

2 種イオン冷却プラズマの生成に関する研究

日大生産工(院) ○望月 義毅 日大生産工 荒巻 光利

1. まえがき

イオントラップを用いた量子コンピュータはイオン数個でデバイス機能が動作することが確認されており、現在のコンピュータと同等の処理能力を発揮するためには、イオンの数を増やす手法がある。多数のイオンを正確に制御するためには強結合プラズマの物性を知らることが求められる¹⁾。イオントラップとは電磁場を用いてポテンシャルの井戸を作り、イオンを空間に長時間閉じ込めることができる装置である。イオントラップを用いることで原子分野において精密な研究を行うことが可能である。RF イオントラップは複数個のイオンを捕獲することで内部に非中性プラズマを生成することが可能で、これとドップラーレーザー冷却法を併用することでレーザー冷却プラズマを生成する。

2種イオンの同時閉じ込めに向け、Ca及びSrの1成分プラズマの閉じ込め実験を行う。

2. 提案手法

四重極電極が $x^2-y^2=r_0^2$ 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の、隣合う電極に逆位相の高周波電圧 $V_{rf} \cos \Omega t$ を印加する。その時にできるポテンシャルは以下のように表せる。

$$\phi(x, y) = \frac{V_{dc} + V_{rf} \cos \Omega t}{r_0^2} (x^2 - y^2) \quad (1)$$

このときの捕獲イオンの運動方程式は、

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2e(V_{dc} + V_{rf} \cos \Omega t) \frac{x}{mr_0^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} - 2e(V_{dc} + V_{rf} \cos \Omega t) \frac{y}{mr_0^2} = 0 \quad (3)$$

となる。ここで

$$\Omega t = 2\xi, a = \frac{8eV_{dc}}{mr_0^2 \Omega^2}, q = \frac{4eV_{rf} \cos \Omega t}{mr_0^2 \Omega^2} \quad (4)$$

と変数変換すると x, y 方向の運動方程式は

$$\frac{d^2 x}{d\xi^2} + (a + 2q \cos 2\xi)x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} - (a + 2q \cos 2\xi)y = 0 \quad (6)$$

と表せる。この式はMathieu方程式として知られている。この式の解が四重極電極の電場中のイオンの運動方程式を表す。また、Mathieu方程式の a, q の値を $a-q$ 平面に図示したものを安定線図といい、イオントラップ内の粒子を安定して閉じ込めることができる領域を示している²⁾。RFによる加熱の影響が少ない $a = 0$ 、 $0.1 \leq q \leq 0.3$ の範囲のパラメータを用いて実験を行う。

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.1に示す。

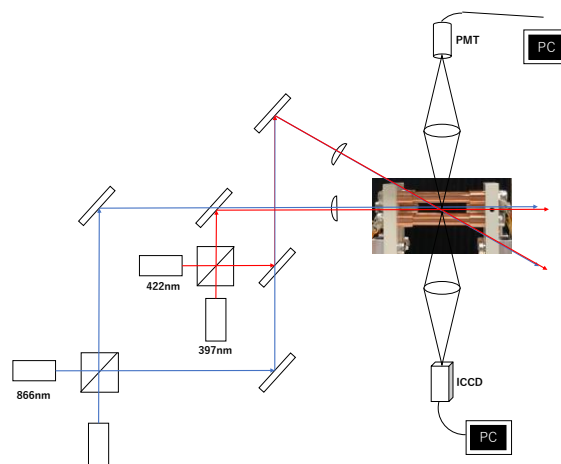


Fig.1 レーザー冷却実験装置の概略図

RFトラップを超高真空(10^{-8} Pa)に配置し、高周波電圧を印加することで径方向を、静電圧で軸方向の閉じ込めを行う。397nm, 422nmと866nm, 1092nmのそれぞれ2本のレーザー光をPBSで重ねており、それらのレーザー光はダイクロイックミラーを用いて重ねている。透過光と反射光は、イオントラップの軸方向と径方向に分かれ照射される。光電離実験と同様にICCDカメラでプラズマを画像化して、励起状態から基底状態に戻るときに放出される光をPMTで観測してスペクトルを得る。

4. 実験結果および検討

Research on the generation of two kinds of ion-cooled plasmas

Yoshiki MOCHIZUKI, Mitutoshi ARAMAKI

Fig.2は Sr^+ の閉じ込められた様子である。冷却用レーザーと生成されたイオンが共鳴することでイオンの自然放出された光をICCDカメラで撮影した。

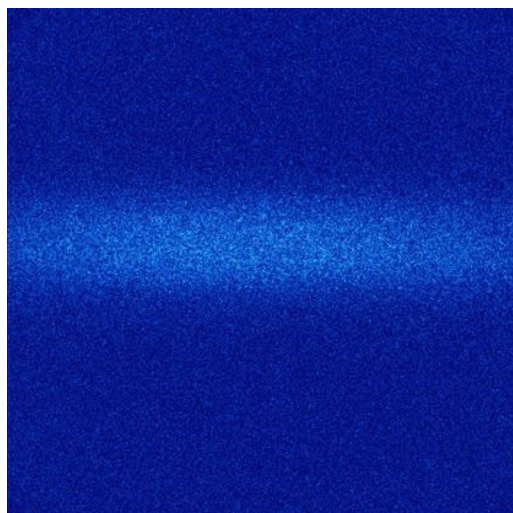


Fig.2 Sr^+ の冷却

ICCDカメラで冷却されている様子を撮影することができた。また、ドップラーレーザー誘起蛍光法で観測したスペクトルから正常にできていることが確認できた。一成分での電離、RFイオントラップへの閉じ込め及び冷却が確認できたため、2種イオンを同時に閉じ込め、粒子の拡散を画像により解析する手法について研究を進める。

参考文献

- 1) 亀山悟志, 「RFトラップ中におけるレーザー冷却プラズマの低擾乱レーザー誘起蛍光計測に関する研究」, (名古屋大学修士論文), (2010).
- 2) 占部伸二, イオンのレーザー冷却とその応用 (2000) p.6.

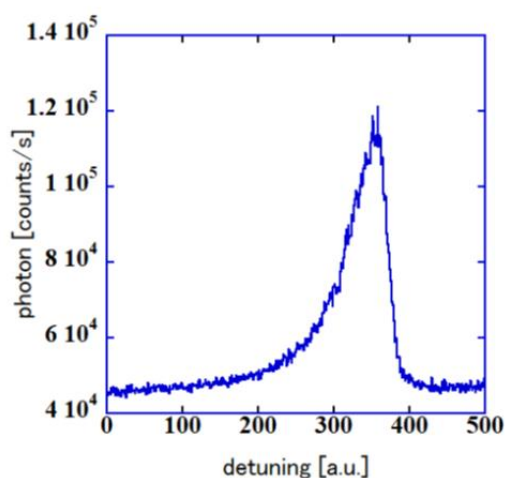


Fig.3 レーザー冷却のLIFスペクトル

Fig.3に冷却中のLIFスペクトルを示す。縦軸は光子数、横軸は掃引したレーザー波長である。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

同時閉じ込めの前段階として Sr のみでのレーザー冷却実験を行った。レーザー冷却実験は