

「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

(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、2量子状態(あるいは数個の量子状態)からなるユニット(qubit)を準備し、その qubit の中で量子操作を行い、qubit の量子状態の観測を行い、さらに、少なくとも二つの qubit を含んだ量子操作を行い、さらに量子情報を伝えるために qubit と光の間の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ユニットとして、非常によく定義され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、かつ多様の選択枝のある原子は魅力的なものである。我々はこのような魅力ある原子を 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。一方、原子の場合には一個の原子を量子情報処理の単位として用いるのではなく、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が可能である。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

1) 3次元光格子量子計算機

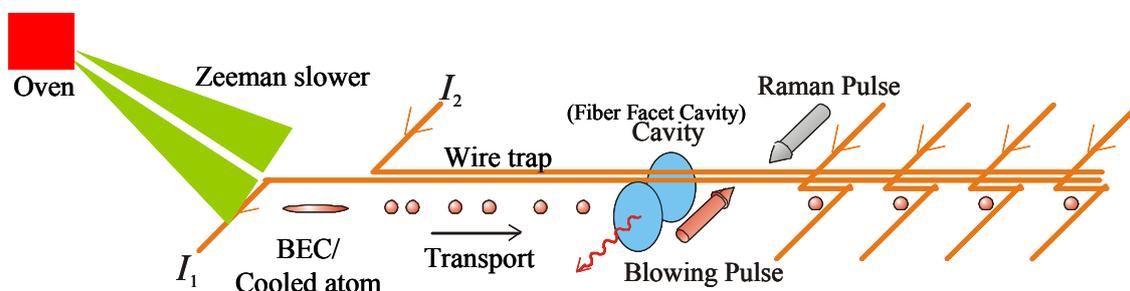
(電通大・NTT 清水)

量子情報操作システムは個々の要素技術開発を積み上げるのが常識的ではある。しかし、実用的な量子計算機ができたとした場合、そのシステムはかなりの数、少なくとも 10^3 個、の qubit を持ち、現在使われている遅い制御用計算機程度の演算速度を備えているだろうと考えられる。我々は、このような要求を満足させる可能性のあるシステムとして二重光格子の一方の格子にはすべての格子点に原子を一個ずつ配置し、他方の格子には別種のごく少数の原子を配置したシステムを提案した。(Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 12, 2004, pp.8376) 17年度は、準安定状態ネオン原子を前者の光格子とし、ナトリウム原子を後者の光格子として選んで、3次元に重光格子を構成するための5つの光共振器からなるシステムの構築を行い、現在、ほぼ完成している。

我々はまた、2qubit 間の相互作用速度を上げるため、量子光を媒介としたシステムの提案も行き、現在、量子操作方法の詳細な検討を行っている。(特許出願中)

2) 量子操作のための冷却原子源の開発

中性原子を使った量子操作の個別技術の中で、まず、開発しなければならないのは操作に用いることができる十分に冷却され、密度の高い原子源の開発であろう。我々はすでにRb原子のボーズ凝縮体を持ち、電通大中川グループはそれを原子チップ上に生成して操作することに成功している。(Appl. Phys. B 82, 363 (2006))我々のプロジェクトでは、この他に、原子チップ近傍でのデコーヒレンスを減少させる目的として超電導ワイヤを用いた原子チップ上への原子のトラッピング、操作およびBEC生成に向けた研究を行っている。(NTT Kasper ら)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と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。東大駒場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。



Conceptual diagram of quantum manipulation of traveling atomic qubits. (After Kuga)

3) マイクロ光共振器による単一原子の検出(東大駒場 吉川他)

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。

4) マイクロ光双極子トラップによる単一原子の検出(電通大 中川他)

量子演算の基本操作の検証を行うためのデバイスとして、微小光双極子トラップを製作し、磁気光学トラップにトラップしたRb原子との間で、原子の個数を制御しながら移動させることに成功した。双極子トラップ中では、トラップされた原子の数を1から10個程度まで画定的に計数することに成功し、また、トラップ中の個々の原子状態を光ポンピングで制御することにも成功した。

5) 原子干渉計 (東大駒場 吉川他、電通大 中川他)

原子干渉計の工学的用途は数多くあるが、量子操作の手段としても興味あるものである。これは、基本的には光で研究されているものと同様であるが、原子の場合は光よりはるかに相互作用が強く、多原子 (qubit) 間の操作が実用的に可能である点でより有利と考えられる。我々は、自由空間およ

び原子チップ上で原子干渉の研究を続行中である。

6) Na原子気体と量子光の相互作用 (熊本大 光永)

原子集団(室温、あるいはレーザー冷却された気体)を用いた量子操作は、任意の光子状態を保存する量子メモリーや単一原子による qubit よりも安定な量子演算の実現などが見込まれる。我々は、その基礎研究として光と原子集団の間の種々のコヒーレント過程の研究をNa原子気体を用いて行ってきた。17年度は電磁誘導回折の観測(Opt. Lett. 30, 2004)、誘導ラマン散乱におけるストークスとアンチストークス光の間の相関(Phys. Rev. A 71, 043817)、暗黒状態からのコヒーレントラマンビートの観測(J. Opt. Soc. Am. B 22, 1105)、EITとSRSの競合の研究(Phys. Rev. A)などの成果を得ている。

3. 研究実施体制

「NTT-電通大」グループ

①研究分担グループ長：清水 富士夫 (電通大、NTT、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

「熊本大」グループ

①研究分担グループ長：光永 正治 (熊本大理、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

「東大駒場」グループ

①研究分担グループ長：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

4. 主な研究成果の発表 (論文発表および特許出願)

(1) 論文 (原著論文) 発表

- Hilmar Oberst, Yoshihisa Tashiro, Kazuko Shimizu, and Fujio Shimizu "Quantum reflection of He* on silicon ", Phys. Rev. A, 71, 052901 (2005).
- 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)
- Munekazu Horikoshi, Ken'ichi Nakagawa, Atom Chip based fast production of Bose-Einstein condensate, Appl. Phys. B 82, 363-366 (2006).
- K. Nakagawa, Y. Suzuki, M. Horikoshi, and J. B. Kim, Simple and efficient magnetic transport of cold atoms using moving coils for the production of Bose-Einstein condensation, Appl. Phys. B 81, 791-794 (2005).

- K. Motomura, M. Tsukamoto, A. Wakiyama, K. Harada and M. Mitsunaga, "Observation of correlated anti-Stokes emissions by multiwave mixing in sodium vapor", Phys. Rev. A71, 043817 (2005).
- K. Harada, K. Motomura, T. Koshimizu, H. Ueno, and M. Mitsunaga, "Coherent Raman beats from dark states", J. Opt. Soc. Am. B22, 1105 (2005).
- K. Harada, S. Tanaka, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, "Electromagnetically induced diffraction in sodium vapor", Opt. Lett. 30, 2004 (2005).
- K. Harada, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, "Competition between electromagnetically induced transparency and stimulated Raman scattering", Phys. Rev. A73, 013807 (2006).
- 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘 (東大院総合) Superradiant Light Scattering from Thermal Atomic Vapors Phys. Rev. Lett., 94, 083602-1-4 2005

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)