

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800218

研究課題名(和文)リニアトラップされた2種イオンの数個レベルでの原子数制御および配列操作

研究課題名(英文)Controlling number and configuration of ions in a two-species ion chain

研究代表者

大坪 望(Ohtsubo, Nozomi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所時空標準研究室・研究員

研究者番号：60710598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では光周波数標準への応用に向けてリニアトラップ中イオンの配列制御を行った。複数種のイオンを1次元上にトラップする時の配列はランダムで衝突等に起因して時間と共に変化してしまう。これらは時計遷移の周波数シフトの要因となるため、光周波数標準としては望ましくない。本課題では2個のCa<sup>+</sup>イオンと1個のIn<sup>+</sup>イオンについて、レーザー冷却光に強度変調を加える方法と、リニアトラップポテンシャルを一時的に下げる方法で配列制御を実現した。また、これらの手法と本課題で利用した装置を用いてIn<sup>+</sup>の時計遷移周波数計測を実施した。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated configuration controls of ion chain in liner Paul trap toward an application to optical frequency standards. A configuration of ion chain changes with time in every several second via background gas collisions. These changes can cause significant frequency shifts in the case of high accuracy frequency measurements, so we should control ion chains configuration. In this study, we demonstrated two methods of sorting ion chains. One has been realized by applying amplitude modulation on a cooling laser, another has been realized by reducing an aspect ratio of radial and axial potential. Moreover, we measured In<sup>+</sup> clock transition frequency by using the latter sorting technic.

研究分野：光周波数標準

キーワード：イオントラップ 光周波数標準

### 1. 研究開始当初の背景

イオントラップは、数個レベルでの原子の捕縛が可能であり、個々イオンの量子状態の操作や検出に適していることから、量子情報や周波数標準において重要な役割を担っている。これらの目的のため、イオンはレーザー冷却が可能な遷移構造を持ち、また同時に量子情報を担わせるコヒーレンスの長い遷移を持つ必要がある。近年においては、これら二つの役割を、レーザー冷却のためのイオン(冷却イオン)と qubit や時計イオンとして利用するイオン(分光イオン)に分け、共同冷却により分光イオンを冷却する方法が行われるようになった。このように目的を分けた二つのイオンをトラップすることで、より広い原子種の中からそれぞれの目的に特化して適したイオンを選ぶことができる。また、共同冷却は分光イオンのコヒーレンスの破壊を避けつつ、背景ガスとの衝突による加熱を抑えることができるので、これまでレーザー冷却によって制限されていたコヒーレンス時間のさらなる長期化が期待できる。実際に周波数標準分野では、Al<sup>+</sup>イオンを分光イオンとし、Be<sup>+</sup>および Mg<sup>+</sup>イオンを冷却イオンとした Al<sup>+</sup>イオン周波数標準が  $8.6 \times 10^{-18}$  という確度を実現しており、この値は研究開始当初において論文として報告されているなかで最も低く、また現在においても 2016 年 1 月に報告された Yb<sup>+</sup>イオンの  $3.2 \times 10^{-18}$  に次ぐ値となっている。

複数種のイオンをトラップする上で、イオンの配列問題が伴う。1 つのイオンのみをトラップする場合、イオンの位置は電気的なポテンシャルによって一意的に定まるが、複数種イオンがあるときには、目的とするイオンが存在できるサイトがいくつかあられ、背景ガスとの衝突等により、その位置を変化させる。イオン位置の変化は時計遷移の検出信号となるイオン蛍光の強度変化をもたらし、また精密な周波数計測分野では、位置に伴った磁場や黒体輻射等の環境の変化による計測周波数のシフトも引き起こす。

### 2. 研究の目的

本研究では、リニアトラップに 2 種イオンを同時に閉じ込め、配列操作の手法の確立し、その実証を行うことを目的とする。近年においては、2 種イオンの混合系が量子情報・周波数標準分野で注目されてきていが、混合イオントラップの配列操作に関して学術的な研究は未開拓である。

本研究では、In<sup>+</sup>イオン光周波数標準への応用を念頭に、Ca<sup>+</sup>及び In<sup>+</sup>の同時トラップ状態で In<sup>+</sup>の位置を制御することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では In<sup>+</sup>イオンと Ca<sup>+</sup>イオンをトラップできるリニアトラップ装置が必要であり、その開発を行った。また、本装置は時計遷移周波数計測にも利用するため、閉じ込めたイ

オンの Lamb-Dicke 状態になるまで強く束縛できるように電極間の狭いトラップを作製した。

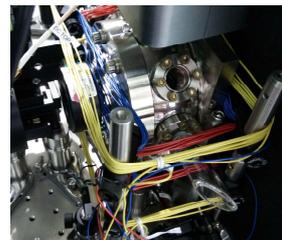
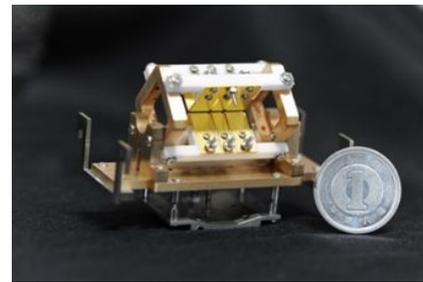


図 1: 作製したトラップ電極(上)及びトラップ電極を設置した真空装置写真(下)

作製した電極を利用して、2 個の Ca<sup>+</sup>イオンと 1 個の In<sup>+</sup>をトラップし、1m 先に設置した CCD カメラに Ca<sup>+</sup>イオン蛍光を結像させた。CCD で得られたイメージング映像よりイオンの配列を確認した。

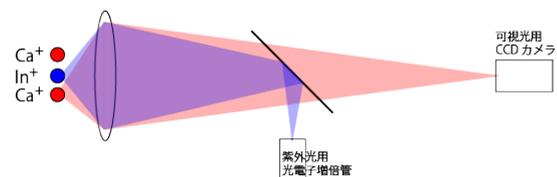


図 2: イオン蛍光の集光。Ca<sup>+</sup>の蛍光を CCD カメラに集光してイメージング映像を得た。また、In<sup>+</sup>の蛍光は別ポートとして取り出し、In<sup>+</sup>時計遷移の検出信号として利用した。

トラップイオンの配列を確認しつつ、以下で記述する不安定化法およびトラップポテンシャル緩和法を行い、配列制御の実演を行った。また、配列制御を実際に行いつつ、In<sup>+</sup>の時計遷移周波数の計測を行った。

### 4. 研究成果

(1) レーザー光強度変調を利用した不安定化法による配列制御

トラップしたイオン集団は、質量の異なるイオン種の配列によって全体の振動励起周波数が異なる。これを利用し、In<sup>+</sup>-Ca<sup>+</sup>-Ca<sup>+</sup>および Ca<sup>+</sup>-Ca<sup>+</sup>-In<sup>+</sup>となる配列の時に共鳴する周波数でイオンを揺さぶることで、これらの配列になったときのみ配列を不安定化し、Ca<sup>+</sup>-In<sup>+</sup>-Ca<sup>+</sup>配列のみを安定に維持することができる。本実験では、Ca<sup>+</sup>イオンのレーザ

ー冷却に用いる波長 397nm レーザー光に AOM を用いて強度変調をあたえ、それによってイオンの集団振動を励起した。

図 3 に不安定化法による配列操作の結果を示す。レーザー光に変調を加えない場合、イオンの配列はランダムに表れていたが、共鳴周波数に当たる 53.8kHz でレーザー強度を変調したところ  $\text{In}^+$  が中央に来る配列の出現率が 92% に上昇し、配列の制御を実現することができた。

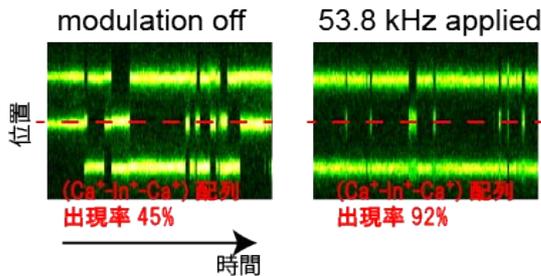


図 3: 不安定化法による配列制御実験。イオンのイメージング映像の断面を、横軸を時間として記録した。制御を行わない状態ではランダムに表れていた配列が、共鳴周波数のレーザー強度変調を加えると  $\text{In}^+$  が中央にある確率が上昇した。

### (2) RF ポテンシャルの緩和による配列制御

リニアトラップでは、RF 場で動径方向に強く閉じ込め、軸方向に DC 場で弱く閉じ込めることで、複数個トラップしたイオンを軸方向に並べることができる。しかし動径方向の閉じ込めが弱いとイオンは軸から離れた位置でトラップされる。質量の異なるイオンを同時にトラップしているときには、質量の重いイオンほど軸から外れやすくなる。これらの様子を数値計算で示したものを図 4(a) に示す。図は  $\text{Ca}^{2+}$  個と  $\text{In}^{+}$  個をリニアトラップに閉じ込めたときの  $\text{In}^+$  が感じる実効的なポテンシャルを示したものであり、 $\text{In}^+$  イオンは図中の極小点にトラップされる。動径方向に十分強く閉じ込めているときには、イオンは軸上の 3 つのサイトのどこかにトラップされるが、閉じ込めが弱くなると軸から離れた場所にトラップされる。この時にトラップの極小点となり、イオンがトラップされる点は軸成分については  $\text{Ca}^+$  の中間に当たる点しかなく、このポテンシャルから徐々に RF トラップのポテンシャルを上げるとイオンは高確率で 3 つのサイトの内の中央に配置される。このことを利用し、図 4(b) に示した通りの手順で、CCD カメラによりイオンの配列の変化を検出した後、一度 RF ポテンシャルを緩和させることで  $\text{In}^+$  を中央に置く配列へ戻すことが可能である。

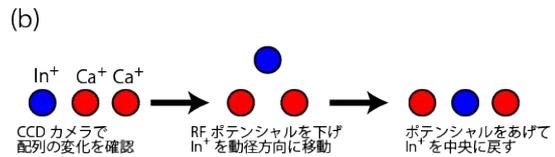
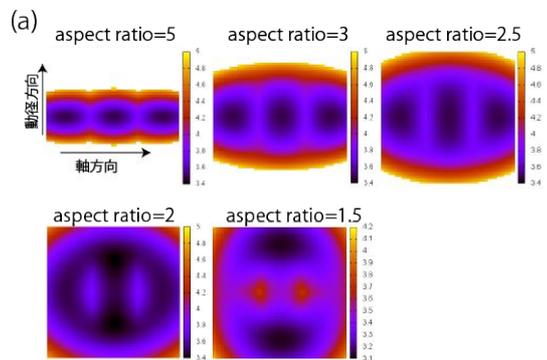


図 4: (a)  $\text{In}^+$  の感じる実効的ポテンシャルと (b) RF ポテンシャルの緩和を利用したトラップイオンの配列制御

図 5 にポテンシャル緩和法で行った配列制御の結果を示す。イオンが左右のサイトにホップした際、高確率で中央に再配置させることができた。

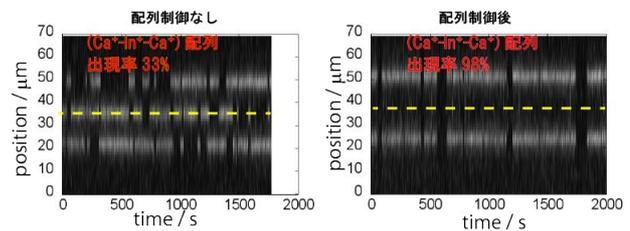


図 5: ポテンシャル緩和法を利用したイオンの配列制御実験。

今回提唱・実演したポテンシャル緩和法は限られたイオン数・質量比の条件に限定されたもので、より複雑で一般的な制御への応用性は未開拓であり、多数のイオンを利用した精密周波数計測への応用性は未知である。しかし、 $\text{In}^+$  イオンを中央に配置する確実性が高く、また 1s 以下の短時間で行うことが可能である。単一イオンを用いた時計遷移の周波数計測では、一回の計測で得られる信号が微弱であることから、多数回の計測を行う必要があり、より短時間で 1 回の計測を終わらせることが重要となる。そのため、下記の周波数計測実験では、こちらのポテンシャル緩和法がより適切であると考え、利用した。

### (3) $\text{In}^+$ イオン時計周波数計測

本研究では配列制御を利用して  $\text{In}^+$  の時計遷移周波数 ( $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$  遷移) の周波数計測を  $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$  遷移を利用した量子状態検出により行った。本実験ではまず、230nm 光 ( $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$  遷移) と 237nm 光 ( $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$  遷移) を同時に照射し、237nm の周波数掃引によるイオンからの 230nm 蛍光の減少を観測することで時計遷移のスペクトルを得た。また、イオンに照射す

る 230nm 光のパワーを変え、得られるスペクトルの中心値から 230nm 光による光シフトを求めると、4.9kHz/ $\mu$ W 程度あることが分かった。

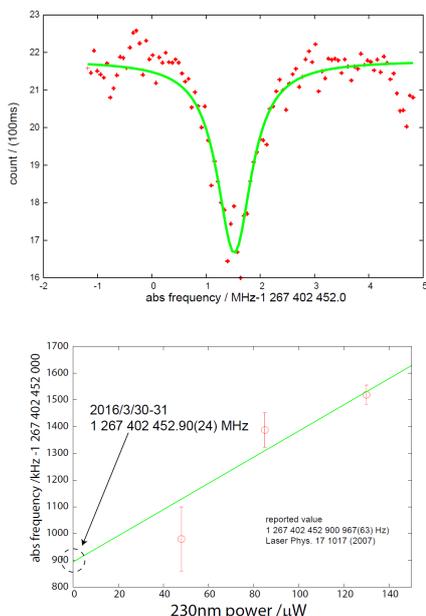


図 6: 観測された時計遷移(上)及び検出光による光シフトの評価(下)

上記の実験により、230nm 光を時計遷移励起時に照射しているとサブ kHz の周波数計測は困難であることが分かった。このため、237nm 光パルスを 5ms 照射し、その後 230nm 光パルスを 60ms する方式にて時計遷移の周波数計測を行った。得られた結果は過去に論文として報告された値と不確かさの範囲内で一致した。今後より高い確度で周波数を決定するため、237nm 自身の光シフトを含めた各種シフトの評価を行う

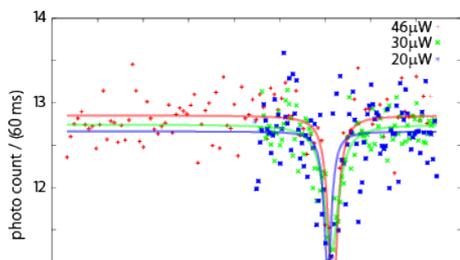


図 7: パルス励起によって得られた In<sup>+</sup>の時計遷移スペクトル。先に報告された文献値に対して 1kHz 以内の近い周波数にスペクトルが得られた。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 4 件)

1, “インジウムイオン時計遷移観測実験”, 大坪望, 李瑛, 松原健祐, 早坂和弘, 井戸哲也 日本物理学会 第 71 回年次大会 22-pBK-1 (2016 年 3 月 22 日), 東北学院大学(宮城県, 仙台市)

2, "Present Ion Optical Frequency Standards and New Challenges", 大坪望, URSI-JRSM 2015 (2015 年 9 月 3 日) 東京工業大学(東京都, 大田区) 招待講演

3, “リニアトラップを用いた In<sup>+</sup>イオン時計遷移の観測”, 大坪望, 李瑛, 松原健祐, 早坂和弘, 井戸哲也, 日本物理学会 第 69 回秋季大会, 10pAW-8 (2014 年 9 月 10 日) 中部大学(愛知県, 春日井市)

4, “Sorting ions in an two-species ion chain by amplitude-modulated laser beams for a new In<sup>+</sup> optical clock”, 大坪望, 李瑛, 松原健祐, 井戸哲也, 早坂和弘, International Conference on Atomic Physics 2014 (2014 年 8 月 5 日), ワシントン D. C. (アメリカ)

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

大坪 望 (OHTSUBO, Nozomi)

国立研究開発法人 情報通信研究機構・電磁波計測研究所・時空標準研究室・研究員  
研究者番号: 60710598