

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成 15 年度採択研究代表者

清水 富士夫

日本電信電話（株）物性科学基礎研究所・リサーチプロフェッサ
電気通信大学 レーザー新世代研究センター・共同研究員

中性原子を使った量子演算システムの開発

1. 研究実施の概要

我々は個々の中性原子、あるいは中性原子の集団を量子情報処理のエLEMENTとして情報処理システムの構築を目指す研究をしている。NTT、電通大の 2 グループ、東大駒場、熊本大の 5 グループがそれぞれ研究機関の得意な分野を反映した特徴ある研究を行い成果をあげている。NTTでは微細加工技術の高さを利用して MgB2 および Nb の超伝導原子チップを製作し、閉超伝導電流による原子のトラップに成功、さらに熱スイッチを用いた原子トラップの制御に成功した。さらに、表面からのトラップ距離の変化に対する原子損失の依存性を測定し、常電流原子トラップのような問題を起こさないことを確認した。電通大(清水)グループでは 2 種類の 2 重 3 次元光格子を用いた量子情報システム構築を目指して研究を進めているが、19 年度には使用可能な 2 重光格子のめどを立てることができ、現在、Ne-Na 原子の系で具体的な操作方法の設計を終え、実験の準備中である。電通大(中川)および東大駒場は冷却 Rb 原子、およびそのボーズ凝縮体を利用した量子情報処理のための要素技術の研究を行っており、原子チップ上での BEC 原子干渉計や原子操作、光双極子トラップへの単一原子のトラップと検出、高 Q 光共振器および光結晶共振器での単一原子の検出と量子状態操作、連続 BEC 生成へ向けた研究などを行っている。また、熊本大では冷却原子集団(気体)を使った集団的なコヒーレンスの研究を行っている。研究課題によっては若干遅れが見られるが、終了時までには全体として当初の目標は達成できるものと思われる。

2. 研究実施内容

NTT グループ

19 年度は MgB2 の超伝導閉回路を書き込んだ原子チップを用いて Rb 原子のトラッピング、トラ

チップされた原子の熱スイッチによる制御、トラップされた原子が原子チップ表面の電流、双極子モーメントなどの擾乱による緩和の研究を行った。まず、電流回路、原子ともに量子系である閉電流磁気トラップにトラップしたこと、およびその運動が熱スイッチによって制御できることを実証したのは世界最初である。緩和に関しては、電流路の幅が 100 ミクロンメートルと太いため、非常によい実験データは得られていないが、それでもトラップ原子を表面上 30 ミクロンメートルまで近づけることに成功し、その位置での緩和時間が約 10 秒とこれまで常電流チップで報告されてきた値より約 1 桁長いこと、距離を近づけても急速に短くなることはないことを確認した。これは超伝導原子チップが単一振動モードの単一原子を保持する qubit として有望な候補であることを実証している。

電通大 清水グループ

清水グループでは 2 種の原子を独立な 3 次元光格子にトラップしたシステムの構築を目指して開発を行ってきた。このためには 5 組の互いに安定した 00 モードの共振器からなる光共振器系をくみ上げる必要がある。昨年度までに製作した共振器系は安定度に問題があることが判り、19 年度には全く新しい構成で共振器を製作し直した。これと同時に、原子系の方も再検討し、準安定状態ネオン原子の Zeeman 準位と、ナトリウム原子の基底超微細構造準位を磁場を使って共鳴させ、単一、および Na-Ne 相互作用の制御を行い量子制御を行うシステムに変更し、目下、実験の準備中である。

電通大 中川グループ

① 光定在波パルス中の BEC 原子を用いた量子状態操作

アトムチップによって生成された Rb 原子の BEC を用いて光定在波パルスによる原子の外部運動状態を用いた量子状態制御を行った。対称な光定在波ポテンシャルを用いて原子を特定の一方方向に加速する量子ラチェット効果を実験で実現した(図 1)。これは運動量状態間の干渉効果によるもので一種の原子干渉計とみなすことができる。また同様の系を用いて原子の位相に依存して特定の運動量状態の原子の分布を増大もしくは抑圧することが可能であることを実験的に示し、これはサーチなどの量子情報処理に応用可能と考えられる。

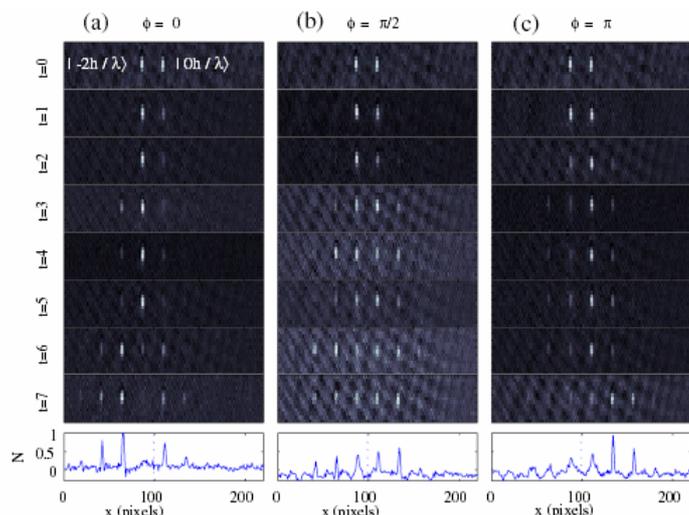


図 1 光定在波パルス中の原子の運動量分布

② 少数個極低温 Rb 原子を用いた Rydberg 状態の分光

光双極子トラップ中の Rb 原子の Rydberg 状態原子間の双極子・双極子相互作用を用いた 2 量子ゲート操作の実現をめざして実験を進めている。今年度は 780nm と 480nm レーザーによる Rb 原子の Rydberg 状態への 2 光子吸収遷移を EIT 信号により観測し、Rydberg 励起用 480nm レーザーの周波数安定化を行った。またこの光源を用いて磁気光学トラップ中の 10 個以下の少数個の ^{87}Rb 原子の Rydberg 状態への励起をトラップロスより観測した。このため今後原子数を 1 個または 2 個にまで減らして光双極子トラップに移行し、Rydberg 状態原子間の双極子・双極子相互作用によるエネルギーシフトや励起の抑圧効果を検証する予定である。

東大駒場グループ

① 量子操作のための冷却原子源の開発(鳥井他)

ルビジウム原子のボース凝縮体を光双極子ポテンシャルを用いて輸送し、アトムチップや光格子にロードするための真空装置および光源を開発した。真空チャンバーはボース凝縮体を生成するメインチャンバーと、ボース凝縮体を輸送するサイエンスチャンバーに分れており、メインチャンバーの真空度は 10^{-11} Torr 以下を実現した。原子の磁気光学トラップへのローディングはメインチャンバーへの磁場の影響の少ないスピントリップ型ゼーマン減速器を採用し、通常の磁場増加型ゼーマン減速器と同様の性能(最終速度 20 m/s で 10^{11} atoms/s)を得た。また、波長 1.06 μm の半導体励起固体レーザーの出力(200 mW)をファイバー増幅器で 10 W まで増幅し、シリンドリカルレンズを用いて容積の大きい光双極子ポテンシャルを形成し、磁気光学トラップされた原子を 10^6 個光トラップすることに成功した。

② フォトニック結晶による単一原子観測(山本他)

中性原子と光子を用いた量子情報処理システムを開発する上で、各種デバイスの集積化は大きな課題となっている。これまで原子に関してはアトムチップと呼ばれる基板デバイスによって集積化が図られている。いっぽう光に関してはフォトニック結晶(PhC)とよばれる光回路チップの研究が、近年おもに産業分野で注目を集めている。我々はアトムチップと PhC を統合することで、全デバイスの集積化が可能であると考えている。本研究の目的は、中性原子との光結合に適した PhC 共振器を開発し、量子操作の予備段階として単一原子観測を行うことである。

現在のところ高 Q 値 PhC 共振器の共鳴波長は通信帯領域に限られている。そこで我々はまず、ルビジウム原子の通信帯波長遷移と PhC 共振器を用いた単一原子観測が実現可能であることを理論的に示した。通信帯波長を用いることは量子情報の伝送という観点で非常に有利である。また従来の高 Q 値 PhC 共振器は、基板内部に光を蓄えているため、相互作用は減衰したエバネッセント光を介さなくてはならず、原子と光子の強結合を阻んでいた。我々は、従来型共振器の中心に線形のエアスロットを導入することにより、高い Q 値を維持しつつ相互作用領域の電場強度を著しく高めることに成功した。このエアスロット共振器は原子-光子結合に適しているばかりでなく、微小センサや低閾値レーザー等の産業デバイスへの応用も可能である。

③ 単一原子観測に向けたナノファイバーリング共振器の作製(滝口他)

近年、ナノファイバー中の伝播モードと中性原子の相互作用に関する研究が盛んに行われている。ナノファイバーを用いると、ファイバーからのエバネッセント光のしみだしが原子の吸収断面積とほぼ等しいため、一原子と一光子を強く結合させることができる。このナノファイバーを用いた共振器を作製すれば、たとえ Q 値が低くても共振器量子電気力学実験が実現できる。特にナノファイバー共振器は、構造上、光ファイバー、光結合器、共振器が一体となっており、原子を用いた量子状態の生成、操作、伝送といった、量子情報通信への応用に適したデバイスであると考えられる。

今回、このナノファイバー共振器の作製を行った。ナノファイバーは、通常の光ファイバーをセラミックヒーターに入れ加熱し両端を引っ張ることで作製する。ナノファイバー共振器は、ナノファイバーをリング状に丸め、ファイバー同士を接触させることで作製する。片方のファイバーからもう片方のファイバーへとモードが結合するようになると、リング部分を共振器として用いることができる。今回はナノファイバーの径が400nm程度、透過率は80%のものを作製した。半導体レーザー波長を掃引するスペクトル測定により、ナノファイバーリング共振器の Q 値は 40000 と見積もられた。

④ 強度相関法による冷却原子の温度評価(中山他)

1956年にハンバリー-ブラウンとトウイスが光の強度相関実験を行って以来、強度相関測定法は現代の量子光学実験では欠かせない手段となっている。最近では冷却原子におけるフェルミオンとボソンの統計的性質の違いも強度相関測定法を用いて観測された。当グループでは冷却原子と光子の間の強い相互作用を用いた量子情報ネットワークの研究を行っている。このために原子を十分冷却しておくことが必要であり、原子集団の温度の定量的な評価が重要になってくる。我々は、光ファイバーを用いた強度相関測定法により原子集団の簡便な温度評価の実験を行った。

十分光量を落とした冷却原子集団からの散乱光を光ファイバーにイメージングし、ビームスプリッターで分岐した後、二つの単一光子検出器を用いて同時計測実験を行う。この際同時計測の確率は冷却原子集団の量子統計性を反映しバンチング効果を示す。バンチング効果は原子の運動による拡散で緩和するため緩和時間を測定することにより、原子集団の温度評価を行うことができる。この手法で得られた温度は $56 \pm 1 \mu\text{K}$ となり、広く用いられる時間飛行測定法で得られた測定結果 $65 \pm 6 \mu\text{K}$ と良い一致が得られた。

⑤ 光双極子トラップ中ボース凝縮体の集団コヒーレンス(中山他)

当グループでは、ボース-アインシュタイン凝縮体(BEC)における集団励起状態を用いた量子情報処理の研究を行っている。原子集団中に生成した集団コヒーレンスの長寿命化は、量子ゲート操作、量子中継などを行うための重要な課題である。現在熱原子気体で報告されているコヒーレンス時間は $10 \mu\text{s}$ 程度であり、自由空間中の BEC でも $140 \mu\text{s}$ 程度である。我々は光双極子トラップに捕獲した BEC を用いることにより、超放射領域での原子の集団コヒーレンスの長寿命化に成功した。

集団励起状態を用いた応用実験では原子集団の空間的な形状が重要となる。そこで波長 974 nm の半導体レーザーを 2 本浅い角度で交差させ、葉巻型の交差型光双極子トラップを形成し実験に用いた。光双極子トラップに捕獲した BEC に対して共鳴線から十分離調を取った書き込み光を照射し、BEC に超放射領域での集団コヒーレンスを生成する。時間間隔を置いた読み出し光によって原子コヒーレンスを光に変換することにより集団コヒーレンスの緩和を観測する。本研究では原子気体を用いた実験の中でもっとも長い 500 μ s のコヒーレンス時間を得られた。

⑥ ボース凝縮体を用いたコヒーレンスのホログラフィック多重保存(吉川他)

近年、ライトストレージや DLCZ 法に基づく量子状態生成など、原子の基底状態コヒーレンスと光子を高効率で変換する技術の研究が盛んに行われている。しかし、これまでの実験では 1 つの原子集団に 1 モードのコヒーレンスしか記録することができなかった。本研究では、古典情報記録に用いられるホログラフィックメモリの原理を応用し、1 原子集団に多モードのコヒーレンスを同時に保存できる実験スキームを提案した。また、ボース凝縮体と超放射ラマン散乱を用いてこの原理を古典領域(光子数 $\sim 10^4$ 程度)で実験的に検証した。結果、2 モードのコヒーレンスをボース凝縮体中に生成・保存し、それらを独立に光に変換することに成功した。変換効率は 70%以上、コヒーレンス時間は 120 マイクロ秒であった。

熊本大グループ

我々は、原子系のサブレベルコヒーレンスをフルに活用した、量子情報処理技術への応用の可能性を、基礎物理の立場から模索しており、そのため、H19 年度は、前年度に引き続いて、ラムダ型 3 準位系における量子干渉効果の発現メカニズムの解明を行った。ナトリウム原子蒸気を用いて、一方向ポンピングの場合と対向ポンピングの場合に、発生光の特性を調べた。対向ポンピングの場合、mirrorless cavity と呼ばれるフィードバック効果により、共振器なしでも強い発振に至る。特に、ナトリウム蒸気の系の場合は、オフアキスに照射される 4 本のビームが同時に発振に至ることが実験的に示された。このような 4 光波パラメトリック発振は、楕円ビームを用いる方法、あるいは、シード光を入射する方法の 2 点で発振が確認されている。これら 4 本の出力光は、パラメトリックに強く結合しており、信号強度に強い相関が見られる。4 本の時間波形の古典的相関は確認されているが、まだ、量子相関の確認には至っていない。また、電磁誘導透過(EIT)とパラメトリック増幅、発振の関連について、詳細な解析を行った。図 2 は、入射光である、カプリング光とプローブ光の周波数を掃引したときのプローブ光とストークス光の強度であるが、2 つの光が 2 光子共鳴条件を満足する場合に、従来の EIT 理論では説明できない、高いパラメトリック増幅が観測されていることがわかる。これは、原子密度が高く、かつカプリング光強度が強い場合にのみ観測され、逆に、従来の EIT 理論は、原子密度が低い場合の限定的な理論といえる。理論的には、3 モード 3 準位型の Liouville-Maxwell 連立方程式を解くことで、プローブ光、ストークス光に対する伝搬方程式を求め、その解析解から、実際に EIT 媒質におけるパラメトリック増幅の挙動をある程度再現することができた。以上の成果は、「電磁誘導回折を用いたナトリウム原子の 4 光波パラメトリック発

振」(Opt. Lett. Vol.32, 1111 (2007))、「4 光波パラメトリック発振:理論と観測」(JOSA B25, 40 (2008))、あるいは、「EITにおけるパラメトリック増幅」(CLEO-QELS2008, May, at San Jose ポスター発表予定)等において、外部発表されている。

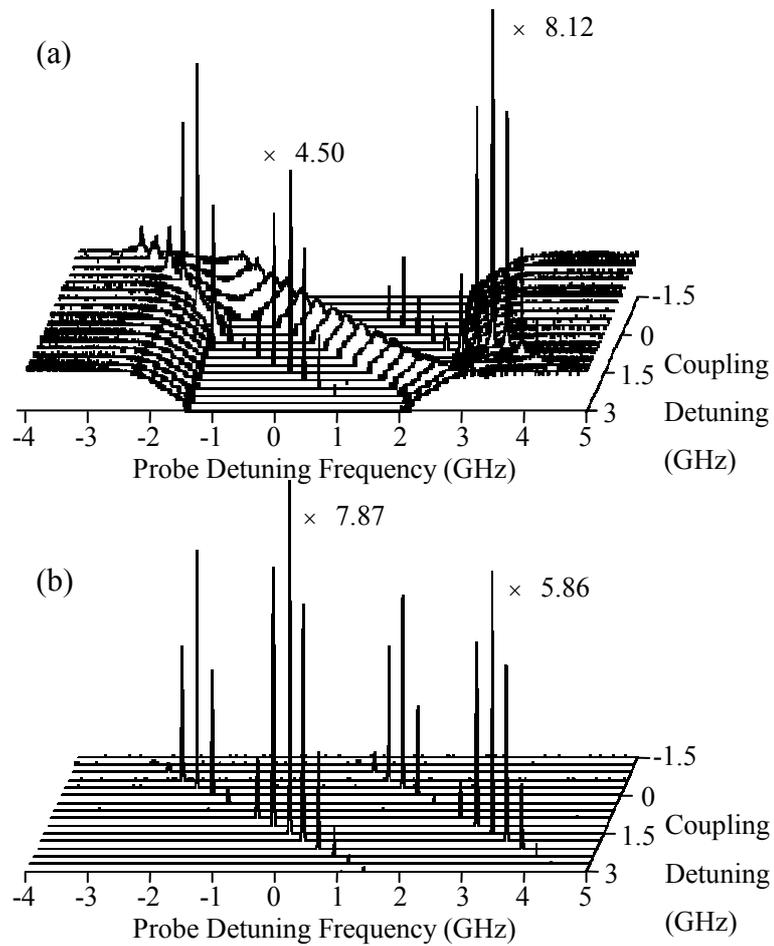


図2 カプリング光とプローブ光の周波数の関数としての、(a)透過プローブ光強度と(b)発生ストークス光強度の3次元プロット。数字はゲインを表す。

3. 研究実施体制

(1)「NTT」グループ

①研究者名:清水 富士夫(NTT 物性科学基礎研究所)

②研究項目

・アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発

(2)「電通大 清水」グループ

①研究者名:清水 富士夫(電気通信大学レーザー新世代研究センター)

②研究項目

・アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発

(3)「電通大 中川」グループ

①研究者名:中川 賢一(電気通信大学レーザー新世代研究センター)

②研究項目

・アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発

(4)「東大駒場 久我」グループ

①研究者名:久我 隆弘(東京大学大学院)

②研究項目

・原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発

(5)「熊本大」グループ

①研究者名:光永 正治(熊本大自然科学)

②研究項目

・ナトリウム原子を用いた量子干渉効果に基づく量子メモリーの研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

T. Mukai, C. Hufnagel, A. Kasper, T. Meno, A. Tsukada, K. Semba, and F. Shimizu : Persistent Supercurrent Atom Chip, Phys. Rev. Lett., 98, 260407 (2007).

Mark Sadgrove, Munekazu Horikoshi, Tetsuo Sekimura, and Ken'ichi Nakagawa : Rectified momentum transport for a kicked Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. Lett. 99, 043002

(2007).

Munekazu Horikoshi and Ken'ichi Nakagawa : Suppression of dephasing due to a trapping potential and atom-atom interactions in a trapped-condensate interferometer, Phys. Rev. Lett. 99, 180401 (2007).

Mark Sadgrove, Munekazu Horikoshi, Tetsuo Sekimura¹ and Ken'ichi Nakagawa : Coherent control of ballistic energy growth for a kicked Bose-Einstein condensate, Eur. Phys. J. D 45, 229-234 (2007).

Yutaka Yoshikawa, Kazuyuki Nakayama, Yoshio Torii, Takahiro Kuga: Holographic storage of multiple coherence gratings in a Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. Lett., 99(22), 220407 (2007).

K. Harada, M. Ogata, and M. Mitsunaga, "Four-wave parametric oscillation in sodium vapor by electromagnetically induced diffraction", Opt. Lett. 32, 1111 (2007).

K. Harada, H. Hayashi, K. Mori, and M. Mitsunaga, "Four-wave parametric oscillation: theory and observations", J. Opt. Soc. Am. B25, 40 (2008).

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:1 件 (CREST 研究期間累積件数:5 件)