

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01822

研究課題名(和文) 真空中の単一ナノ粒子による巨視的重ね合わせ状態の研究

研究課題名(英文) Exploration of macroscopic superposition states with single nanoparticles levitated in vacuum

研究代表者

相川 清隆 (Aikawa, Kiyotaka)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：10759450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：まず、光学系および真空系からなる新しい装置を作成し、光格子中の単一荷電ナノ粒子を電場フィードバックによって基底状態付近へ冷却する技術を開発した。この際、レーザーの位相ノイズによって光格子中のナノ粒子の運動が加熱される効果を初めて観測し、レーザーの位相ノイズの低減などの工夫によって、この効果を無視できるほど小さくできることも示した。さらに、ナノ粒子の運動量測定を行うための飛行時間法についても検討を行い、荷電ナノ粒子は残留電場の影響により飛行時間法では運動量測定が困難であることを見出した。この問題を解決すべく、ナノ粒子を中性化する手法およびこれを基底状態へと冷却する新しい手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、真空中の単一ナノ粒子を量子基底状態付近まで冷却する技術が開発できた。特に、ナノ粒子を中性化した上で基底状態付近へと冷却できることは、多くの応用の観点から重要である。まず、残留電場の影響なく飛行時間法による運動量測定が行えるため、ナノ粒子の重心運動に関する量子性を探る研究が可能となる。また、残留電場の影響を受けずに、ナノ粒子を加速度センサとして利用することが可能となる。これらの意義に加え、本研究の本来の目的からは外れるものの、従来知られていたもの比べて高い周波数帯域で極めて低い強度ノイズのレーザーを開発できた点も、レーザーを用いる種々の応用において有用と期待される。

研究成果の概要(英文)：We constructed a new apparatus consisting of an optical system and a vacuum chamber. With this apparatus, we demonstrated electric feedback cooling of single charged nanoparticles in an optical lattice to near the ground state. In this experiment, we observed that the motion of nanoparticles in an optical lattice was heated by the laser phase noise and showed that the heating effect was made negligible by the reduction of the laser phase noise. Furthermore, we investigated the possibility of measuring the momentum of nanoparticles via the time-of-flight method and found that the momentum measurements of charged nanoparticles were difficult due to the strong impact of the residual electric fields in the vacuum chamber. To solve this issue, we developed a method for neutralizing nanoparticles and cooling them to near the ground state.

研究分野：量子光学・ナノ物理

キーワード：ナノ粒子 浮揚オプトメカニクス フィードバック冷却

## 1. 研究開始当初の背景

光との相互作用により物体の運動を制御するオプトメカニクス分野では、機械的振動子を量子基底状態まで冷却できることが示されているが、基板との接点があるために振動のQ値が制限されるという問題があった。そこで、基板との接点のない新たな系として、真空中に浮揚させた単一ナノ粒子の研究が急速に発展しつつあり、特にその重心運動を冷却することで種々の応用に活かそうとする研究が盛んに進められている。その中でも、ナノ粒子の運動における量子性を探る研究は、世界的に大きな流れとして盛り上がりを見せている。

従来の研究で用いられていた冷却手法は、ナノ粒子を光学的に観測し、その情報に基づいて捕捉レーザー光に変調を加える手法（パラメトリックフィードバック冷却）であり、これにより絶対零度 1mK 程度まで冷却できることが示されていた。ただし、この手法ではこれより低い温度への到達は困難であることも判っており、この系を用いて量子力学的振る舞いを観測するためには、新しい冷却手法が必要であった。我々は、本研究を開始する直前に、光格子中の荷電ナノ粒子の運動を光学的に観測し、その情報に基づく振動電場を印加してナノ粒子の運動をフィードバック制御する電場冷却の手法を開発しており、絶対零度 10mK 程度（基底状態からの占有数にして 1000 程度）までの冷却に成功していた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、真空中の単一ナノ粒子の重心運動における量子的振る舞いを観測・制御するための基盤技術を開拓することである。特に、重心運動を量子基底状態付近へと冷却する手法を開発することを中心的な目的とする。その上で、量子状態が黒体放射や真空槽内の背景気体といった環境要素にどのように影響を受けるのか、また、どのようにすれば運動に関する重ね合わせ状態を生成できるのか、といった観点で研究を進める。

## 3. 研究の方法

まず、量子基底状態付近への冷却に向けて、新たな装置の製作を進めた (図 1)。これは、従来の装置では、基底状態への冷却に不可欠な高い真空度に達することが困難とわかったためである。新しい装置では、特に背景圧を高真空 ( $10^{-6}$ Pa 以下) へと到達することを目的として、排気量の大きなターボポンプとイオンポンプを用いること、またアウトガスの多い部品を使わないこと、といった点

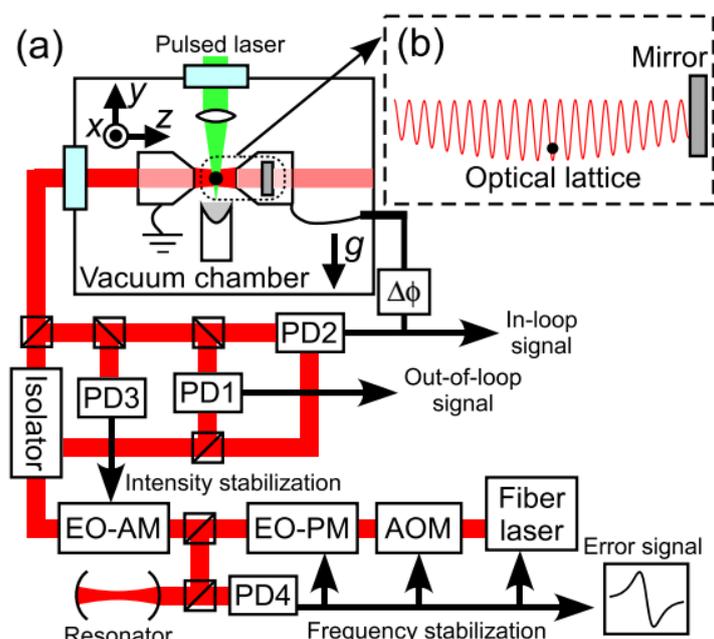


図 1：新たに構築した装置の概要

に注意して真空系を改良した。また、ナノ粒子の運動を観測する光学系についても改良し、

光学部品の配置を工夫したり、レーザーの強度ノイズを低減する機構を導入したりすることで、ナノ粒子の運動の観測精度を高めた。さらに、実験を行う中でわかってきた問題として、ナノ粒子の光格子方向の運動がレーザーの位相ノイズによって大きく加熱されることから、レーザーの位相ノイズを低減する機構を導入したり、光格子を形成するための打ち返しミラーを真空槽内に配置したりする改良を施した。

ナノ粒子の電場冷却を行う際には、光学的に得られたナノ粒子の位置の情報からフィードバック信号を生成し、これに基づく電場をナノ粒子捕捉領域に印加する。本研究では、電場冷却による到達温度をできるだけ低くすることを目標として、このフィードバック信号の生成手法についても研究・改良を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 光格子中での位相ノイズによる加熱の評価

本研究では、他グループにない独自の特徴として、ナノ粒子を光の定在波である光格子に捕捉している。光格子の特長は、与えられたパワーに対して振動周波数が高く、基底状態の温度が高いために、占有数の低い状態へと冷却しやすい点にある。その一方で、レーザーが位相ノイズを持つ場合、光格子の位置が変調されることになり、捕捉されたナノ粒子の運動が加熱されるという問題がある。

本研究では、光格子中のナノ粒子がこのような加熱を受けていることを初めて観測した。この加熱の効果を最小限とするために、光格子を形成するための打ち返しミラーを、技術的に可能な範囲で最短となる位置に配置するために真空槽に工夫を行った。さらに、レーザーの位相ノイズを光共振器への安定化によって低減するための光学系・電子回路系の開発を行った。

このように改良を施した状態で、位相ノイズの影響がどの程度大きいのかを見積もるために、位相ノイズによる加熱の割合を評価する理論的なモデルを構築し、実験結果との比較を行った。その結果、このモデルは観測された加熱の早さをよく説明できること、および位相ノイズを低減した状態では、位相ノイズによる加熱は無視できるほど小さく、加熱はほぼ光子のランダムな散乱に伴う光子反跳加熱のみによることが明らかとなった（図2）。

### (2) 電場冷却による基底状態付近への冷却

位相ノイズの影響が十分に低減された状態において、ナノ粒子の光格子方向の重心運動の温度はおおよそ  $40\mu\text{K}$  程度、占有数にして3程度であり、量子基底状態に近い温度まで冷却できることがわかった。また、この温度は、光子反跳加熱および光学的な観測精度から理論的に予想される値とよく一致することもわかった（図3）。

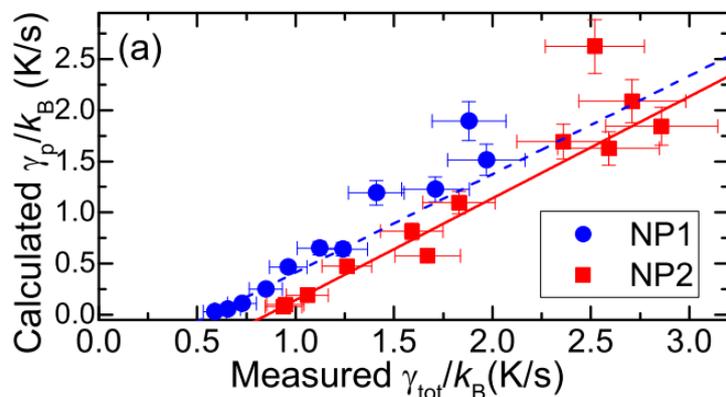


図2：計算された加熱レートと観測された加熱レートの比較（NP1, NP2はレーザーパワーの異なる条件）

量子基底状態への到達には、光学的な観測精度を向上させることが必要である。そこで、さらに到達温度を下げるべく、光学系に対して改良を行うと共に、レーザーの強度ノイズを低減する工夫を行った。特に、強度ノイズについては、30kHz～600kHzという周波数帯域において、

相対強度にして $6 \times 10^{-8}/\text{Hz}$ というショットノイズに近いノイズレベルまでの安定化を実現した。これらの改良の結果、温度にして約 $13\mu\text{K}$ 、占有数にして0.9程度へと到達できることがわかった。これにより、当初目標としていた、量子基底状態付近への到達が達成されたと言える。

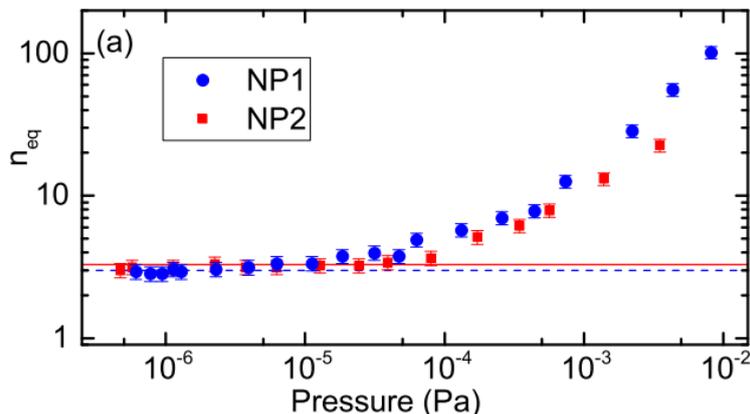


図3：光格子方向の占有数の圧力依存性

### (3) ナノ粒子の中性化の重要性

量子基底状態付近のナノ粒子を用いて、その量子性を探る研究を行う中で、最も重要な観測手段となり得るのは、ナノ粒子を捕捉光ポテンシャルから解放し、しばらく飛行させた後にトラップで再捕捉して運動量を測定する飛行時間法であることがわかった。ところが、荷電ナノ粒子の場合、レンズを始めとする真空槽内の様々な部品が作り出す表面電場の影響を受けて飛行時間中に加速されるために、正確な運動量の測定ができないという深刻な問題が判明した。電場冷却では、ナノ粒子が電荷を帯びていることを利用し、外部からの振動電場によりナノ粒子の運動をフィードバック冷却する。そのため、ナノ粒子は必ず表面電場の影響を受けることになり、飛行時間法による運動量測定は不可能であることがわかった。

そこで、本研究では、当初の計画を変更し、ナノ粒子を中性化する手法を探ると共に、中性化した状態で基底状態付近まで冷却することができるかどうかを探る、という方向性へと転換した。まず、中性化については、過去のナノ粒子・マイクロ粒子に関する研究や、重力波関係の研究、慣性センサー関係の研究などを参考に、放電を用いる手法と、紫外光を用いる手法の双方を試行した。その結果、どちらか片方では本研究の目的には不十分であり、双方を併用する形とすることで、高真空において安定に中性化されたナノ粒子を生成し、長時間に渡って中性化した状態を保つことができるとわかった。

### (4) 中性化したナノ粒子の基底状態付近への冷却

中性化したナノ粒子を基底状態へとフィードバック冷却することは非常に困難である。10年以上前から知られる、パラメトリックフィードバック冷却であれば中性化したナノ粒子を冷却できるが、冷却能力が弱いために光子反跳加熱に逆らって基底状態まで冷却することはできず、占有数にして50～100程度が冷却限界であることが最近明らかとなっている。

そこで、本研究では、我々が開発した電場冷却の手法と類似する新しいアプローチを試みた。荷電ナノ粒子に対する電場冷却では、ナノ粒子の速度に比例した力を電場という形で与えることで冷却する。そこで、同様にナノ粒子の速度に比例した力を光の電場勾配によって

与えることができないかを試した。具体的には、我々の実験系では、ナノ粒子は光格子に捕捉されているため、捕捉レーザー光に異なる周波数成分の光を混合することにより、わずかにずれた光格子を形成し、粒子に対して電場勾配を与えることが可能である。2種類の異なる周波数成分の光を混合し、それぞれが粒子の捕捉位置で逆向きの勾配となる光格子を生じさせれば、正負どちらの向きの力も与えることができるため、荷電ナノ粒子に対する電場冷却と同様に、ナノ粒子の運動と共に振動する力を与えて冷却できると予想される。

光学系を変更し、2種類の異なる周波数の光を混合した上でこの手法を試したところ、実際にナノ粒子の運動を電場冷却と同様に効率よく冷却できることがわかった。この手法は、ナノ粒子の電荷によらずに冷却することが可能であるため、中性化したナノ粒子に対しても有効である。実際、中性化したナノ粒子を基底状態付近（占有数1程度）まで冷却できることを実証できた。

この成果により、中性化したナノ粒子を基底状態付近へと冷却した上で、飛行時間法を用いて運動量を測定することが可能となり、ナノ粒子の量子的振る舞いを探るための基盤技術が整ったといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 相川清隆	4. 巻 -
2. 論文標題 電場フィードバック技術による浮揚ナノ粒子の冷却とその応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 M. Iwasaki, T. Yotsuya, T. Naruki, Y. Matsuda, M. Yoneda, K. Aikawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Electric feedback cooling of single charged nanoparticles in an optical trap	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 051401(R)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.99.051401	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 -

1. 著者名 M. Kamba, H. Kiuchi, T. Yotsuya, and K. Aikawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Recoil-limited feedback cooling of single nanoparticles near the ground state in an optical lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 L051701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.L051701	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8件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 四谷泰佑, 奥田滉生, 須山直斗, 相川清隆
2. 発表標題 非シリカナノ粒子の捕捉に向けたイオントラップの製作
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木内宏紀, 神庭光善, 四谷泰佑, 相川清隆
2. 発表標題 光格子中における基底状態付近のナノ粒子のフィードバック冷却
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相川清隆
2. 発表標題 真空中の超低温単一ナノ粒子によるオプトメカニクス
3. 学会等名 第3回 ワークショップ「物理工学の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成木翼, 岩崎睦, 四谷泰祐, 松田雄輔, 米田光慶, 相川清隆
2. 発表標題 レーザー捕獲された単一荷電ナノ粒子の電場フィードバック冷却
3. 学会等名 日本物理学会 2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相川清隆・岩崎 睦・四谷泰佑・成木 翼・松田雄輔・米田光慶
2. 発表標題 真空中に光捕獲された荷電ナノ粒子の電場冷却
3. 学会等名 OCU先端光科学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyotaka Aikawa
2. 発表標題 Towards exploring macroscopic quantum mechanics with ultracold levitated nanoparticles
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神庭光善, 木内宏紀, 中野悟志, 加賀谷尚杜, 相川清隆
2. 発表標題 光格子中の中性ナノ粒子の冷却
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水峻雅, 奥田滉生, 須山直斗, 四谷泰佑, 神庭光善, 相川清隆
2. 発表標題 ナノ粒子捕捉のためのイオントラップの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------