

# NEWS LETTER

## Vol. 02

2010年8月4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>



### 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

## 〈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)

#### 1. 超伝導トンネル接合でのサブギャップ漏れ電流要因解明

超伝導トンネル接合の電流-電圧特性は、基本的にはBCS状態密度を反映し、超伝導ギャップ以内で電流が大きく抑圧される。しかし実際にトンネル接合でえられる特性では、理想的なBCS状態密度から推測される電流よりかなり大きな漏れ電流が観測される。このような余剰なサブギャップ電流は、接合近傍での不要な準粒子の存在を示唆し、量子ビットのコヒーレンスの消失の要因となる可能性が大きい。また古典的ジョセフソン回路においても、サブギャップでの漏れ電流はデジタル回路や量子電圧標準の性能を左右する一つの重要な問題である。一方サブギャップ電流の原因に関して、これまでいろいろと議論されてきたが、謎の部分が多い問題であった。このたび我々は、二つの異なった実験で、サブギャップ漏れ電流の二つの重要な要因を突き止めた。すなわち:環境と共振する光子介在トンネルと[1]、接合界面の固有の準粒子界面準位[2]である。

超伝導体/絶縁体/常伝導体(S/I/N)トンネル接合でのサブギャップ漏れ電流は、このような接合を使った量子電圧標準において、電流標準の精度に直接関連する重要な問題である。我々はチップ上にランド面などに構成せられるフィルターを作成し、サブギャップ漏れ電流を詳細に調べた。その結果、S/I/Nトンネル接合でのサブギャップ電流は、主に環境中と共振する光子により誘起されるものであるという新たな見地を得た。このような漏れのメカニズムは、フィルターなどで効果的に抑止することが可能なのである。

我々は超伝導体/絶縁体/超伝導体(S/I/S)トンネル接合でのサブギャップ漏れ電流も詳細に調べた。接合はSQUID状に作成され、Andreev反射に起因する有限電圧での電流は磁場により抑止した状態で漏れ電流を評価した。電極材料はアルミまたはニオブ、トンネル障壁はアルミ酸化膜である。その結果、漏れ電流は超伝導体と絶縁体との界面で誘起される界面準位によるものであるという結論を得た。S/I/S接合では、前記の光子介在漏れ電流は超伝導ギャップで大きく抑止され、主なサブギャップ漏れ電流は界面準位によるものである。

[1] *“Environment-assisted tunneling as an origin of the Dynes density of states”*

Physical Review Letters, 105, 026803, 2010

[2] Not published

#### 2. 超伝導可変ミラーの提案

1次元マイクロ波導波路に結合した超伝導量子ビットを使った光子の反射を可変的に制御できる鏡の理論的提案を行った。詳細は本ニュースレター英語版を参照のこと。

**I. スピン・軌道相互作用の大きな異方性** 半導体中のスピン・軌道相互作用は人為的に制御可能であり、電子スピンを電場等により効率良く制御する為の重要な物性である。今回スピン・軌道相互作用が強い InAs 量子ドット素子に直接2端子電極をつけ、それを流れる電流の励起スペクトルを詳細に調べることで、スピン・軌道相互作用が外部磁場の方向に対して大きな異方性を持つことを見出した。図の(a)-(d)に示したのは、基底状態(最も下の線)と第一励起状態(下から二番目の線)の面内磁場の強さ依存性である。 $\phi$ は面内での磁場の印加方向を表す(図(e))。基底状態の電子スピンの向きと第一励起状態のスピンの向きは外部磁場と平行で、それぞれ反対を向いている。矢印で示した磁場領域では二つの状態のエネルギーが接近し、「反交差」している様子が分かる。この反交差の幅がスピン・軌道相互作用の大きさを特徴づける。図(f)はその反交差の大きさを面内角度 $\phi$ の関数でプロットしたもので、実線は理論計算による結果で良い一致を示している。 $\phi=60^\circ$ で完全に反交差が消失している事が分かる。本研究により、半導体量子ドット中のスピン・軌道相互作用の大きさを正確に見積もる事が可能になり、さらにこの相互作用の大きさを制御可能である事を示すことができた。[1]今後はゲート電圧など他の外部パラメタでの相互作用の変調を目指す。

**II. g 因子制御二重量子ドット** 半導体二重結合ドットは電子スピン量子ビットのコヒーレント操作や読み出しの基本的な舞台である。今回、縦型タイプの GaAs をベースとした二重量子ドットの一方に In 元素を加えたデバイスを作成し、外部磁場下でこの伝導特性を調べることで二つの量子ドットが異なる Lande g 因子(0.33, 0.89)を持つ事を確認した。外部磁場の元で、異なる g 因子を持つ直列二重量子ドットは共鳴トンネルの条件を一つのスピン状態しか満たす事ができない。興味深い事に、この実験ではこの共鳴トンネル条件が満たされていても電流が強く抑制される事が見出された。これは共鳴条件が満たされない方のスピンの量子ドットを占有して局在してしまうことにより、それ以降の電流が抑制されることが原因である。[2]この「スピントルネック」効果は g 因子の正確な見積もりを可能にし、また g テンソルの評価[3]や過渡電流の奇妙な量子化[4]など新奇な現象をもたらす。

[1] S. Takahashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. 104, 246801 (2010).  
 [2] S. M. Huang, Y. Tokura, H. Akimoto, K. Kono, J. J. Lin, S. Tarucha and K. Ono, Phys. Rev. Lett. 104, 136801 (2010).  
 [3] Y. Tokura, T. Kubo, Y. -S. Shin, K. Ono, and S. Tarucha, Physica E 42, 994-998 (2010).  
 [4] Yasuhiro Tokura, Keiji Ono, and Seigo Tarucha, J. Phys.: Conf. Ser. 193 (2009) 012102.

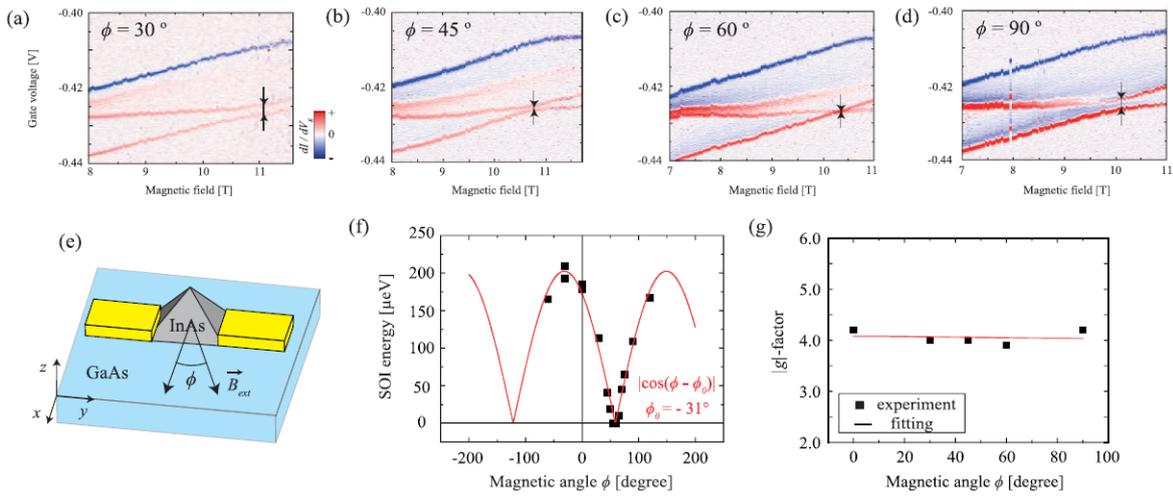


図 (a)-(d) さまざまな印加角度  $\phi$  における InAs 量子ドットの電流の励起スペクトルの磁場依存性。矢印に挟まれた点、スピン下向き基底状態とスピン上向き第一励起状態が反交差するところ。(e) 素子の概念図と磁場の方向 (f) 反交差の大きさの磁場の向き  $\phi$  依存性。(g) Lande g 因子の磁場の向き依存性。

## 〈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)

#### (光励起三重項電子スピンを用いた動的核偏極の重水素デカップリングによる高速化)

私たちは、ペンタセン分子の光励起三重項電子スピンを利用して、動的核偏極によって核スピンの高偏極化を行う際に、ホスト結晶を重水素化してプロトンスピンの数を減らすことによって、高速化を行ってきた。今回、重水素を CW 照射でデカップルすることによって、プロトンスピン間のスピン拡散係数を高めて、さらに高速化が可能であることを見出し、実験的に実証した。この結果は、核スピン量子ビット・量子メモリの初期化や量子誤り訂正のためのフレッシュ量子ビットの供給に応用が期待される。

#### (分子スピンバス量子サイバネティクス系の Tripartite Entanglement の検出技術の確立)

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、混在する様式は、自然界を支配する群論的な対称性とトポロジ的な対称性によって決まる。これらのスピンは本来的に量子機能の発現の結果であるので、分子設計によって量子スピンビットとしての役割を持たせることができ、量子コンピュータや量子情報処理要素技術の開発にとって重要な「量子混在系の絡み合い状態」を人為的に制御するモデルとして位置づけることができる。2010年度前半期では、1電子スピンをバス qubit とする、核スピン混合 qubit 系(アンサンブル系)の「3 体量子絡み合い状態」を生成し、評価するパルス電磁波・スピン制御技術を確立した。さらに、Tripartite Entanglements を視覚化するアプローチを示した。

## 〈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 Yb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を一次元光格子に閉じ込め、さらに光格子の軸方向に大きな磁場勾配を印加して、磁場に大きな感度を持つ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成功し、BEC の空間分布をこのスペクトル情報から再現することに成功した。また、量子シミュレーション研究として、Yb 原子のボース・フェルミ混合系を 3次元の光格子に導入した系を用意し、特に、光格子強度を共鳴変調することにより、ボソンとフェルミオンが相分離をしている境界に、長寿命で高エネルギーを持ったボソンとフェルミオンからなる束縛ペアを非平衡的に生成することに成功した。この束縛ペアの振舞い、特に緩和過程を詳しく調べることにより、この相分離境界領域の特異な性質に関する情報が引き出せると期待される。また、フェルミ粒子についても、6 成分フェルミ粒子系、すなわち SU(6)の系であることに起因した Mott 絶縁体の生成に対する Mott ギャップの存在を示唆する結果が得られた。さらに、量子非破壊測定によるスピンスクイズド状態生成システムについて様々な改良を重ね、信頼性・安定性を大幅に向上させることに成功した。

### 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)

高速断熱通過を用いて置換対称性を持つエンタングル状態であるディッケ状態の発生実験を進めている。このためには、非共鳴サイドバンド遷移を高強度のビームで励起することが必要であるが、大きなシュタルクシフトが発生する。このシュタルクシフトをキャンセルし、高忠実度でディッケ状態を発生させるための実験装置の改良を行った。また STIRAP(誘導ラマン断熱通過)を用いたロバストな量子ゲート実現に必要な低周波数ノイズのラマン光源実現のための、光コムを用いた対称位相ロックシステムを完成させた

開放型のプレーナートラップは平面基板上に電極パターンを作製するため、従来の立体的なトラップ電極よりも集積化が容易で、かつ光学アクセスが良い。我々はアルミナ基板に金で電極を作製し、カルシウムイオンを電極表面から約 400  $\mu\text{m}$  上方に捕獲してレーザー冷却することに成功している。さらに浮遊電場に起因するイオンのマイクロ運動を抑制するために、プレーナートラップに適した新しい手法を開発した。

## <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

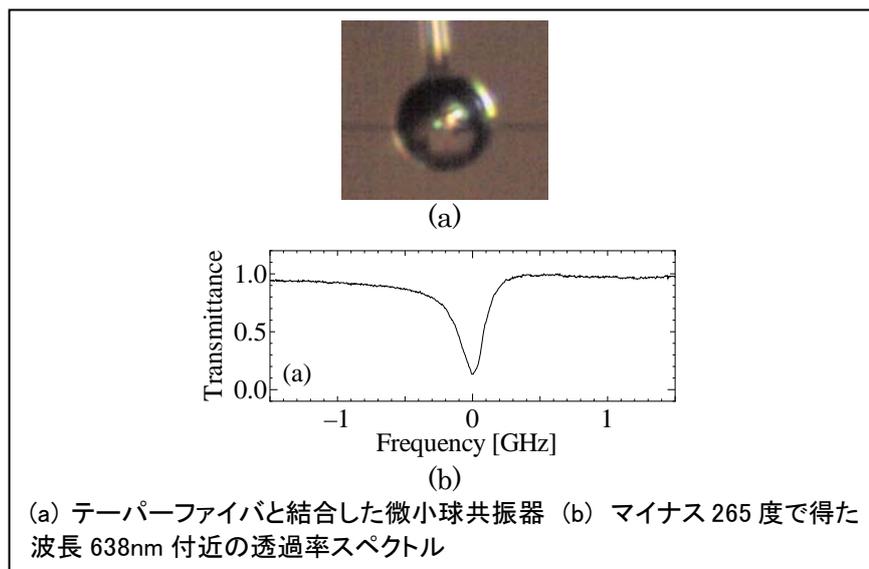
研究代表者／竹内 繁樹（北海道大学電子科学研究所・教授）

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。

単一光子と相互作用する量子系としては、単一発光体は自然な選択です。なかでも、ダイヤモンド中の窒素欠陥 (Nitrogen Vacancy, NV) 中心は、長い位相緩和時間と強い耐性が報告され、注目されています。また、光子と単一発光体を強く相互作用させるための高効率固体共振器としては、テーパー状に引き延ばした光ファイバ(テーパーファイバ)と結合させた微小球共振器が知られています。しかし、量子状態制御に必要な極低温環境下で、テーパーファイバと微小球間の距離を数ナノメートルの精度で制御することは困難でした。

今回私たちは、冷却装置に工夫を凝らし、絶対温度 8 度(マイナス 265 度)程度の極低温環境下で、直径 1 マイクロメートルのテーパーファイバと直径 70 マイクロメートルの微小球間距離を数ナノメートルの精度で制御することに成功しました。また、ダイヤモンド NV センターの共鳴波長である波長 638nm のレーザー光により高効率共振器(Q 値 200 万)として動作することの実証に極低温域で初めて成功しました[1]。この成果は、今後の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につながる成果です。

[1] Takashima et. al., Optics Express, vol. 18, No. 14, 15169 (2010).



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（大阪大学・基礎工学研究科・准教授）

多数の光子にまたがる量子もつれには、光子どうしの相関の様子が異なる多くの種類がある。ある量子もつれ状態では、光子の全てにまたがる相関を通じて強い量子もつれを保持しており、また別の量子もつれ状態では、少数の光子間の相関に分割された形で量子もつれを持っており、その分だけ光子の損失に対する耐性が強い。「W状態」は、後者の最も極端な場合で、光子損失に最も強い量子もつれ状態である。我々は、このW状態のサイズを拡張する手法として、量子もつれ状態を担う光子の数を2個ずつ増やす簡単な方法を提案し、実証実験を行った。この方法によって、3光子および4光子W状態を生成し、W状態の特徴である光子対間量子もつれが全ての対に存在することを観測した。この方法は、初期状態のW状態のサイズに依らず適用可能で、しかも1個の光子だけにしかアクセスする必要がないため、多くの粒子にまたがる量子もつれを生成するための有用なツールであると考えられる。

