

## レーザー冷却により生成した2種イオンプラズマクーロン結晶の観測

日大生産工(院) ○小山 紗輝 日大生産工(学部) 関 拓哉  
量研高崎研 穂坂 綱一, 百合 康介 日大生産工 荒巻 光利

### 1. まえがき

イオントラップとは、ポテンシャルの井戸を作り、荷電粒子を閉じ込める装置である。イオンを絶対零度付近までレーザー冷却することで、長時間の閉じ込めが可能となる。レーザー冷却によりイオンの運動エネルギーを抑えるとクーロン相互作用が支配的になり、秩序化したクーロン結晶を形成する。

本研究では、 $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{88}\text{Sr}^+$ によるクーロン結晶をイオン種別に高精度に観測する事を目的としている。

### 2. プラズマの結合状態による分類

プラズマ中の荷電粒子には、クーロン相互作用が働いている。荷電粒子を冷却し、運動エネルギーを小さくすると、クーロンエネルギーが運動エネルギーを上回り強結合プラズマ状態となる。このようなクーロンエネルギーと運動エネルギーの比は、式(1)のようにクーロン結合定数 $\Gamma$ で定義される。

$$\Gamma = \frac{\text{Coulomb Potential Energy}}{\text{Thermal Energy}} = \frac{q^2/4\pi\epsilon_0 d}{k_B T} \quad (1)$$

$q$ はイオンの電荷、 $\epsilon_0$ はデバイ長、 $d$ は荷電粒子間の距離、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ はイオンの温度である。 $\Gamma$ の大きさにより気相、液相、固相に分類できる。 $\Gamma$ が1以下では気相、 $1 < \Gamma < 170$ では液相となる。また $\Gamma$ が1を超えるプラズマを強結合プラズマと呼ぶ。 $\Gamma$ が170以上では固相に分類され強結合プラズマはクーロン結晶へと相転移することが知られている。

### 3. 光電離法による同位体分離

CaとSrからなる2種イオンプラズマを生成するために、不純物となる同位体を分離する。そのために、本研究では、光電離法を用いた。Fig. 1に光電離のスキームを示す。発振波長423 nm, 461 nmの外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を用いて存在比が最も高い同位体であ

る $^{40}\text{Ca}$ と $^{88}\text{Sr}$ を選択的に励起し、375 nmの半導体レーザーにより電離をする。

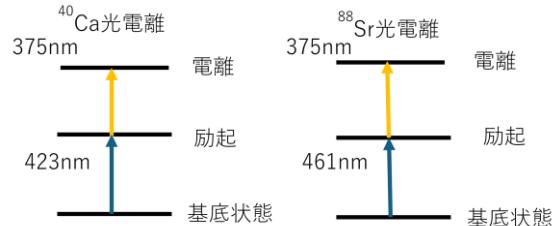


Fig. 1 光電離スキーム

### 4. ドップラーレーザー冷却

イオンがエネルギー準位 $E_1$ ,  $E_2$ を持つときのイオンの共鳴周波数 $\omega_0$ を式(2)に示す。

$$\omega_0 = \frac{(E_2 - E_1)}{\hbar} \quad (2)$$

ここで、 $\hbar$ は換算プランク定数である。このとき、レーザーの伝播方向に対向して運動するイオンは、共鳴周波数よりわずかに低い周波数の光を吸収し、減速する。このとき、イオンは光吸収によって励起され、内部エネルギーが増加する。その後、即座に励起準位からランダムな方向に光を自然放出するため、平均的には自然放出による運動量の変化はない。したがって、レーザーによって原子の運動エネルギーが小さくなり、冷却される。このような冷却の手法をレーザー冷却と呼ぶ。

本研究におけるレーザー冷却のスキームをFig. 2示す。 $^{40}\text{Ca}^+$ を397 nm, 866 nm,  $^{88}\text{Sr}^+$ を422 nm, 1092 nmのECDLを用いて三準位系( $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{P}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{3/2}$ )からなる冷却遷移によって冷却する。397 nm, 422 nmで基底状態( $^2\text{S}_{1/2}$ )のイオンを $^2\text{P}_{1/2}$ 状態へと励起する。 $^2\text{P}_{1/2}$ 状態に励起されたイオンの大半が基底状態へと遷移する。残りのイオンは準安定状態( $^2\text{D}_{3/2}$ )へと脱励起し $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{P}_{1/2}$ 遷移から外れるため866 nm, 1092 nmのレーザーによって $^2\text{D}_{3/2}$ 状態のイオンを $^2\text{P}_{1/2}$ 状態へと励起して、 $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{P}_{1/2}$

---

Observation of Two-Species Ion-Plasma Coulomb Crystals Formed by Laser Cooling

Saki KOYAMA, Takuya SEKI, Koichi HOSAKA, Yosuke YURI  
and Mitsutoshi ARAMAKI

遷移へと戻している。

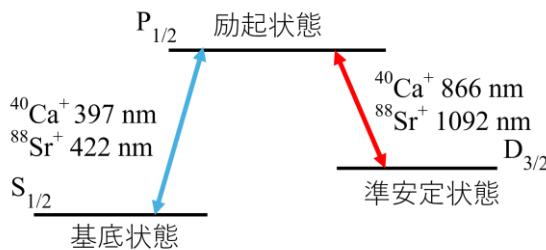


Fig. 2 レーザー冷却スキーム

## 5. 4f光学系

本研究では、 $^{40}\text{Ca}^+$  (397 nm) と $^{88}\text{Sr}^+$  (422 nm) の蛍光を同時観測する際、波長差に起因する色収差により両者の焦点位置が光軸方向に約25 mmずれ、同一カメラ位置からの結晶の撮影が困難であった。

この問題に対して、4f光学系を設計・導入を行った。4f光学系は、2枚のレンズを焦点間隔で直列配置し、第1レンズの後焦点面で入力像のフーリエ変換を得て、第2レンズで逆フーリエ変換により像面へ再結像する構成であり、像を忠実に結像できる。さらに、本研究ではレンズとしてアクロマティクレンズを採用している。アクロマティクレンズとは異なる屈折率を持つ2枚のレンズを組み合わせることで、波長差によって生じる色収差を補正したレンズである。このレンズを用いることで397 nmと422 nmによって生じる色収差の補正を行った。Fig. 3に導入した4f光学系の概略図を示す。

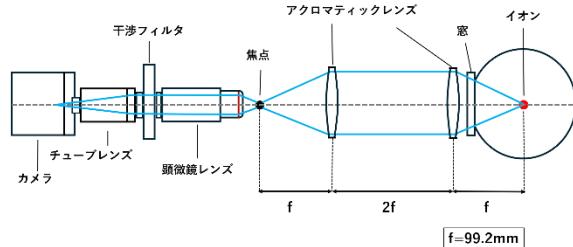


Fig. 3 4f光学系

## 6. 実験方法及び測定方法

Fig. 4に本実験の装置の概略図を示す。二段階光電離用レーザー3本と冷却用レーザー4本をそれぞれビームスプリッタ(BS)と偏向ビームスプリッタ(PBS)により重ねイオントラップの軸方向に照射している。冷却用レーザーは、対抗する方向の2方向で照射している。冷却し

た2種イオンプラズマのレーザー誘起蛍光 ( $^{40}\text{Ca}^+$ :397nm,  $^{88}\text{Sr}^+$ :422nm) を光電子増倍管(PMT)によるフォトンカウンティングおよびICCDカメラで観測する。個別のイオン種は干渉フィルタで波長を選択して観測している。

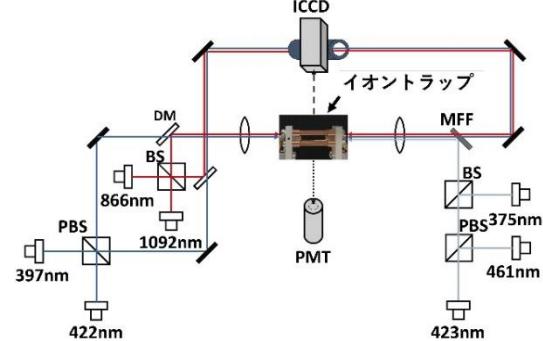


Fig. 4 実験装置図

## 7. 実験結果

Fig. 5に実験により得られた(a) $^{40}\text{Ca}^+$ , (b) $^{88}\text{Sr}^+$ (c)ImageJを使用して重ね合わせたクーロン結晶像を示す。

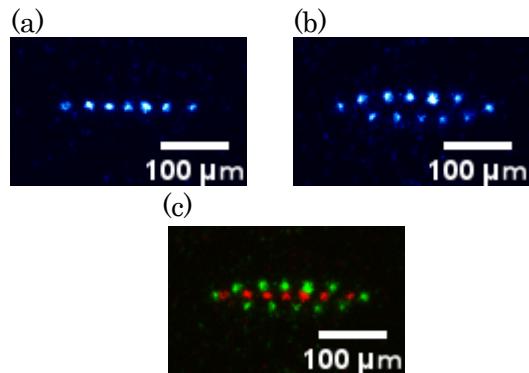


Fig. 4 実験結果(a) $^{40}\text{Ca}^+$ (b) $^{88}\text{Sr}^+$ (c)ImageJでの重ね合わせ画像赤 $^{40}\text{Ca}^+$ 緑 $^{88}\text{Sr}^+$

2種イオンによるクーロン結晶の作成に成功したが4f光学系導入後も、色収差による焦点位置のずれが約1 mm残存した。今後レンズ位置等を再調整し、焦点位置の一致を図る。

## 参考文献

- (1) 荒巻光利 : J. Plasma Res. Vol.85, No.8(2009), p520-525
- (2) 猪澤健二 : レーザー冷却によるクーロン結晶の生成, 広島大学修士論文(2008), p4-6
- (3) 霜田光一 : レーザーによる同位体分, 分光研究第25巻1号(1976), p4-5