

**京都大学教育研究振興財団助成事業
成 果 報 告 書**

2021年7月28日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会 長 藤 洋 作 様

所 属 部 局 工学研究科

職 名 准教授

氏 名 杉山 和彦

助 成 の 種 類	令和2年度 ・ 研究活動推進助成			
申請時の科研費 研究 課 題 名	単一と多数個のイオントラップを組み合わせた超高精度イッテルビウムイオン 光時計			
上記以外で助成金 を 充 当 した 研 究 内 容	なし			
助成金充当に関 わる共同研究者	(所属・職名・氏名) なし			
発表学会文献等	(この研究成果を発表した学会・文献等) 湯川, 藤崎, 杉山, 「リニアRFトラップに捕捉されたBa ⁺ のレーザー冷却」, 日本物理学会第76回年 次大会, 15aA2-1, 2021年3月15日発表.			
成 果 の 概 要	研究内容・研究成果・今後の見通しなどについて、簡略に、A4版・和文で作成し、 添付して下さい。(タイトルは「成果の概要／報告者名」)			
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	1,000,000	円	
	使用した助成金額	1,000,000	円	
	返納すべき助成金額	0	円	
	助成金の使途内訳	費 目	金 額	
		物品費	1,000,000	
		(内訳)		
		備品費(ヒーターコントローラー)	145,251	
消耗品費(光学部品、 電気部品等)		854,749		
当財団の助成に つ い て	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) コロナウイルスによる活動制限下でも、本助成により、なんとか研究を継続することができました。また、今年 度、同様の研究課題で科研費を獲得することにつながりました。感謝申し上げます。近年、特に新しい研究助 成に関しては若手優先が多く、そのこと自体はよいことだと思う一方、年齢によらない研究助成は、私のような 老境に入った研究者には貴重です。今後もこのような形で継続されればと思います。			

研究内容

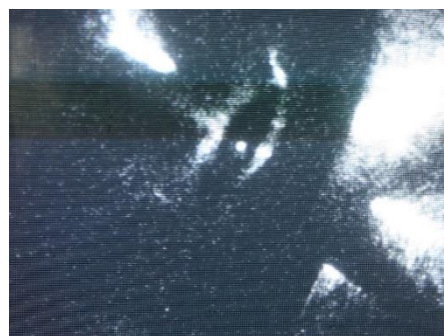
科研費の研究課題の目的は、トラップされたイオンのスペクトルを基準とする、不確かさのきわめて小さい光時計を実現することである。イオンを長時間閉じ込めることができるイオントラップの特長をいかして、自然幅の極めて狭い遷移を長時間観測して鋭い基準スペクトルを検出する。イオンを単一としてイオン本来の遷移周波数を検出し、周波数の不確かさを低減する。その際、イオン数が1個で基準スペクトル信号が弱いため、検出用レーザーの周波数を、あらかじめ改善しておく必要がある。多数個イオンから信号対雑音比の高い別の基準スペクトルを検出し、この目的に対応する。提案方式の光時計を実現するために、本助成では、(1)多数個のイオンを閉じ込めるために用いる、リニア RF(radiofrequency)トラップで、イオンの冷却技術を確立すること、(2)Yb⁺の超長寿命 $^2S_{1/2} - ^2F_{7/2}$ 遷移を単一イオンで検出するための3次元型 RF トラップで、3次元の冷却を達成すること、を目標に研究を進めた。

研究成果

- (1) リニア RF トラップに単一イオンを閉じ込めて冷却する技術を確立した。RF トラップに閉じ込めたイオンの冷却では、RF で形成される擬ポテンシャル中の振動(永年運動)をレーザー冷却する。しかし、現実には不要な静電場によりイオンが擬ポテンシャル中心(リニア型では中心軸)からずれて、トラップに用いている RF による過剰マイクロ運動が発生する。この静電場を打ち消し、過剰マイクロ運動を最小化する方法を確立した。なお、既存のリニア RF トラップで研究を進められる、Ba⁺で実験を進めた。

本研究ではまず、長時間の測定に備えて、冷却レーザーの周波数安定度の改善からおこなった。冷却レーザーの周波数は、光共振器の共鳴周波数に安定化されている。そこで、冷却レーザーとは波長の異なるレーザーを光共振器の共鳴に安定化し、これと研究室にある低ドリフトの基準レーザー光とのビート周波数を測定した。そして、ビート周波数で干渉計を構成してビート周波数の変動を検出し、変動を抑えるように光共振器を制御した。安定度は ± 50 kHz と、冷却状態を十分かつ長時間保つことができるようになった。過剰マイクロ運動は、トラップ軸から3度ほど角度をつけた冷却レーザー光を、対向する2方向からそれぞれ90度異なる方向に角度をつけて導入し、あらかじめ補正した軸方向と合わせて3次元とも最小化した。スペクトル幅の狭い遷移を観測し、冷却が進んで永年運動によるサイドバンドが減少したスペクトルを確認することができた。マイクロ運動の最小化までを学会発表し、サイドバンドの低下の確認をふくめた論文を発表予定である。

(2) 単一 Yb^+ を閉じ込めるために用いる 3 次元型 RF トラップにおいても、冷却レーザー光を 1 方向からしか導入していなかったため、縮退している径方向 2 次元の同時冷却が達成できていなかった。そこで、この装置でも 2 方向目の冷却レーザー光を導入した。レーザー冷却時に観測される蛍光をイメージインテンシファイア付 CCD カメラで観測した。補正電圧を 3 か所調整して、過剰マイクロ



運動の原因となる不要静電場を打ち消すと、1 方向目と 2 方向目の冷却光による蛍光が同じ離調周波数のときに同じ場所で観測される。この条件を見出した。これで、およそ 3 次元の過剰マイクロ運動最小化が達成できたものと推測している。(図：中央の輝点が 2 方向から冷却レーザー光を照射された少数個 Yb^+ の蛍光。)

今後の見通し

リニア RF トラップにおける冷却技術を確立する中で、トラップの構造上、冷却レーザー光のトラップ軸に対する角度が浅くしかとれないことが、径方向の冷却に不利に働いていることが示唆された。角度のついた冷却光を導入可能なトラップ電極を設計し、冷却効率を改善することが、今後、冷却個数の増加にも寄与すると考える。

また、これで 3 次元冷却が可能な単一イオントラップ装置が 2 台となった。今後は線幅の狭い基準遷移スペクトルを検出し、2 台の比較による不確かさの測定や、異なる遷移の周波数比の決定に進んでいきたい。