

令和元年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17841

研究課題名(和文)浮遊微粒子の光による冷却技術開発

研究課題名(英文)Optical cooling of levitated particles

研究代表者

蓑輪 陽介 (Minowa, Yosuke)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：50609691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：浮遊状態にあるナノメートル・マイクロメートルサイズの微粒子の、重心運動のエネルギーを低減すること、また微粒子から熱を奪うこと、本研究ではこれら2つの異なる冷却技術の開発に取り組んだ。まず、舞台となる浮遊微粒子を真空中に用意するための実験系を構築した。さらに、適切な冷却が可能な材料開発にも取り組み、設計通りのサイズの微粒子を多数作製可能であることを実証した。また、これら作製した微粒子が発光することも確認した。この結果は、冷却実現への大きなマイルストーンである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、微粒子を浮遊させるために、相補的な性質をもつ2つの異なる手法を開発した。一方は光トラップと呼ばれる手法で、もう一方はパウルトラップと呼ばれる手法である。これらは大きなサイズの粒子や、逆に小さな原子分子を対象としては盛んに研究されてきたが、本研究のようなナノメートル・マイクロメートルサイズの微粒子を真空中に浮遊させるために研究した例は少なく、学術的に新しい知見を得ることができた。また、冷却に適した材料開発にも取り組んでおり、サイズの制御が可能であること、発光すること、などを実証できた。

研究成果の概要(英文)：This project aims to develop cooling methods for the levitated particles. To cool or to reduce the center of mass motion energy and internal energy of the levitated particles, appropriate levitating schemes were developed. We also synthesized the particles suitable for the optical cooling and observed the photoluminescence from the particles.

研究分野：光物理学

キーワード：光トラップ イオントラップ 冷却 微粒子

1. 研究開始当初の背景

真空中で、レーザー光などを用いてナノ・マイクロ微粒子を浮遊させ（以下、浮遊微粒子と総称）、その物理を探索する研究が世界的に萌芽しつつある。真空中の浮遊微粒子は環境から隔離され、その重心運動が非常に高い Q 値の機械振動となるため、理想的なメゾスコピック機械量子系として大きく注目されている。

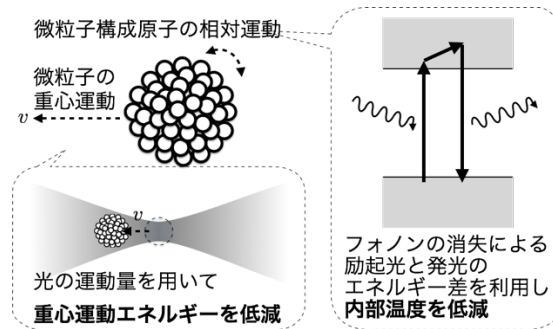


図1：微粒子の冷却技術の模式図。

この浮遊微粒子の重心運動エネルギーを低減（以下、重心運動自由度冷却と表記）することが出来れば、これまでの原子気体の特徴に加えて、大質量かつ多様な物性を利用可能であるというユニークな特徴が合わさった、全く新しい物理系を構築することができる。これまで原子気体の物理は、ドップラー冷却に端を発し、冷却技術の発達とともに、飛躍的發展を遂げてきた。同様に、浮遊微粒子の物理も、冷却技術の開発を鍵とした革新的展開が見込める。

しかし、原子気体とは異なり、浮遊微粒子には重心運動自由度の他に、相対運動自由度が存在している（図1参照）。したがって、デコヒーレンスフリーな浮遊微粒子系を用意するためには、環境から切り離し重心運動エネルギーを低減させることに加え、相対運動エネルギーを低減させることが必要不可欠である（以下、相対運動自由度冷却と表記）。

2. 研究の目的

本研究では、真空中の浮遊微粒子を対象として、光を用いた重心運動自由度の冷却と、相対運動自由度の冷却の両方の技術開発を目的とする。この二つの全く異なる冷却技術の組み合わせにより、環境との相互作用による量子状態の乱雑化が極限まで抑制された浮遊微粒子を用意し、量子的に制御することが可能となる。

3. 研究の方法

浮遊微粒子を用意するための実験手法として、光トラップとパウルトラップを用いる。両者は長所短所が異なる相補的な手法である。さらに、浮遊微粒子の重心運動自由度の冷却のためには、重心運動をリアルタイムで測定し、その情報をフィードバックして光によって減衰力を与える手法を実装する。そのために、まず重心運動の観測手法を確立する。

相対運動自由度の冷却のために単色レーザーによる励起とそれに続くフォノンの消失、そして発光という一連の過程（アンチストークス発光過程）を利用することが有効であることが、バルク材料を対象として実証されている。アンチストークス発光過程を通じて、フォノンエネルギーの分だけ内部エネルギーが低下するためである。そこで、本研究では浮遊微粒子を対象として同様の原理で相対運動自由度の冷却に取り組む。そのために、バルク材料で冷却が報告されている代表的物質である半導体 CdS の微粒子作製に取り組む。

4. 研究成果

まずはじめに、光吸収による加熱の恐れが少ない光子エネルギーの小さな近赤外線レーザー光を用いて、単一ビームの光トラップ実験系を真空チャンバー内に構築した。光トラップは、光と微粒子の間の相互作用を利用して、光の焦点付近に微粒子を3次元的に固定する手法である。実際に、数 mbar の真空下でシリカ微粒子の安定的な非共鳴光トラップに成功した。さらに、この安定な光トラップをベースに、ホモダイン検出による重心運動の観測系を立ち上げた。光散乱とバランス検出を利用することで、散乱光の位相変化を敏感に測定することができる。この散乱光の位相変化を通じて、波長以下の空間分解能で重心運動を測定することに成功した。一方で、後述の手法で作製した CdS 微粒子も含め、シリカ以外の材料からなる微粒子では、数 mbar の真空度に達するまでに光トラップから消失してしまうことがわかった。これは、わずかながら存在する光吸収によって微粒子が加熱され、劣化・消失している可能性が示唆される結果である。そこで、高強度の光を用いる必要がないパウルトラップによる微粒子の浮遊に取り組んだ。

一般に、荷電粒子を静電場のみをもちいて浮遊させることは不可能であることが知られている。一方で交流電場を用いることで、実効的にポテンシャルエネルギー極小点を作ることが可能である。この原理に基づく手法の一つがパウルトラップである。本研究ではまず、小型が用意かつ、空間的余裕が取りやすく光によるアクセスがしやすい、平面電極型のパウルトラップ

を選択した。試作品としてプリント基板を用いたリング型パウルトラップを作製した。その結果、大気圧下で荷電微粒子の安定なトラップに成功した。しかし、この平面電極型のパウルトラップでは、成功確率が非常に低いことと、表面が汚染された結果、意図しない電場が生じること、という欠点があることがわかった。そこで、これらの欠点を持たないロッドタイプのパウルトラップを作製した。ロッドタイプのパウルトラップでは、トラップ可能な空間が広く、トラップ確率が高いという利点とともに、不要な誘電体部分が極小で、意図しない電場の発生が避けやすいという特徴がある。このロッドタイプの電極構造を用いることで、実際に複数のシリカ微粒子を安定に大気圧下でトラップすることに成功した。さらに高真空下での何時間にも及ぶ安定なトラップも実証した。また、このパウルトラップをもちいることで、蛍光微粒子を浮遊させて、トラップ下での単一微粒子発光測定にも成功した。これらの結果から、パウルトラップを用いた浮遊微粒子の冷却実験の基盤が十分に整備できたといえる。

上記の実験と同時に、相対運動自由度の冷却に適した微粒子の作製にも取り組んだ。半導体CdSはバルク材料として光による冷却が報告されている。このCdSについて、様々な手法を用いて、微粒子作製に取り組んだ。まずバルク材料をターゲットとして、レーザーアブレーションによる微粒子作製を試みた。閉鎖空間で、たくさんの微粒子を作製可能であることがわかったが、大小様々なサイズの微粒子が形成されてしまい、狙った形状・サイズの微粒子を作製することが困難であることがわかった。一方で、10 nm以下の非常に小さな量子ドットと呼ばれるサイズの微粒子もレーザーアブレーションによって作製可能であることがわかった。特に、超流動ヘリウム中という特殊な環境において大量の量子ドットが作製可能であることを見出し、論文としてまとめた(5. 主な発表論文等 - [雑誌論文] -1 など)。

次に、一様なサイズの微粒子を作製可能な技術として、バルク材料を破砕するビーズミルと呼ばれる手法の開発に取り組んだ。硬質のセラミクス微粒子とバルク材料を混合し、攪拌することで材料を粉砕、サイズの揃った微粒子を得ることができる。この手法をCdSに適用したところ光トラップに最適な100 nm程度の微粒子を多数作製することができた。さらに、このビーズミルによって作製した微粒子を、電子線励起することにより、単一微粒子からの発光を確認することにも成功した。

上記のトップダウン的手法とは真逆のボトムアップ的手法による微粒子作製にも取り組んだ。まず、カドミウムイオンの含まれた逆ミセルと硫黄イオンの含まれた逆ミセルを別々に用意した後に、両者を混合することで微粒子を得る。逆ミセルのサイズを調整することで、作製されるCdS微粒子のサイズを制御可能である。おおよそ100 nmほどの一様なサイズの微粒子を作製することに成功した。また、光励起することにより、励起子発光を観測することにも成功した。現在、これらの結果をまとめ、論文投稿予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6件)

1. "Single-particle photoluminescence from cadmium selenide quantum dots fabricated via laser ablation in superfluid helium,"
Yosuke Minowa, Tatsuro Suzuk, Kenji Setoura, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, Masaaki Ashida
Journal of Nanophotonics, 13(1), 012506 (2018). 査読あり
doi: 10.1117/1.JNP.13.012506
2. "In situ tuning of whispering gallery modes of levitated silica microspheres,"
Yosuke Minowa, Yusuke Toyota, Masaaki Ashida
Journal of the Optical Society of America B 34, C20(2017). 査読あり
doi: 10.1364/JOSAB.34.000C20
3. "Inner structure of ZnO microspheres fabricated via laser ablation in superfluid helium,"
Yosuke Minowa, Yuya Oguni, Masaaki Ashida
Optics Express 25, 10449(2017). 査読あり
doi: 10.1364/OE.25.010449
4. "Fabrication of Superconducting Micro Particles by Laser Ablation in Superfluid Helium,"
Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, Yuta Takahashi, Fusakazu Matsushima, and Yoshiki Moriwaki
Conference on Lasers and Electro-Optics , STh1J.4(2017). 査読あり
doi: 10.1364/CLEO_SI.2017.STh1J.4
5. "Optical fabrication and trapping of superconducting nanoparticles in superfluid helium,"
Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, Yuta Takahashi, Fusakazu

Matsushima, Yoshiki Moriwaki

Proc. SPIE. 10347, Optical Trapping and Optical Micromanipulation XIV (2017). 査読あり

doi: 10.1117/12.2273278

6. "Fabrication of semiconductor microspheres with laser ablation in superfluid helium,"
Yosuke Minowa, Yuya Oguni, Masaaki Ashida
Proc. SPIE 10252, Optical Manipulation Conference, 102520N(2017). 査読あり
doi: 10.1117/12.2274888

〔学会発表〕 (計 21 件)

1. Yosuke Minowa, Xi Geng, Masaaki Ashida,
"Optical trapping of dielectric particles in superfluid helium,"
Optical Trapping and Optical Micromanipulation XV, 10723-64, San Diego
Convention Center San Diego, California, USA, 22nd August, 2018
2. Yosuke Minowa, Tatsuro Suzuki, Kenji Setoura, Syoji Ito, Hiroshi Miyasaka, Masaaki
Ashida,
"Semiconductor quantum dots fabricated via laser ablation in superfluid helium,"
The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in
Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (Nara Kasugano International
Forum, Nara), 12th July, 2018
3. Akihiro Tatemoto, Yosuke Minowa, Masaaki Ashida,
"Characterization of inner structure and optical properties of semiconductor
microspheres,"
The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in
Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (Nara Kasugano International
Forum, Nara), 12th July, 2018
4. Xi Geng, Yosuke Minowa, Masaaki Ashida,
"Optical trapping of sub-micro particles in superfluid helium,"
The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in
Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (Nara Kasugano International
Forum, Nara), 10th July, 2018
5. Yosuke Minowa, T. Suzuki, K. Setoura, S. Ito, H. Miyasaka, M. Ashida,,
"Fabrication of Cadmium Selenide Quantum Dots with Laser Ablation in Superfluid
Helium,"
The 5th Optical Manipulation Conference (OMC'18) (Yokohama), 23-27th April, 2018
6. Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, and Yoshiki Moriwaki,
"Optical fabrication and trapping of microspheres in cryogenic conditions,"
Optics & Photonics Japan (OPJ), Tokyo, Taiwan, 30th October - 2nd November, 2017
7. Shinya Nikaido, Yosuke Minowa, and Masaaki Ashida,
"Building optical trap system toward optical cooling of nanoparticle,"
6th Hsinchu Summer Course and Workshop, Hsinchu City, Taiwan, 3-5th July, 2017
8. Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, and Yoshiki Moriwaki,
(invited)
"Optical fabrication and manipulation of semiconductor or superconducting nano-
and micro-particles,"
6th Hsinchu Summer Course and Workshop, Hsinchu City, Taiwan, 3-5th July, 2017
9. Yosuke Minowa, Yuya Oguni, Masaaki Ashida,
"Fabrication of semiconductor microspheres with laser ablation in superfluid helium,"
The 4th Optical Manipulation Conference (OMC'17) (Yokohama), 19-21th April, 2017
10. Masaaki Ashida, Yosuke Minowa, Mitsutaka Kumakura, Yuta Takahashi, Fusakazu
Matsushima, and Yoshiki Moriwaki,
"Fabrication of Superconducting Micro Particles by Laser Ablation in Superfluid
Helium,"
CLEO 2017 (San Jose Convention Center, USA), 14-19th May, 2017

その他 11 件

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
該当なし

6. 研究組織
研究代表者のみから構成されている。

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。