O-43

線形四重極 RF イオントラップ装置内での放射線を用いた Xe イオンの捕捉実験

Experiment of stored Xenon ions using radioactive rays in a linear quadrupole RF ion trap device

○横山 達郎[1]，　渡部 政行[2]
*Tatsuro Yokoyama[1], Masayuki Watanabe[2]

Abstract: The goal of this research is the understanding of the corrective behavior in strong coupled plasmas. Especially the purpose of our experiment is the measurement of stored Xenon ions in an ion trap device. A linear quadrupole ion trap is one of the technologies for a trap of charged particles. The ion trap is applied to mass spectrometry and frequency standard at present. In this experiment, Xenon ions are trapped by a combination of RF electric field and electrostatic field. The number of charged particles was measured by using a RF resonance absorption method. Two circuits with the resonant frequency to characteristic vibration of Xenon ions are used for this measurement. In this poster, the principle of ion trap, the outline of experimental apparatus and experimental results are presented.

１．イオントラップ

イオントラップとは，電磁場を用いて荷電粒子を空間に捕捉する技術の総称である．Earnshaw の定理により静電場のみ，もしくは静磁場のみではイオンを空間に捕捉できないことが証明されている．そのためイオンを捕捉するためには最低 2 種類以上の場を用いる必要がある．場の組み合わせとしては主に，「静電場と静磁場」を用いた Penning Trap と「静電場と高周波電場」を用いた RF Trap がある．Penning Trap は，磁場中を運動する荷電粒子が磁力線から中心力を受け，磁力線に巻きつくように運動し，また磁力線方向には静電場によって閉じ込める方式である．この方式の特徴は運動エネルギーの低い状態で荷電粒子を閉じ込めることが可能なことである．欠点としては，強磁場が必要であるため，装置が大型になることが挙げられる．一方，RF Trap は時間的に変動する鞍型ポテンシャルによって，中心部に荷電粒子を捕捉する方式である．欠点として，中心領域以外の荷電粒子は高周波加熱され，安定的に捕捉することはできない．しかしながら，Penning Trap と比べて，装置の小型化が容易であり，比較的簡単に荷電粒子を捕捉することが可能である．本研究では RF Trap を用いて Xe イオンを捕捉する研究を行っている．RF Trap は粒子閉じ込め部の形状により回転双極子型と線形四重極型の 2 種類に分類できる．回転双極子型の特徴は，中心領域に少数個のイオンを捕捉できることが挙げられる．線形四重極型の特徴は，荷電粒子を線状に並べて捕捉できるため，多数個のイオンを捕捉できる点と高周波加熱の影響を受けにくい点である．

本研究では多数個のイオンを空間に捕捉し，強結合性の強いプラズマの閉じ込め特性やその集団的な振る舞いを調べることを目的としている．以上より，線型四重極 RF イオントラップを用いて捕捉実験を行っている．一般的な線形四重極 RF イオントラップ装置の図を Figure 1 に示す．

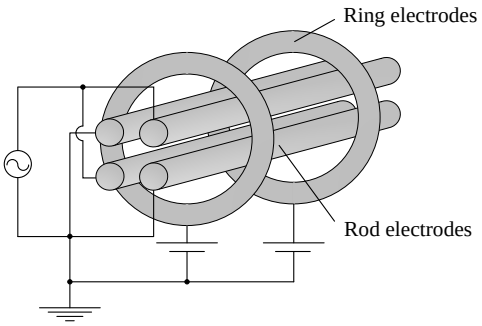

Figure 1. Linear quadrupole RF ion trap.

２．線形四重極 RF イオントラップ実験装置

Figure 2 に本実験で用いる線形四重極ロッド部の概略図を示す．本実験で用いる線形四重極イオントラップは，四重極ロッド電極が 4 本とリング電極 2 枚で構成されている．四重極ロッド電極部の全長は 350mm である．四重極ロッド（ステンレス製）の長さは 300mm，半径 R は 5mm である．中心軸からロッド表面までの距離 r は 3mm～6mm までの 1mm 間隔での変更が可能である． R/r の値によって，イオンを捕捉する際の閉じ込め特性に影響を与えることが知られている．電極にはステンレスを用い，支柱には絶縁体であるテフロ

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.

ン（白い部分）とポリイミド（肌色の部分）を用いている．

実験で使用しているガスは Xe ガスである．Xe ガスを使用している理由は，イオン化しやすいことと，質量が重いため周りの物質と衝突しても影響を受けにくいことからである．

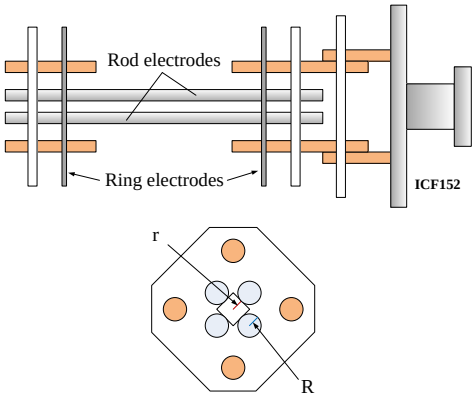

Figure 2. Trapping part of the charged particles

３．放射線によるイオンの生成

本実験では，放射線を用いて Xe ガスを，電離し，Xe イオンを生成している．使用している放射線源は ^{60}Co，^{90}Sr，^{137}Cs である．^{60}Co と ^{137}Cs はβ線とγ線，^{90}Sr はβ線が放出されている．放射線源は真空管の外から挿入する設計になっており，真空内と真空外の間に厚さ 1mm のアルミニウムで隔てている（Figure 3）．β線もできるだけ透過できる設計とした．放射線源は直線導入機を介して，真空容器に接続しているため，線形四重極ロッドと放射線源の距離は変更が可能となっている．

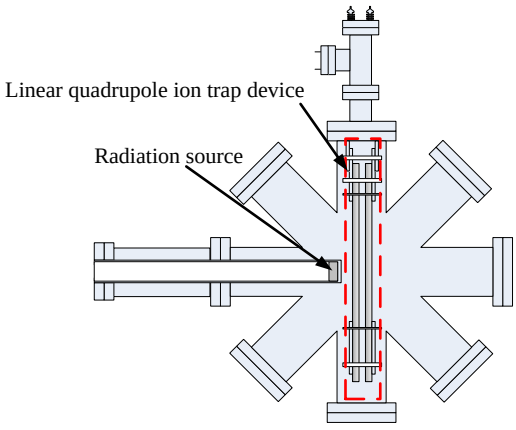

Figure 3. Production of ions by radioactive rays

４．RF 共鳴吸収法によるイオン蓄積量の計測

本研究ではイオントラップ内に蓄積された荷電粒子を観測するために RF 共鳴吸収法を用いている．RF 共鳴吸収法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観測方法である．RF 共鳴吸収法の回路図を Figure 4 に示す．コイル L_1，コンデンサ C_1 で構成された直列共振回路は四重極ロッド内に荷電粒子を捕捉するために印加する交流電圧 $v_r(t)$の RF 共鳴吸収回路への影響を軽減するための共振回路である．交流電圧 $v_r(t)$の周波数 ω_rに合わせるように L_1 と C_1を選択すると，RF 共鳴吸収回路の出力電圧 $v_m(t)$のその部分とその周辺の周波数のみが軽減される．

コイル L_0 とコンデンサーC_0 で構成された並列共振回路は荷電粒子を測定するための回路である．この回路より荷電粒子の捕捉を確認することができる．共振周波数 f_0 はイオンの共振周波数 f_{ion} 及びイオンを観測するための RF 共鳴吸収法の回路に印加する周波数 f_p に共振するように調整する必要がある．入力する周波数 f_p を変化させることにより，荷電粒子の捕捉を確認することができる．荷電粒子が捕捉されていない場合は，山なりの波形を示す．捕捉されている場合は，f_0=f_{ion}=f_p になる周波数で山なりの途中で凹みが現れ，確認できる．

実験の詳細な結果はポスター発表にて報告する．

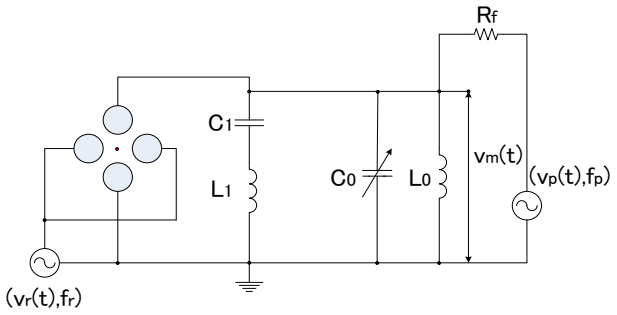

Figure 4. Circuit system for RF resonance absorption method

５．参考文献

[1]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　荒巻光利

[2] 占部伸二，梅津純，石津美津雄，RF 共鳴吸収法による蓄積イオンと特性測定，応用物理　第 54 巻　第 9 号(1985 年)

[3]綿引智之，線形 RF トラップを用いた荷電粒子の空間捕捉に関する基礎研究，　2010 年度修士論文

[4]木方康一郎，線形 4 重極 RF イオントラップのための荷電粒子の生成法および閉じ込め特性に関する基礎研究，　2012 年度修士論文

[5]長田康志, RF 共鳴吸収法による線形四重極イオントラップ内の蓄積イオン計測，　2013 年度修士論文