピンの多くが、他方のドットに含まれる核スピンと 1 重項的にエンタングルしていると考えられる。現在このような 1 重項スピンプロケード状態の探索を続けている。