

RF 共鳴吸収法を用いた RF イオントラップ内の Xe イオンの計測

Measurement of Xe ions by using the RF resonance absorption method in a RF ion trap

○長田康志¹, 渡部政行²*Yasushi Nagata¹, Masayuki Watanabe²

Abstract: Ion trap is one of the technologies for a trap of charged particles. The charged particles are trapped inside the electrode of the ion trap by the potential which makes an electric and magnetic fields. In this research, charged particles produces inside the trapped small space of the ion trap device by using (i) an electron beam, (ii) the discharge and (iii) the radiation (β and γ rays). The accumulation of the charged particles is measured by the RF resonance absorption method. This method identify an ion by using a resonance phenomenon. In the poster, the initial experimental results of the RF resonance absorption method are presented.

1. はじめに

イオントラップとは電磁場を用いて形成されるポテンシャルによって荷電粒子を空間的に捕捉する技術の総称である。1923年, Kingdon によりイオントラップの研究が開始された。1950年代後半には Wolfgang Paul により質量分析への応用を念頭においたイオントラップの研究が開始されている。1970年代後半にはレーザー冷却法が実用化され, イオンを極低温状態で閉じ込めることが可能となる。この極低温状態で閉じ込められたイオンは量子的に強く振る舞うことから, 周波数標準や量子計算機など様々な応用研究が展開されている。

本研究ではイオントラップを用いてキセノンイオンの捕捉実験を行っている。将来的には多種もしくは多数個のイオンを閉じ込めることでプラズマの集団的振る舞いやその特性を調べたいと考えている。现阶段の目的としてはイオントラップを用いて荷電粒子の捕捉を実現し, 捕捉されている荷電粒子の特性を観測することである。

1-1. 線型四重極 RF イオントラップ

イオントラップで荷電粒子を閉じ込めるためには2種類の場合を用いる必要がある。荷電粒子を閉じ込めるために用いられる場の組み合わせとして「静電場と静磁場」の組み合わせを用いる Penning Trap と「静電場と RF 電場」の組み合わせを用いる Paul Trap がある。本研究では後者に属する線型四重極 RF イオントラップを用いて荷電粒子の閉じ込め実験を行っている。その理由としては, 線型四重極 RF イオントラップは多数個の荷電粒子を均等に閉じ込めることができ, 荷電粒子の蓄積量や蓄積時間を比較的計測しやすいからで

ある。Fig.1 は本研究で用いている線型四重極 RF イオントラップの概略図である。

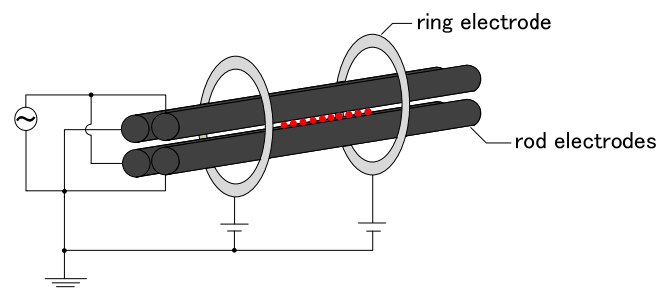


Fig.1: The linear quadrupole RF ion Trap

2. 荷電粒子の生成法

本研究では, 荷電粒子の集まりである一成分プラズマの時間発展を, 様々な圧力領域において調べている。イオントラップの研究において荷電粒子の生成法として電子ビームが一般的に用いられる。しかしながらこの方法だけでは, 荷電粒子を生成できる圧力領域が限定されてしまう。そこで本研究では幅広い圧力領域において荷電粒子の生成を可能にするために, 電子ビームに加え電極放電, 放射線源を用いてイオントラップ内に荷電粒子を生成し, 荷電粒子の捕捉を試みている。本研究では主に, 電子ビームを用いて荷電粒子の生成, 捕捉実験を進めている。

3. 荷電粒子の検出方法

イオントラップ内の蓄積された荷電粒子を観測する方法は主に以下の2通りある。1つはトラップされた荷電粒子の電氣的性質を利用してその荷電粒子自体の捕捉を確認する「RF 共鳴吸収法」であり, もう1つはとレーザー等の単波長光源で荷電粒子を励起して, その荷電粒子からの蛍光を観測する「レーザー誘起蛍光法」

1: 日本大学・院・量子 Graduate School (M) of Science and Technology, Nihon University

2: 日大・教員・量科研 Institute of quantum Science, Nihon University

である.

3-1. RF 共鳴吸収法

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, 捕捉された荷電粒子の運動周波数と一致する高周波の電場エネルギーをイオンが吸収する性質を用いてイオンの捕捉を確認する方法である.

RF 共鳴吸収法で用いた回路系の概略図を Fig.2 に示す. ここで f_r は四重極ロッドに印加する周波数であり, f_p は RF 共鳴吸収法の回路系に印加する周波数である. 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に印加した荷電粒子閉じ込め用電圧 $v_0(t)$ の RF 共鳴吸収法の回路への影響を軽減するための回路である. コイル L_0 , コンデンサ C_0 で構成された並列共振回路は荷電粒子からの信号を観測するための共振回路であり, その共振周波数 f_0 はイオンの共振周波数 f_{ion} 及び RF 共鳴吸収法の回路系に印加する周波数 f_p に共振するように調整しなければならない.

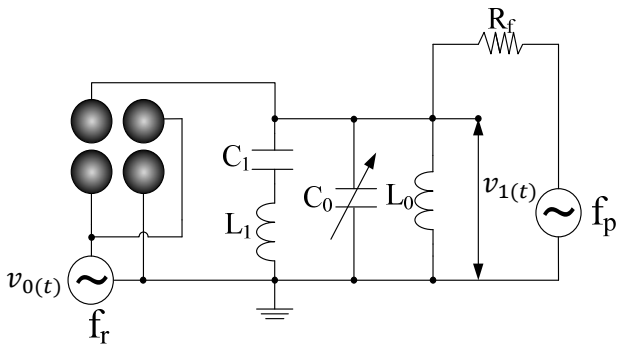


Fig.2: Circuit system for RF resonance absorption method. Fr: Frequency applied to the rod. Fr: Frequency applied to the circuit.

イオンの共振周波数は以下の式で表される.

$$f_{ion} = \frac{qf_r}{2\sqrt{2}}$$

ここで q は荷電粒子を捕捉するための安定条件である. この q の値は Mathieu の方程式より得ることができる. また, コイル L_0 , コンデンサ C_0 で構成される並列回路の共振周波数 f_0 は回路方程式から以下のように求めることができる.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}$$

3-2. 予備実験

実験を行う前に RF 共鳴吸収法の回路シミュレーションを行った. RF 共鳴吸収法は荷電粒子が捕捉されているか出力波形で確認する. イオンが閉じこもっていない場合の出力波形は Fig.3 のようになる.

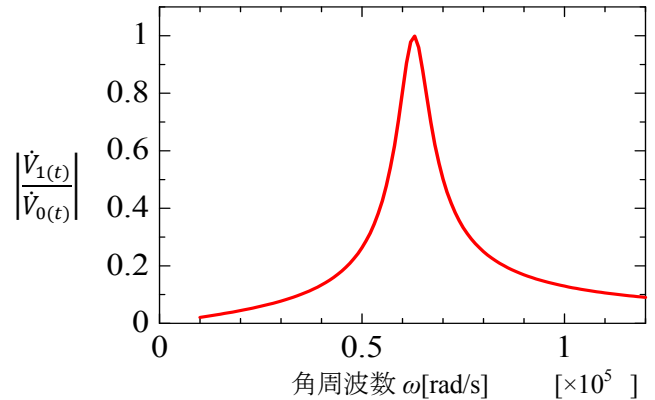


Fig.3 Resonance waveform without trapped ions

一方イオンが閉じこもった場合は電気回路と共鳴し, 高周波の電場エネルギーをイオンが吸収するので Fig.4 のような出力波形が得られる.

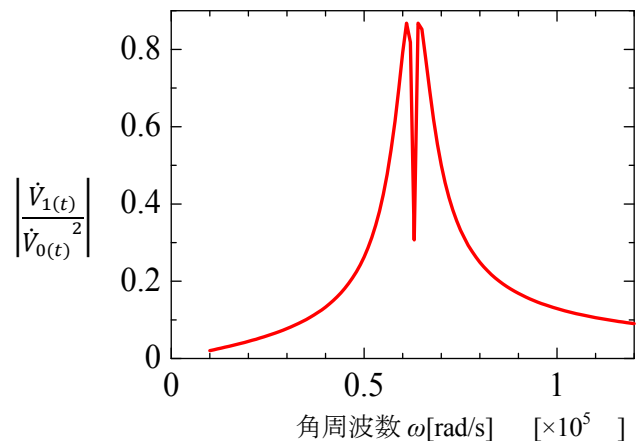


Fig.4 Resonance waveform with trapped ions

4. 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, pp.7-11, 2001
- [2] 桜井誠: イオントラップー最近の実験ー, pp.230-232, 1991
- [3] 占部伸二: RF 共鳴吸収法による蓄積イオンの特性測定, pp.965-969, 1985
- [4] 依田潤: トラップされたイオンの電氣的・光学的検出, pp.4-7, 1993
- [5] 荒巻光利: トロイダル RF イオントラップ中のイオン閉じ込め時間測定, pp.284-289, 2000