

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：82636

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20362

研究課題名（和文）171Yb+イオンを用いた共同冷却による115In+イオン光周波数標準の精度向上

研究課題名（英文）Improvement of an accuracy of optical frequency standard using the 115In+ ion sympathetically cooled by the 171Yb+ ion

研究代表者

木原 亜美 (KIHARA, Ami)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波標準研究センター・研究員

研究者番号：90911371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は現在開発されているインジウムイオン光時計のさらなる精度向上を目指し、現在の課題であるインジウムイオンの効率的な冷却を目的として共同冷却に用いるイオンをこれまでのカルシウムからイッテルビウムに変えたイオントラップシステムの立ち上げを行なったものである。研究期間内でイッテルビウムイオンとインジウムイオンの同時トラップに必要な装置の構築を行い、これらのイオンの同時トラップに成功した。また、光時計動作を目指してインジウムイオンの量子状態観測を可能にするためにインジウムイオンの状態検出に必要な波長230nmのレーザー光源の開発も行い、3時間以上の安定動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インジウムイオン光時計は様々なイオン種が提案されているイオントラップ光時計の中でも環境によるずれの影響を受けにくく精度の良い時計としてその将来性が期待されている。また、イオントラップ光時計は量子ネットワークとの親和性も持っていることから、将来的に量子インターネットに光時計を組み込むことも可能であり、より安全かつ高精度な時刻同期にも期待が持てる。本研究成果はその始めの一步を踏み出したと言える。

研究成果の概要（英文）：To improve the accuracy of an indium ion trap optical clock which has been already developed in our group, we started to construct a new indium ion trap optical clock system. In the new system, we used a single ytterbium ion to cool an indium ion sympathetically. This is because a mass ratio between a cooling ion and a coolant ion should be nearly unity to effectively cool. During the term of the research, we constructed a new ion trap system including some laser systems. After that, we succeeded in trapping a single ytterbium ion and a single indium ion in the trap together. We also developed a 230nm laser system to be able to detect indium ion quantum state for the clock frequency measurement. We tested laser frequency locking and confirmed it kept stable operation over 3 hours.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：イオントラップ 光周波数標準

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

中性原子やイオンの光遷移を用いた光周波数標準(光時計)は、現在の1秒の定義で使われているセシウム原子のマイクロ波遷移を使った周波数標準と比較すると不確かさは3桁以上小さいことから新たな時間の基準としての利用に向けた期待が高まっている。その中でもインジウムイオン光時計はイオントラップ光時計の最初の提案[IEEE Trans. Instrum. Meas. **31**, 83 (1982).]で挙げられていたイオン種の一つで、インジウムイオンの時計遷移周波数は1267 THz、線幅は0.8 Hz と高分解能かつ狭線幅であり、電気四重極シフトを持たないこと、磁場によるシフトが小さいこと、黒体輻射シフトが小さいことなどの特徴から $10^{-19}$ の精度を達成できる可能性を持っている [Phys. Rev. A **99**, 013405 (2019).]。

インジウムイオン光時計は $10^{-19}$ の精度を達成できる可能性があるにも関わらず、現時点で報告されているインジウムイオン光時計の最高精度は本グループで開発されてきたインジウムイオン光時計の $10^{-16}$  [Opt. Lett. **45**(21), 5950-5953 (2020).]であり、その課題点としてトラップ中のイオンの運動に起因する2次のドップラーシフトによる影響が大きいと考えられる。2次のドップラーシフトに関わる要因としてはイオンの永年運動とマイクロモーションの2種類があり、このうちマイクロモーションはイオントラップに印加する高周波電場によるもので、電場が作るポテンシャルの鞍点にイオンを置けるように補正電圧をトラップに印加することでマイクロモーションの低減は可能である。一方でイオンの永年運動はトラップ中のイオンの固有振動に起因するものであり、レーザー冷却や他種イオンとの同時捕獲による共同冷却によってイオンの温度を下げることで低減させることが可能である。

インジウムイオンは単独で捕獲しドップラー冷却することが難しいイオン種のため、本グループで開発を進めてきたインジウムイオン光時計では共同冷却にカルシウムイオンを用いてきた。カルシウムイオンでインジウムイオンを共同冷却し、その後でインジウムイオンを単独でドップラー冷却することでインジウムイオンをさらに冷却するという手法をこれまでは用いており、これによってインジウムイオンを70  $\mu$ K [Opt. Lett. **45**, 5950-5953 (2020).]まで冷却することが実現されている。しかしドップラー冷却限界温度の8.6  $\mu$ K までには到達できていない。

2種イオンの共同冷却では質量比が1に近いほど効率的に冷却できることが知られている [Phys. Rev. A **85**, 043412 (2012).]。また、冷媒となるイオンが到達可能な温度がイオン結晶の到達できうる温度となるため、冷媒となるイオンの冷却に使う遷移の線幅はより細かい方が望ましい。そこで共同冷却に使うイオンをカルシウムイオン(2つの質量比2.9、冷却遷移の線幅22 MHz)からイッテルビウムイオン(質量比1.5、冷却遷移の線幅19.6 MHz)に変えて、よりインジウムイオンを低温まで冷却することを目指した。イッテルビウムイオンのドップラー冷却限界温度はカルシウムイオンより50  $\mu$ K ほど低いため、共同冷却後にインジウムイオンのみをドップラー冷却して到達する温度も70  $\mu$ K を下回れると見込まれる。したがって2次のドップラーシフトの低減も可能であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、インジウムイオン光時計の精度向上である。具体的にはこれまで達成されている $10^{-16}$ 台から1桁以上向上させることを目指す。そのために新たなインジウムイオン光時計システムとしてイッテルビウムイオンで共同冷却をするインジウムイオントラップシステムを構築し、インジウムイオンをこれまでに達成されている70  $\mu$ K [Opt. Lett. **45**(21), 5950-5953 (2020).]からインジウムイオンのドップラー冷却限界温度の8.6  $\mu$ K により近づけられることを目標とした。

### 3. 研究の方法

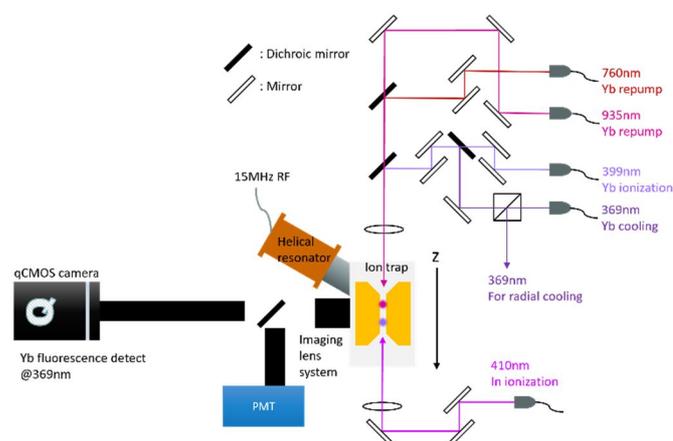


図1 イオントラップ装置の概略図

本研究で構築したイオントラップ装置の概略図を図1に示す。初年度は図1に示した装置の構築を行った。まずイッテルビウムイオンの捕獲を行うために、イオントラップ電極の組み立て、イオントラップ電極に高周波電場を印加するためのヘリカル共振器、イッテルビウムイオンの蛍光観測のためのイメージングレンズ系の構築、カメラの設置、イッテルビウムイオンの生成・捕獲・冷却に必要なレーザー光源の用意、光学系の構築を行った。

次にイッテルビウムイオンの捕獲と十分に冷却できたことを示す結晶化の確認を行った後、インジウムイオンの共同冷却に向けてインジウムのイオン化光のイオントラップ導入への光学系を構築した。インジウムイオンの蛍光は図2に示した波長230nmの遷移を用いており、本研究で用いているカメラの波長感度範囲外のため蛍光をカメラで直接観測することはできない。そこでイッテルビウムイオンとインジウムイオンを同時に捕獲できたかどうかはカメラで観測したイッテルビウムイオンの蛍光からイオン結晶の永年運動周波数を測定し、イッテルビウムイオン単独の永年運動周波数と比較し捕獲したイオンの質量数を推定することでインジウムイオンの捕獲を確認した。

さらにインジウムイオンの直接冷却を可能にするために波長230nm光源も作成した。直接冷却に用いる波長230nmの遷移に共鳴する光をインジウムイオンに照射すると、インジウムイオンを直接冷却できるだけでなくインジウムイオンの量子状態観測を行うことも可能になる。これは将来的な光時計動作に向けて非常に重要なステップとなる。

波長230nm光源は922nm DBRレーザーと2段の二次高調波発生(SHG)用共振器を組み合わせて作成した。図3にその概略を示す。1段目のSHG共振器から出た透過光は音響光学変調器(AOM)を介して光源に戻し、共振させることで光フィードバックによる短期の周波数安定化[Opt. Lett. 36, 2188-2190 (2011).]を行っている。さらにHänsch-Couillaud法による共振器の安定化をそれぞれのSHG共振器で行い、1段目の461nm発生共振器の共振器長を制御することで922nmの周波数の長期安定化を行った。

#### 4. 研究成果

##### インジウムイオン ( $^{115}\text{In}^+$ ) とイッテルビウムイオン ( $^{174}\text{Yb}^+$ ) の共同冷却

本研究で構築したイオントラップシステムで捕獲したイオンを用いた永年周波数測定の結果を図4に示す。カメラでイオンの蛍光画像をリアルタイムで撮影しながら、図1のz方向にあたる方向の閉じ込めを制御しているイオントラップ電極にAC電圧を印加し、ACの周波数をスキャンしつつ撮影したイオン画像の蛍光部分の幅を測定した。ACの周波数が永年周波数と一致するとトラップされているイオンは運動が励起されて一時的にイオンの加熱が起き、カメラ上で見ると蛍光部分が大きな広がりを見せるため、蛍光部分の幅が最も広がったピークの周波数が永年周波数となる。イッテルビウムイオン単独の場合は365.7 kHz、イッテルビウムイオンと別種イオン(カメラ上ではダークサイトとして観測される)の場合は396.9 kHzという結果が得られた。これらの結果から2種イオンの質量比を推定したところ、片方が質量数174のイッテルビウムイオンだったとするともう片方の質量は $115.4 \pm 1.8$ という値が得られた。片方のイオンは捕獲した際のイオン化光周波数や冷却光の周波数から質量数は174と確実に言えるため、もう片方のイオンは質量数からインジウムイオンであると見なすことができ、インジウムイオンとイッテルビウムイオンの同時捕獲・共同冷却に成功した。

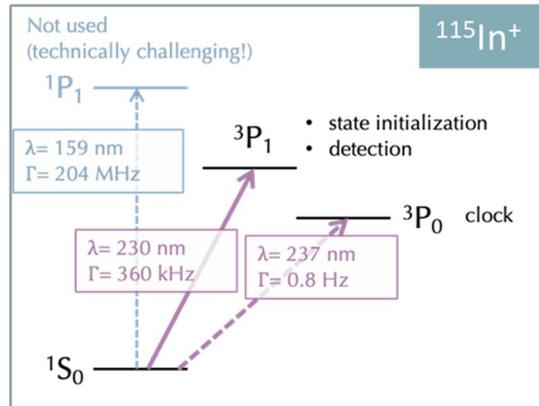


図2 インジウムイオンのエネルギー準位図

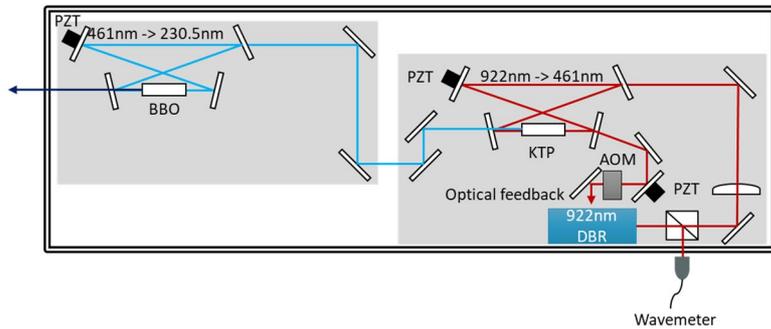


図3 波長230nm光源の概略図。赤は波長922nm、水色は461nm、紺色の矢印は波長230nmを示している。

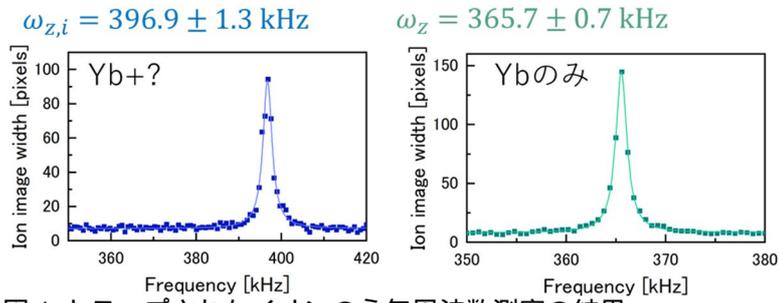


図4 トラップされたイオンの永年周波数測定の結果

$^{115}\text{In}^+$ 量子状態観測に向けた 230nm 光源の作成

作成した波長 230nm 光源の周波数ロックのデモを行った結果を図 5 に示す。上は基本波である波長 922nm の出力周波数を波長計でモニタしたもので、所々でノイズが発生しているものの概ね 1 MHz の周波数幅での出力が 6 時間以上見られた。また、下は 2 回目の SHG を行った後の波長 230nm に変換された光の出力パワーをフォトディテクタでモニタしたものである。連続 3 時間以上の出力が安定して出ており、実験に使用するのに問題ない安定性を持っていることを確認できた。

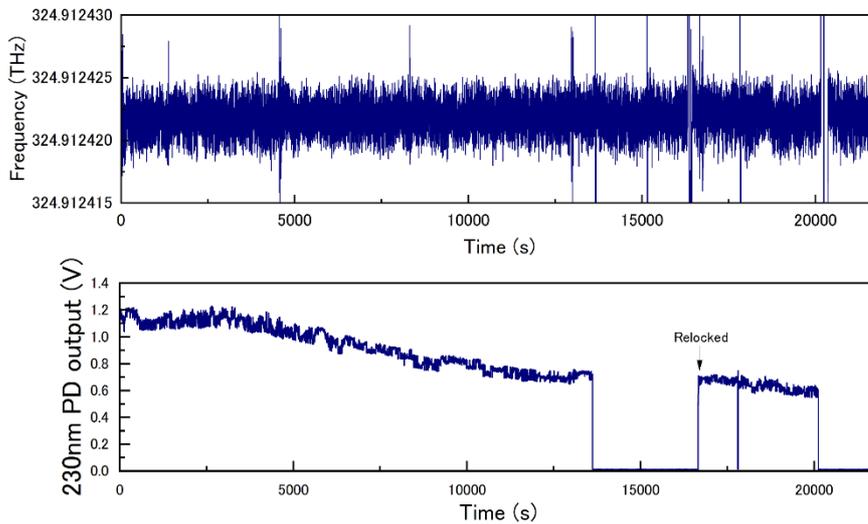


図5 作成した波長 230 nm 光源の周波数ロックの結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木原亜美、大坪望、早坂和弘、井戸哲也
2. 発表標題 光時計開発に向けたIn+イオンとYb+イオンの同時トラップ
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 木原亜美、大坪望、李瑛、Nils Nemitz、蜂須英和、早坂和弘、井戸哲也
2. 発表標題 115In+/87Sr光時計周波数比計測II
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
---------	---------