

線形 4 重極イオントラップ装置内に捕捉されたイオンの蓄積数計測 Measurement of stored ion in a linear quadrupole ion trap by RF resonance absorption method

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

Abstract: The purpose of this research is the measurement of stored ion in an ion trap device. A linear quadrupole ion trap is one of the technologies for a trap of charged particles. Ion trap is applied to mass spectrometry and frequency standard at present, it will be applied to the quantum computer in future. In this experiment, Xenon ions are trapped by a combination of the RF electric field and the static electric field. The number of the charged particles was measured by using a RF resonance absorption method. Two resonant circuits with the frequency of the match to the characteristic vibration of Xe ion are used for this measurement. In this poster, the principle of ion trap, outline of the 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知られている。そのためイオンを空間に安定に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。RF Trap は回転双極子型と線形型の 2 種類に分類できる。回転双極子型の特徴は、中心領域に点状にイオンを捕捉でき、少数個のイオンを捕捉できる点である。線形型の特徴は、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線形 RF Trap を用いた荷電粒子の捕捉実験を行ってきた。ここで強結合プラズマとは、粒子間の相互作用が強いプラズマの状態を表す。具体的には平均クーロンポテンシャルエネルギーと熱運動エネルギーの比によって求められ、次の式で与えられる。

$$\Gamma = \frac{\text{平均クーロンポテンシャル}}{\text{熱運動エネルギー}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 ak_B T}$$

Γ はクーロン結合パラメータと呼ばれ、この値が 1 より大きい場合または等しい場合は強結合プラズマの状態となる。クーロン結合パラメータ Γ が 1 より小さい

場合は弱結合プラズマとなる。弱結合プラズマは気体的な性質を示し、強結合プラズマでは液体的な性質を示す。更に強いクーロン相互作用が起ると固体の状態に転移することも可能である。^[5]

2. 線形四重極 RF イオントラップ実験装置

本実験では、4 本のロッド電極を用いた線形四重極 RF イオントラップを用いて荷電粒子の捕捉実験を行っている。図 1 に実験装置の概略図を示す。線形四重極イオントラップの利点は、比較的簡単に荷電粒子が捕捉できること、装置の小型化ができること、更に荷電粒子を線上に並べることができることである。またレーザー冷却法等により冷却されたイオンは量子的な特性が強くなり、その特性を利用することも利点の一つである。欠点としては、中心部以外で形成されているポテンシャルの変化によって捕捉されている荷電粒子が高周波加熱されるため、粒子の運動エネルギーが高くなることである。

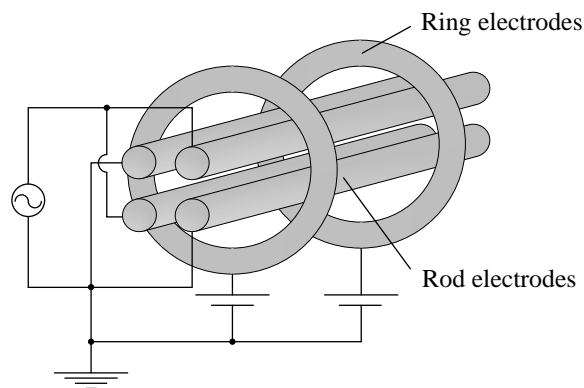


Fig. 1: The linear quadrupole RF ion Trap.

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.

本研究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。これはイオンを捕捉する際の閉じ込め特性 R/r に影響する。z 軸方向の閉じ込め領域は 147mm と 47mm の 2 種類で計測した。実験で使用しているガスは Xe ガスである。下図 2 は本実験で用いている線形四重極ロッド部の概略図である。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ンとポリイミドを用いている。現在、両側 2 枚のリング電極の位置を変更し、より最適な粒子閉じ込め条件を探りながら実験を進めている。

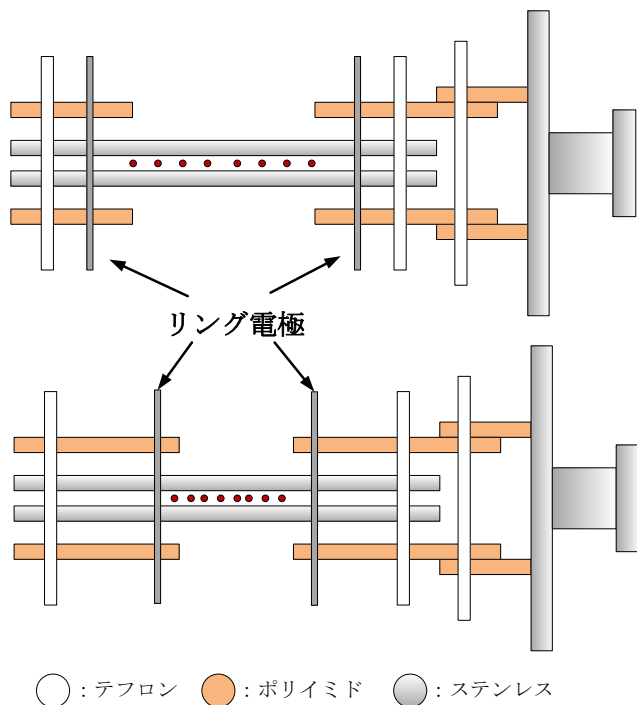


Fig.2: Trapping part of the charged particles

3. 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イオンが吸収する性質を用いた検出方法である。RF 共鳴吸収法の回路図を図 3 に示す。コイル L_1 , コンデンサー C_1 で構成された直列共振回路は四重極ロッド電極に印加する交流電圧 $v_r(t)$ が RF 共鳴吸収法回路に影響を与えるため、その影響を軽減するための回路である。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 を選ぶと、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の周波数を観測するための回路である。これにより荷電粒子が捕捉されたのか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 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しなければならない。

RF 共鳴吸収法では電極内に捕捉された荷電粒子の微小な信号を取り扱う。そのため、荷電粒子の運動の調和振動に合わせて、回路の出力がそれと同じ周波数にする必要がある。そこで重要になるのが共振波形の鋭さ Q 値である。 Q 値とは周波数のピークの鋭さを表す。荷電粒子を捕捉するために、 Q 値を鋭くすることによって、荷電粒子以外の影響を抑えることができる。

実験の詳細な結果はポスター発表にて報告する。

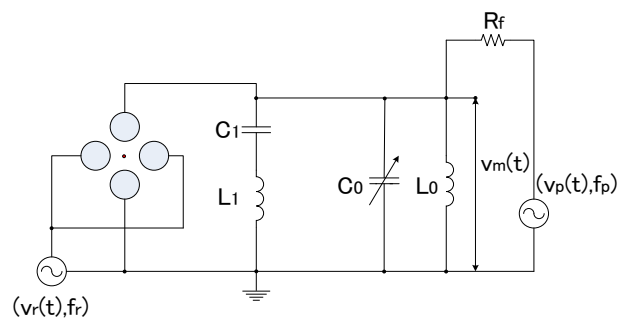


Fig.3: Circuit system for RF resonance absorption method.

4. 参考文献

[1]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, 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻 2010 年修士論文(2011)

[2]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, 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻 2012 年修士論文(2013)

[3]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, 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻 2013 年修士論文(2014)

[4]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)

[5]林康明, 橋那英, クーロン結晶と強結合プラズマ, プラズマ・核融合学会誌 第 72 巻第 1 号(1996 年) P.71