

## 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 庸介 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．

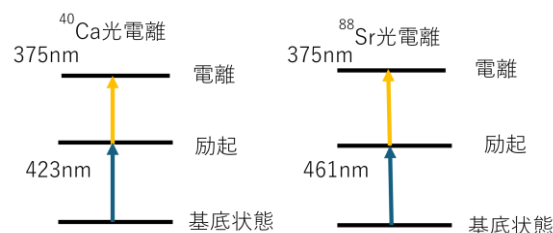


Fig. 1 光電離スキーム

## 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， $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{P}_{1/2}$

遷移へと戻している。

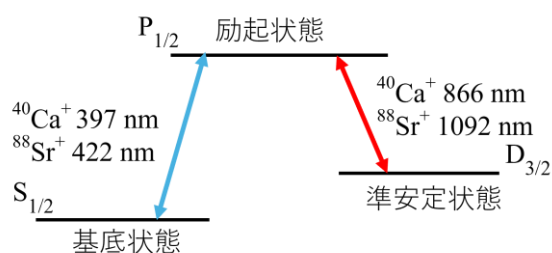


Fig. 2 レーザー冷却スキーム

## 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ックレンズを採用している。アクロマティッ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。

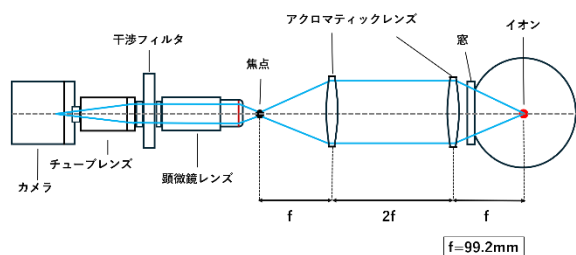


Fig. 3 4f光学系

## 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。

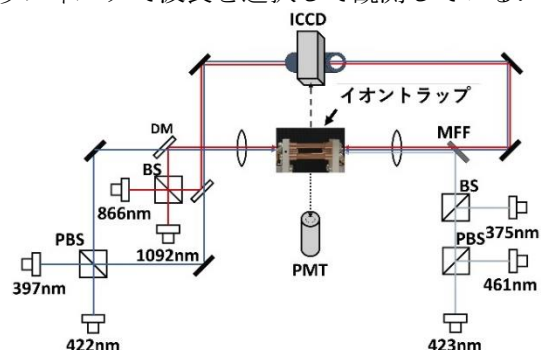


Fig. 4 実験装置図

## 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。

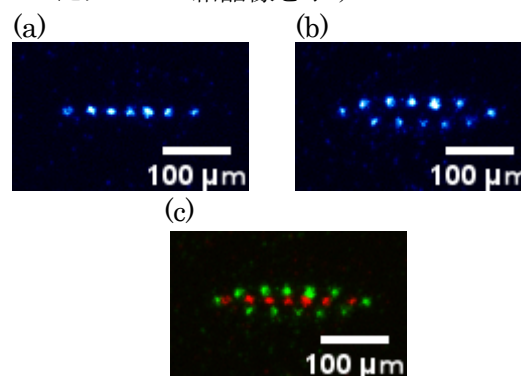


Fig. 5 実験結果(a) $^{40}\text{Ca}^+$ (b) $^{88}\text{Sr}^+$ (c)ImageJでの重ね合わせ画像赤  $^{40}\text{Ca}^+$ 緑  $^{88}\text{Sr}^+$

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