

## 2 種イオン冷却プラズマの同時蛍光観測

日大生産工(院) ○近藤 正都, 望月 義毅  
日大生産工 柴山 均, 荒巻 光利

### 1. まえがき

RFイオントラップとはポテンシャルの井戸を作り、荷電粒子を長時間閉じ込める装置である。レーザーによる冷却技術を用いてイオンを絶対零度付近まで冷却することで、長時間の閉じ込めが可能となる。レーザー冷却により冷やされたイオンは運動エネルギーが小さくなりクーロン相互作用による影響が大きくなる、この状態を強結合プラズマと呼ぶ。強結合プラズマは量子演算に用いられている。[1] 応用研究の発展にはイオンを冷却することにより形成されるクーロン結晶の制御が課題となる。よって強結合プラズマの物性や冷却過程のダイナミクスを理解することが求められる。

本研究では弱結合状態から強結合状態への遷移過程におけるレーザー冷却プラズマの状態を実験的に解明することを目的としている。光学素子の調整やノイズを軽減するための装置の配置を変え、RFイオントラップ内にCa<sup>+</sup>, Sr<sup>+</sup>を同時に閉じ込め、その際の2種イオン冷却プラズマの同時蛍光観測を行う。

### 2. RFイオントラップの閉じ込めポテンシャル

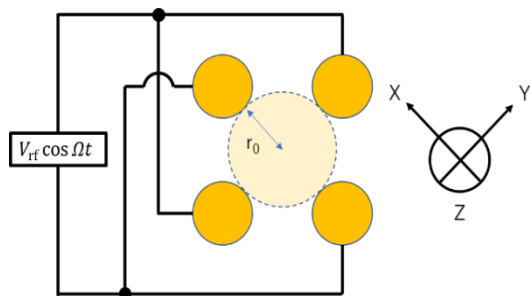


Fig.1 Liner RF 四重極電極

Fig.1のように四重極電極の内接円が $x^2 + y^2 = r_0^2$ となるように配置されている場合を考える。これらの電極の対向する電極に同位相で隣り合う電極に逆位相の高周波電圧を $V_{rf} \cos \Omega t$ 印加する。またエンドキャップ電極には直流電圧VDCを印加する。高周波電源によるポテンシャル $U_{rf}$ は

$$U_{rf}(x, y) = \left( \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \right) V_{rf} \cos \Omega t \quad (1)$$

Z軸方向のポテンシャルは

$$U_{dc}(x, y, z) = \frac{\kappa V_{dc}}{z_0^2} \left[ Z^2 - \frac{1}{2}(x^2 + y^2) \right] \quad (2)$$

と表すことができる。 $\kappa$ はRFトラップの縦横比で決まる構造因子であり、 $0 < \kappa < 1$ となっている。よって電極内のポテンシャル $\Phi(x, y)$ は重ね合わせの原理より

$$\Phi(x, y) = U_{rf} + U_{dc} \quad (3)$$

となる。

### 3. 実験方法および測定方法

レーザー冷却実験装置の概略図をFig.2に示す。

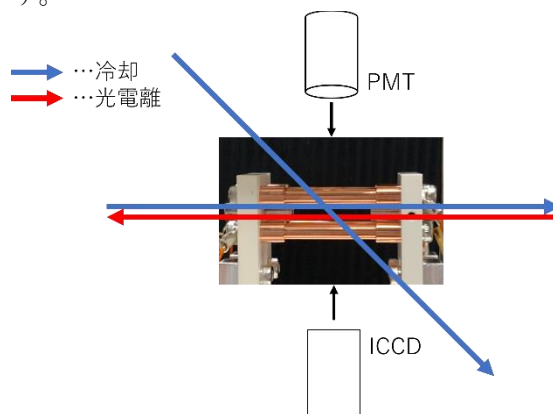


Fig.2 レーザー冷却実験装置の概略図

電子ビームによる衝突電離によってイオントラップ内で生成されるプラズマは、不純物となる同位体のイオンなどが含まれる。その影響により、レーザー冷却での温度制御が難しくなると考えられている。光電離法は、同位体固有の励起波長を利用して同位体を選択的に励起し、さらにエネルギーを与えることで同位体を選別した電離が可能となる。光電離用レーザーは<sup>40</sup>Caを励起させる423nmのレーザーと、<sup>88</sup>Srを励起させる461nmのレーザー、励起状態の<sup>40</sup>Ca,<sup>88</sup>Srを電離させる375nmのレーザーを偏

Simultaneous Observation of Fluorescence from Two Ion Species Plasma

Masato KONDO, Yoshiki MOCHIZUKI and  
Hitosi SIBAYAMA and Mitsutoshi ARAMAKI

光ビームスプリッターで重ね合わせて1本にまとめてイオントラップに入射する。

イオンがトラップ内で生成された直後は、運動エネルギーが非常に高く、長い間閉じ込めることができない。そのため、ドップラー効果を利用したレーザー冷却を行う。原子は共鳴周波数と同じ光を吸収しその時の光と原子の相互作用を利用するのがレーザー冷却である。イオンがエネルギー準位E1, E2を持つ時のイオンの共鳴周波数は、

$$\omega_0 = \frac{(E_2 - E_1)}{\hbar} \quad (4)$$

と表せる[2]。 $\hbar$ 換算はプランク定数である。本研究では、原子の動く方向と対抗する光の波長が短く変化するドップラー効果により、共鳴周波数よりわずかに低い周波数のレーザーを当てることで、運動エネルギーを下げる。励起状態になったイオンは、その後光子を自然放出光として放出し94%は基底状態へ、6%は準安定状態へ崩壊を起こす。この準安定準位のイオンを励起状態へ戻すため、2種類の周波数が違うレーザーを使う。冷却用レーザーは、 $^{40}\text{Ca}^+$ を基底状態から励起状態へ遷移させる397nmのレーザーと、準安定状態の $^{40}\text{Ca}^+$ を励起させる866nmのレーザー、 $^{88}\text{Sr}^+$ を基底状態から励起状態へ遷移させる422nmのレーザーと、準安定状態の $^{88}\text{Sr}^+$ を励起させる1092nmのレーザーを1本にまとめて、イオントラップ内に照射する。また、軸方向と径方向に運動するイオンを冷却するために2方向から入射させている。光電離用レーザーは冷却用レーザーの軸方向と対向して入射させている。イオンの発光は、フォトンカウンターで光子数を測定しICCDカメラで可視化する。

#### 4. 実験結果および検討

2種イオンのプラズマが閉じ込められた様子をICCDカメラで撮影したが、冷却効率が悪く気相から液相、固相への変化は、見られなかった。イオントラップ内でのレーザースポットのサイズを検討し、ECDLの光フィードバックがよりかかるように調整する。

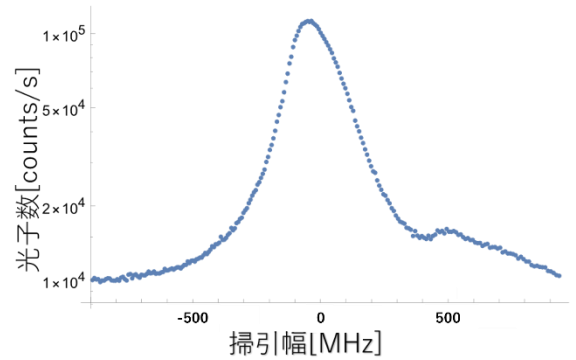


Fig.3  $\text{Ca}^+$  のLIFスペクトル

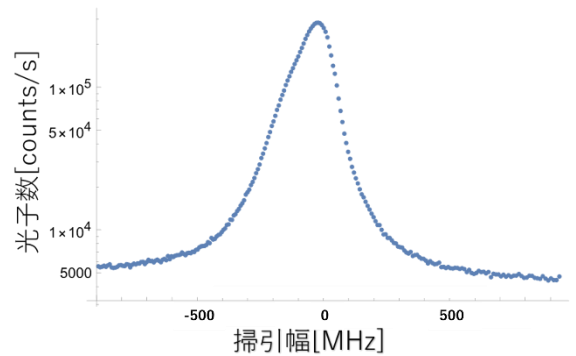


Fig.4  $\text{Sr}^+$ のLIFスペクトル

Fig.3はCaの光電離用レーザーの波長を掃引することで得られたLIFスペクトルである。横軸は周波数を表している。縦軸は発光の強度である。Caと同様にして得られたSrのLIFスペクトルをFig.4に示す。

粒子が励起する波長は速度によって変化する。波長を掃引すると、共鳴する粒子が多く存在するときに光子数が増加する。

#### 5. まとめ

本研究では、イオントラップへ光電離させた $^{40}\text{Ca}^+$ 及び $^{88}\text{Sr}^+$ を同時に閉じ込め、その後ドップラーレーザー冷却により、強結合プラズマを生成、冷却をする。これら2種類のイオンをレーザー誘起蛍光法で観測した。

#### 参考文献

- 1) 荒巻光利, J. Plasma Res. Vol.85, No.8, 522, (2009)
- 2) 占部信二, 共立出版株式会社, イオンのレーザー冷却とその応用, 16, (2000)