

NEWS LETTER

Vol. **01**

2010年5月1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]



QUANTUM
CYBERNETICS

<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」

研究紹介

<<研究項目 A>>

蔡 兆申	独立行政法人理化学研究所	3
都倉 康弘	NTT 物性科学基礎研究所	4

<<研究項目 B>>

北川 勝浩	大阪大学	5
-------	------	---

<<研究項目 C>>

高橋 義朗	京都大学	6
占部 伸二	大阪大学	6

<<研究項目 D>>

竹内 繁樹	北海道大学	7
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)

超伝導量子サイバネティクス研究グループでは、ジョセフソン量子ビットのコヒーレントな操作に関連する一連の研究を行っている。超伝導量子ビットを人工の巨視的原子とみなした量子光学の研究に関しての重要な進展や、無デコヒーレンス亜空間の実現、量子非破壊読み出し等の成果があったので以下に特記する。

これは固体中の電子状態と、共振器や伝送線中の光子とがコヒーレントに結合した混合量子系である。主に人工原子として磁束量子ビットを使い、これを伝送線の中に配置し実験を行った。開放系にある自然原子は共鳴散乱によって検出できる。これは共鳴蛍光と呼ばれる量子光学の基本原理解である。我々は単一の巨大な人工原子により、同じような入射電磁場の散乱が起こることを観測した。人工原子のこのような振る舞いは、量子光学を使った次元開放系中の点散乱源の予測と定量的に一致していた。このような現象は、巨視的量子散乱と呼ぶことができる。共鳴条件では入射電磁波がほぼ完全に反射されること(透過電磁波の消滅)が観測された。これは原子と場の相互作用が大変強いことを示し、このような制御性を備えた人工原子の量子光学やフォトニクスへの応用が期待される。

人工原子の2準位を使い、弱いマイクロ波を照射した場合、入射光の約94%が反射される弾性散乱が観測された。更に強いマイクロ波を照射したときには、非弾性散乱(蛍光共鳴)が観測され、Mollowトリプレットが明確に観測された。この成果は *Science* 誌に掲載された[1]。

人工原子の3準位を使った実験も行った。 $|0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制される縮退点にバイアスした場合、電磁誘導透過(electromagnetically induced transparency, EIT)が観測され、Autler-Townes ダブルレットが明確に観測された[2]。縮退点から離れたバイアス点では $|0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制されず、光学的ポンピングによる反転分布が実現し、マイクロ波光の誘導放出と増幅が観測された[3]。上記の成果は *Physical Review Letters* 誌で出版された。

二つの磁束量子ビットがそれらの超伝導ループの一部を共有することにより結合されている量子ビットの研究を行った。低周波数の磁束雑音の相関効果を調べ、局所的な磁束ノイズがデコヒーレンスの要因であることを突き止めた。また同様なノイズ源に対応した無デコヒーレンス亜空間を実現した。

ジョセフソン量子ビットをその最適動作点で量子非破壊的に読み出すことが可能な、分散型読み出し法の研究を行っている。量子ビットをタンク回路中に置くと、タンク回路の共振周波数は量子ビットが0状態と1状態の時で少し異なる値を持つことを利用して読み出しを行う。ジョセフソン接合のバイファークーション現象を利用した非線形タンク回路を使った量子非破壊読み出しを実現した(読み出し効率:0状態=90%、1状態=40%)。

超伝導量子ビットの理論的研究では、複数ビットを使った制御可能な鏡[4]、制御可能な電磁誘導透過デバイス、量子シミュレータ、トポロジカル保護を持つ超伝導量子ビット系を使ったスピンシステムの量子エミュレータ、動的カシミア効果等の研究を行った。

[1] *Science* **327**, 840(2010)

[2] *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 193601, 2010

[3] *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 183603, 2010

[4] *Phys. Rev. A*, in press

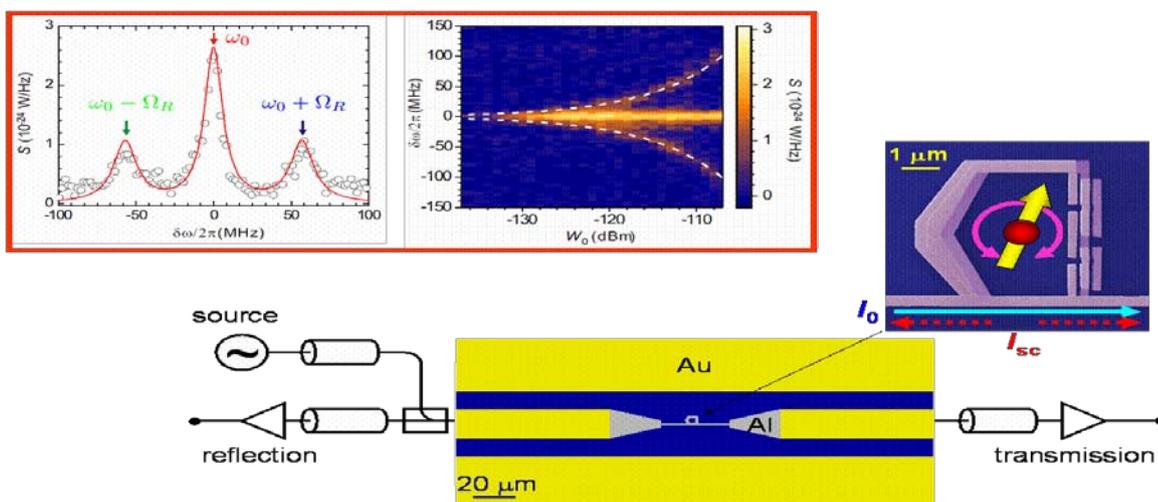
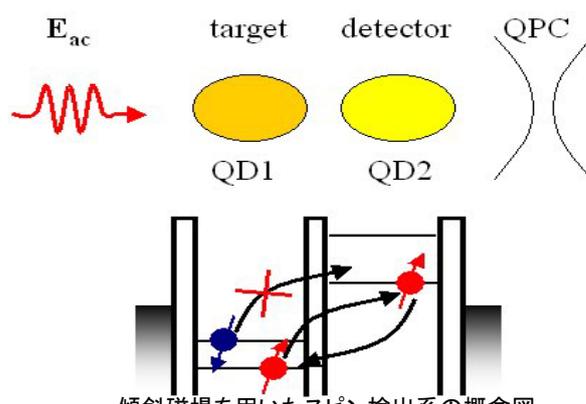


図1 伝送線(1次元開放系)中に配置された人工原子(磁束量子ビット)。

挿入図(赤枠): 巨視的量子散乱の一例として非弾性散乱(蛍光共鳴)の実験結果をしめす。Mollowトリプレットが明確に観測されている。

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)

I. 高性能スピン検出 単一電子スピンの検出はスピンの持つ磁気モーメントとプローブとの相互作用が極めて弱い為に技術的に困難だが、スピン状態を電荷状態に転写する事により、電荷計を用いて単一スピン状態の読み出しが可能である。これまで (1)強磁場下ゼーマン分離レベルのトンネルのエネルギー選択則による方法(2)パウリスピン閉塞状態の破れを用いる方法が用いられて来たが、破壊測定である点やスピンの回転のみを検出して向きが決定できないなど問題があった。今回微小磁石を集積化した傾斜磁場下二重量子ドットで、マイクロ波と量子ポイントコンタクト(QPC)による電荷計を用いた非破壊スピン射影測定に初めて成功した。[1]



傾斜磁場を用いたスピン検出系の概念図
 左右のドットのゼーマン分離の大きさが異なる

II. 量子キャパシタンス 半導体二重結合ドットを用いて、低周波から

10GHz を超える超高周波まで幅広い周波数で測定可能なキャパシタンス測定手法を実現した。本測定では、二重量子ドットおよびドット近傍に作り付けた QPC に独立に高周波電圧を印加し、ドット間の電荷移動に伴って誘起される QPC 電流の変化をロックイン検出している。検出された電流はドットのキャパシタンス成分に比例する。本手法を用いて、トンネル結合した二重量子ドット間の電荷移動に伴う量子キャパシタンスの測定に成功した。今後は2電子系の二重量子ドットにおけるスピン相関状態の検出を目指す。[2]

[1] Y.-S.Shin, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 046802 (2010). [2] T. Ota *et al.*, Appl. Phys. Lett. 96, 032104 (2010).

<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)

大規模量子計算を実現するには、個々の量子ゲートを高精度で実行する必要がある。分子の核スピンや電子スピンを磁気共鳴パルスで制御する場合、高感度・強照射のために用いられる共振器やその他の回路によってパルスが変形し、量子ゲートの忠実度を低下させてしまう。そこで、本研究では、系の応答を測定して歪を予め補償し、所望のパルス磁場波形を共振器内に発生する方法を開発した。この方法を用いて1量子ビットの回転ゲートに相当するラビ振動を観測し、図1のように位相過渡歪を抑制できることを初めて示した。

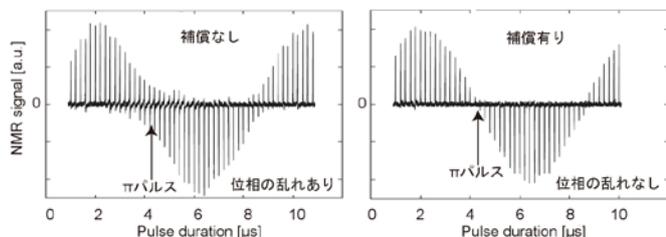


図1 パルス補償の有無によるラビ振動の変化

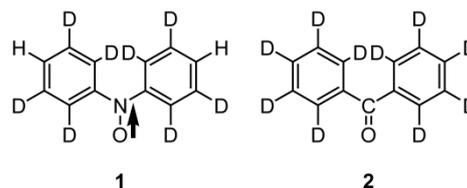


図2 量子ビット分子1とホスト分子2

分子スピン系では、分子設計によって群論的な対称性とトポロジ的な対称性を制御して、電子スピンと核スピンの両方に量子ビットとしての役割を持たせた混合量子ビット系を作ることができる。本研究では、1電子スピン、3核スピン混合系のモデル分子として図2に示す分子1を分子2の格子中に埋め込んだ系を合成した。混合量子ビット系の絡み合い状態を評価するためのコヒーレントスピン制御技術を開発して、複雑な位相関係を初めて検出した。

〈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。本年度はそのための本格的な研究を開始した。

まず、量子計算機実現にむけて、新たに構築した真空チャンバーを用いて、光ピンセットにより金属チャンバー領域から薄型ガラスセル領域に原子を移動し、薄型ガラスセル領域にてBECを生成することに成功した。さらに、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系、およびそのための安定な光源系を開発した。また、量子シミュレーション研究として、Yb 原子のボース凝縮体を光格子に導入し、モット絶縁体状態、バンド絶縁体状態を実現した。さらに、引力相互作用および斥力相互作用するボース・フェルミ混合系を用意し、相互作用の違いによる原子系の振舞いの相違を、原子波干渉および光会合法により実験的に詳しく調べその振舞いをほぼ理解することに成功した。また、フェルミ粒子についても、フェルミ粒子同位体混合を実現し、その同位体間の大きな引力相互作用による、集団運動の抑制を観測することに成功した。さらに、量子非破壊測定により

生成したスピンスクイズド状態を、光を用いて高速にデコヒーレンスなく操作することに成功するとともに、高速量子フィードバック実現にむけて、FPGAによる「スピン射影測定値」を「制御光パルス長」に変換するシステムを準備した。

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」では平面型のプレーナートラップの開発および高速断熱通過法を用いた量子状態制御の研究を進めている。プレーナートラップについては、小型でかつ深いトラップポテンシャルを形成するプレーナートラップを開発した。新しいトラップは集積化に向けてより適した形状になるよう、小型化、電極間に設けていたスリットの排除、電極表面や端面の精度を上げるため作製方法の変更を行った。さらにプレーナートラップの難点である従来型より浅いポテンシャルについても、シミュレーションで電極配置の最適化を行った結果、従来の設計に比べ6倍ほど深いポテンシャルを形成できることがわかった。このトラップを作製・実装してカルシウムイオンを捕獲することに成功し、イオンの永年周波数の測定、DC電圧印加によるイオンの移動量の測定、水平方向の2軸についてのRF-光子相関を用いたマイクロモーション補正を行った。

高速断熱通過法を用いると、ラビパルスを用いた方法に比べて、レーザーのパルス幅や強度など実験パラメーターの変動に強いロバストな量子状態制御が可能になる。今年度は2個のCaイオンを用いてDicke状態の生成実験を行った。まず、2個のイオンの重心運動振動モードを振動基底状態まで冷却し、その後、個別にレーザーをアドレスした1個のイオンのブルーサイドバンドを励起することにより1個のフォノンを振動状態に生成する。この二つのイオンに等振幅のレッドサイドバンドの高速断熱通過レーザーパルスを照射することでDicke状態を生成することができる。生成された量子状態はラムゼイ干渉法によりパリティ信号を求めることで解析される。実験によると、通常の周期の2倍の周期のラムゼイ干渉信号が観測され、2個のイオンのDicke状態が生成されていることが確認された。

〈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、とくにデコヒーレンス制御の実現を目指します。また、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ます。今年度は、特に本プロジェクトの鍵となる、線形光学量子回路の基盤となる技術について研究を行い、以下のような成果を得ました。

「93%±5%と、世界最高レベルの2光子干渉性をもつ光子源の実現」

2光子干渉とは、2つの光子を半透鏡に入射した際に、そのプロセス間の干渉により、2つの光子が何れかの側から2つ一緒に現れる現象です。この2光子干渉は、線形光学量子回路の性能を決める重大要因です。今回、パラメトリック下方変換により発生した光子の2光子干渉性を理論的に検討、その結果に基づき工夫した結果、93%±5%と、世界最高レベルの2光子干渉性をもつ光子源を実現しました。

「線形光学量子ゲートにおけるエラー要因の解析」

線形光学量子ゲートにおけるエラー要因としては、2光子干渉性に加え、素子の反射・透過率や、偏光依存位相差などがあります。我々は、これらのエラー要因の寄与を、プロセスマトリックスを用いて理論的に解析しました。その結果、特にエラー量が小さい領域で、要因ごとに異なる依存性（一次、2次）を持つこと、またエラー間の相乗・相殺効果が全エラー量の10%に達する場合があることなどを明らかにしました。

これらの成果をもとに、次年度以降は、量子制御用光量子回路の設計構築に取り組みます。

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）

複数の粒子が量子力学的に強く相関した量子もつれ状態は、粒子の数が3つ、4つと多くなるにつれて、定性的にも異なる多種多様なもつれ合いのパターンが可能になっていく。その中のひとつ、クラスター状態は、量子計算の実行を容易にするリソースとして着目されている。4光子のクラスター状態を発生し、計算の基本となる量子ゲート操作を行い、その入出力特性を量子プロセストモグラフィによって評価することで、高い忠実度で操作が行われていることを実証した。

W状態と呼ばれる別のパターンの量子もつれ状態では、各粒子が他の全ての粒子と等しく相関を持つため、あらゆる粒子対の組み合わせが互いに手を繋いでいる網の目のような構造を持つ。このような状態に粒子を追加してW状態を拡張するには、既存の全ての粒子との相互作用が必要に思えるが、量子力学の性質をうまく使うと、たった一個の既存の粒子と相互作用させるだけで、拡張が可能になる。独自に提案した光子のW状態の拡張法の検証実験を進めている。

量子力学の性質を通信に広く応用するためには、離れた2地点に置かれた量子メモリの間に、光を媒介として量子もつれを作ることが重要である。この際、距離に応じて光ファイバの損失が増加するため、その影響をなるべく避けて生成効率と忠実度を高める工夫が重ねられている。我々は、1個の2準位系からなる量子メモリと、コヒーレント光を非共鳴に相互作用させる場合に、損失に起因する原理的な限界を明らかにし、さらに、その理論限界に達する生成法の提案を行った[Phys. Rev. A **80**, 060303(R) (2009); Phys. Rev. A (2010), to be published.]。