

EXPERIMENTAL STUDY OF BEAM PHYSICS WITH ION PLASMAS CONFINED IN A LINEAR PAUL TRAP

Shunsuke Ohtsubo, Kiyokazu Ito, Kenji Izawa, Hiroyuki Higaki, Masao Kuriki, Hiromi Okamoto
Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530

Abstract

The dynamics of ion plasmas confined in a linear Paul trap is physically equivalent to that of charged particle beams. The linear Paul trap system for experimental study of beam physics has been developed at Hiroshima University. In this paper, we outline our linear Paul trap system, and report a new observation system to measure the transverse distribution of the ion plasma. In addition, the effects of space-charge on nonlinear resonance are investigated through systematic experiments by using a trap system.

イオンプラズマを用いたビーム物理実験

1. はじめに

加速器中を走る荷電粒子ビームが大強度化、低エミッタンス化すると、クーロン相互作用に起因する空間電荷効果が顕在化する。従って、ビームを更に高性能化するには空間電荷効果がビームの運動に与える影響について熟知しておく必要がある。

空間電荷効果の影響は、これまで、主に数値計算により研究が行われてきた。しかし、クーロン相互作用を考慮したシミュレーションは計算時間の都合上、近似を用いる必要があり、その精度には自ずと限界がある。一方、実際の加速器を用いたビーム実験ではラティスやビームのパラメーターを容易に変更することができないため、広範囲にわたる系統的な実験は困難である。

我々は線形ポールトラップに閉じ込めたイオンプラズマを用いて空間電荷効果がビームの運動に与える影響を実験的に研究する手法を提案し^[1]、ビーム物理実験に最適化した線形ポールトラップシステムの開発を行って来た^[2-4]。ポールトラップを用いた実験には、

- 1) 高密度のイオンプラズマを生成できる。
- 2) ラティス構造を容易に変えられる、
- 3) 小型で安価である。

などの利点がある。ここでは、我々が開発してきたイオントラップシステムの概要とその特性、またイオンプラズマを用いた非線形共鳴実験の結果について報告する。

2. ビーム物理用イオントラップシステム

線形ポールトラップは平行に置かれた4本の円柱電極（四重極電極）のうち対向する2本の電極には同位相の、残りの2本の電極には逆位相の高周波電圧を加えることで断面方向の実効的な閉じ込め場を形成する（加速器の強収束の原理と同じである）。これに加えて、四重極電極の端に設置した端板電極に直流電圧を印加することで軸方向の閉じ込め場

形成する。

我々が開発したビーム物理実験用に最適化した線形ポールトラップシステム SPOD(Simulator for Particle Orbit Dynamics)を図1に示す。SPODの特徴は、二つのイオントラップを直列に繋ぎ、それぞれに異なる役割を持たせている点にある。図左側の領域は、イオンを生成、捕捉するイオン化領域(Ion Source)である。ISで生成したイオンを右側の実験領域(Experiment Region)へと移送し、ここで実験・観測を行う。ISとERを区切っているGate領域も四重極電極にすることで、高いイオン位相効率を実現している。このようにISとERを分割した主な理由は、1) ERをイオン化の際の汚染から保護する、2) Q-massフィルタの原理により捕捉イオンを単一化するためである。

今回はおもにIS領域のみを使って実験を行った。典型的な実験手順を以下に記す。線形ポールトラップは $\sim 10^{-8}$ Pa程度の真空容器中に設置してある。各四重極電極に振幅 $Vrf \sim 100$ V, 周波数 $f = 1$ MHzの高周波電圧を、GateとIS側の端板電極(CapA)には直流電圧 $U_{end} = 30$ Vを印加してイオン捕捉のためポテンシャルを形成しておく。次に真空容器内に中性のArガス ($10^{-7} - 10^{-5}$ Pa) を導入する。電子ビーム

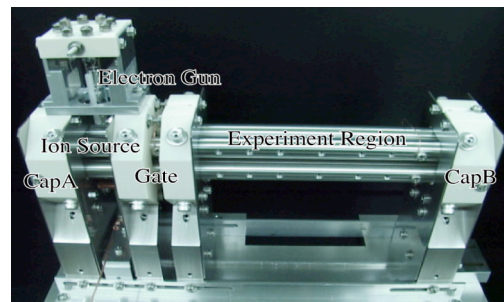


図1 ビーム物理実験用線形ポールトラップ。内接半径 5mm, 四重極電極半径 5.57mm, イオン化領域 50mm, ゲート領域 10mm, 実験領域 100mm。

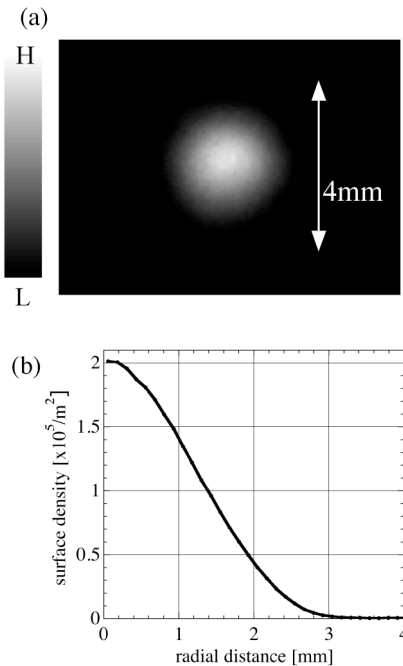


図 2 イオンプラズマの断面方向分布. (a) CCDカメラで撮影した蛍光分布. (b) プラズマの径方向密度分布.

($\sim 120\text{eV}$, 0.1mA) を IS 領域へと 1 秒間入射し, IS 領域内で Ar ガスをイオン化・捕捉する. 捕捉イオン数は Ar ガス圧や電子ビーム電流により制御する. イオンプラズマを IS 領域に適当な時間捕捉し, その後, イオンプラズマをイオントラップ外に設置した検出器へと排出することで, プラズマの状態を計測する.

3. 捕捉プラズマの主な特性

これまで, プラズマの検出器には ER 側の端板電極 (CapB) の外に設置した Faraday Cup (FC) を用いて来た. FC はイオンプラズマの電荷量を正確に測定できるが, その空間分布を測定することが出来なかった. しかし, ビーム物理研究を進める上で断面方向の実空間分布測定は重要である. 今回, イオンプラズマの実空間分布を測定するため, 蛍光面付き MCP と CCD カメラからなる計測系を新たに構築した^[4].

蛍光面付き MCP はイオントラップの CapA 側 (FC とは反対側) に設置してある. MCP へイオンプラズマを排出することで, イオンプラズマの断面方向分布を電子分布へと変換し, さらに蛍光面により光量分布へと変換する. この光量分布を大気中に設置した 8bit の CCD カメラで検出・保存する. このシステムにより高感度 (~ 4 個/pix²), 高い空間分解能 ($\sim 40\ \mu\text{m}$) でイオンプラズマの断面方向分布計測が可能になった.

このシステムで測定したイオンプラズマの断面方向密度分布を図 2(a) に示す. イオン化終了後 IS 領域に 10ms 閉じ込めた後の断面分布であり, イオン数は 1.7×10^6 個である. 閉じ込めのための高周波電圧は $V_{rf} = 30\ \text{V}$ でこれは, ベータトロンベアチューンに換算すると $\nu = 0.105$ 程度である. 図 2(b) は方位角

向に平均化することで決定した半径方向分である. 半径方向分布はほぼガウス分布になっており, 準定常状態にあると言える. 定常状態を仮定すると断面方向の実空間広がりから断面方向の温度を評価することができる. このトラップに捕捉されたイオンプラズマ典型的な特性について表 1 にまとめる.

表 1 イオンプラズマの代表的な特性

イオン種	Ar ⁺
粒子数	$\sim 10^7$
軸方向長さ	$\sim 30\ \text{mm}$
径方向平均二乗半径	$\sim 1.5\ \text{mm}$
軸方向温度	$0.2 \sim 0.5\ \text{eV}$
径方向温度	$0.2 \sim 0.5\ \text{eV}$
ライフタイム	$0.5 \sim 2\ \text{sec}$

4. 非線形共鳴実験

加速器中を走行する荷電粒子ビームの安定性に深刻な影響を与える要因の一つに, 外場とビームの間に生じる共鳴不安定性がある. 共鳴不安定性に対する空間電荷効果の影響はイオントラップシステムによるビーム物理研究の典型的な例の一つである.

SPOD を用いて非線形共鳴不安定性の粒子数依存性を実験的に検討した. トラップ実験においてベータトロパアンチューン ν を変化させた. すなわち, 断面方向の収束力を変化させるには高周波電圧の電圧 V_{rf} を変化させればよい. 非線形共鳴の誘起には電極の構造に起因する閉じ込め場の高次成分を利用する.

ベアチューンに対する捕捉粒子数の依存性を図 3 に示す. 縦軸はイオン化終了後 10ms 経過した後にイオントラップ内に残っていた粒子数を表している. 色の違いはイオン化の際の電子ビーム電流の違いを表している. まず黒色の線に注目する. $\nu < 0.13$ では ν の増加に伴い捕捉粒子数が増加していく. 一方, $\nu > 0.13$ では, 幾つかの急激な粒子の損失があるが, 基本的には ν の増加に伴い粒子数は減少していく.

ν の変化に伴う比較的ゆっくりとした粒子数の変化は主にベータトロン振幅の変化に起因すると考えられる. SPOD では電子ビームをイオントラップの軸に対し垂直に入射するため, イオンは初期の状態では断面方向一杯に広がっている. ν が大きすぎても, 小さすぎてもベータトロン振幅は大きくなるため, 電極等に当たって損失する粒子は多くなる. 従って, 適当な ν の値で捕捉できる粒子数は最大となる. また ν が大きいとき, 即ち V_{rf} が大きいときには, その影響で IS 領域内に入射される電子ビーム電流が減少するため初期に生成できるイオン数が減少する. このことも, $\nu > 0.13$ で捕捉イオン数が減少する原因の一つと考えられる.

一方, この比較的ゆっくりとした粒子数の変化とは別に, 急激な粒子の減少も観測される. これらの減少はその発生するチューンが単粒子軌道から予測される非線形共鳴の位置に近いことから, 非線

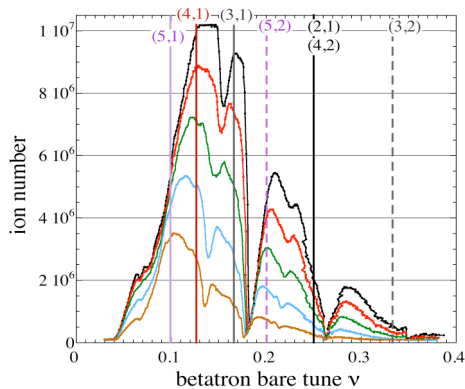


図3 非線形共鳴実験結果. 閉じ込めイオン数を5回変化し, チューンの変化によるイオン数を計測した. イオン数のチューン依存性を計測した. 実線, 破線はコヒーレント共鳴の共鳴条件式(2), $\Delta\nu = 0$ の場合の (m, n) を表している.

形共鳴によりイオンプラズマが不安定化したために発生したと考えられる.

しかし, 2次元の計算から予想される共鳴の位置に比べ, 実験で観測される共鳴位置は右側にシフトしている. このシフトの原因を特定するために, 実際の電極構造を考慮したポテンシャル分布を用いて3次元の粒子追跡シミュレーションを行った. このとき粒子間相互作用は無視したが, それ以外の実験条件は出来る限り正確に再現した. シミュレーションでは共鳴による粒子損失が二次元近似からの予測位置とほぼ重なっていた. 従って実験で観測された共鳴位置のシフトは電極構造による物では無いと結論できる. 共鳴位置は全て右側, 即ち ν が大きくなる方向にシフトしている. また, 粒子間相互作用を無視したシミュレーションではシフトは再現されなかった^[3]. 以上のことから, このシフトは空間電荷効果によると結論づけられる.

この結論を確認するため, 粒子数を変化させた時のチューンシフト量の変化を計測した. 予想どおり, 粒子数の減少に伴いチューンシフトの量も減っていく. 様々な粒子数で行った実験に対し, 共鳴中心(粒子損失が最大となる点)のチューンと単粒子運動のチューンの比, 即ち, チューン降下率 η を図4にまとめる. チューン降下率は最大で0.8に達する.

ここで, $\nu = 0.13 \sim 0.17$ と $\nu = 0.21 \sim 0.23$ の共鳴に注目する. この二つの共鳴が, 個々の粒子がそれぞれ閉じ込め場と共鳴する「インコヒーレント共鳴」と考えると, その共鳴条件は,

$$m(\nu - \Delta\nu) \approx n \quad (1)$$

となる. ここで m は方位角方向の次数, n は共鳴の次数, $\Delta\nu$ はインコヒーレントチューン降下である. 従って, それぞれ $(m, n) = (8, 1)$, $(5, 1)$ になる. 一般的に m は小さい方が強い共鳴を誘起する. しかし, 図3では次数の高い $m = 8$ と考えられる共鳴の粒子損失が多く, 強い共鳴が起きている.

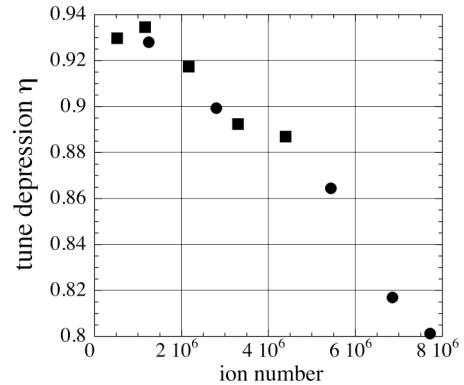


図4 チューンディプレッションの評価. ■は $\nu \approx 0.21 \sim 0.23$, ●は $\nu \approx 0.13 \sim 0.17$ において観測されたイオン損失から見積もった.

一方, チューン降下率が非常に大きいことから, これらの共鳴はクーロン力で相互作用する粒子群全体が集団的に不安定化する「コヒーレント共鳴」の可能性はある. その共鳴条件は,

$$m(\nu - A_m \Delta\nu) \approx n/2 \quad (2)$$

である^[5]. A_m は1より小さい正の定数である. この場合, 前述の共鳴の次数はそれぞれ $(4, 1)$, $(5, 2)$ と考えることができ, m が小さい方の粒子損失は多い. 即ち次数の低い共鳴が強い, という共鳴現象の一般的な性質とも一致する. このことも, これがコヒーレント共鳴である可能性を示唆している. これらの共鳴がコヒーレント共鳴かインコヒーレント共鳴かを決定するには更なる実験と解析が必要である.

5. まとめ

ビーム物性研究用に開発した線形ポルトラップのイオン閉じ込め特性について実験を行った. 今回プラズマ分布計測用に導入したMCPとCCDカメラを用い断面方向分布を測定した.

このイオントラップシステムを用いて, 非線形共鳴現象に対する空間電荷効果の影響を系統的な実験により検討した.

参考文献

- [1] H. Okamoto, Y. Wada and R. Takai: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 485 (2002) 244.
- [2] R. Takai, H. Enokizono, K. Ito, Y. Mizuno, K. Okabe and H. Okamoto: Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) 5332.
- [3] R. Takai, K. Nakayama, W. Saiki, K. Ito and H. Okamoto: J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 014802.
- [4] K. Ito, K. Nakayama, S. Ohtsubo, H. Higaki, and H. Okamoto: to be published in Jpn. J. Appl. Phys. (2008).
- [5] H. Okamoto and K. Yokota: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 482 (2002) 51.