

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05239

研究課題名(和文)冷却イオン列の超放射ダイナミクス制御

研究課題名(英文)Engineering of superradiance of laser-cooled trapped ions

研究代表者

早坂 和弘 (Hayasaka, Kazuhiro)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所量子ICT先端開発センター・研究マネージャー

研究者番号：10359086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：イオントラップで原子イオンをレーザー冷却すると、イオン特有の精密光周波数を取り出すことが可能である。単一イオン光時計はこの特徴を生かしたものだが、これまでは複数個を用いた性能改善の方法が明らかではなかった。本研究課題では千個以上のイオンを用いた超放射光時計や、数十個イオンを用いた複数個イオン光時計が原理的にも実装上でも可能であることを明らかにした。将来のGPS精度向上や光通信の高速化に大きく寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：Precise optical frequencies can be derived from laser-cooled ions in ion traps. The single-ion optical clock exploits this feature. However, the strategy for extending it to multiple-ion versions to improve the performance has not been known until recently. We have shown theoretically and experimentally that such extensions are feasible with implementations such as the superradiant ion clock using thousands of ions and multi-ion clock based on tens of ions. These new clocks will lead to higher precision of the GPS system and faster transfer rates of optical communications in future.

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 共振器量子電磁力学 超放射 光時計

1. 研究開始当初の背景

(1) レーザー冷却によりイオントラップ中に整列した原子イオン(以下、「冷却イオン列」と表記)は、熱運動や環境との相互作用による摂動を受けない理想的な量子系とされる。この特性は量子コンピュータ、量子シミュレータ、光時計等に応用されている。光時計としては単一イオンを用いた「単一イオン光時計」が開発され、18桁におよぶ精度が実現されていたものの、複数個イオンへ拡張した方式は知られていなかった。超放射は複数個の量子系からなる多体量子系を示す顕著な性質であり、これをイオン光時計の複数個化へ利用できれば単一イオンの持つ信号の弱さなどの欠点を克服し、GPSシステムの高精度化、光通信の速度向上等への応用が期待される。

(2) 一方、中性原子の超放射については、光共振器中で光格子に配置した  $10^4$  個以上の中性原子を用いると、超放射により狭線幅のコヒーレント光が発生できることが予想され、その原理実証実験が報告されていた<sup>2)</sup>。中性原子に比べると、イオントラップに保持できる原子イオン数は圧倒的に少ないことなどから、この超放射発振原理が冷却イオン列に適用できるか検討された例はなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では冷却イオン列を用いた超放射発振実現に向け、以下を目的として研究を実施した。

- (1) 冷却イオン列を用いた超放射発振を実現するための構成、動作パラメータ等を明らかにすること。
- (2) 冷却イオン列での超放射を観測するための基本的技術を研究開発すること。
- (3) 冷却イオン列を用いた超放射発振を実装するための基盤技術を研究開発すること。

3. 研究の方法

- (1) 冷却イオン列を用いた超放射発振の検討では、現在用いられているイオン種の遷移確率などのデータを用いて、中性原子での計算に用いられた方法<sup>3)</sup>を適用することにより冷却イオン列による超放射発振の可能性、最適条件を明らかにする。
- (2) 冷却イオン列での超放射を観測するための基本的技術の開発では、従来から用いているリニアトラップで原子イオンをトラップ、レーザー冷却し、超放射により起こると予想される放射寿命の変化を高精度で測定する手法を研究開発する。
- (3) 冷却イオン列を用いた超放射発振を実装するための基盤技術を研究開発では、上記で明らかになった超放射発振条件を満たすための新しいイオントラップのプロトタイプを試作、動作させ、実装に必要な課題を明らかにする。

4. 研究成果

- (1) 冷却イオン列を用いた超放射発振の検

討では、カルシウムイオン( $^{40}\text{Ca}^+$ 、以下「 $\text{Ca}^+$ 」と表記)の  $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$  遷移(波長 729nm, 線幅 0.2Hz)を用いると超放射発振を観測できる可能性が高いことが分かった。 $\text{Ca}^+$ のエネルギー準位を図1(a)に、構成を図1(b)に示す。

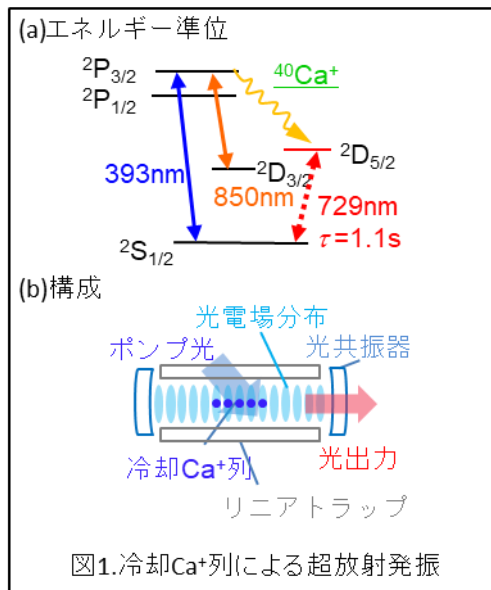


図1.冷却Ca+列による超放射発振

この構成で、別の用途で  $\text{Ca}^+$  に用いられた光共振器のパラメータ<sup>4)</sup>を用いて、最適条件で得られる出力光子数及び出力光のコヒーレンスの指標となる二次のコヒーレンス関数  $g^{(2)}(0)$  の予測値を図2に示す。他の原子レーザーの挙動と同様に、明確な発振閾値は確認できないが、光共振器と結合する  $\text{Ca}^+$  が 1000 に達する領域で  $g^{(2)}(0)$  の値がほぼ1となってコヒーレント光が生成されることが分かる。この領域では出力光子数が毎秒  $10^5$  個を超え、市販の単一光子検出器を用いて超放射発振が観測可能なことが分かった。

超放射が起こるためにはすべての  $\text{Ca}^+$  が共振器に結合し、どの  $\text{Ca}^+$  が光子を放出したかが量子力学的に識別できないことが本質的である。したがって、 $\text{Ca}^+$  を等間隔に配置して光共振器に結合されること、トラップ電場による個々のイオンの周波数シフトのばらつきを抑圧する必要があること、が分かった。

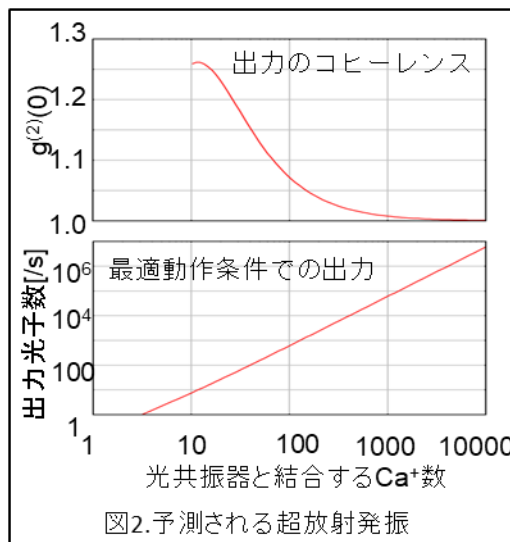


図2.予測される超放射発振

(2) 冷却イオン列での超放射を観測するための基本的技術の開発では、(a)少数個  $\text{Ca}^+$  の放射寿命を正確に計測する技術の研究開発、(b)光共振器の共鳴周波数を安定化するためのコヒーレント光源の開発、を実施した。複数個の  $\text{Ca}^+$  を光共振器内に配置した場合には共振器による Purcell 効果と超放射効果で放射寿命が短くなることが予想される。前者はイオン個数に依存しないが、後者は依存するため個数を変えて放射寿命の測定を行うことで、超放射による放射寿命変化が識別可能である。この実験に向けて (a) (b) の研究開発を実施した。

(a)  $\text{Ca}^+ \ ^2\text{D}_{5/2}$  状態放射寿命の精密測定  
 単一  $\text{Ca}^+$  をリニアトラップ中でレーザー冷却した後、 $\ ^2\text{D}_{5/2}$  に励起し、自然放出により  $\ ^2\text{S}_{1/2}$  に脱励起されるまでの時間の分布から放射寿命を計測する手法を開発した。図3に示す例では 10,000 回の脱励起時間の分布から、放射寿命  $T$  として  $T = 1.177 \pm 0.013$  [秒] を得た。これは過去に報告された  $\ ^2\text{D}_{5/2}$  放射寿命とよく一致しており、2%以下の放射寿命の変化を検出可能であることを示す。本測定は光電子増倍管を用いた単一イオンでの測定であるが、微弱光カメラを用いた測定を行えば同時に複数個の放射寿命を測定可能であることを確認した。十分な精度での放射寿命に必要な測定数を数値シミュレーションにより試算したところ、測定の分散を2%に収めるためには 10,000 回の測定が必要であることが分かった。図3の測定では1回の計測に平均1.4秒を要することから、少数個イオンでの超放射による放射寿命の測定には 14,000 秒程度の時間を必要とすることが明らかとなった。

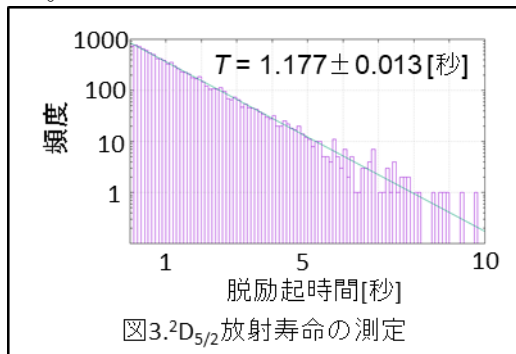


図3.  $\ ^2\text{D}_{5/2}$  放射寿命の測定

(b)  $\ ^2\text{S}_{1/2} - \ ^2\text{D}_{5/2}$  遷移用コヒーレント光源の開発  
 光共振器とイオン列を結合させて、超放射を放射寿命の変化から検出するためには数時間にわたり光共振器長を  $\ ^2\text{S}_{1/2} - \ ^2\text{D}_{5/2}$  遷移に合わせて安定化する必要があることが 4(2) (a) 項で明らかになった。そのための波長 729nm の  $\ ^2\text{S}_{1/2} - \ ^2\text{D}_{5/2}$  遷移に同調するコヒーレント光源の研究開発を実施した。

従来用いられている波長 729nm の直接発振ではなく、1458nm の外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の第二高調波として 729nm コヒーレント光を生成したところ、出力 2.5mW、線幅 250kHz を得た。リニアトラップに配列した 4 個の  $\text{Ca}^+$  を用いて  $\ ^2\text{S}_{1/2} - \ ^2\text{D}_{5/2}$  遷移を励起で

きることを確認した。この励起信号を用いて、729nm コヒーレント光の周波数を  $\ ^2\text{S}_{1/2} - \ ^2\text{D}_{5/2}$  遷移の中心に周波数ロックする実験を行ったところ、図4に示すように ECDL 単体動作 (free-run) では一時間に 100MHz 程度あった周波数ドリフトが、周波数ロックで完全に抑圧されることが分かった。従来、自然幅が 1Hz 以下の狭線幅遷移では、基準共振器等を用いてある程度の周波数安定化を施した上で狭線幅遷移へ周波数ロックするのが標準的な方法であった。本実験で確認された、事前の周波数安定化無しの直接の狭線幅遷移への周波数ロックは、基準共振器の代わりに複数個イオンを用いたイオン光時計が実現可能であることを示唆する。ただし、今回使用したリニアトラップでは、個々の  $\text{Ca}^+$  の電気四重極シフトがイオンの位置により異なるために到達可能な周波数精度が制限されるという問題点が残る。

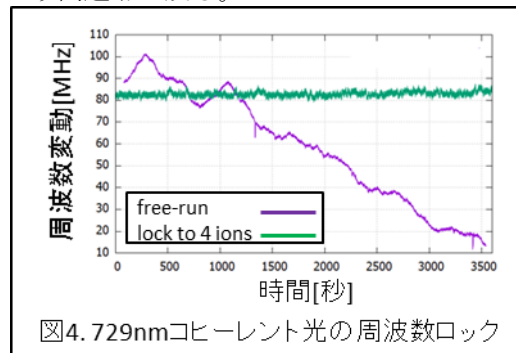


図4. 729nm コヒーレント光の周波数ロック

(3) 冷却イオン列を用いた超放射発振を実装するための基盤技術を研究開発では、4(1) 項で明らかになった、1,000 個以上の  $\text{Ca}^+$  を等間隔に配置し、個々のイオンの周波数シフトのばらつきを解消するためのイオントラップの研究開発を実施した。 $\text{Ca}^+$  の場合、周波数シフトで最も大きなばらつきをもたらすのは電気四重極シフトである。

従来型のリニアトラップで冷却イオン配列は調和型ポテンシャルにより生成され図5(a)に示すような非等間隔な配列となる。最近になってイオンを等間隔に配置する非調和型ポテンシャル形状が解析的な数式とし

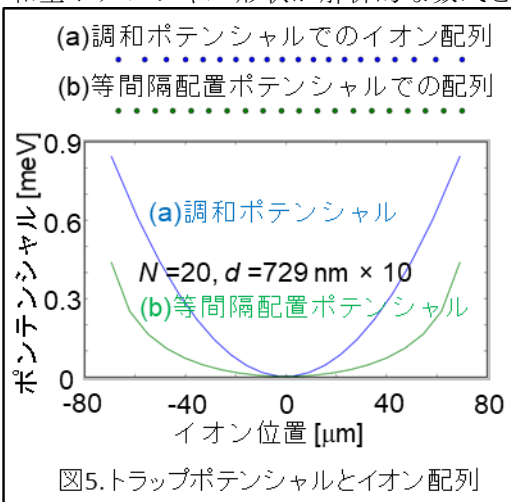


図5. トラップポテンシャルとイオン配列

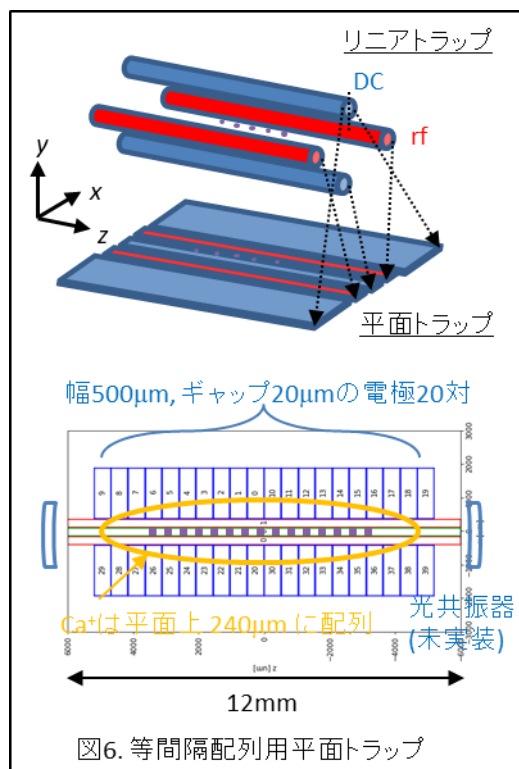
で導出され、このポテンシャル形状を実装すると図 5(b) の様に等間隔にイオン配列が生成されることが示された<sup>5)</sup>。このポテンシャル形状は平面型トラップによって生成することが可能である。平面トラップの構成を図 6 に示す。20 対の電極から構成される図 6 の平面トラップでポテンシャルの計算を行ったところ、729nm の間隔で 10,000 個までの Ca<sup>+</sup> を配置できそうであることが分かった。

平面トラップの実装実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科田中歌子講師の研究グループの協力で実施した。図 6 の構成を単純化した 12 対の電極から構成される平面トラップを試作し、Ca<sup>+</sup> を等間隔で配置する実験を行ったところ、17 個までの Ca<sup>+</sup> を 15 μm の間隔で等間隔に配置することに成功した。この時の間隔のばらつきは 2 μm に収まっていた。平面型トラップの基本的な動作が確認できたので、改善を加えて 1,000 個程度までの Ca<sup>+</sup> に拡張するか、あるいは今回確認できた 20 個程度の Ca<sup>+</sup> 配列を単位ユニットとして 50 ユニット平面基板の上に作成することで、超放射発振が期待される 1,000 個まで拡張が可能だと考えられる。

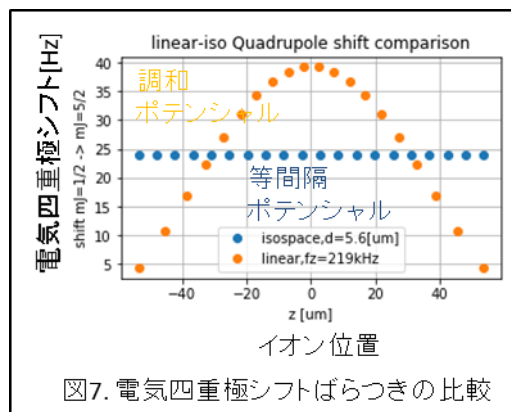
このようにして生成される等間隔イオン配列では、従来のリニアトラップでのイオン配列では数 10Hz に及んでいた電気四重極シフトのばらつきが、厳密にゼロとなることが理論計算で明らかとなった。電気四重極シフト  $v_Q(z)$  は

$$v_Q(z) \propto \nabla E(z) \cdot \Theta$$

で与えられる。ここで  $\Theta$  は電気四重極モーメント、 $E(z)$  はトラップ電場と他のイオンからのクーロン力による電場である。等間隔ポテ



ンシャル中では  $\nabla E(z)$  がイオンの位置によらず一定値となることから電気四重極シフトはイオン列で同一の値となる。図 7 に従来の調和ポテンシャルと等間隔ポテンシャルでの Ca<sup>+</sup> の <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> (m<sub>j</sub>=1/2) - <sup>2</sup>D<sub>5/2</sub> (m<sub>j</sub>=5/2) 遷移の電気四重極シフトのばらつきを示す。調和ポテンシャルでは 35Hz 程度のばらつきがあるのに対し、等間隔ポテンシャルではシフト量が均一となっている。このことから、等間隔ポテンシャルではすべてのイオンが遷移周波数で区別つかないという超放射の要件を満たしていること、複数イオン光時計として動作させた場合には個々のイオンが同一の周波数に集中して信号を増強する効果が期待されること、を示している。



以上の研究成果を総括すると以下の通りである。

- ・1,000 個以上の Ca<sup>+</sup> を光共振器に結合させた系では超放射発振が期待される。
- ・その条件は平面トラップにより生成される等間隔ポテンシャルで実現が可能である。
- ・等間隔ポテンシャルに配置したイオンを用いて直接周波数安定化を行う複数イオン光時計の動作が期待される。

#### <引用文献>

- 1) D. Meiser, *et. al.* Phys. Rev. Lett. **102**, 163601 (2009)
- 2) J. G. Bohnet, *et. al.* Nature **484**, 78 (2012)
- 3) D. Meiser, *et. al.* Phys. Rev. A **81**, 063827 (2010)
- 4) A. Kreuter, *et. al.* Phys. Rev. Lett. **92**, 203002 (2004)
- 5) M. Johanning, Appl. Phys. B **122**, 71 (2016)

#### 5. 主な発表論文等

- [学会発表] (計 14 件)
- ① 北尾政義, 早坂和弘, 向山敬, 田中歌子 「プレーナートラップでの Ca<sup>+</sup>イオン等間隔配列動作」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 23 日, 東京理科大学野田キャンパス
  - ② 早坂和弘, 「複数イオンによるイオン光時計の高安定化」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月 20 日, 早稲

- 田大学西早稲田キャンパス
- ③ M. Kitao, K. Hayasaka, T. Mukaiyama, U. Tanaka, "Generation of anharmonic potential for isospaced ion strings with a planar trap," 10th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms, 2018/1/8, Nagoya University
  - ④ K. Hayasaka, "New Approaches to the Optical Clocks with Trapped Ions (Invited talk)," The 1st Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS2017), 2017/12/10, Sun Yat-sen University, Zhuhai campus, Zhuhai, China
  - ⑤ 北尾政義, 早坂和弘, 向山敬, 田中歌子 「等間隔イオン配列を実現する矩形電極配列プレーナートラップ」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 22 日, 岩手大学上田キャンパス
  - ⑥ 早坂和弘, 「複数個  $\text{Ca}^+$ への時計レーザー周波数ロック」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 22 日, 岩手大学上田キャンパス
  - ⑦ K. Hayasaka, M. Kitao, U. Tanaka, "Collective Coupling of Trapped Ions to a High-Finesse Cavity toward Superradiant Lasing," The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), 2017/8/23, Keio Plaza Hotel, Tokyo
  - ⑧ 北尾政義, 増谷賢吾, 早坂和弘, 田中歌子 「光共振器を用いた等間隔イオン配列プレーナートラップの性能評価法の検討」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学豊中キャンパス
  - ⑨ 早坂和弘, 「光通信波長帯光源の第二高調波による  $\text{Ca}^+$ 時計遷移励起」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学豊中キャンパス
  - ⑩ 早坂和弘, 「超放射観測に向けた  $\text{Ca}$  イオン準安定状態の寿命測定」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 16 日, 金沢大学角間キャンパス
  - ⑪ 増谷賢吾, 早坂和弘, 「等間隔イオン配列のための環状電極配置プレーナートラップ」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 23 日, 東北学院大学泉キャンパス
  - ⑫ 早坂和弘, 「蓄積イオンの量子状態制御とその応用 (招待講演)」, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学泉キャンパス
  - ⑬ 早坂和弘, 「イオントラップ光時計の現状と未来 (招待講演)」, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」, 2015 年 12 月 19 日, 東京大学山中寮内藤セミナーハウス
  - ⑭ 早坂和弘, 「レーザー冷却イオン列による

超放射発振に関する検討」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 16 日, 名古屋国際会議場

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早坂 和弘 (HAYASAKA, Kazuhiro)  
国立研究開発法人情報研究機構・未来 ICT  
研究所・研究マネージャー  
研究者番号: 10359086