

線型 RF イオントラップによる荷電粒子閉じ込めの基礎実験

The basic research for charged particles confinement with a linear RF ion trap

○木方康一郎¹, 長田康志², 渡部政行³
Koichiro Kihō¹, Yasushi Nagata², Masayuki Watanabe³

Ion trap is one of experimental devices for confinement of charged particle (ion) by the combination of an electric and a magnetic field. Trapped ions can be cooled until extremely low temperatures by using laser cooling. In this condition, the ion and electron clouds trapped by ion trap can regard as an ion cluster, which exists on the surface of white dwarf star or neutron star in nature. The strongly coupled plasma can also be formed in the laboratory plasma. Physics of strongly coupled plasma has not been known well. The ion trap experiment has been expected to develop a new physics of the quantum science. Finally ion trap has been researched to apply quantum computer because the movement of ions allow controlling perfectly. In this poster, the setup and construction of a linear RF ion trap and initial experimental results of the trapped ions are presented.

1. はじめに

1-1. イオントラップの研究背景

電磁場の作用によって荷電粒子を空間のある狭い領域に保持する装置をイオントラップといい、1923年の Kingdon による研究がイオントラップ研究の始まりとされている。現在多く用いられている RF トラップ (Paul トラップ) はドイツ人物理学者の W.Paul の質量分析の研究によって開発されたイオントラップの一つである。分光などへの応用は 1960 年代後半から行われ、1970 年代後半にレーザー冷却等による低温化が可能になると荷電粒子の高分解能分光実験が急発展した。またアメリカ人物理学者の H.Dehmelt は Paul トラップを用いて原子物理実験の実験を行い、1989 年、この功績により W.Paul と共にノーベル物理学賞を受賞した。イオントラップはレーザー冷却等を使用することで、さらに極低温状態でイオンを閉じ込めることが可能になる。この閉じ込められたイオンは周波数標準への応用や量子的な振る舞いを行うことから、量子コンピュータへの応用が検討されている。

本研究室では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。将来的には強結合プラズマを生成・捕捉し、その基礎特性を調べたいと考えている。強結合プラズマとは荷電粒子間のクーロンエネルギーと荷電粒子の運動エネルギーの比 Γ が 1 よりも大き

$$\Gamma = \frac{\text{クーロンエネルギー}}{\text{運動エネルギー}} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 a k_b T}$$

い状態で、荷電粒子相互のクーロン力が全体で釣り合った結果、原子からなる結晶のように並んで静止した状態であるクーロン結晶を形成する。古典統計に従う場合、低密度プラズマでのクーロン結晶の実現は困難であるが、レーザー冷却等により荷電粒子を極低温状態にすることにより可能になるとされる。さらにはプラズマの相転移を自在に操作することも可能であるため、イオントラップは強結合プラズマの特性を調べるのに適している装置であると思われる。現段階の目的としては同装置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。

1-2. イオントラップの種類

荷電粒子の閉じ込めには通常 2 種類の場合を用いる。静電場および静磁場を用いて粒子を捕捉する方式をペニングトラップ (Penning trap) と呼ぶ。磁場中を運動するイオンは磁力線から中心力を受け、その結果、磁力線に巻きつくように運動する。この力に加え、磁力線方向の閉じ込めとして静電場によって荷電粒子を制御する。つまり、荷電粒子にサイクロトロン運動とマグネトロン運動を行わせることにより、空間的な閉じ込めを可能とする。よって荷電粒子は振動の少ない、すなわち運動エネルギーの低い状態での閉じ込めが可能である。しかしながら、荷電粒子を安定に閉じ

1: 日大理工・院・量子 Graduate School (M) of Science and Technology, Nihon University

2: 日大理工・学部・物理 College of Science and Technology, Nihon University

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

込めるためには 1T 程度の磁束密度が必要なため比較的大きな装置が必要となる。

もう一つは交流電場と静電場を用いる方式の RF トラップである。図 1 に示すような時間的に変動する鞍型ポテンシャルを形成することによって荷電粒子をトラップ電極の中心部に閉じ込めることを可能にする。交流電場がつくる場によって荷電粒子の振動が大きくなるが、装置がペニングトラップに比べて小さく、かつ簡単に荷電粒子を閉じ込めることが可能である。

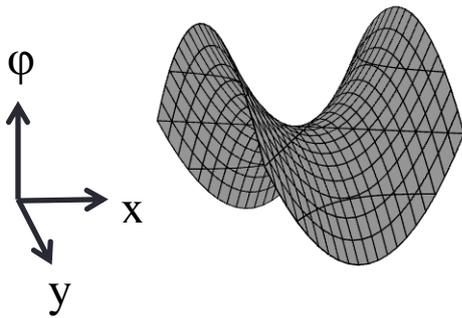


Figure1: Potential formed by a linear RF trap.

本研究では、より強結合プラズマへの応用が期待でき、イオンを閉じ込めるための電極構造が比較的簡単な RF トラップを基にした線型 RF トラップを用いた荷電粒子の捕捉実験を行っている。(図 2 参照)

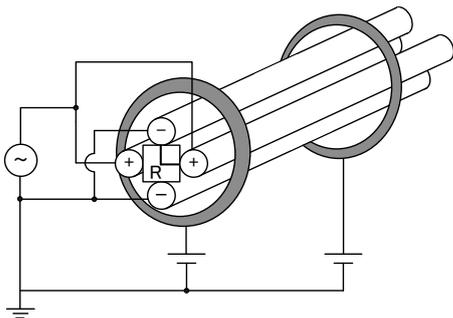


Figure2: Schematic drawing of a linear RF trap.

2. 実験装置及び実験方法

本実験では、閉じ込める荷電粒子の生成源としてガスと金属の 2 種類を用いる予定である。ガスは希ガスのアルゴン(Ar)とキセノン(Xe)を、また金属はアルカリ土類金属のマグネシウム(Mg)を用いる。それぞれのガスおよび金属をイオン化する方法としては、ガスの場合は装置内を真空にしてガスを封入する。また、金

属の場合は装置内に金属からの蒸気を送り込み電子ビームを用い電離させる予定である。測定方法として、冷却 CCD カメラを用いての撮影と電氣的共鳴法による観測を試みている。それらの結果について講演にて報告する。

3. 電氣的共鳴法

本実験では捕捉された荷電粒子を観測する方法の一つとして電氣的共鳴法という手法を検討している。電氣的共鳴法とは閉じ込められたイオンの固有振動に相当する共鳴吸収を観測することによって、荷電粒子の種類や数に対応する信号を得る方法である。得られた吸収波形から荷電粒子の総数を求めることできる。

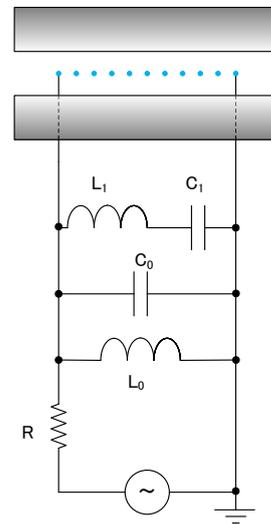


Figure3: Schematic circuit diagram of electric resonant method.

L_0 と C_0 で構成される並列共振回路は荷電粒子の固有振動に共振するように調節する。また、 L_1 と C_1 は閉じ込め用の RF の影響を除去するための直列 LC 回路である。

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, 名古屋大学図書
- [2] 林康明, クーロン結晶と強結合プラズマ, プラズマ・核融合学会 (1996)
- [3] 桜井誠, イオントラップー最近の実験ー, 核融合研究 (1991)