

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19740344
 研究課題名 (和文) 純イオンプラズマによる加速器ビームの非線形共鳴に関する実験的研究
 研究課題名 (英文) Experimental study of non-linear resonance on beam with ion plasmas
 研究代表者
 伊藤 清一 (ITO KIYOKAZU)
 広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教
 研究者番号：70335719

研究成果の概要：

本課題では、線形ポルトラップに捕捉した高密度のイオンプラズマを用いて大強度ビームの共鳴現象に空間電荷効果がどのような影響を与えるかを実験的に研究することを目的とした。実験に先立ち、断面方向密度分布計測システムの開発を行った。次にこのシステムを用いて線形、非線形共鳴実験を行ない、空間電荷効果が影響していると思われる幾つかの現象を観測することに成功した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 2,500,000 | 0 | 2,500,000 |
| 2008 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 240,000 | 3,540,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ基礎，非中性プラズマ，ビーム物理，共鳴，空間電荷効果，

1. 研究開始当初の背景

加速器科学の発展に伴い荷電粒子ビーム (以下ビーム) の大強度化，低エミッタンス化が進むに連れてその利用分野は拡大している。現在では物理，工学，化学，生物学，医学等の幅広い分野で利用されており，その結果，更なるビームの大強度化，低エミッタンス化が望まれている。

ビームの大強度化，低エミッタンス化が進むと，荷電粒子間のクーロン相互作用すなわち「空間電荷効果」に起因する「非線形集団運動」が顕在化する。従って，次世代の高性能加速器を設計するためには，空間電荷効果

による複雑なビームの運動を考慮する必要があり，ビーム物性研究とそれに対するプラズマ物理応用の重要性が認識されつつある。

しかし，ビームは相対論的速度で運動しているため，その性質を高い精度で直接調べることは難しい。また，完成した加速器では，ビームを収束，偏向させる外場の形状 (電磁石の配置や強さ) やビーム強度，エミッタンス等のパラメータを広い範囲で変化させることも難しい。そのため，現実の加速器を用いてビーム物性を実験的に研究することは困難であり，数値計算に頼らざるを得ないのが現状である。しかしながら，数値計算において

も計算速度やメモリサイズ等、計算機の性能による制限のために、ある種の近似を導入せざるをえず、その精度には自ずと限界がある。

このような状況の中、岡本（広島大学）等により非中性プラズマを用いてビーム物性を実験的に研究する方法が提案された。その原理は、重心系で観測したビームの運動と電子またはイオンのみで構成される非中性プラズマの運動が空間電荷効果まで考慮しても物理的に等価であることを基盤とする。

非中性プラズマ（ \approx ビーム）の運動に対する空間電荷効果の影響は、外場と空間電荷効果による場（自己場）の関数であり、つまりは「外場の形状」、「非中性プラズマの密度と温度」の関数となる。即ち、系統的に実験を行うためにはこれらのパラメータを制御する必要がある。そこで、研究代表者は岡本らとビーム物理研究用に最適化した非中性プラズマトラップ装置の開発をすすめてきた。その特徴を以下に挙げる。

(a) 加速器ビームの収束に使われる四重極磁場と対応が付けやすい「線形ポルトラップ」を使用。

(b) 広範囲な温度制御が可能な「レーザー冷却」の導入。

(c) 実空間分布、速度空間分布を非破壊的に測定可能な「レーザー誘起蛍光 (LIF) 法」を用いた観測系。

ただし、レーザー冷却法や LIF 法を適用出来るイオン種は限られている。その中から、比較的安価な半導体レーザーを利用できる $^{40}\text{Ca}^+$ を捕捉イオン種として採用している。そのため、

(d) $^{40}\text{Ca}^+$ を安定かつ大量に得ることが難しく、実空間での密度を上げることが困難である。

(e) 効率的な冷却のためにレーザーは線形ポルトラップの中心軸に沿って入射する。一方、誘起蛍光観測はレーザー（中心軸）に直交する方向から行うため、断面方向の（実空間）密度分布を直接的に観測することが難しい。

といった欠点も存在する。そこで、これらの欠点を補い、現有システムと相補的に実験を行うための新しいシステムを考案するに至った。

2. 研究の目的

本課題の第一の目的は、空間電荷効果の影響を実験的に確認できる程度の「高密度イオンプラズマを捕捉できる線形ポルトラップシステム」と「断面方向のイオン密度分布を高精度で測定できる観測システム」を構築することである。このシステムは次の方法で実現する。

捕捉イオン種は、簡便かつ安定して大量に生成、捕捉することが可能なガスをイオン源

とし、かつ $^{40}\text{Ca}^+$ とほぼ同じ比電荷をもつ $^{40}\text{Ar}^+$ とする。

密度分布の観測は、捕捉したイオンプラズマを線形ポルトラップの軸方向に設置した蛍光面付き Microchannel Plate (MCP) へと排出しその発光強度分布を CCD カメラで撮影することにより行う。この方法は破壊的であるが、プラズマの断面方向の空間分布を高い空間分解能で直接観測することが出来る。

第二の目的は、このシステムを用いて典型的なビーム不安定現象の一つである「非線形共鳴」と、それに対する空間電荷効果の影響を実験的に検討することである。非線形共鳴現象とは周期的に変化する外場の空間的な高次成分（非線形成分）と捕捉粒子が共鳴を起こす現象を指す。非線形共鳴が起こると粒子が損失するため、加速器やポルトラップではこの共鳴条件を外すように動作点を設定する。

3. 研究の方法

図 1 に本実験で使用した実験装置の概略図を示す。この線形ポルトラップはビーム物理研究用に最適化されており、イオン捕捉部が Gate 電極によりイオン化領域 (IS) と実験領域 (ER) に分かれているのが特徴である。イオン捕捉部の内接円半径は 5 mm で、IS, Gate, ER の長さはそれぞれ 50mm, 9mm, 100 mm である。全体は 10^{-8} Pa 程度の高真空中に納められている。

ここに $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa 程度の Ar ガスを導入する。Ar ガスに 1 秒程度電子ビームを照射して Ar^+ を生成し、これを IS 領域に捕獲する。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 領域で典型的には 10ms 捕獲しその間に共鳴不安定性を誘起する。非線形共鳴の誘起には電極構造に起因する外場の高次成分を利用する。その後、捕捉イオンをファラデーカップへと排出しその総量を測定する。

IS 領域の反対側に本研究課題で新たに導入した断面方向の密度分布測定システムが

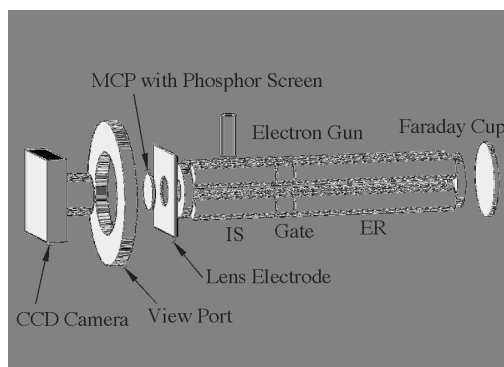


図 1 実験装置概略図

設置されている。捕捉したイオンプラズマを MCP へと排出し、二次電子分布へと増幅・変換する。さらに、この電子分布を蛍光面で光量分布へと変換し CCD カメラで記録する。光量分布からイオンプラズマの断面方向分布を評価する。なお、蛍光面はファラデーカップとしての機能も有しており、全二次電子数も同時に計測することができる。

4. 研究成果

(1) 断面方向分布計測システムの構築

イオンプラズマの断面方向分布のような二次元のデータを効率よく取得するためには画像計測が有効である。単純にはイオンプラズマを加速して蛍光面で発光分布へと変換すればよい。しかしながらイオンから蛍光への変換効率は電子のそれに比べ非常に低い。本課題では MCP を使用してまず電子分布へと変換した後、これを蛍光面により光量分布へと変換することにした。

MCP を使用することで、殆どのイオン種に対し、高い感度を得られる。しかし、よく知られているように MCP の増幅度は入力が大きくなると低下する。従って、そのままではイオン数と発光量の間には線形性はなく、計測の定量性を確保できない。

まずは、MCP 増幅度の非線形性を補正するための校正感度曲線を決定し、絶対校正を行った。図 2 に MCP に入射したイオン数と蛍光面の発光量の関係を示す。補正前 (■) は、イオン数が増加すると光量が飽和していく。これが MCP 増幅度の飽和を示している。しかし、適切な補正を行うことで (□)、イオン数と光量の間には線形性を確保することができる。この線形性は局所的にも成立するので、光量分布をイオンプラズマの密度分布へと変換することができる。

空間電荷効果、捕捉時の横方向振動の影響、イオンを MCP へと加速する外場による静電レンズ効果により、イオンプラズマが線形ポルトラップを出てから MCP へ到着するまでに、その分布が変化する。この中で空間電

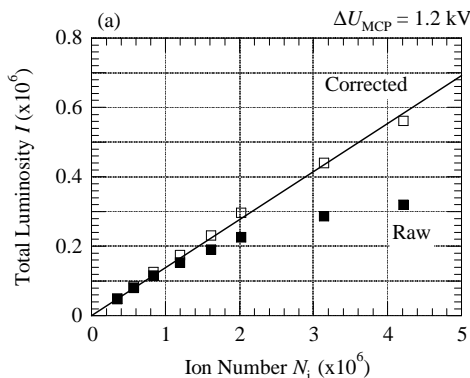


図 2.イオン数と光量の関係.

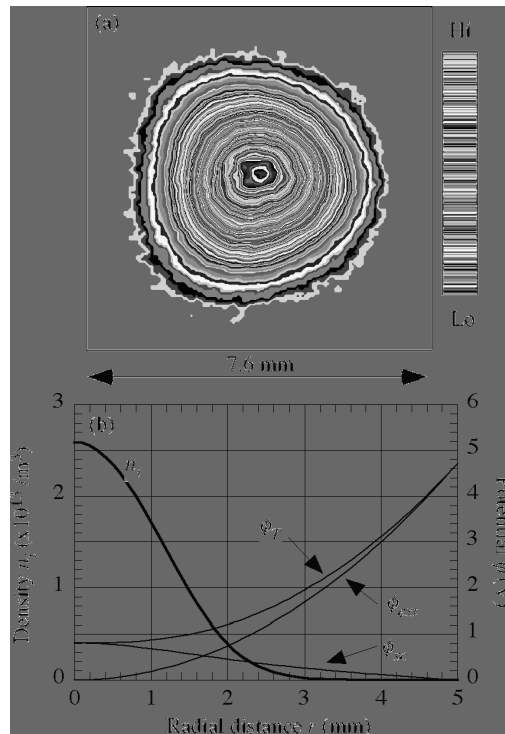


図 3.イオンプラズマの断面方向分布

荷効果の影響は他の二つに比べ小さいので無視できる。そこで、他の二つの影響をシミュレーションにより評価した。その結果、MCP 上での分布は IS 内での分布と相似の関係にあることを確認した。即ち、観測された MCP 上の分布を断面方向に拡大、縮小するだけで、容易に IS 内の分布を再構成することができる。

図 3(a)に画像計測システムにより得られた、典型的なイオンプラズマの分布を示す。全イオン数は 5×10^6 個である。色の濃淡が密度に対応する。画像上の距離は IS 中心部での距離に換算してある。中心部で密度が高い円柱状の密度分布をしていることがわかる。

図 3(b)に密度分布の径方向分布を示す。密度分布は RMS 半径 1.5mm のほぼガウシアンとなっている。断面方向の密度分布が得られたので、二次元近似の基でポテンシャルの径方向分布を導出することができる。図 3(b)に実効ポテンシャル ϕ_{ext} 、自己場 ϕ_{sc} 、その重ね合わせ ϕ_T を示す。外場による閉じ込めポテンシャルが自己場により 20%程浅くなっていることが分かる。

このように、画像計測を用いると断面方向の密度分布だけでなく、ポテンシャル分布や断面方向の温度、後述するチューンデプレッション等を測定することができる。この画像計測システムは「ビームハロー形成の研究」等、イオンプラズマを用いたビーム物理研究の多くの面で非常に有用であると考えられる。

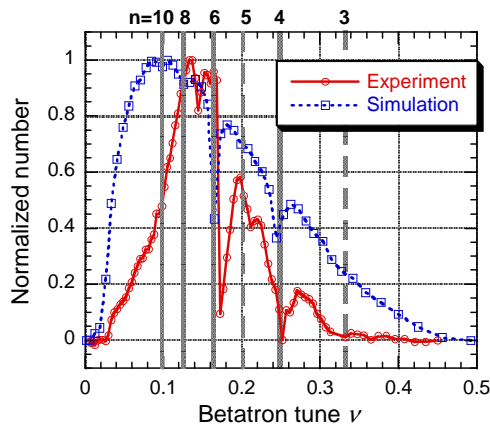


図 4.非線形共鳴による粒子損失

(2)非線形共鳴実験

線形ポルトラップに捕捉されたイオンは断面方向に振動をする。この振動は、高周波電圧の周波数等しい周波数をもつが振幅の小さな微小振動と、高周波電圧の周波数より低い周波数で振幅の大きな永年振動とに分けられる。この永年振動をビーム物理ではベータトロン振動と呼び、ビームの安定性を表す重要なパラメータとなっている。ベータトロン振動が外場の高調波成分と共鳴することにより非線形共鳴が誘起される。

高密度イオンプラズマのベータトロン振動数は単粒子のベータトロン振動数よりも低くなる。前述のようにイオンプラズマの自己場が外場をキャンセルするためである。ビーム物理分野ではこのずれ（チューンデプレッション）を空間電荷効果の強さの指標として用いている。チューンデプレッションは高温・希薄な状態では1であり、低温・高密度の極限では0となる。

比較的低密度の場合は、空間電荷効果は考慮するが基本的には個々の粒子運動で説明できるインコヒーレント共鳴が支配的となる。一方、ある程度高密度になるとプラズマと同様に空間電荷効果を介して集団的な運動を始める。その場合、集団的な運動が外場と共鳴するコヒーレント共鳴が誘起される。理論的

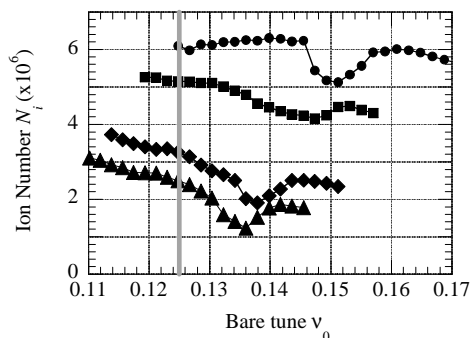


図 5.チューンシフトの粒子数依存性

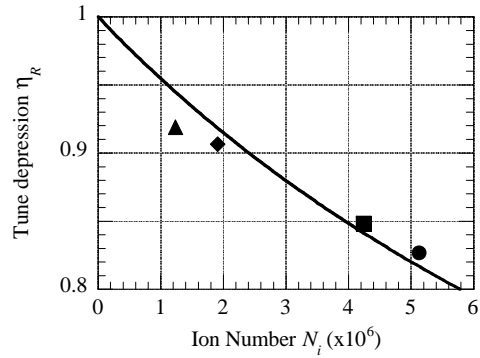


図 6.チューンデプレッションの粒子数依存性

な予測によると、両者のチューンデプレッションはプラズマ密度に対する依存性がわずかに異なる。

図 4 に IS 領域の残存イオン数のベータトロンチューン ν_0 (=単粒子のベータトロン振動数/rf の振動数) に対する依存性を示す。縦軸は観測された粒子数の最大値で規格化してある。○は実験値を表す。特定の ν_0 の近辺で粒子数が急激に減少している。これらの減少はその発生する ν_0 が単粒子軌道から予測される非線形共鳴の位置 (図中に実線で示す) に近いことから、イオンプラズマが非線形共鳴により不安定化したために発生したと考えられる。共鳴の位置が全体に右側にシフトしているのは空間電荷効果によるチューンシフトが原因と考えられる。

このシフトが空間電荷効果以外の、例えば電極構造に起因したものである可能性もある。そこで、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。シミュレーションに置いては実験条件を出来る限り正確に再現したが、粒子間相互作用は無視している。結果を図 4 中に □ で示す。シミュレーションでは共鳴による粒子損失が発生する ν_0 が二次元理論から予測される位置とほぼ重なっている。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由来するものではないこと結論できる。

シフトが空間電荷効果に由来するものであることを確認するために、粒子数を変化してチューンシフトの量を計測した。結果を図 5 に示す。ここでは比較的損失の少ない $\nu_0=0.125$ 付近の共鳴に注目した。これはインコヒーレント共鳴では $8 (=1/0.125)$ 次の共鳴であり、コヒーレント共鳴では $4 (=0.5/0.125)$ 次に対応する。粒子数の増加に伴い共鳴の位置が右へとシフトしていく。チューンシフトは粒子数に依存していることは明らかであり、空間電荷効果により生じていると結論づけられる。

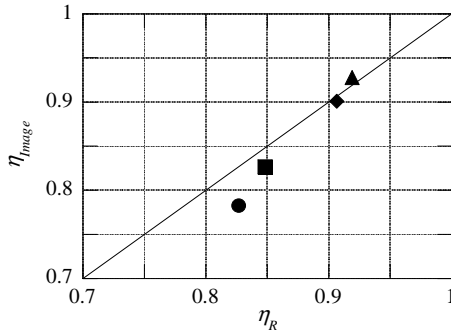


図 7. 分布から決定したチューンデプレッションと共鳴のずれから決定したチューンデプレッションの比較

最も粒子数が減少した時のチューン ν' と単粒子軌道（コヒーレント共鳴の場合は低密度の極限）により予想される共鳴周波数 0.125 から、チューンシフトは $\Delta\nu = \nu' - 0.125$ であり、チューンデプレッションは $\eta = 0.125 / \nu'$ となる。図 6 にチューンデプレッションの粒子数依存性をまとめる。記号は実験値を示し、実線は幾つかの現実的な仮定の下で計算されたインコヒーレントチューンデプレッションを表す。イオン数の増加に伴い、チューンデプレッションは大きくなる。実験で得られたプラズマのチューンデプレッションは最大で 0.8 程度である。通常の加速器に比べ非常に大きい。これは空間電荷効果の研究にイオンプラズマを用いる利点の一つである。

今回観測された共鳴がインコヒーレント共鳴に由来するのか、コヒーレント共鳴によるのかは非常に興味深い問題であるが、現状ではまだ確定できていない。実験値とインコヒーレントチューンデプレッションの計算値が比較的良く一致すること、また共鳴の幅が広いことからインコヒーレント共鳴ではないかと考えている。一方でこの次数ではインコヒーレントチューンデプレッションとコヒーレントチューンデプレッションの差が小さいと予想されることや、8 次のインコヒーレント共鳴にしては損失が多すぎるなどから、コヒーレント共鳴の可能性も捨てきれない。いずれにせよこれを確定するためにはさらなる検討が必要である。

チューンデプレッションは断面方向の密度分布からも決定できる。画像計測で得られた密度分布から評価したインコヒーレントチューンデプレッションと共鳴のずれから決定したチューンデプレッションの関係を図 7 に示す。両者はよく一致しており、画像計測によりチューンデプレッションを決定できることが分かる。共鳴を使う方法ではチューンデプレッションを直接的に測定することができるが、共鳴の付近にしか適用できないという欠点がある。しかし、画像計測にはそのような制限がない。これも画像計測の大き

な利点である。

(3) 摂動場印加による加速器構造の再現

円形加速器では収束・発散の組み合わせからなるセル（線形ポルトラップの rf 一周期に相当）が複数個集まって超周期構造を作る。従って、加速器ではセルと超周期構造のそれぞれに起因する共鳴現象が発生する。

本研究では閉じ込め用 rf 周期の整数倍の摂動場を加えることでこの超周期構造を線形ポルトラップで再現することに成功した。その結果、通常の線形ポルトラップでは共鳴が生じない条件下でも非常に強い共鳴が観測された。プラズマ密度が低い場合には、この共鳴条件は加速器の単粒子軌道モデルからの予測とよく一致する。一方、プラズマの密度が高い場合には、イオンプラズマの集団運動に起因すると考えられる共鳴も観測された。これはイオンプラズマによる大強度ビーム模擬実験が有用であることを示している。この成果は学術誌に投稿中である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① K. Ito, S. Ohtsubo, H. Higaki, K. Izawa, H. Okamoto, “Tune Depression of Ion Plasmas Observed in a Linear Paul Trap”, J. Plasma and Fusion Research Series, 査読有り, 掲載決定.
- ② K. Ito, K. Nakayama, S. Ohtsubo, H. Higaki, H. Okamoto, “Determination of Transverse Distribution of Ion Plasmas Confined in a Linear Paul Trap by Imaging Diagnostics”, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有り, Vol. 47 (2008), pp. 8017-8025.

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 岡本宏己, “小型プラズマトラップを使った大強度ハドロンビームの共鳴不安定性に関する実験”, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009/3/28, 立教大学 池袋キャンパス.
- ② 伊藤清一, “非中性プラズマによる大強度ビーム模擬実験”, プラズマ科学シンポジウム 2009/第 26 回プラズマプロセッシング研究会, 2009/2/2, 名古屋大学 豊田講堂シンポジオン.
- ③ K. ITO, “Tune Depression of Ion Plasmas Observed in a Linear Paul Trap”, ICPP2008, 2008/9/11, Fukuoka International Congress Center.
- ④ 大坪俊介, “Experimental Study of Beam Physics with Ion Plasma Confined in a Linear Paul Trap”, 第 5 回加速器学会年

- 会, 2008/8/6, 東広島市中央公民館.
- ⑤ 中山賢二, “線形ポルトラップに捕捉したイオンプラズマの断面方向分布測定”, 日本物理学会第 62 回年会, 2007/9/21, 北海道大学 札幌キャンパス.

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/beamphys/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 清一 (ITO KIYOKAZU)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教
研究者番号: 70335719

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者