

研究終了報告書

「極低温原子・微小球ハイブリッドシステムで探る散乱の物理」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：赤松 大輔

1. 研究のねらい

本研究のねらいは、“古典的”な微小球による“量子的”な原子の散乱を観測する事である。ナノ粒子に代表される微小球や物体を構成する原子は、レーザーによる散乱力・勾配力を利用し、その重心運動制御が可能である。レーザー冷却技術により、原子気体はボーズ・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退といった量子力学を強く反映した相転移を起こし、重心運動の基底状態まで冷却することが可能である。一方、本研究の開始とほぼ同時期に光トラップされたナノ粒子の重心運動をその基底状態まで冷却したとの報告がなされた。光トラップされたナノ粒子は、外部のシステムと切り離されており各種ノイズの影響を受ける事がなく精密計測との親和性がよい。

そこで、本研究ではこれら二つのシステムを両立する実験系(極低温原子・微小球ハイブリッドシステム)を立ち上げ、極低温原子の微小物体による超低エネルギーの散乱現象を観測することを目的とした。そして、観測された散乱現象から微小粒子と原子の相互作用を明らかにし、ナノテクノロジーの分野へ貢献することを目指した。

本研究で中心となる中性ナノ粒子と中性原子の間にはたらく力は、分散力と呼ばれ量子力学的な揺らぎに起因する力である。本研究で目指しているナノ粒子・極低温原子気体のハイブリッドシステムにより、低エネルギーでの散乱を精密に観測することで微小球と原子の衝突における量子反射などの量子力学的な影響を調べる事を目指した。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究遂行において最も重要な研究課題の一つは、 10^{-6} Pa の超高真空中でのナノ粒子の光トラップである。これまでのナノ粒子の光トラップに関する多くの実験は、水中や常圧の空気中で行われてきた。背景に存在する水や常圧の空気存在がナノ粒子の光トラップの安定性に重要であるが、超高真空中ではその効果は期待できない。そこで本研究ではナノ粒子を光トラップしている光の強度変調を行う事により人工的に重心運動をコントロールしトラップの安定性を高める事にした。初年度の本研究予算で購入したデジタルロックイン検出器を用いて、xyz の3軸全ての重心運動冷却を行い、重心運動温度を 1 K 程度まで下げる事が出来た(研究テーマ A)。重心運動が冷却された状態で、超高真空への排気を試みたが、1~10 Pa 程度においてナノ粒子が失われるトラップロスが観測された。このような現象は先行研究では報告されておらず、その原因の解明のため以下の実験(研究テーマ B)を行った。

1) 帯電量変化の測定・制御

2) 電場による運動制御

その他、失われる際のナノ粒子の運動の様子を別の波長のレーザーで観測したり、様々な製造法で作られたSiO₂ ナノ粒子で試した。残念ながら、研究期間中にトラップロスの原因を解明

することはできず、本研究期間中に、 10^{-4} Pa 未満での超高真空中でナノ粒子の光トラップを行う事が出来なかった。

また、真空排気を行う中で、10 Pa 程度でトラップされたナノ粒子の粒径が急激に減少する様子が観測された。この現象に関しては、さがけプロジェクトの同期である杉本研究員からナノ粒子の表面の OH 基などが解離していく際に見える現象で間違いないとご指摘いただき、その過程について領域会議の際に詳細にご教授していただいた。

本研究の後半では、超高真空中でのナノ粒子の光トラップが成功次第、すぐにハイブリッドシステムが構築できるように極低温原子気体の準備を行った(研究テーマ C)。ハイブリッドシステムのための真空装置を設計した。さらに、予定通り Cs の磁気光学トラップのための光源を準備し、新たな真空装置の中での磁気光学トラップに成功した。ナノ粒子と極低温原子のハイブリッドシステムの構築においては開口数(NA)の大きな単レンズを使用する予定であった。磁気光学トラップ用に 852nm のレーザーは反射し、ナノ粒子トラップ用に 1030 nm は透過するようなダイクロイックコートをした。NA が大きいとコーティングの許容角を超えた角度でレーザー光は通過するが、ダイクロイックコートにより1) 集光スポットサイズに影響は出ないこと、2) 852 nm の反射光の偏光が大きく変化しないことを確認した。これにより、ナノ粒子の光トラップができれば極低温原子・微粒子ハイブリッドシステムの構築ができる準備が整った。

(2) 詳細

研究テーマ A「光トラップされたナノ粒子の3次元同時運動制御」

本研究では、まず超高真空中(10^{-6} Pa 程度)でのナノ粒子の光トラップの実現に注力し、2年目以降に Cs 原子の磁気光学トラップの構築を行う事を計画していた。そして、2年目後半から磁気光学トラップの実験系を拡張しナノ粒子とのハイブリッドシステムを構築する予定で研究を開始した。

そこで、研究開始直後から超高真空中でのナノ粒子の光トラップを目指し、重心運動制御に関する研究を開始した。光トラップされたナノ粒子の1次元方向のみの重心運動制御に関しては、3次元方向同時に冷却することには成功していなかった。また、その重心温度も全て手動での計算が毎回必要でありパラメータの最適値を見つけるのが困難であった。そこで、これまで1次元でしか冷却できていなかったシステムを3次元に拡張するため本研究予算でデジタルロックインアンプを購入した。私の異動(産業技術総合研究所から横浜国立大学)に伴い、実験システムを一新する機会に恵まれたため、よりよいナノ粒子トラップシステムの構築を行った。

図1が横浜国立大学で新しく組み上げたナノ粒子の光トラップシステムである。多くの研究は Nd:YAG レーザー (1064 nm) やファイバーレーザー(1.55 μ m) を用いているが、本研究では光トラップ用レーザーとして、最大出力 500 mW の Yb:YAG レーザーを用いた。中心波長は 1030 nm であり、将来的に、Yb³⁺:YLF ナノ粒子などを用いて格子振動の冷却を見据えての選択である。これが後述するトラップロスの原因の可能性は否定できないが、レーザー波長を変えて詳細を明らかにする実験を計画したが、研究期間内に遂行することはできなかった。

これは、将来の課題の一つである。

ナノ粒子が光トラップされた後、実験システムは真空ポンプにより排気される。圧力が大きい環境で排気速度を大きくしてしまうと空気と一緒にナノ粒子も排出されてしまうため、排気量の制御が重要である。そこで、電磁バルブを用いて排気速度を自動で制御できるシステムを開発した。本研究においては学部三年生の学生さんが大いに頑張ってシステムを構築してくれた。また、重心運動温度に関してもリアルタイムに温度を推定するプログラムを卒業研究の一部として作成してもらい、研究を遂行する上での大きな助けとなった。

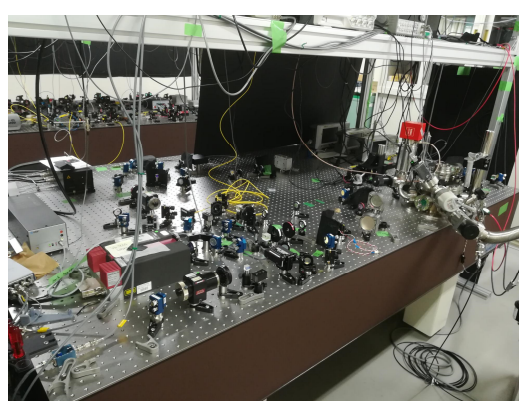


図 1

光トラップされたナノ粒子による前方散乱光と光トラップ光の干渉を利用し、リアルタイムにナノ粒子の重心運動を観測した。真空度がよくなるにつれて、ランダムなブラウン運動からトラップポテンシャルを反映した単振動が観測される。x,y,z 軸のそれぞれの単振動に対応する信号をデジタルロックインアンプに入力し、振動周波数ごとに内部の振動子を位相同期させ、二倍の周波数信号を出力させた。この信号によりトラップ光強度に変調をかけることでナノ粒子の重心運動を冷却した(図2)。位相やゲインに応じてナノ粒子の温度が変化する様子も確認した。本研究では、全ての軸において 1 K 程度までの冷却に成功した。

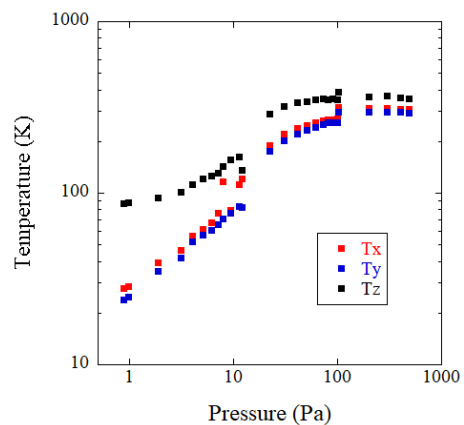


図 2

十分冷却が行えているにもかかわらず、10~100 Pa 程度でナノ粒子が突然トラップから消失する現象が観測された。先行研究ではそのような報告がなされていない。このようなトラップロスには本研究遂行の上で致命的であるため、その原因の解明・解決のため以下の研究テーマBを行った。

研究テーマB「ナノ粒子の帯電計測・制御と電場による運動制御」

3次的に十分ナノ粒子が冷却されているにもかかわらず、先行研究では報告されていないナノ粒子のトラップロスが観測された。原因を明らかにすべく、まず帯電量計測の実験系を構築した。具体的には、トラップナノ粒子付近に電極を設置した。電極に交流電場を印加し、光トラップ中のナノ粒子を強制振動させその振幅から電荷を推定した。さらに、帯電量の制御を行うため、コロナ放電のための電極を準備した。正に帯電したナノ粒子に対し、コロナ放電を行うと帯電量が減少し、負に帯電していく様子が見られた(図3)。強制振動用の電極に電場を印加すると、正に帯電をさせる事が出来、自由に電荷をコントロールすることができた。これまで、放電では符号を含めて自由に帯電量の制御は行われていなかったため、中性化をすることは難しかったが、本研究では外部環境をコントロールすることで自由に帯電をコントロールで

きることが実験的に示せた。帯電の正負がコントロールできる詳細な物理プロセスは不明であるが、稲田研究員からのコメントを頂き解析中である。

上述の手段により中性化を行いながら、真空度を上げる実験を行ったが、ナノ粒子はロストしてしまった。ロストの原因は電荷ではないと結論付け、次に光による冷却をやめ電極電場による冷却を試みた。

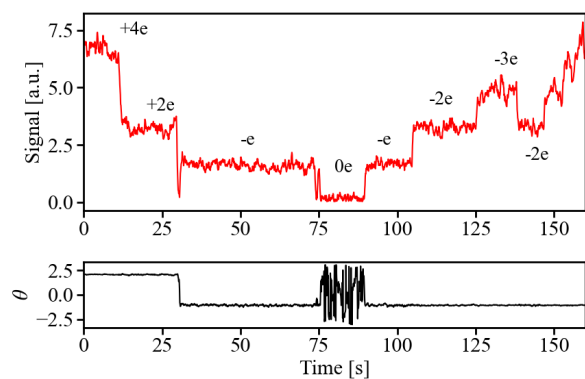


図 3

図4が電場による冷却を行った結果である。交流電場の位相に応じて冷却・加熱が行えた。電場冷却の利点は、トラップ機構と冷却機構を分離できる事だけでなく、光の強度変調で行う制御よりもゲインを上げられること(より冷却が可能になる事)がある。本研究では、ナノ粒子の重心運動を光制御よりも冷却できることを確認した。これらのメリットにもかかわらず、ナノ粒子のトラップロスの問題は残ってしまい原因解決には至らなかった。

重要な副産物として、上述したように自由に電荷をコントロールする手段を開発することに成功した。これにより、中性ナノ粒子と中性原子の衝突だけでなく、帯電量を調整したうえでの中性原子との衝突の観測まで実験が行えるようになった事は大きな進展であった。

研究テーマ C「ナノ粒子とのハイブリッドシステムを目指した磁気光学トラップ」

超高真空中でのナノ粒子の光トラップの実験と並行して、研究期間後半では

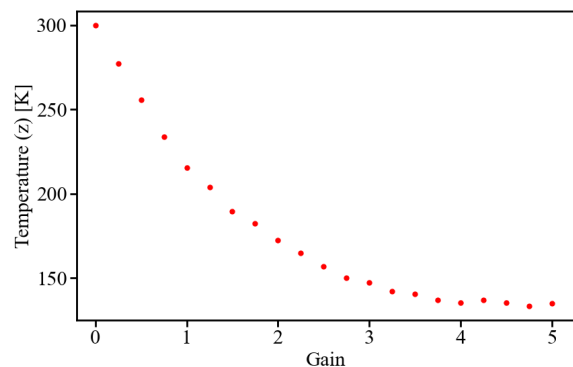


図 4

ハイブリッドシステムを目指した磁気光学トラップシステムの構築を行った。本研究ではミラー磁気光学トラップという手法により磁気光学トラップを行う事を提案していた。すなわちナノ粒子の光トラップに必要な NA の大きな単レンズの平面側にダイクロイックコートを施して、ナノ粒子をトラップしつつ付近でのミラー磁気光学トラップを行う手法である。NA が大きいレンズであるため適切なダイクロイックコートができるか非自明であったが、十分に良質なダイクロイックコートができていることが確認できた。さらに、そのようなレンズの平面側をミラーに見立てたミラー MOT にも成功した。

3. 今後の展開

本研究成果として、コロナ放電を利用してナノ粒子の帯電量を自在に制御できるようになった事が挙げられる。本研究提案では、中性ナノ粒子と中性原子気体の衝突の物理に関して考察していたが、このような技術により任意の帯電量をもつナノ粒子と中性原子の衝突に関しても実験的に調べる事ができるようになった。本研究期間中に、明治大学金本先生と共同で中性原子気体と中性ナノ粒子の衝突に関する理論論文を出版したが、帯電ナノ粒子との計算は手を出せな

かった。これに関しても衝突レートなどを計算したいと思う。

また、冷却原子気体を蒸発冷却などの手法を用いて量子縮退状態にし、例えばボーズ凝縮した気体の中でナノ粒子はどのような(ブラウン)運動するのか、についても大変興味深い研究課題だと考えている。

4. 自己評価

報告書で記載した通り、ナノ粒子のトラップロスがあり、その原因説明ができず超高真空中でのナノ粒子の光トラップを行う事が出来なかった。これにより、当初の研究計画からは大きく遅れてしまった。また、研究期間中に異動することとなり一度組み上げた系を分解・再構築する必要となった。

しかしながら、スタートアップ支援のおかげで前研究機関から移管できなかった装置類の多くを購入する事が出来て、比較的短時間で実験を再スタートできたのではないと思う。また優秀な学生のリクルーティングにも成功し、当初のシステムよりも自動化されたシステムの構築ができた。電場によるナノ粒子の電荷計測・制御、また運動制御に関する研究は当初の研究計画にはなかったが、学生さんらが進んで行った実験であり、新たな実験手法の獲得として大きな意義があった。

残念ながら研究実施期間中には、ハイブリッドシステムの構築に成功できなかったが、ナノ粒子の粒径減少の解明など領域会議等を通じていくつかの謎だった現象が明らかになりつつある。引き続き研究を続け、ナノ粒子と冷却原子気体の相互作用についての研究を推進したい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. T. Yamaguchi, D. Akamatsu, and R. Kanamoto, "Low-energy scattering of ultracold atoms by a dielectric nanosphere", *Physical Review Research*, 2021, vol.3, 043214.

本論文では、低エネルギーでの中性誘電体ナノ粒子と中性原子の散乱現象を理論的に解析した。ドブロイ波のナノ粒子による散乱角の変化、量子反射による散乱レートの変化を量子力学的に WKB 近似を利用して計算し、古典理論との乖離について議論した。計算はレーザー冷却された Rb、Cs 原子とガラス球で行い、本研究提案の基礎となるものである。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものも含む)

(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] 招待講演 赤松大輔、「光トラップされたナノ微粒子と冷却原子の相互作用の研究」
分子研研究会、2020 年 12 月
- [2] 招待講演 Daisuke Akamatsu, "Optical trap and control of a nanoparticle in vacuum towards a mixture with ultracold atoms", *Optical Technology and Measurement for Industrial Applications Conference 2022*, 2022 年 4 月