

平成 21 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007 年度～2008 年度
 課題番号：19740249
 研究課題名（和文）多重極線形イオントラップによる新しいタイプのクーロン結晶生成とその応用
 研究課題名（英文）Production of novel ion Coulomb crystals in linear octupole rf ion trap
 研究代表者
 岡田 邦宏 (OKADA KUNIHIRO)
 上智大学・理工学部・助教
 研究者番号：90311993

研究成果の概要：高周波 8 重極線形イオントラップを用いたレーザー冷却実験を行い，CCD カメラを用いたクーロン結晶の画像観測に世界で初めて成功した．本研究では，円筒型巨大クーロン結晶（長径 1.7mm 以上， 10^4 個以上）の生成に成功し，蛍光スペクトルの測定からそのイオン温度が 10mK 以下であることを示すことができた．また， $^{40}\text{Ca}^+$ クーロン結晶中に $^{44}\text{Ca}^+$ とと思われる不純物イオンの影を捉えることにも成功し，多重極型トラップにおいても共同冷却が可能であることを初めて実験的に示した．

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,800,000	0	2,800,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	150,000	3,450,000

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：4305

キーワード：イオントラップ，クーロン結晶，レーザー冷却，カルシウムイオン，共同冷却

1. 研究開始当初の背景

(1) レーザー冷却により生成されるトラップされたイオンのクーロン結晶の研究は，イオントラップを利用した量子計算機が具体化されるにつれ近年再び注目を集めるようになった．アメリカNISTのD. J. Winelandらは，回路基板上に製作した微小4重極イオントラップにイオンをトラップし，キュービットを生成する実験を行い[PRL 96, 253003 (2006)]，またインスブルック大のR. Blattらは，4重極線形イオントラップを用いた量子ゲートの研究

を進めている[Nature 438, 643 (2005)]．

一方，イオントラップ中に生成されたクーロン結晶の応用として重要なのが，分子イオンの共同冷却である．最近，デュッセルドルフ大・S. Schillerらのグループは，レーザー冷却された Be^+ イオンとの共同冷却によって，直接レーザー冷却できない HD^+ イオンの並進温度を 1 K以下に冷却することに成功し，振動回転遷移の精密赤外分光を行なった[PRA 74, 040501(R) (2006)]．4重極線形イオントラップを量子計算機や分子イオンの共同冷

却へ応用した場合、イオンがトラップ軸上を離れると高周波マイクロ運動が大きくなり、イオン温度が上昇してしまうという問題がある。4重極トラップにおける擬ポテンシャルは r^2 に比例しており、イオンが調和運動をするために、RF電場の影響が小さいトラップ軸付近ではなく、電極に近い位置での滞在時間が最も長い。4重極型イオントラップを用いている限り、このマイクロ運動の問題を解決するのは容易ではない。

(2) 本研究代表者はレーザー冷却イオンに与えるマイクロ運動の影響を小さくする手段として、高周波多重極線形イオントラップの利用を提案した。多重極線形イオントラップは、同じ寸法をもった4重極線形トラップの場合と比べ、高周波電場の影響を殆ど受けないfield free領域が広いことが特長である。多重極トラップではポテンシャルは $\propto r^{2n-2}$ ($2n$: pole数)であり、滞在時間の殆どは高周波電場の弱い中心軸付近で費やされる。故に、特に冷却イオンに対しては、トラップの高周波電場によるマイクロ運動の影響は小さくなる。本研究代表者は多重極線形イオントラップにおけるイオンのレーザー冷却の可能性を実証するために、8重極線形イオントラップを用いた Ca^+ イオンのレーザー冷却によるイオンの結晶化の特徴を持った蛍光スペクトル測定し、また分子動学的 (MD) シミュレーションを行い、その結果をはじめて報告したが、シミュレーションで予測されるクーロン結晶の画像観測には至っていなかった。また、これまでイオンのレーザー冷却実験は多数行われてきたが、多重極線形イオントラップを用いたイオンのレーザー冷却研究が行われたという報告はなかった。

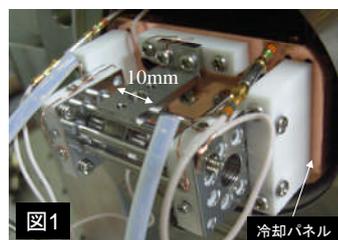
2. 研究の目的

高周波 8 重極線形イオントラップ中での Ca^+ イオンのレーザー冷却実験の結果と分子動学的シミュレーションの結果から予測される新しいタイプの"リング型クーロン晶"の生成と画像観測を行い、その特性を調べることを目的とした。また、生成されたリング結晶の応用として、分子イオンの共同冷却実験を試みることを目的とした。

3. 研究の方法

クーロン結晶の画像観測を目的とした小型冷却 8 重極線形イオントラップ (ロッド

径 ϕ 3mm) を新たに製作した。また、イオンのクーロン結晶状態を長時間維持するためには超高真空が必要なため、専用の小型真空槽を新たに製作し、イオントラップを液体窒素デューワー上に設置した (図 1)。



真空槽の排気にはターボ分子ポンプ及びイオンポンプを用い、液体窒素冷却によりトラップ領域で 10^{-8} Pa以下の真空度を達成した。生成したクーロン結晶の画像観測には精密なピント調整が必要なため、高倍率レンズ系を取り付けた高感度冷却 CCD カメラを精密ステージに設置し観測を行った。検出光学系はトラップ軸に垂直な方向からの観測に加え、45度の角度からの観測も試みた。一方、レーザー冷却に用いる半導体レーザーの周波数安定化もクーロン結晶の安定な観測のために重要であるため、新たに高フィネス

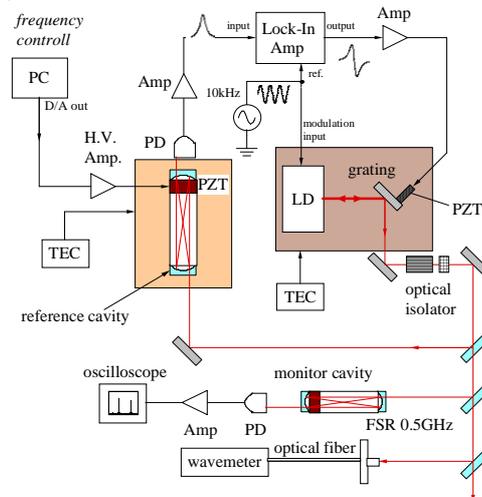


図2. 半導体レーザー周波数安定化システム

光共振器を導入し、レーザー周波数の安定化を行った (図 2)。

以上の実験装置に加え、空気中で動作する 8 重極トラップを別途製作し、リング・円筒クーロン結晶の生成を原理的に証明するシミュレーション実験を併せて行った (図 6 (a)参照)。

4. 研究成果

高周波 8 重極線形イオントラップを用いたレーザー冷却実験を行い、CCDカメラを用

いたクーロン結晶の画像観測に世界ではじめて成功した(図3上側). イオン数は約1700個, 同時に測定された蛍光スペクトルからイオン温度は6mKと見積もられる. この画像はスペクトルのピーク付近で撮像されたものである. 高周波8重極トラップでの結晶化スペクトルの特徴として, クーロン結晶の生成過程においてスペクトルにディップが現れないことがあげられる. このディップは線形ポールトラップでは通常見られるが, その原因は高周波加熱効果とレーザー冷却効果の競合の結果生じることが分かっている. つまり, 図3のスペクトルにディップが見られないことは, 高周波8重極トラップにおける高周波加熱効果が小さいことを間接的に示していると考えられる.

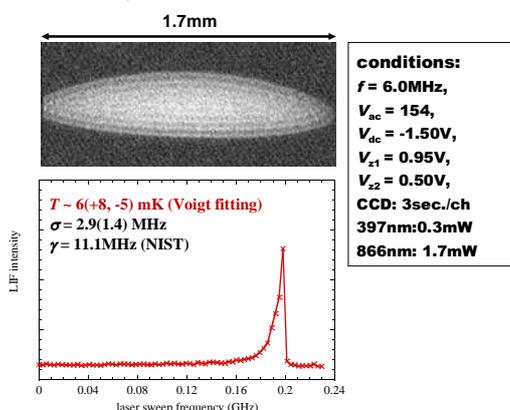


図3. 蛍光スペクトルと結晶画像の同時測定

本研究では少数個のイオンからなるクーロン結晶を, 単一イオン感度で観測することにも成功した(図4). 図の横方向がトラップ軸(z)方向である. 分子動力学シミュレーションでは, 結晶はリング状に分布するため, 縦方向の棒状結晶が観測されるはずであるが, 実験では図4のような2次元の楕円状クーロン結晶が観測された. 計算結果との不一致の原因としては, 1) 8重極場による擬ポテンシャルが r^6 に比例した非常に平坦なポテンシャルであるため, 電極配置の設計からの誤差や電極表面の酸化物の帯電によるポテンシャル歪みによって円柱対称ポテンシャルの対称性が乱されたことが原因であると考えられる.

また, 図5(a)に示すように本研究では巨大クーロン結晶(長径1.7mm以上, 10^4 個以上)の生成にも成功し, さらに蛍光スペクトルの測定からそのイオン温度が10mK以下であることが分かった. 本結果は高周波8重極トラ

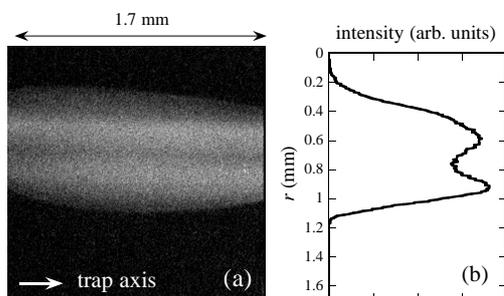


図5. 巨大円筒状クーロン結晶の生成

ップが多数イオンからなる極低温・巨大クーロン結晶の生成に適した実験装置であることを裏付けるものと考えられる. 図5(b)には(a)の画像を横方向に射影したプロファイルを示す. 2つのピークをもった構造が見られるが, これは生成されたクーロン結晶が従来には生成されたことがない円筒構造をもつことを示唆していると考えられる.

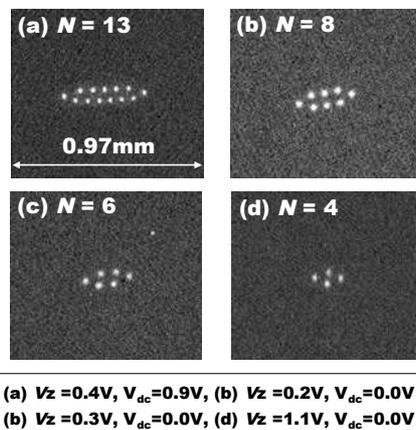


図4. 少数イオンのクーロン結晶

本実験結果のシミュレーションとして, 空气中で動作する8重極線形トラップを作成し, 数100個のアルミナ粒子(粒度#320)を用いたクーロン結晶の生成実験を行った. その結果, 図6(b)に示すような円筒構造をなすクーロン結晶の生成が目視によって確認できた. また, 同様の条件で分子動力学シミュレーションを行い, 実験画像がほぼ再現できることを示せた(図6(c), (d)). この結果により, 図5で生成されたクーロン結晶が円筒状結晶であり, 高周波8重極線形トラップにおいて, 原理的にリング・円筒構造をもつクーロン結晶の生成が可能であることを証明した.

さらに8重極トラップによる共同冷却実験についても行った. 図7に示すように $^{40}\text{Ca}^+$ クーロン結晶中に同位体 $^{44}\text{Ca}^+$ と思われる不純物イオンの影を捉えることに成功した. 図7(a)は不純物イオンが含まれていない場合の画像であり, 対称な形をしているが, 同画像(b)の点線で囲まれた領域には暗い影が形成されており, 不純物イオン($^{44}\text{Ca}^+$)が共同冷却されていることが分かる. 以上の結果から, 多重極型線形イオントラップにおいても分子イオンの共同冷却が原理的に可能であることを実験的に示すことができた.

本研究の成果によって高周波多重極型線形イオントラップにおけるクーロン結晶の研究と分子イオンの共同冷却実験の実現可能性を示すことに成功した. また, イオントラップ量子計算機への応用が期待される2次

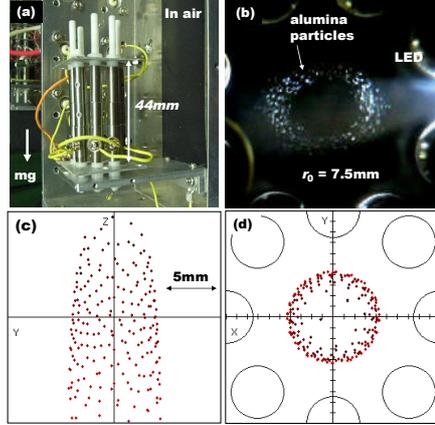


図6.(a) 空気中で動作する8重極トラップ, (b) 帯電アルミナ微粒子による円筒構造クーロン結晶. (c), (d) 分子動力学シミュレーションによる画像(a)の再現結果.

元リング結晶や円筒型クーロン結晶の生成が原理的に可能であることを実験的に示すことができたことも大きな成果である.

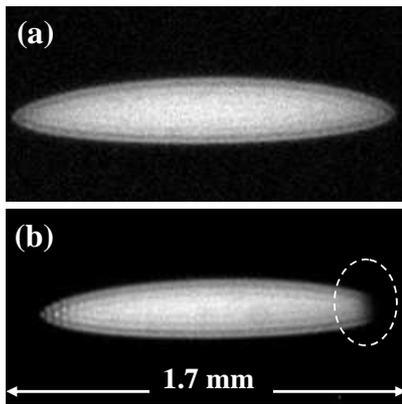


図7. 共同冷却実験

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3件)

① K. Okada, T. Takayanagi, M. Wada, S. Ohtani, H. A. Schuessler, "Observation of Coulomb crystals in a cryogenic linear octupole rf ion trap", 21th International Conference on Atomic Physics (ICAP2008), Storrs, CT, USA, July27-August 1, 2008.

② 岡田邦宏, 高柳俊暢, 和田道治, 大谷俊介, H. A. Schuessler, "高周波八重極線形イオントラップにおけるクーロン結晶の生成と画像観測", 日本物理学会 2008 年度秋季大会, 21aZA-3,岩手大学, 2008 年 9 月.

③ 岡田邦宏, 安田和弘, 高柳俊暢, 和田道治, 大谷俊介, H. A. Schuessler, "高周波八重極線形イオントラップにおける新しいタイプのクーロン結晶の生成", 日本物理学会第 62 回 年次大会, 24aRH-7, 北海道大学, 2007 年 9 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 邦宏 (OKADA KUNIHIRO)

上智大学・理工学部・助教

研究者番号: 90311993