

「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子システムの開発」

1. 研究実施の概要

原子は無数の多様な内部固有状態を持っており、それらの固有状態はすべての同種原子に対して完全に同一であり、また、固有状態間の遷移は単一周波数光で精緻に制御することが可能である。したがって、原子の内部固有状態は量子計算機の構成要素である qubit として非常に魅力的なものである。それにも関わらず、中性原子を用いた原子計算は予想通りには進んでいない。これは原子を用いた量子演算を行うためにどうしても解決しなければならない課題がいくつかあるからである。まず、自由原子は完璧な qubit であるが、演算を行うためには空間の決められた場所に固定されなければならない。第2に演算結果を知るためには個々の原子の量子状態を観測できなければならない。第3に中性原子は外界との相互作用が弱いので、qubit 2つの関与した演算の開発は必ずしも容易でない。我々は、これらの点を解決すべく多彩な手段を用いて研究を進めている。第1の問題点については、原子のボーズ凝縮体から、qubit のために用意されたポテンシャルに原子をトラップするのが有効な方法と考えられるが、我々は、すでに東大駒場、電通大(中川)、NTTの3カ所でボーズ凝縮に成功しており、さらに電通大ではアトムチップを使ったボーズ凝縮も実現している。原子の受け皿となるトラップも3次元光格子トラップ、原子チップ上の電流トラップ、さらに原子チップ上で超電導ワイヤーで作ったトラップに原子を閉じこめ、緩和過程を研究する準備を進めている。第2の点については一個の原子を光双極子トラップにトラップして検出する研究(電通大)、マイクロ光共振器を用いて原子を検出する研究が進行中である。

2. 研究実施内容

1. 超電導ワイヤーを用いた原子チップ上での原子操作

導体に流れる電流による磁場を利用した中性原子の磁気トラップは大きなフレキシビリティがあり、各所で研究されてきた。量子計算機のqubitで必要とされるような強い束縛状態を作るためには原子を $1\mu\text{m}$ 程度以下まで、電流線に近づけなければならないが、このような近距離では電流揺らぎによっておこるスピン緩和のために原子のコヒ

ーレンスは急速に失われる。我々はこれを克服するため、室温の導体を使う代わりに、超電導ワイヤーで磁気トラップ、それを用いたqubitを作る研究をしている。現在、Si基板状に形成したNbN 超電導ワイヤーを作成し、その特性を調べている。

2. 二重光格子を使った量子計算

3次元的な定在波光で構成される光格子は原子を3次元的に超密に配列ができる。例えば、可視光線を使えば数ミクロンメートル立方の中に1000個の原子を並べることができる。量子コヒーレンスはqubit（原子）間の距離が近いほど壊れにくいことを考えれば、この系は量子計算システムとして非常に魅力的である。しかし、汎用の量子計算には個々の原子にアクセスする必要がある、光の波長以下で密に並んでいる光格子ではこれは不可能である。そこで、我々はqubit原子とは別に量子演算を仲介する原子を用意し、これを前者とは独立ではあるが光子定数が同じ光格子にとラップすることを提案した。目下、Ne と Na 原子を対象とした2次元二重光格子を作る光共振器システムを製作し、安定性、位相の制御性能などのテストを行っている。

3. アトムチップによるボーズ凝縮原子の生成

ボーズ凝縮原子を基板上の電流が作るマイクロ磁場ポテンシャルによってコヒーレントな原子の操作およびこれを用いた量子ゲートの実現をめざすものである。前年度に作成したSi基板および金電極からなるアトムチップを用いて⁸⁷Rb原子のボーズ凝縮の生成を行った。この結果、最大20000個の凝縮原子の生成が確認され、また最短生成時間は3秒が得られた。これらの性能は今後の凝縮原子の操作の実験に十分なものである。

4. 光格子によるボーズ凝縮原子の操作

ボーズ凝縮原子より3次元の光格子の各サイトに原子1個ずつを閉じ込めてこれを操作することにより量子ゲートの実現を目指すものである。磁場を用いた冷却原子の輸送法を用いて凝縮原子に対して3次元的な光学的アクセスが容易な新しいボーズ凝縮生成装置の開発を行った。この結果、最大40000個の凝縮原子の生成が確認され、またNd:YAGレーザーによる光双極子トラップを用いた凝縮原子のトラップもある程度確認できた。今後は3次元光定在波を導入して凝縮原子を光格子へ移行する予定である。

5. 単一原子トラップ

磁気光学トラップを用いて原子を1個ずつを捕捉し、さらに光ポテンシャルを用いてこれを操作して量子ゲートの実現をめざすものである。高い磁場勾配が得られる磁気光学トラップを用いてトラップ領域を小さくすることにより、トラップ内の原子数を100個程度まで減少することが確認できた。今後はトラップ原子の検出光学系の改良を行って、捕捉原子を1個まで減らしてその後の単一原子の操作を行う予定である。

6. 東大駒場ではボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を含めた冷却されたルビジウム原子(単一原子)の運動を、光双極子力により自在に制御する研究を行っている。その方法として、量子演算のための原子を安定供給するために、コヒーレント原子波を連続的に発生させる。また、中性原子による量子情報処理の基本技術として、空間光変調器による原子制御、ファイバー端面光微小共振器による光-原子相互作用の制御などを行う。

現在までに、コヒーレント原子波連続発生関連では、2次元磁気光学トラップを実現し、そこから約20cm/sの超低速原子を 10^8 個/s程度の流量で得ることができた。同時に、ガラス表面でのボース凝縮実現のための基本データを得ることができた。中性原子による量子情報処理関連では、空間光変調器を用いてBECを分離させることに成功した。また、ファイバー端面を利用した光微小共振器を作成し、フィネス1000の値を得るなど、2005年度以降に研究を進めていく上で基本となる技術やノウハウが蓄積できた。

今後の見通しとして、2次元磁気光学トラップから取り出せる超低速原子線の流量をあと一桁増加させ、磁気ガイドを用いた蒸発冷却法あるいはガラス表面での蒸発冷却法により、BECを実現させるべく努力する。また、空間光変調器を用いてBECを分離させる実験では、今のままでは捕捉した原子の損失が大きいためBECの寿命が短くなっている。この寿命を延ばす工夫を行う。さらに、真空仕様の超高フィネスファイバー端面光微小共振器を作成し、磁気光学トラップと組み合わせて、単一光子による単一原子観測にも挑戦する。

7. 熊本大では、「Na原子のラムダ型3準位系を用いた量子メモリの開発」を標榜して研究を進めている。今年度（2004年度）は、その量子メモリ用の非古典光源の候補となる相関光子対の発生に成功した。（Phys. Rev. A, 2005掲載予定）Na原子に対向するポンプビームを入射すると、リング状のアンチストークス光が発生し、その鏡像位置にある2点の時間波形は強い相関を持つ。相関時間は $0.5\mu\text{s}$ と測定された。（右図）このような2光子が量子相関を持つか、あるいはスクイズド光として利用できるかが今後の焦点となる。さらにこのような光子対を光源とした量子メモリの動作確認が次年度の課題となる。

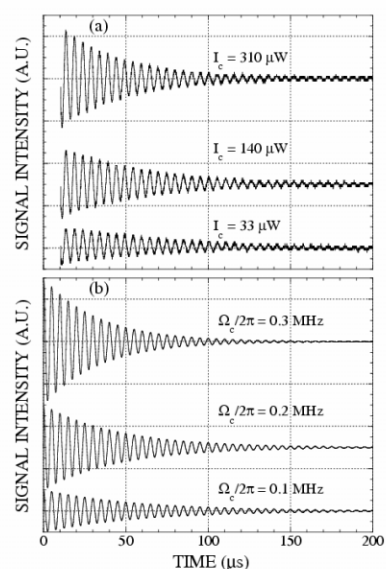
また、量子干渉効果の効率的な測定法も開発した。Coherent Raman Beat (CRB)と呼ばれる手法で、試料に入射したprobe、coupling光の一方の周波数を突然シフトすることで、透過光からビート信号が観測される。この信号の減衰を測定することで、量子メモリの記録時間に相当する、サブレベルコヒーレンス緩和時間を見積もることができる。（右図、J. Opt. Soc. Am. B掲載予定）

さらに、このような量子干渉効果を解析する際に、（今まで無視されてきた）誘導ラマン散乱が重要な役割を果たし、これにより、従来の電磁誘導透過（EIT）の解釈にも変更が余儀なくされることが明らかになってきた。この点についても次年度に研究を進めていく予定である。

3. 研究実施体制

NTTグループ

- ① 研究分担グループ長：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：アトムチップを用いた量子演算素子の研究

電通大ー清水グループ

① 研究分担グループ長：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：二重光格子による量子計算

電通大ー中川グループ

① 研究分担グループ長：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：ルビジウム原子による量子情報処理

東大駒場グループ

① 研究分担グループ長：久我 隆宏（東京大学大学院総合文化研究科、教授）

② 研究項目：ルビジウム原子の光による制御

熊本大グループ

① 研究分担グループ長：光永 正治（熊本大学理学部、教授）

② 研究項目：Na原子のラムダ型3準位系を用いた量子メモリーの開発

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- Hilmar Oberst, Dimitrii Kouznetsov, Kazuko Shimizu, Jun-ichi Fujita, and Fujio Shimizu, "Fresnel diffraction mirror for an atomic wave", Phys. Rev. Lett. 94, 013203 (2005).
- M. Morinaga, "Focusing ground-state atoms with an electrostatic field", Applied Physics B, Vol 79, 679 (2004).
- Fujio Shimizu, "Scalable Quantum Computer with Optical Lattices", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 12, 2004, pp.8376-8382.
- 中川賢一、「原子干渉計を用いた精密計測および量子情報処理」、レーザー研究 Vol. 32, No.7, 457-462 (2004).
- Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, "Superradiant Light Scattering from Thermal Atomic Vapors", Phys. Rev. Lett. **94**, 083602 (2005).
- Y. Yoshikawa, T. Sugiura, Y. Torii, and T. Kuga, "Observation of superradiant Raman scattering in a Bose-Einstein condensate", Phys. Rev. A 69, 041603 (2004)
- K. Motomura, T. Koshimizu, K. Harada, H. Ueno and M. Mitsunaga, "Sub-kilohertz linewidths measured by heterodyne-detected coherent population trapping in sodium vapor", Opt. Lett. 29, 1141 (2004).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：2件（CREST研究期間累積件数：2件）