

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06016

研究課題名(和文)超低速コライダーによるナノ粒子衝突ダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Investigation of the collisional dynamics between nanoparticles with an ultralow-velocity collider

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) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、真空中において赤外レーザー光で作られた光格子中にナノ粒子を捕捉し、その3次元運動を精密に観測する実験装置を製作した。この装置において、真空中のナノ粒子は50～200素電荷程度の大きな電荷を持ち、振動電場によりその運動を制御しやすいことを明らかにした。また、単一荷電ナノ粒子を光学的に観測し、その振動振幅が減衰するように電場にフィードバックを与えることで、ナノ粒子の重心運動を3次元的に超低温へと冷却する効率的な手法を実現した。同時に、捕捉されたナノ粒子の質量や帯電価数を正確に測定する手続きも確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、真空中の単一荷電ナノ粒子の重心運動を電場によって容易に制御でき、超低温領域まで冷却できることが明らかとなった。この電場冷却の手法をさらに高真空で適用することで、原子・分子よりはるかに大きな粒子の重心運動を量子基底状態付近まで冷却し、今なお未開拓な巨視的物体の量子的振る舞いを明らかにできると期待される。また、本研究により、真空中のナノ粒子は大きな電荷を自発的に持つため、ナノ粒子同士の相互作用はクーロン反発力が支配的であることがわかった。今回確立した実験系は、高い制御性を持つことから、星間物質の形成に関わる荷電ナノ粒子間衝突の物理を実験室内で追究する舞台としても有望である。

研究成果の概要(英文)： We built an experimental apparatus that can trap nanoparticles in vacuum in an optical lattice formed with an infrared laser and observe their three dimensional motion precisely. With this apparatus, we found that nanoparticles in vacuum tend to have a relatively large charge of about 50 to 200 elementary charges and can be readily manipulated by oscillating electric fields. Furthermore, we demonstrated an efficient cooling method relying on the optical observation of single charged nanoparticles and the application of feedback electric fields that decelerate the amplitude of the nanoparticles' motion and reached ultralow temperatures in three dimensions. Simultaneously, we established a procedure to properly measure the mass and the charge number of trapped nanoparticles.

研究分野：量子光学

キーワード：ナノ粒子 オプトメカニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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、接点のない新たな系として、真空中に浮揚させたナノ粒子の研究が、近年、急速に発展しつつある。研究開始時点では、光学的に浮揚させたナノ粒子の重心運動の温度を捕捉レーザー光に変調を加える手法により絶対零度数 mK 程度まで冷却できることが示されていた。こうした先行研究は、ナノ粒子の重心運動を高感度なセンシングや巨視的物体の量子的性質の追究を目的としており、粒子の内部状態や内部の温度には着目しないものであった。

2. 研究の目的

本研究では、将来的にナノ粒子の内部状態を冷却する冷凍機の実現も視野に入れつつ、浮揚粒子の内部状態を観測・制御することを重要な目標としている。本課題では、特に捕捉されたナノ粒子同士の衝突に着目し、超低速のナノ粒子コライダーの実現と、これを利用した、ナノ粒子の内部エネルギーが重心運動に変換される非弾性過程の観測を目的として研究を進めた。また、これに当たり、ナノ粒子の重心運動を冷却する技術の開拓やナノ粒子同士の相互作用の観測・制御も重要な目的であった。

3. 研究の方法

本研究では、まず新しい実験装置を製作し、こ

れを用いてナノ粒子を捕捉・観測・冷却する技術を確認した。その上で、ナノ粒子同士の衝突について実験を行い、得られた結果から、真空中のナノ粒子が自発的に帯電している可能性を検討した。さらに、荷電ナノ粒子を扱う技術を開拓した。各過程の詳細は次の通りである。

(1) 新たな実験装置の製作

真空槽、粒子の捕捉・観測のための光学系、観測に関わる電子回路系、および実験系制御・データ取得・データ解析のためのコンピュータからなる新たな実験装置を製作した(図1)。他グループにない特長として、直径2ミクロン程度に絞られたビームを打ち返すことで光格子を形成し、複数のナノ粒子を同時に捕捉・観測できる実験系とした。複数のナノ粒子が捕捉された様子を図2に示す。また、捕捉光として材質による光吸収が少なく、元々低ノイズの光源が市販されている1550nm付近の光を用いた実験系であることも、重要な特長である。ナノ粒子による散乱光をホモダイン検出し、レーザー光の強度ノイズを取り除くためにバランス検出を利用することで、室温付近で運動する粒子の運動を50dB程度の信号/ノイズ比で観測できる観測系を構築した。粒子の典型的な運動スペクトルを図3に示す。なお、光学系を工夫することで、粒子の3方向の運動が全て異なる周波数となるようにした。これにより、1つの光検出器で3方向の運動を別々に観測することが可能となった。

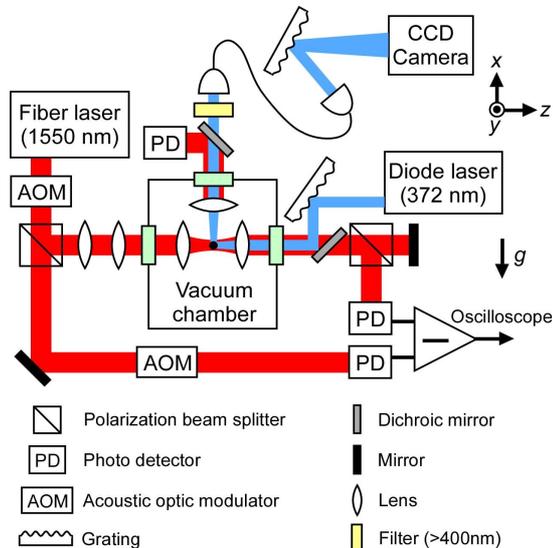


図1: 実験装置の概要

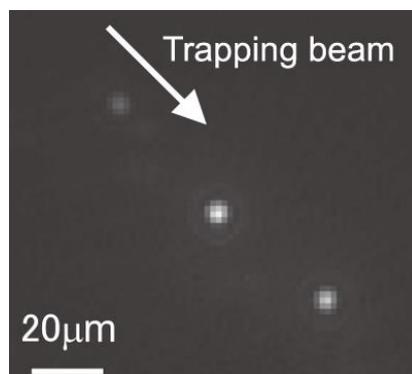


図2: 光格子中の複数のナノ粒子

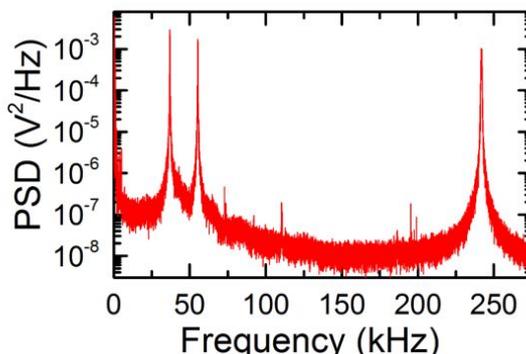


図3: ナノ粒子の運動スペクトル

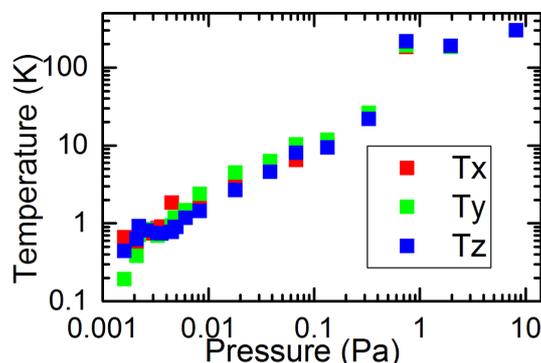


図4: パラメトリック冷却によるナノ粒子の重心運動の温度

(2) ナノ粒子の冷却手法の確立

本研究開始当初は、ナノ粒子の冷却手法として、ナノ粒子の重心運動を光学的に観測し、得られた信号の周波数を2倍化し、さらに位相をずらしたものを捕捉レーザー光強度にフィードバックすることで、パラメトリックに重心運動を冷却するパラメトリックフィードバック冷却が知られていた。そこで、本研究においても、上記のような信号処理を行うフィードバック回路系をアナログ電子回路により自作し、ナノ粒子の重心運動を数 mPa 程度の圧力において絶対零度 0.5K 程度まで冷却できることを確かめた。圧力の低下と共に重心運動の温度が下がる様子を図4に示す。

(3) 複数のナノ粒子の捕捉・衝突機構の実現

光捕捉したナノ粒子を衝突させる実験は過去に例がないため、本研究では新しい機構を実現すべく研究を進めた。具体的には、光格子中に2個のナノ粒子を捕捉し、その後打ち返し光のみをゆっくり切ることで、2粒子を捕捉したまま衝突させるという新しい実験手法が可能であるかを追究した。

(4) ナノ粒子の荷電特性の探究

ナノ粒子間の衝突を制御するための手法の一つとして、ナノ粒子を帯電させることが重要であると考えられたことから、ナノ粒子の荷電特性を調べられるよう真空槽内に電極を導入し、ナノ粒子の電場に対する応答を調べた。

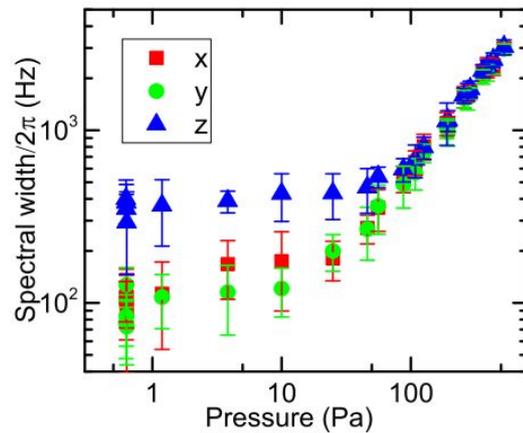


図5：運動スペクトル幅の圧力依存性

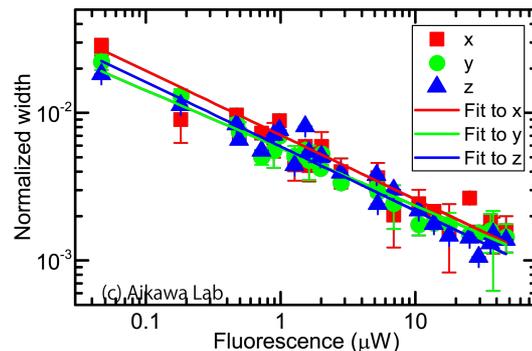


図6：規格化されたスペクトル幅と粒子の散乱光強度の関係

4. 研究成果

(1) 光との相互作用に基づいてナノ粒子の大きさを推定する手法の開発

本研究を進める中で、当初想定していなかった振る舞いが観測されたことから、その詳細な観測・解析を行い、論文として発表した。その概要を以下に記す。

ナノ粒子を用いる実験では、捕捉されるナノ粒子は1個ずつサイズが異なっているため、捕捉されたナノ粒子のサイズの推定はナノ粒子の振る舞いを理解する上で重要となる。従来、ナノ粒子のサイズは、背景気体によってナノ粒子の運動が減衰する様子から推定するのが一般的であった。しかし、この方法では、背景気体の種類や圧力を正確に知る必要があるため、必ずしも精度よく粒子のサイズを知ることはできなかった。

本研究において、ナノ粒子のスペクトル幅を様々な圧力において測定した結果、100Pa 以上数 1000Pa 程度の圧力領域においては、背景気体との相互作用による減衰を反映して、幅が圧力に比例することがわかったが、数 10Pa 以下においては一定値に近づくこと、また振動の方向によって幅が大きく異なることを見出した(図5)。このような振る舞いは過去に報告されていなかったことから、実験データの解析および新しい理論の構築に取り組み、低圧力でのスペクトル幅は、3次元的な熱的振動によって運動に非線形性が導入された結果、背景圧力から予想されるものより大幅に広がること、また振動周波数に比例することを見出した(図6)。

この成果により、低圧力下でのナノ粒子のスペクトル幅が、ナノ粒子の感じるポテンシャルの深さを直接与えることが明らかとなったため、低圧力下でのスペクトル幅から、背景気体の情報なしに粒子のサイズを推定することが可能となった。

また、ナノ粒子同士の衝突を引き起こす実験を行う中で、光格子を切ると2粒子が衝突することなく捕捉レーザー光から逃げる、という振る舞いがしばしば観測された。ナノ粒子が自発的に帯電しており、光格子に捕捉された時点で2粒子がお互いに強くクーロン反発している、と考えると、この振る舞いに説明がつくことから、ナノ粒子の帯電特性について詳しく調べた。その結果、ナノ粒子は真空引きの最中に、数 Pa 程度の圧力において、主にイオンゲージの動作開始と共に帯電する機会が多いことを見出した。これは、イオンゲージの動作によって正の気体分子イオンが生成され、これらがナノ粒子に衝突することでナノ粒子が電荷を持つことを示唆している。

(2) 電場冷却の実証

ナノ粒子が自発的に帯電しており、しかも 10V/cm 程度の比較的弱い電場によって重心運動が大きく影響される様子が観測されたことから、荷電ナノ粒子の重心運動を電場によって冷却できる可能性を追究した。従来ナノ粒子の冷却に用いられてきたパラメトリックフィードバック冷却は、冷却能力が温度に比例し、低温では冷却能力が非常に弱くなるという欠点があったが、電場を用いればこのような欠点なしに超低温領域まで冷却できるのではないかと、この見込みがあったためである。その結果、数 mPa 程度の圧力においてどの方向にも絶対零度 10mK 程度以下にまで冷却できることを実証すると共に、電場冷却のモデルを構築し、実験結果とよく合うことを確かめた(図7)。また、これと同時に、ナノ粒子の電荷を正確に評価する方法を開発し、電場に対する応答を利用して、ナノ粒子の質量および帯電価数を正確に評価できることを示した(図8)。さらに、冷却限界についても考察を行い、現在の冷却限界はフィードバックの帯域で制約されていること、より低い圧力ではフィードバック帯域は問題とはならず、最終的には量子基底状態付近まで到達可能であるとの見込みを得た。今回得られた成果は、今後、ナノ粒子を超低温領域で扱う研究の基盤をなすものである。

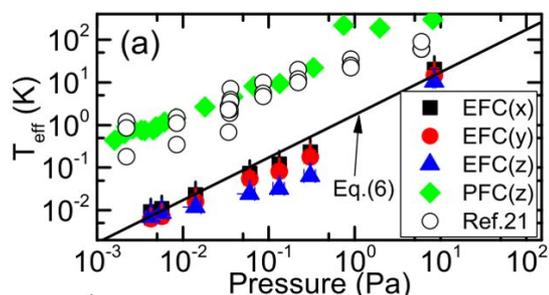


図7：電場冷却によるナノ粒子の重心運動の温度 (EFC ; PFC はパラメトリック冷却の結果)

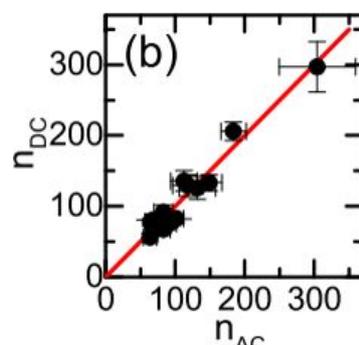


図8：2手法による帯電価数の比較

重心運動の冷却について強力な手法を実現できた一方で、本研究により、ナノ粒子同士の衝突を追究することは、現在の実験系では難しいことも明らかとなった。今回製作した実験系では、真空へ移行したナノ粒子が 50~200 素電荷程度の正電荷を持っているために、2 個のナノ粒子同士に非常に強いクーロン反発力が働いている。ナノ粒子のおよその直径である 200nm の間隔において、このクーロン反発力のエネルギーは温度にして 10 万 K を大きく上回る。このため、ナノ粒子同士が衝突する場合でも、お互いに十分に接近することはなく、ナノ粒子の内部状態が変化するような衝突はほとんど起きないと考えられる。ナノ粒子の捕捉領域周辺に負の高電圧をかけることでナノ粒子を中性化する試みを行った結果、ある程度は電荷を制御できることが明らかとなったが、現状では複数粒子に対してそれぞれの電荷を別々に制御することは難しい。そのため、ナノ粒子同士の衝突を調べていく上では、中性付近の小さな電荷を持ったナノ粒子を複数準備できるような手法の開発が今後の重要な課題となると結論づけられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] 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). (査読あり)
- [2] Mitsuyoshi Yoneda, Makoto Iwasaki, **Kiyotaka Aikawa**, “Spontaneous continuous orbital motion of nanoparticles levitated in air”, Phys. Rev. A **98**, 053838 (2018). (査読あり)
- [3] M. Yoneda, **K. Aikawa**, “Thermal broadening of the power spectra of laser-trapped particles in vacuum”, J. Phys. B **50**, 245501 (2017). (査読あり)

[学会発表] (計 8 件)

- [1] **Kiyotaka Aikawa**, Cold nanoparticles in an optical lattice: towards investigating multi-particle dynamics (招待講演), the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Kanazawa, Japan, 26 September 2018
- [2] 米田光慶, **相川清隆**, レーザー捕捉された粒子におけるパワースペクトルの熱的広がり, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 千葉, 2018 年 3 月 25 日
- [3] 岩崎睦, 米田光慶, **相川清隆**, 光格子中におけるナノ粒子の重心運動の 1K 以下への冷却, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 千葉, 2018 年 3 月 25 日

- [4] 竹添慎司, 成木翼, **相川清隆**, リング型ポテンシャルへのナノ粒子の捕捉、日本物理学会 第 73 回年次大会、千葉、2018 年 3 月 25 日
- [5] **相川清隆**, レーザー捕捉された粒子におけるパワースペクトルの熱的広がり (招待講演), 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」, 軽井沢、2017 年 12 月 14 日
- [6] 米田光慶, **相川清隆**, 真空中のナノ粒子のフィードバック冷却、日本物理学会 第 72 回年次大会、大阪、2017 年 3 月 17 日
- [7] **Kiyotaka Aikawa**, Towards understanding the collisional dynamics of cold nanoparticles (招待講演), CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, Saitama, Japan, 10 June 2016.
- [8] **Kiyotaka Aikawa**, Towards understanding the collisional dynamics of cold nanoparticles (招待講演), Coherent Control of Complex Quantum Systems, Okinawa, Japan, 20 April 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 微小粒子を用いる加速度計

発明者: 相川清隆

権利者: 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-028232

出願年: 2017

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

www.aikawa.phys.titech.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者なし

(1) 研究協力者

研究協力者なし