

「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

(NTT 物性科学基礎研究所 リサーチプロフェッサー
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

量子情報処理、量子計算機を実現するためには、二量子状態(あるいは数個の量子状態)からなる量子系 (qubit) を準備し、その qubit の中で量子操作、状態の観測を行い、さらに、少なくとも二つの qubit を含んだ量子操作を行い、また、量子情報を伝達するために qubit と量子光の間で量子操作を行うことが必要である。これらの操作を行いうる量子系として、非常によく定義された量子状態を持ち、どのユニットをとっても完全に同一であり、かつ、多様な選択枝のある中性原子は非常に魅力的なものである。我々はこのような魅力ある中性原子を qubit として用いた量子状態操作を行うため種々の基礎研究を行っている。原子を qubit として用いる際に解決しなければならない課題に、原子の外部運動状態の制御、2原子間相互作用の制御、単一原子の量子状態の観測がある。原子は一個の原子を量子情報処理の単位として用いることができるだけでなく、原子の集団(通常は冷却原子気体)に光子の量子情報を書き込み、読み出し、あるいは操作する方法も可能である。これらの課題に対するこの取り組みを次節に述べる。

2. 研究実施内容

NTT グループ

我々はアトムチップ上に原子をトラップ、制御して量子操作を行う手段を開発することを目指して研究を進めている。この際、一番問題になるのは原子を原子チップ表面に近づけると、表面の磁氣的揺らぎのために早い緩和が起こることである。一方、量子操作を行うには強い閉じこめが必要で、原子をチップ表面近くまで近づけなければならない。我々はこの困難を回避するため、常電流ではなく、超伝導電流によって原子をトラップ、制御する研究を行っている。すでに17年度に我々は窒化ニオブの超伝導電流によってルビジウム原子のトラップに成功しているが、18年度はこれをさらに進めて、閉回路超伝導電流の作る磁場による原子トラップに成功した(図1参照)。このようにして生成した磁場は一般にはマイスナー効果のため磁場を変化させることは困難であり、従って原子の位置操作には不向きと考えられるが、我々はレーザー光を用いた熱スイッチを開発し、数ミリ秒のオーダーで電流をコントロールすることができるようになった。

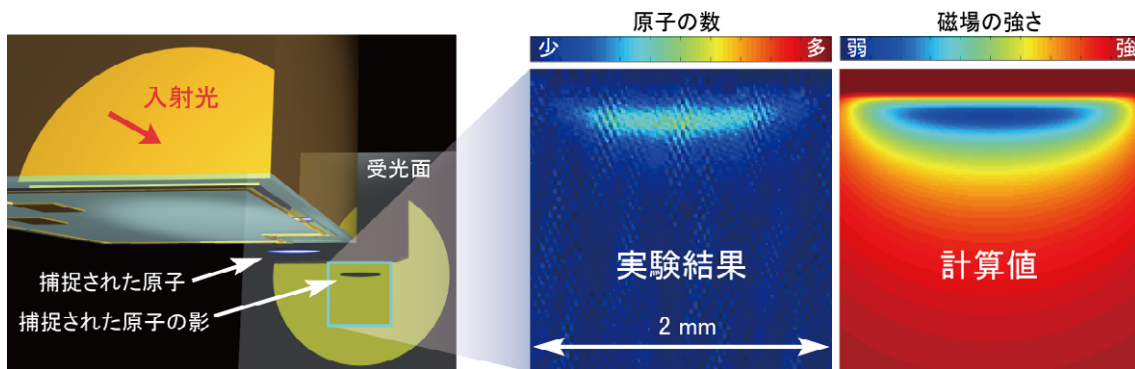


図1 原子トラップの計測方法（左図）と実験結果（右図）

電通大 清水グループ

中性原子を使って拡張可能な量子演算装置を作るためには、等価な原子を多数並べ互いに相互作用させる方法が望ましい。我々は、3次元光格子の各格子点に原子を一個ずつトラップした三次元 qubit システムを建設中である。この際、トラップされた原子は動かさないで、同一の格子間隔を持った独立な三次元光格子に別の原子をトラップし、この原子を仲介として量子操作を行う予定である。現在、ネオンとナトリウム原子を使ったシステムを建設中で、図はこのうち2次元分の光学系を示した図である。両原子で位相と波面を一致させるために各軸、各原子で独立な光共振器を構成している。反射鏡の位置を PZT で動かすことで二つの光格子間の相対位相を制御する。

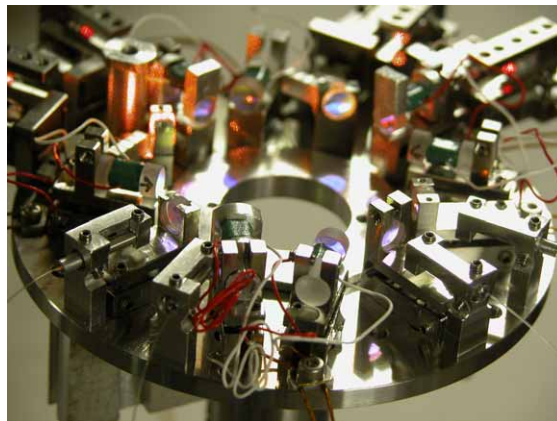


図2 2次元2重光格子

電通大 中川グループ

○アトムチップ上の BEC を用いた原子干渉計における干渉信号のコントラスト低下を調べ、これが主に原子間相互作用および磁場ポテンシャルによるデフェーシングによるものであることを明らかにした。またこのデフェーシングの影響をほとんど受けずに長いコヒーレンス時間が得られる BEC 干渉計を提案し、これを実験で実証した。これによって相互作用時間を 50ms 以上に延ばすことができ、これによって BEC 干渉計の検出感度を大きく向上することが可能となる。

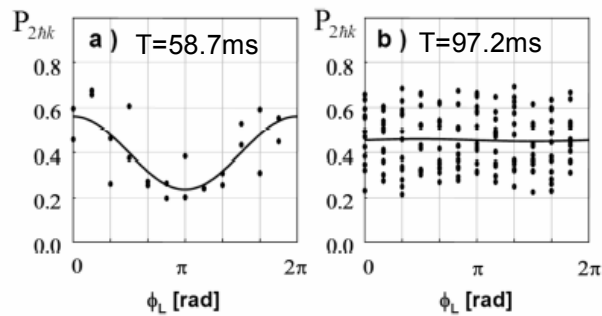


図3 アトムチップ上の BEC 干渉計によって得られた干渉信号

○光双極子トラップ中の単一 Rb 原子を用いて原子の内部状態と原子から放出される単一光子との間の量子相関の実現を目指して実験を進めた。また原子をRydberg状態に励起することによりその大きな原子間相互作用を用いて光双極子トラップ中の2個の原子間の量子相関を実現することを検討し、Rb 原子の Rydberg 状態への励起に必要な半導体レーザーの第二高調波を用いた480nm 波長可変光源の開発を行った。

東大駒場グループ

○量子操作のための冷却原子源の開発(東大駒場 鳥井)

原子を量子操作に用いる場合、個々の原子をポテンシャルトラップに固定して操作する方法以外に、原子フローを作り、その途中に光共振器などの操作素子を置いて流れてゆく原子、原子間の量子操作を行う方法も考えられる。当グループではゼーマン減速と2次元MOTを用いて高輝度の原子源の開発を行っている。

今年度はゼーマン減速器の先に、新しい超高真空槽およびクローバーリーフ型の磁気トラップ用コイルを設置し、ルビジウム原子のボース・アインシュタイン凝縮の実現を目指した。

○マイクロ光共振器による単一原子の検出(東大駒場 久我他)

マイクロ光共振器は原子 qubit の情報を光子状態に移し、遠方へ伝送したり、原子間の量子操作を仲介させるための基本部品であり、重要な開発課題である。我々はすでに数年前に通常型の共振器を使って単一原子の検出に成功しているが、今回は、多モードファイバーの端面を凹面研磨、多層膜蒸着してフィネス約1200の高Q光共振器を作ることに成功した。

しかし、いくつかの問題点も明らかになったため、現在は、高反射率鏡で微小共振器を構成するオーソドックスな手法とファイバー端面を使った手法の両方で研究を進めている。特に、後者に対する工夫として、シングルモードファイバーの先に1mm程度のグレーデッドインデックス多モードファイバーを融着し、その端面をの凹面加工を化学エッチングで行う方法を取り入れた。これにより共振器の更なる小型化を目指している。

○フォトニック結晶による単一原子観測(東大駒場 吉川他)

フォトニック結晶を用いると、波長の3乗程度の体積という極微の領域に電磁場を閉じ込めることも可能となる。このような条件下では単一光子と単一原子の相互作用の観測が容易くなるため、単一原子検出器としての潜在能力は高いものがある。ルビジウムの $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$ の励起状態間遷移(波長 1.53 ミクロン)を使った単一原子観測を目指して、二光子吸収による二重共鳴の観測を行い、現在はフォトニック結晶の設計、真空装置の製作を進めている。

通常のフォトニック結晶は、結晶媒質内に電場が最大になる場所ができてしまうが、単一原子観測という目的のためには自由空間の電場強度を大きくする必要がある。今回は、共振器の中心に 200nm 程度の細いスリットを設けた微小共振器の設計・シミュレーションを行い、誘電率の違いによる電場増強効果により、「自由空間」において高い電場強度が得られることを確認した。

熊本大グループ

原子集団(室温、あるいはレーザー冷却された気体)を用いた量子計算、量子操作の実現のため、任意の光子状態を保存する量子メモリの開発が不可欠である。原子による情報保存としてはラムダ型3準位系の超微細副準位を用いる方法が一般的であるが、この副準位間のコヒーレンスの寿命、大きさ、生成のメカニズム、等を、我々はNa原子気体を用いて、基礎研究の立場からシステムティックに調査してきた。18年度は電磁誘導透過と誘導ラマン散乱の競合の研究(Phys. Rev. A73, 013807 (2006)), 4光波パラメトリック増幅と発振(Opt. Lett. 2007年5月出版予定)、4光波の時間相関の観測(ICAP at Innsbruck, C.99 (2006))、4光波パラメトリック増幅の理論(ICAP at Innsbruck, C.115 (2006))、などの成果を得ている。

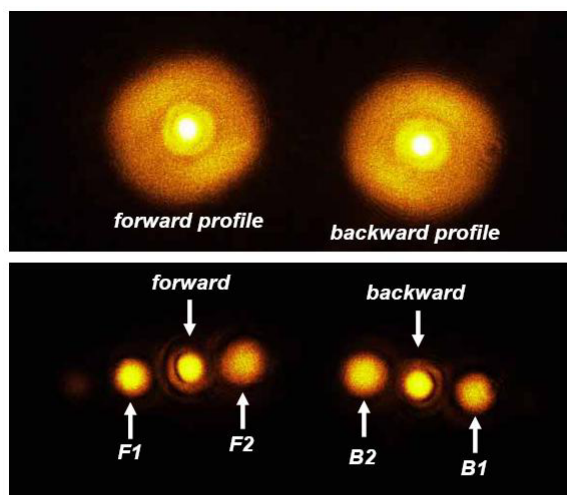


図4 ナトリウム原子蒸気における4光波パラメトリック蛍光(上)と4光波パラメトリック発振(下)

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 リサーチプロフェッサー)

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

(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 共同研究員)

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 助教授)

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」グループ

①研究者名

久我 隆弘(東京大学大学院 教授)

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 教授)

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)

- K. Harada, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, "Competition between electromagnetically induced transparency and stimulated Raman scattering", Phys. Rev. A73, 013807 (2006).

○Munekazu Horikoshi, Ken'ichi Nakagawa, Dephasing due to atom-atom interaction in a waveguide interferometer using a Bose-Einstein condensate, Phys. Rev. A 74, 031602(R) (2006).

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:1 件 (CREST 研究期間累積件数:4件)