

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06017

研究課題名（和文）単一Siナノ粒子と極低温原子集団の混合システム

研究課題名（英文）Mixture of ultracold atoms and a single nanoparticle of Si

研究代表者

赤松 大輔 (Akamatsu, Daisuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：90549883

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,570,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超高真空中で光トラップされた単一ナノ粒子と極低温原子集団の混合システムの構築を目的とした。そのために、まずは高真空中でのナノ粒子の光トラップが可能な装置を開発した。超高真空中までの排気が可能となるように、対物レンズではなく単レンズでも大きなNAのレンズを使い、ナノ粒子の光トラップに成功した。さらに光トラップ中の運動をリアルタイムで観測、制御するシステムの開発に成功した。運動制御により光トラップ中のナノ粒子の重心温度を1K程度まで冷却することに成功し、10 Paでの光トラップに成功した。また、ナノ粒子と極低温原子の散乱断面積について理論的な解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで単一ナノ粒子とレーザー冷却された原子の相互作用に関する研究はほとんど行われてこなかった。本研究では、量子力学的なレベルでの超精密測定・制御が可能なそれぞれが共存することにより、それぞれの超精密なプローブになると考え提案した。理論的な解析により、ナノ粒子の散乱断面積が変化することを明らかにした。また、実験的には、真空中でのナノ粒子の安定なトラップに成功し、レーザー冷却された原子気体と共存可能な道筋を示した。本研究成果により、光トラップされたナノ粒子の物理を原子波でプローブするという新たな分野が拓ける可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we aimed to realize a mixture of an optically trapped nanoparticle and a laser-cooled atomic gas. We built an experimental apparatus for trapping a nano-particle in high vacuum. We demonstrated optical trapping of nanoparticles with a single aspherical lens instead of an objective lens, which promises better vacuum condition. We successfully observed the motion of the particle in the optical trap and cooled the temperature down to 1K at the pressure of 10 Pa. We analyzed the scattering cross section of a nanoparticle and ultra-cold atoms.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却 ナノ粒子 光トラップ

1. 研究開始当初の背景

光による勾配力と散乱力を利用し物体の運動を制御することが可能である。Ashkin らは 1971 年にレーザー光により微粒子を捕獲することに成功し、その成果は 2018 年のノーベル物理学賞につながった。レーザー光により物体の運動を制御する研究は、大きく二つに分かれて発展した。すなわち、原子やイオンの運動を制御する研究とナノやマイクロサイズの物体の運動を制御する研究である。

鋭い共鳴をもつ原子・イオンは、周波数制御により散乱力を制御することが可能である。これを応用することで原子の速度を減速し、冷却することが可能である (レーザー冷却)。レーザー冷却により希薄原子気体のボーズアインシュタイン凝縮(BEC)が可能になり、量子力学的なレベルで原子の超精密計測・制御が可能になった。一方、ナノ粒子などの固体の重心運動に関しても、量子力学的なレベルの運動制御を目指す研究が盛んに行われるようになった。(本研究期間終了直前の 2020 年 2 月に光トラップ中のナノ粒子の重心運動を基底状態まで冷やすことに成功したことが報告された。)

レーザー冷却された原子のドブロイ波長は、100nm 程度であり、そのサイズの構造を持つ物質による原子波の回折や量子反射などの研究が行われていた。さらに、基板から生えるカーボンナノチューブと BEC の相互作用に関する研究がおこなわれていたが、光トラップされたナノ物質と原子の散乱に関する研究は行われていなかった。光トラップされたナノ粒子は外界から完全に孤立することができ、精密計測などにとっては魅力的なシステムである。

原子のレーザー冷却には、超高真空が必要である。また、冷却しつつ原子をトラップする磁気光学トラップのためにはある程度広い光学アクセスを確保する必要がある。一方、ナノ粒子を安定に長時間光トラップするには、背景原子気体の粘性を利用する必要がある。また、大きな開口系 (NA) をもつレンズをトラップ領域の近傍に置く必要がある。このように、二つの実験系は相反する実験環境下で行われるため、その共存は困難であった。

2. 研究の目的

1. で述べた研究背景を踏まえ、本研究では光トラップされたナノ粒子とレーザー冷却された原子気体が共存可能なシステムの構築を目的とした。この目的を達成するために、具体的には以下の技術を開発することにした。

- 1) 単レンズによる光トラップ
- 2) 超高真空中でのナノ粒子の光トラップ
- 3) 長時間にわたって安定なレーザー冷却システム

3. 研究の方法

1) 真空装置とナノ粒子の光トラップ

ナノ粒子と原子気体を混合させるシステムのために、真空システムの開発を行った (図 1)。ナノ粒子光トラップ用の光は図 1 左側から入射し、原子気体を磁気光学トラップするための光は右側、および上側から入射できるようになっている。

ナノ粒子を光トラップにロードする手法として、噴霧器を用いる手法を採用した。具体的には、オムロン製 NE-U22 を用いた。噴霧器は粒形 5 μm の微粒子液滴を生み出す。噴霧される液滴におよそ 1 つのナノ粒子が入るようにエタノールで希釈した薬液を使用した。そして、できるだけ効率的にレーザーが集光している光トラップ領域にナノ粒子が導かれるように、図 1 挿入図のようなノズルを用いた。

光トラップ用レーザーとしては、Yb:YAG レーザー(1030nm, 500mW)を用いた。光トラップに用いたパワーはおおよそ 50mW であった。光トラップを行うための集光用レンズとして、先行研究で多く用いられてきた対物レンズに加え、本研究では単レンズを用いた実験も行った。

トラップされたナノ粒子は浜松ホトニクス製のカメラ (C10633-13) で観測した。ナノ粒子がトラップされたことを確認したのち、ノズルを取りだし、ゲートバルブを閉じ、排気を行う。大気圧から 10 $^{-3}$ Pa 程度まではゆっくり排気することで排気流によるトラップロスが起こらないようにした。

2) ナノ粒子の重心運動の観測と制御

光トラップされたナノ粒子の重心運動を前方散乱光とトラップ光の干渉により観測した。観測したシグナルは、自作の制御用回路により加工され、トラップレーザーに強度変調をかける事に用いられる。適正な位相で強度変調をかけることで、ナノ粒子の重心運動の冷却を行う。

3) 堅牢なレーザー冷却レーザーシステムの開発。

原子のレーザー冷却のためには、半導体レーザーの周波数を原子共鳴付近に安定化 (ロック) する必要がある。多くの実験で用いられている回折格子を用いる手法では、振動によるノイズを

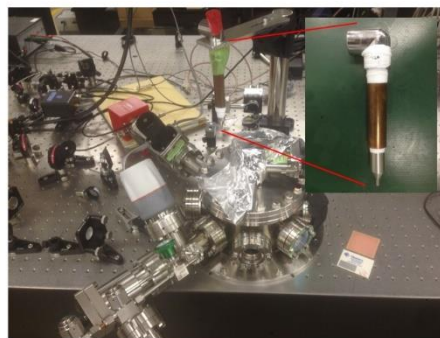


図 1: メインチャンバー。挿入図はノズル。

受けやすく、周波数ロックが外れやすい。そこで、本研究では振動などに対して堅牢な干渉フィルターを用いる外部共振器レーザーを開発した。さらに、万が一ロックが外れても自動で復帰できるよう FPGA を用いたリロック回路を開発した。

4. 研究成果

1) ナノ粒子の光トラップ

図2は真空容器中で光トラップされたナノ粒子である。本研究では、対物レンズだけではなく、単レンズを用いてもナノ粒子の光トラップにも成功した。ナノ粒子の光トラップは安定であり、常圧中において数日以上光トラップし続けることができた。

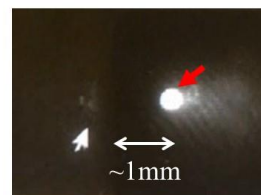


図2：赤矢印がトラップされたナノ粒子を示す。白矢印は、集光レンズの端面の位置。

2) ナノ粒子の重心運動の観測と制御

図3が前方散乱光とトラップ光の干渉信号であり、ナノ粒子の光軸方向の重心運動を表す。常圧中では、背景気体との衝突によるブラウン運動が明確に観測された(図3(a))。減圧に従い、レーザー光による調和振動子ポテンシャル中での単振動の様子が顕著に見られるようになった(図3(b))。

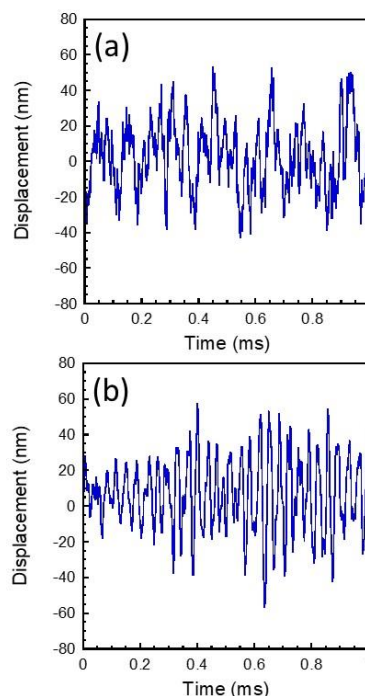


図3:トラップ中のナノ粒子の運動
(a)常圧中(b)290Pa

観測された信号をアナログ回路により、二倍の周波数に変換し、適当な位相を加えてトラップ光の強度変調を行った。回路を作動させたときに、調和振動の振幅が抑制された(図4)。すなわち重心運動が冷却されたことが分かる(パラメトリック冷却)。制御信号の位相を変化させると、理論通り温度が変化することも確かめた。

重心運動の制御により、ナノ粒子はトラップ中心に留められ、より安定になった。これにより 10^{-3} Pa まで減圧しても安定にトラップすることが可能となった。本研究期間中には行えなかったが、リークやデガスの問題を解決することで超高真空中でも安定にトラップできることが期待される。

4) 堅牢なレーザー冷却用レーザーシステムの開発

図5に示すようなフィルター型外部共振器レーザー(波長 852nm)を作成した。出力は 20mW でその後の tapered amplifier の seed 光として用い、最終的にはファイバー出力後で 280mW 得ることに成功した。これはセシウム原子の磁気光学トラップに十分なパワーである。

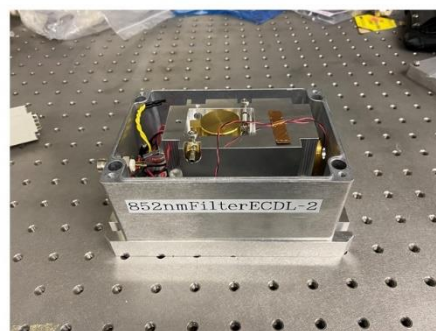


図5：フィルター型外部共振器半導体レーザー

本研究では、レーザーは UTC (NMIJ) を周波数基準とする光周波数コムに対し光位相同期し、安定化する予定であった。そこで、万が一光位相同期が外れても、自動復旧するシステムを FPGA を用いて製作した。この成果は、日本国内で特許出願を行い、国際論文誌に投稿した。さらに本研究課題の主題ではないが、“スピンオフ研究”として、光格子時計の長期運転に貢献した。

本研究期間中には、当初の目的であるナノ粒子とレーザー冷却された原子集団の混合システムを構築することはできなかった。しかしながら、各種の要素技術は確立し、引き続き研究を続けることで1、2年以内に目的を達成できるところまで研究を進めることができた。

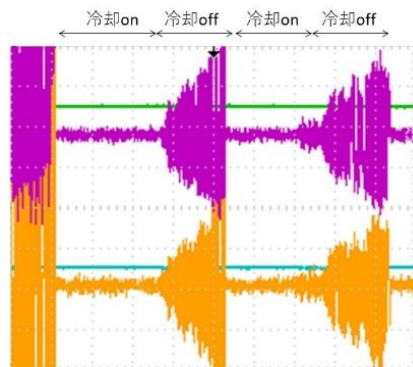


図4：重心運動の冷却

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda	4. 巻 90
2. 論文標題 A relocking scheme for optical phase locking using a digital circuit with an electrical delay line	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 103002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5111935	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 T. Yamaguchi, R. Kanamoto, D. Akamatsu
2. 発表標題 Quantum reflection of ultracold atoms by a spherical surface
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics, ICAP 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口孝明、金本理奈、赤松大輔
2. 発表標題 誘電体ナノ球による冷却原子の量子反射
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Akamatsu
2. 発表標題 Optical trap of a nanoparticle in ultra-high vacuum towards a mixture of a nanoparticle and a laser-cooled gas
3. 学会等名 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤松大輔
2. 発表標題 極低温原子ガスとの混合系を目指した単一ナノ粒子の光トラップ
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 位相同期回路	発明者 小林拓実、赤松大輔、安田正美	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-83313	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

産業技術総合研究所時間標準研究グループ https://unit.aist.go.jp/ripm/time-stdg/index.html
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----