

# 研 究 報 告 書

## 「真空中の浮揚ナノ粒子に対するレーザー冷凍機の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 相川 清隆

### 1. 研究のねらい

真空中に浮揚させた単一ナノ粒子系は、物体の運動を光で制御するオプトメカニクスの分野における新しい実験系として、近年急速に発達しつつある。基板上に固定された機械的振動子と比べて、浮揚ナノ粒子は熱的・物理的に極めてよく隔離されており、非常に高い Q 値を持つ点が特長である。

これまで、この実験系は、主にナノ粒子の重心運動を利用して、加速度や微小質量のセンシング、ナノスケールの非平衡物理の探究といった目的のために用いられてきた。これに対し、本研究では、環境から極めてよく隔離された単一のナノ粒子を観測できる点に着目し、単一ナノ粒子内での物性研究のための新たな舞台として浮揚ナノ粒子系を扱うための基礎的な技術の開拓を進める。特に、熱的によく隔離されていることを利用し、希釈冷凍機でも到達し得ないほどの超低温へと達する冷却の技術を開拓し、浮揚ナノ粒子系を用いて、単一ナノ粒子の内部状態および重心運動に関わる量子力学を探究する舞台を創り出すことを長期的な目標としている。

本研究課題では、浮揚ナノ粒子系での物性探究に向けた第一歩として、真空中・レーザー光中でのナノ粒子の振る舞い、特に帯電の有無やナノ粒子同士の衝突特性について調べ、これらの知見に基づいて浮揚ナノ粒子の内部状態を冷却する新しい機構を実証することを目的とする。また、浮揚ナノ粒子を扱うための基盤的技術として、その重心運動の観測・冷却の手法を極限的に発展させることも、重要な目的である。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、まず真空中で光格子に捕捉されたナノ粒子という新しい系の基礎的な性質について探究を進めた。その結果、低圧力領域におけるパワースペクトルのスペクトル幅が背景圧力によらない一定値に近づくことを見出し、このスペクトル幅から粒子のサイズを推定する新しい方法を実験・理論の両面から確立した。また、2 粒子が単一格子内に捕捉されている場合に、大気圧下でも安定な発振を起こすことを発見し、この 2 粒子が互いの周りを回るような安定な軌道運動を行っていることを示した。

続いて、ナノ粒子の帯電特性について調べた結果、ほとんどの場合にナノ粒子は真空引きの際に比較的大きな正電荷を獲得することを見出した。この特性のため、2 粒子間には非常に大きなクーロン反発力が働くこととなり、粒子の内部状態が変化するような非弾性衝突は起こりにくいと考えられることがわかった。

本研究では、捕捉されたナノ粒子の重心運動の制御も、重要な基盤技術であることから、複数の手法について技術開発を進めた。他グループによってこれまでに知られていた、パラメトリックに捕捉光の強度変調を行う冷却手法を光格子内で実証すると共に、これより

かに冷却効率の高い新たな手法として、外部から振動電場を加える新奇手法を実証し、その冷却限界について理論的な検討を行った。その結果、充分低い背景圧力下では、重心運動の量子基底状態への到達が可能であるとの見込みを得た。

さらに、本研究で得られた知見を踏まえ、超高真空領域での実験を行うべく、排気系に大幅な変更を加えた新しい真空チャンバーの製作を進めた。

## (2) 詳細

### 研究課題(A): 光格子中のナノ粒子の基礎的な振る舞い

ナノ粒子を真空中で扱う従来研究では、単一ビームが粒子の捕捉・観測・冷却に用いられていた。一方、ナノ粒子間の衝突をも課題とする本研究では、同時に複数粒子を捕捉できる光格子を利用した独自の実験系を構築した。この実験系において、ナノ粒子の振る舞いを理解する基盤となるパワースペクトルを調べたところ、従来知られていたものとは異なる振る舞いが観測された。すなわち、背景圧力に比例すべきスペクトル幅が、低圧力下では一定値に近づき、しかも振動の方向によって異なる値となることを見出した。ナノ粒子の3次元的な運動についての理論

モデルを立てて実験結果と比較した結果、ナノ粒子の低圧力領域でのスペクトル幅を振動周波数で規格化した値は、粒子が感じる光ポテンシャルの深さと直接関係があることを見出し(図1)、低圧力下でのスペクトル幅から粒子のサイズを推定する新しい手法の実現へと繋げることが出来た。

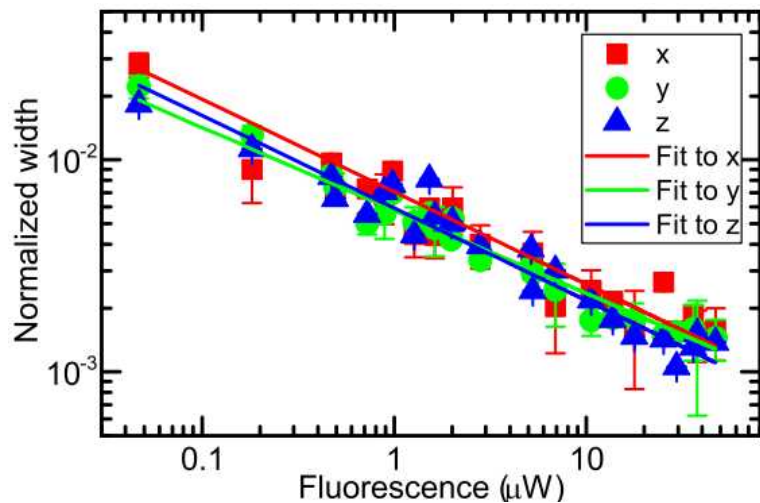


図1 規格化されたスペクトル幅と粒子による散乱光強度の関係

また、光格子にナノ粒子を捕捉する際に、大気圧下という非常に擾乱の多い環境であるに関わらず、しばしば強い発振が生じ、数時間に渡って安定に維持されることを発見した。この発振現象について様々な角度から実験を進めた結果、複数個のナノ粒子が単一格子内に捕捉されると、互いの周りを回るような軌道運動を始め、粒子を別格子に分離すると発振が消えること(図2)、また擾乱が少ないほど発振が強まりそうという直感に反し、0.1気圧程度以下では発振が消えること、といった非常に興味深い性質を明らかにした。この現象のメカニズムは明らかとなっておらず、今後の理論・実験の両面からの研究が必要である。

これらの成果は、いずれも当初は想定していなかったものであり、直接その後の研究に不可欠なものではないが、光格子に捕捉された真空中のナノ粒子という新しい系を確立し、その新しい基礎的な性質を見出すことができたという意味で重要である。

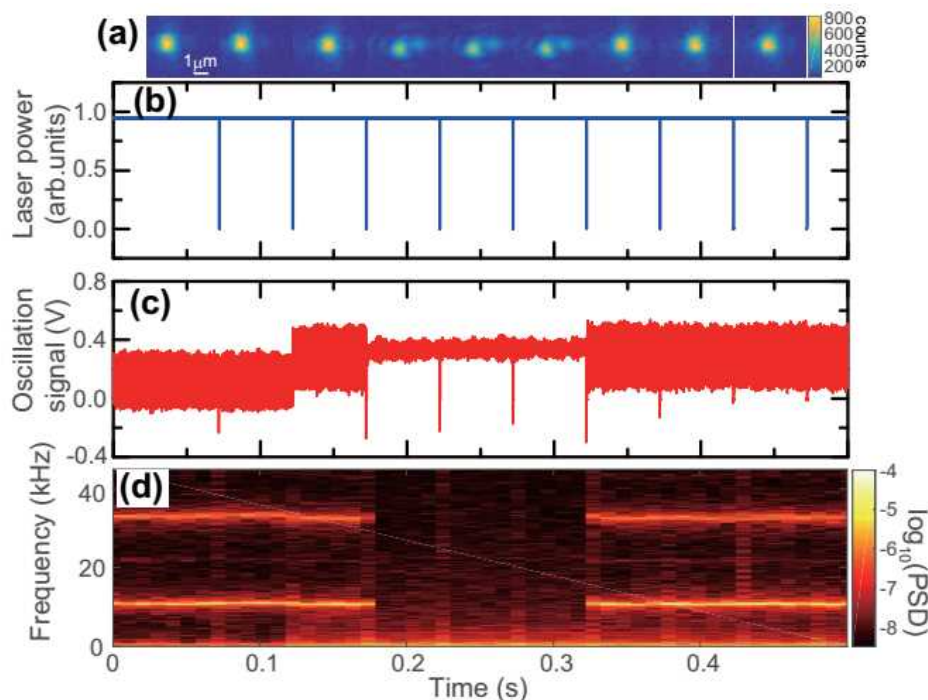


図 2 光格子中の複数のナノ粒子が示す発振現象

#### 研究課題(B): 荷電特性の解明・より効率的な重心運動の冷却

本研究では、ナノ粒子間の相互作用を制御する目的で、捕捉光とは別の光を当ててナノ粒子を帯電させる手法の導入を想定していた。しかし、実験を進める中で、真空中のナノ粒子が自発的に比較的大きな電荷を持っている可能性が示唆されたことから、ナノ粒子の電場に対する応答を調べた。その結果、真空引きの行う過程で、主にイオンゲージの生成するイオンによって素電荷の 100 倍程度の電荷を獲得することがわかった。大きな電荷を持つことから、電場によって容易に重心運動を制御できることが予想されたため、重心運動の電場による制御の可能性を追究した。

真空中に光捕捉されたナノ粒子の重心運動を冷却する手法として、これまでに知られていたのは、ナノ粒子の運動を観測し、その結果に基づいて捕捉光に変調を加えてパラメトリックに行う手法であった。本研究でも、光格子中のナノ粒子の運動を、パラメトリック冷却によって 1K 以下にまで冷却できることを実証した。

ただし、先行研究により、パラメトリック冷却の本質的な問題点である、低温での冷却能力の弱さが制約となり、捕捉光のランダムな散乱による加熱に打ち勝てず、0.5mK 程度が限界であることが示されていた。

一方、本研究では、ナノ粒子が自発的に大きな電荷を持つという性質を活用し、外部から

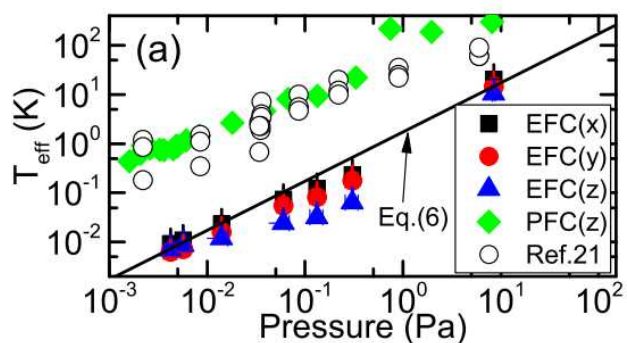


図 3 重心運動の温度と圧力の関係

加えた周期的な電場によってナノ粒子の運動を冷却する研究を進めた。その結果、電場冷却は高い冷却能力を持ち、パラメトリック冷却と比べて、同じ圧力で 1~2 桁低い温度へと冷却できることを見出した(図 3)。本研究で用いた実験装置の限界である数 mPa 程度の圧力において、3 次元的に 10mK 程度までの冷却を実現した(図 4)。さらに、冷却の限界についても理論的な検討を行い、中真空~高真空程度の圧力領域ではフィードバック信号を生成する帯域で制約されること、超高真空領域ではパラメトリック冷却の限界となっていた光子反跳加熱に打ち勝って、量子基底状態(数 $\mu$ K 程度)付近までの冷却が可能であることを示した。

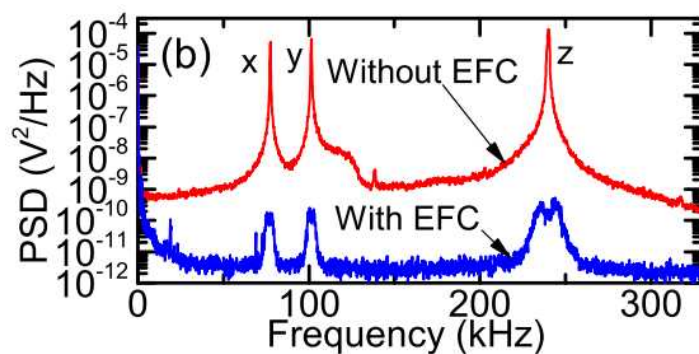


図 4 捕捉されたナノ粒子の 3 次元的なパワースペクトル

捕捉されたナノ粒子の内部状態と重心運動との結合をつくりだし、重心運動の冷却を通じて内部状態の冷却をも志す本研究においては、重心運動の冷却が本質的に重要である。そのため、今回得られた高効率な冷却手法は、目標の実現に向けた重要な布石であると言える。本研究により、超高真空環境でナノ粒子の捕捉・冷却を行う重要性が明らかとなったことから、デザインを一新した真空槽およびそれに関わる光学系の構築を進めた。

### 3. 今後の展開

本研究により、真空中のナノ粒子の重心運動を 3 次元的に超低温領域まで冷却する手法を確立できた。この手法を発展させることで、重心運動に関する量子基底状態への到達が可能であると期待される。原子、分子などの小さな粒子に対してよく研究され、応用されてきた量子力学が、どの程度大きな物体にまで適用できるかはわかっておらず、本研究で開発した実験系を用いることで、原子数が 1 億~10 億個程度のメソスコピックなサイズにおける量子力学の振る舞いについて、実験的に検証することが可能となると期待される。原子・分子・光子などに対してよく研究されてきた量子重ね合わせ状態が巨視的物体において観察されることはない、という事実に基づき、量子力学に対する様々な形での補正が理論的に検討されてきているが、これまで、適切な実験系がないために、理論を検証することができない状態であった。真空中のナノ粒子という新しい量子系を活用し、巨視的物体の重心運動に対する量子力学を探究することが、量子という分野における今後の重要な潮流の一つとなっていくと考えられる。

また、真空中のナノ粒子は、環境から極めてよく隔離されているという点で特異であり、その重心運動の極限的に冷却する技術は、新しいタイプのセンサーへの道を拓くと期待される。たとえば、ナノ粒子に働く加速度や、ナノ粒子が感じる角速度などを検知する高感度なセンサーなどの応用が考えられることから、本研究で開発した技術を実用へと近づける研究も重要である。

この他、本研究で実現した、光格子に捕捉された複数ナノ粒子系においても、興味深い研究が進められると期待される。2 個のナノ粒子を単一光格子内に閉じ込めただけの非常に単純な系で

あるにもかかわらず、粒子が永続的に軌道運動を行い続けるという、簡単には理解できない振る舞いが見つかったことから、この系にはこの他にもナノ物理、非平衡物理という観点から興味深い性質が潜んでいる可能性がある。これらの性質を明らかにすることは、たとえば星間物質が形成されるメカニズムに関する定量的な検討といった、複数のナノ粒子を利用した新しいタイプの実験にも繋がると期待される。

#### 4. 自己評価

本研究の当初の目標は、真空中のナノ粒子の内部状態と重心運動を結合させ、重心運動の冷却を通じて内部状態をも冷却する機構の開発であったが、この機構の実現にまでは至らなかった。ナノ粒子同士の衝突を利用することで、内部状態と重心運動を結合させる手法を想定していたが、ナノ粒子が想定よりずっと大きな電荷を自発的に持ち、粒子同士の反発が非常に大きいことが主な問題点であった。ただし、逆にこのような性質を積極的に活用することで、ナノ粒子の重心運動を量子基底状態付近まで冷却できる見込みのある、新しい効果的な冷却手法を提案・実証できた点は、想定以上の重要な成果であったと言える。

本研究は、全期間を通して、学生数名と共に適宜役割を分担しながら遂行した。そのため、データ収集中に次の実験装置を準備する、あるいはデータ解析中に装置の改良を行う、といった効率的な研究の進め方ができた。研究予算についても、研究の進展状況を鑑みつつ、実験結果を踏まえて装置の改良を順次進めていく形をとったことから、予算を非常に効果的に利用し、成果へと繋げることができたと考えている。

本研究の成果は、主に基礎科学に対して重要な貢献を行うものである。量子力学は、20世紀を通して飛躍的な進展を遂げ、最近ではこれを計算やセンシングへと活用する応用研究へとシフトしつつあるが、いまなお理解されていない側面も多い分野である。特に、我々の日常に関わる巨視的物体が、なぜ原子・分子・光子といった粒子で調べられてきた量子力学の振る舞いを示さないのか、という根源的な疑問に答えられる理論は確立しておらず、その実験的検証は量子力学の次なる重要な課題である。この観点からいえば、新しいメゾスコピック量子系を開拓した本研究は、量子力学の基本を明らかにする基礎科学としての側面が強いと同時に、将来的にはその量子的性質を有効活用する新しいタイプのデバイスへの道を拓くものであるとも言える。特に、真空中のナノ粒子が持つ、環境からよく隔離されているながら長時間観測が可能であるという特長は、高感度センシングに適していると考えられることから、その応用研究を通じた社会的な波及効果も大きいと期待される。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. M. Yoneda, K. Aikawa, “Thermal broadening of the power spectra of laser-trapped particles in vacuum”, J. Phys. B 50, 245501 (2017).
2. Mitsuyoshi Yoneda, Makoto Iwasaki, Kiyotaka Aikawa, “Spontaneous continuous orbital motion of nanoparticles levitated in air”, Phys. Rev. A 98, 053838 (2018).
3. M. Iwasaki, T. Yotsuya, T. Naruki, Y. Matsuda, M. Yoneda, K. Aikawa, “Electric feedback cooling of single charged nanoparticles in an optical trap”, Phys. Rev. A 99, 051401(R)

(2019).

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

発 明 者: 相川 清隆

発明の名称: 微小粒子を用いる加速度計

出 願 人: 東京工業大学

出 願 日: 2017/02/17

出 願 番 号: 特願 2017-028232

公 開 番 号: 特開 2018-132500

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 平成 29 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 受賞
2. 平成 29 年度 末松賞(東京工業大学) 受賞
3. (invited talk) K. Aikawa, "Cold nanoparticles in an optical lattice: towards investigating multi-particle dynamics", the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Kanazawa (Japan), 26 September 2018.