

線形四重極 RF イオントラップ装置を用いた放電プラズマの閉じ込め実験 Confinement experiment of the discharge plasma by using a liner quadrupole RF ion trap

○横山 達郎¹, 渡部 政行²
*Tatsuro Yokoyama¹, Masayuki Watanabe²

Abstract: The purpose of this research is to understand the confinement characteristic of an ion rich plasma, which is trapped by using the RF ion trap device. The plasma discharge is formed at the center of four rods of the RF ion trap by using inserted electrodes. In this experiment, such a discharge plasma is trapped by a RF electric field. Since the confinement of the ions can be enhanced rather than electrons in the condition of the frequency of the RF electric field, it is possible to form a non-neutral ion rich plasma. The number of the charged particles will be measured by using a RF resonance absorption method.

1. イオントラップ

イオントラップとは電磁場を用いて、限られた空間内に荷電粒子を捕捉する技術の総称である。荷電粒子を捕捉するための場として静電場のみでは不可能であることがアーンショーの定理で証明されている。つまり、荷電粒子を捕捉するためには2種類以上の場が必要となる。その主な場の組み合わせとして、「静磁場と静電場」を用いた Penning Trap と「高周波電場と静電場」を用いた RF(Radio Frequency) Trap が挙げられる。Penning Trap の特徴は、高周波電場を用いないことから荷電粒子の過熱が起こらないため、低エネルギーの荷電粒子を多く捕捉することが可能である。しかしながら、荷電粒子を閉じ込めるためには1 T (テスラ) 程度の強磁場が必要になるため、装置が大型になってしまう欠点がある。RF Trap の特徴は、装置の小型化が可能なことである。ポテンシャルの中心部以外では高周波電場により、荷電粒子が加熱してしまう等の欠点があるが、本研究では比較的簡単に荷電粒子の捕捉が可能であるため RF Trap を用いて、荷電粒子の閉じ込め実験を行っている。RF Trap には、中心領域に少数個の荷電粒子を閉じ込めることができる回転双曲面型と多数個の荷電粒子を軸上に並べて閉じ込めることができる線形型がある。本研究では、多くの荷電粒子を捕捉し、その荷電粒子の閉じ込め特性を調べることを目的としているため線形型のイオントラップを用いている。特に本研究では、イオンを多く含んだイオンリッチプラズマの閉じ込め特性について調べることを目的としている。Figure 1.は本研究で用いている線形四重極 RF イオントラップの概略図である。

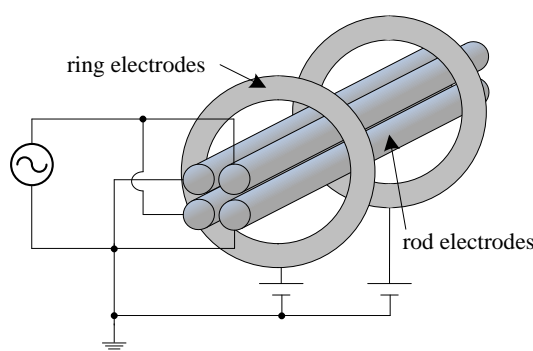


Figure 1. Liner quadrupole RF ion trap device

2. 荷電粒子の生成方法

本研究では、捕捉する荷電粒子を電極間に生成するために「電極放電」、「熱電子放出」、「 β 線 γ 線等の放射線」の3通りを用いている。電極放電は、直流電源を用いて電極間で放電を起こし、荷電粒子を生成する方法である。使用できる真空度は低真空に限られているが、大量の荷電粒子を定常的に生成することが可能である。熱電子放出は、フィラメント電極に直流電源を印加することで熱電子を放出し、その熱電子を引き出し電極で加速させ、原子との衝突によりイオン化させる方法である。 β 線 γ 線等の放射線は、放射線源から放出する β 線や γ 線を原子に衝突させることにより、イオン化させる方法である。この方法は真空度に関係なく用いることができるが、電極放電や熱電子放出に比べ電離できる粒子の数が少ないことが欠点である。そこで今回は電極放電を用いて実験を行った。電極放電の装置と RF トラップ装置の概略図を Figure 2.に示す。

本実験で使用するガスは、キセノンガスである。キ

1 : 日大理工・院 (前)・量子:Graduate School of Quantum Science and Technology, CST., Nihon-U.

2 : 日大・教員・量科研 : Institute of Quantum Science, Nihon-U.

セノンガスを使用している理由は、イオン化しやすいこと、希ガスの中では質量が重く周りの粒子と衝突しても影響を受けにくいからである。

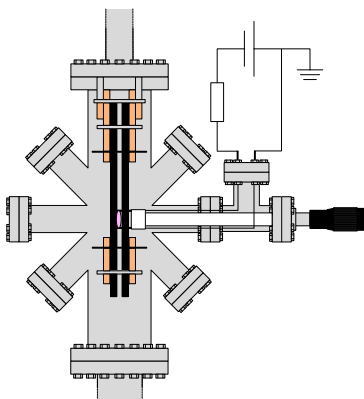


Figure 2. Experimental device

3. 線形四重極 RF Trap の実験装置

本実験では、4本のロッド電極（ステンレス製）に交流電圧を印加することで高周波電場を作り、荷電粒子が r 方向に逃げないような電場構造になっている。四重極ロッドを固定するために、絶縁体のテフロン（白色）を用いている。z 軸方向には、2枚のリング電極に直流電圧を加えて静電場を作り、荷電粒子が逃げないような電場を形成している。リング電極は絶縁体のポリイミド（肌色）を用いて支えられている。四重極ロッド電極の全長は 350mm、四重極ロッドの長さは 300mm となっている。荷電粒子を捕捉するリング電極間の距離は 147mm である。四重極ロッドと電極放電部の間で放電が起きないように四重極ロッドは熱収縮チューブで覆っている。四重極ロッドの半径 R と中心軸からロッド表面までの距離 r の比が閉じ込め特性に影響を与える。これを踏まえて、中心から四重極ロッドまでの距離 r を 3mm~6mm の 1mm 間隔で変更が可能になっている。リング電極間の距離も変更が可能になっている。

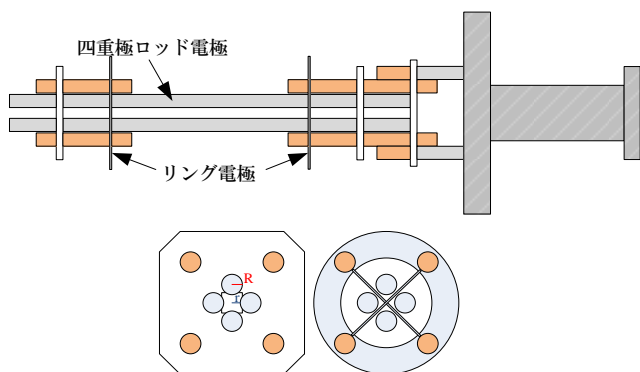


Figure 3. Trapping part of the charged particles

4. 荷電粒子の測定方法

本実験では、RF 共鳴吸収法を用いて荷電粒子の閉じ込めを確認する予定である。RF 共鳴吸収法とは電気回路の共鳴現象を用いて、捕捉された荷電粒子の運動周波数 f_i と一致する高周波電場を荷電粒子が吸収する性質を用いた方法である。Figure 4. に RF 共鳴吸収法の回路を示す。回路図内の電圧 $v_r(t)$ は荷電粒子を捕捉するために印加する電圧である。この電圧 $v_r(t)$ は荷電粒子を観測する際に影響を与える。そこでコンデンサー C_1 、コイル L_1 で構成される共振回路の周波数 f_1 を f_r に合わせることでその影響を減少させている。またコンデンサー C_0 、コイル L_0 で構成される回路の周波数 f_0 は、横軸を周波数 f_p とし、 $v_m(t)$ を測定した場合、凸の波形が観測できる。荷電粒子の測定のための f_0 は荷電粒子の運動周波数 f_i に一致するように選択する必要がある。これにより、もう一つの交流電源の周波数 f_p を変化させ、 $f_0 = f_i = f_p$ となる条件で、荷電粒子が共振することにより電圧が下がり荷電粒子の閉じ込めを確認することができる。荷電粒子が電極間にない場合は、電圧 $v_m(t)$ はピークで減少せず波形は凸のままである。

その他にもプローブなどを用いて、イオン密度や温度を測定した結果をポスターにて発表する予定である。

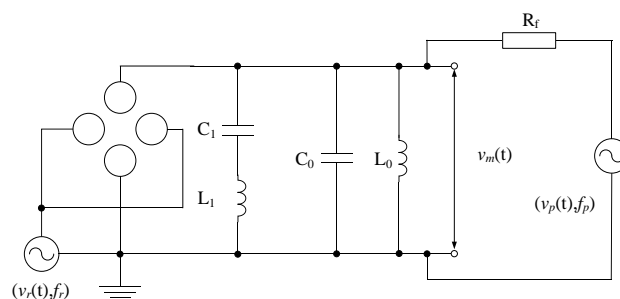


Figure 4. Circuit for measurements of the RF resonance absorption method

5. 参考文献

- [1]荒巻 光利：「トーラス型高周波トラップ配位における一成分プラズマの特性」
- [2]依田 潤, 杉山 和彦：「トラップされたイオンの電気的・光学的検出」, レーザー研究, 第 22 巻, 第 5 号, pp3-14, 1994