

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740400

研究課題名（和文） 純イオンプラズマを用いたビームハロー形成過程の実験的研究

研究課題名（英文） Experimental study on evolution of a beam halo by an ion plasma

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（和文）：

線形ポールトラップに捕捉されたイオンプラズマと加速器中を伝搬する荷電粒子ビームは空間電荷効果による集団運動まで考慮しても等価となる。即ち、イオンプラズマにより加速器ビームの振る舞いを実験的に研究することが可能である。我々は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の開発を行ってきた。本課題では、線形ポー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加速器ビームにおけるハロー形成過程を実験的に研究することを目的とした。我々は、イオンプラズマに共鳴を誘起することで、イオンプラズマにおいてもハローが形成されることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

The collective motion of an ion plasma trapped in a linear Paul trap is equivalent with that of a charged-particle beam propagating through a linear transport line. Namely, the dynamics of the space-charge-dominated beam can be studied by using the ion plasma. At Hiroshima University, a linear Paul trap system "S-POD (Simulator for Particle Orbit Dynamics)" was developed to investigate various collective effects in beams. A purpose of this theme is experimental study on evolution of a beam halo by an ion plasma confined in a linear Paul trap. It was observed that an ion plasma could produce a large halo with induced resonance instability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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，空間電荷効果，ビームハロー

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子を加速した「荷電粒子ビーム」は物理実験用の道具として発明された。しかし、加速器科学が発展しビームの大強度化，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，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いる。ここでエミッタンスとは，ビームを構成する粒子群が位相空間中で占める体積のことである。

近年の加速器においてはビームの大強度化、低エミッタンス化が進んだ結果、荷電粒子間のクーロン相互作用すなわち「空間電荷効果」に起因する様々な問題が顕在化しつつある。換言すれば、ビームがプラズマ化しつつあると言える。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が支配的なビームの複雑な運動を考慮する必要がある、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、実際の加速器中を走行するビームを用いてビーム物性を研究するには様々な困難が伴う。特に大きな障害となるのは放射化の問題である。高速ビームの構成粒子が加速器の構造物に衝突するとこれを放射化してしまう。従って、ビームが不安定化したときの振る舞いを加速器実験で検証することは出来ない。そのため、ビーム物性の研究は数値計算に頼らざるをえないのが現状である。しかしながら、数値計算においては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、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が岡本(広島大学)等により理論的に示され、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。これを受け、研究代表者は岡本らと共に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進めてきた。

これまでに自己場が外場の20%に達する比較的高密度のイオンプラズマの生成・捕捉に成功している。またこの装置を用い、加速器ビームの典型的な不安定現象である「非線形共鳴」に対する空間電荷効果の影響を実験的に検討してきた。これに関しては多くの結果が得られており、そのうち一部は既に学術誌に掲載されるなど順調に成果が上がりつつある。

2. 研究の目的

ビームハローとはビームが加速器中を伝搬する間にその主たるビーム(コア)の周辺に希薄なビーム(ハロー)が成長・形成される現象であり、多くの加速器において観測されている。ハローはコアの数倍から10倍以上の大きさにまで成長する場合もある。ハローが大きく成長すると加速器の構造物に衝突し、これを放射化してしまう。そのため、ハローが何処まで成長するかを正確に予測し、その成長を如何に抑制するかは加速器を設計する上で非常に重要な問題となる。これらの予測には主に数値計算が用いられるが、

特に次世代の大強度加速器においては空間電荷効果はその予測を非常に困難にしている。本課題では、「ビームハロー形成過程とそれに対する空間電荷効果の影響を実験的に検証する」ことを目的とする。

ビームを構成する荷電粒子の一部が共鳴的にエネルギーを得てコアからはじき出されることによりハローは形成される。ハロー形成の種となりうる現象は多くあるが、本課題ではこれまでに研究を行ってきた(1)非線形共鳴と特に問題視されている(2)ミスマッチにその対象を限定する。

加速器(線形ポルトラップ)では断面方向の閉じ込めのための外場は空間的(時間的)に振動している。非線形共鳴とは、周期的に変化する外場と捕捉粒子が共鳴を起こす現象である。低次の非線形共鳴ではビームが強く不安定化し全体が損失してしまう。このような場合にハローを考えることはナンセンスである。しかし、共鳴条件の付近ではビーム全体に及ぶ不安定化は起きないが、一部の粒子は共鳴しハローを形成する。また、高次の共鳴ではビームが損失するほどには不安定化しないが、ビーム端部の粒子が共鳴を起こしハローが成長する可能性がある。特に、空間電荷効果が支配的になると共鳴条件がずれる、ビーム全体の集団的な運動と結合した新たな共鳴が現れるなど、予想しない場所でハローが形成される可能性がある。本課題では、これまでに得られた非線形共鳴に対する知見をもとに、非線形共鳴によるハロー形成に対する空間電荷効果の影響を実験的に検証することを目標の一つとする。

定常的なビーム(イオンプラズマ)の場合、その断面方向のサイズ(エンベロープ)は外場と同じ周期で振動する。ビーム物理では、このような状態を「整合(マッチ)」とよび、このときにはハローは成長しない。一方、外場の振動とエンベロープの振動が一致しない「不整合(ミスマッチ)」な状態では、プラズマ自己場の振動と粒子運動が共鳴する事でハローが成長することが知られている。そのため、通常はビーム源からのビームをマッチングさせてから加速器へと入射する。しかし、収束系のエラー場などがビームを「蹴る」ことでミスマッチが発生してしまう。また、いわゆるマッチング条件は粒子分布が特殊な形状をしている場合以外は、空間電荷効果を見逃した形でしか計算する事が出来ない。そのため、実際のビームではマッチングを完全に行うことは不可能である。本課題では、イオンプラズマにミスマッチによりハローを形成することも目標の一つとした。

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。この線形ポー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 程度の超高真空中に納められている。

各四重極電極にはあらかじめ断面方向閉じ込めのために $f_{rf}=1\text{MHz}$, 数十 V の rf 電圧を印加しておく。同様に端板及び Gate 電極には軸方向閉じ込めのために数十 V 程度の DC 電圧を印加しておく。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 IS 領域内に 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やミスマッチを誘起する。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 領域の反対側には蛍光面読み出し型の MCP が設置してある。MCP へと排出したイオン分布が二次電子分布へと変換・増幅される。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。

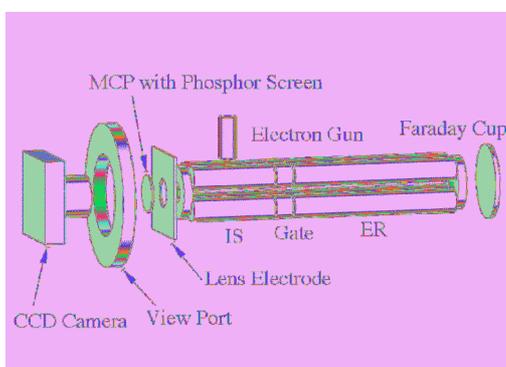


図 1. 実験装置概略図

4. 研究成果

(1) 共鳴によるハロー生成実験

線形ポールトラップに捕捉されたイオンは軸方向、断面方向ともに振動運動をする。ここでは、断面方向の振動に注目する。断面方向の振動は、高周波電圧と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

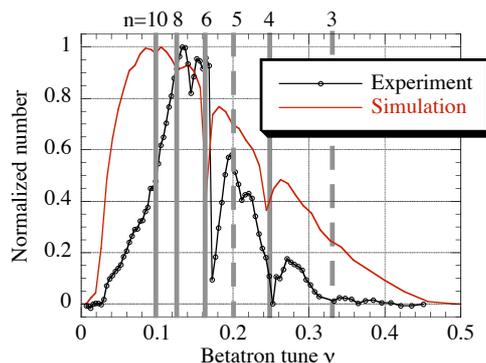


図 2. 残存イオン数の閉じ込め場に対する依存性

いる。ベータトロン振動が外場と共鳴することにより非線形共鳴が誘起される。即ち、ベータトロン振動数が外場の振動数の整数分の 1 になった時に共鳴が生じる。

一般に、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。これは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。

図 2 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。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結果を実線で示す。ただし、このシミュレーションでは粒子間相互作用は無視している。 $\nu_0=1/n$ の近辺で粒子数が急激に減少している。この減少はその発生する ν_0 から非線形共鳴による粒子損失と結論づけられる。

黒丸は実験結果を表す。シミュレーションと同様に $\nu_0=1/n$ 近辺で共鳴による急激な粒子損失が観測される。ただし、共鳴の位置が全体に右側にシフトしている。これは前述の空間電荷効果によるチューンシフトが原因である。

この共鳴は閉じ込め場により駆動されるため、その強さや印加時間を制御することが難しい。そこで、本来は共鳴が起きない条件下において、イオンプラズマに摂動場を印加することで共鳴を強制的に誘起することにした。この方法であれば、共鳴の強さや、共鳴の ON/OFF を容易に制御出来る。

図 3 にベータトロンチューンを 0.105 (ベータトロン振動数 105 kHz) に設定した場合の残存粒子数を摂動場の周波数の関数として示す。摂動場の振幅は閉じ込め場の振幅の 0.2% と十分に弱くしてある。赤い実線は図 2 の場合と同様に空間電荷効果は無視した 3 次元シミュレーションの結果である。

$f_{ex}=210$ kHz 付近に共鳴による急激な粒子損失が観測される（イオントラップの共鳴はパラメトリック共鳴である）。

黒い実線は実験で観測された残存粒子数の変化である。シミュレーションと違うのは幅の広い損失と狭い損失が見られることと、全体が左にずれている点である。共鳴の発現

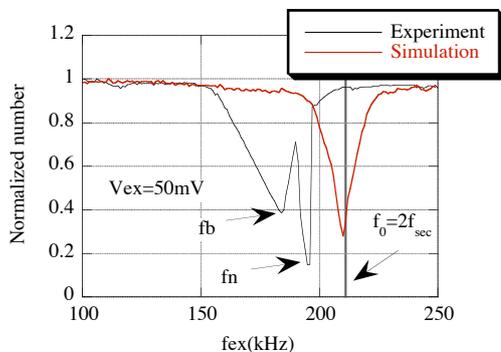


図 3. 残存イオン数の摂動場周波数に対する依存性

位置が左にずれるのは、やはり、空間電荷効果によるチューンシフトのためである。幅の広い共鳴と狭い共鳴が現れる理由はまだよく分かっていない。可能性としては a) 次数の違う共鳴が見えている、b) インコヒーレント共鳴とコヒーレント共鳴が見えている、の二つが考えられる。観測された二つの共鳴は粒子数に対する依存性や時間発展が異なることから、後者である可能性が高いと代表者は考えている。

図 4 に広い共鳴時における密度分布の時間発展を示す。時間経過にともない、中心部の密度が減少しその周辺部に低密度のペDESTルな分布、即ち線形ポールトラップに捕捉したイオンプラズマにおいてもハローが形成されることが確認できた。今後は系統的にデータを取得し、しかるべき場で発表する予定である。

一方、幅の狭い共鳴においては明確なハローの形成は観測されなかった。その原因の一つは幅の狭い共鳴は発展が非常に早く、十分な時間分解能で計測が行えなかったことが上げられる。また、計測系の線形性を確保するために感度を落としていたため、密度の低いハローを検出するのに十分な感度が無かった可能性もある。検出系に MCP をもちいているので、その線形性を気にしなければ感度はまだまだ高くすることが出来る。今後は、感度を高くして実験を続ける予定である。

(2) ミスマッチによるハロー生成実験

本課題では、ミスマッチによるハロー形成実験も行った。具体的には、閉じ込め場を急激に変化させることでプラズマにミスマッチを与えた。しかしながら、この方法では、

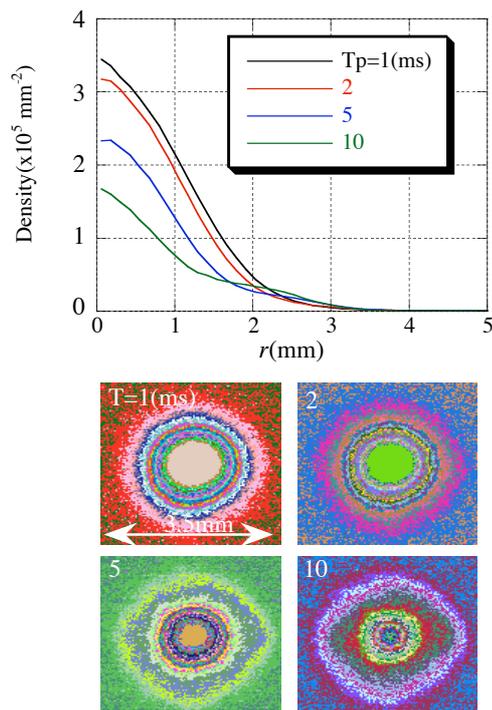


図 4. 密度分布の時間発展

有意なハローを検出することが出来なかった。この場合も計測系の線形性を確保するために感度を落としていたためにハローを検出できなかった可能性が高い。今後はやはり感度を高くして実験を続ける予定である。

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 10 件)

- ① S. Ohtsubo, M. Fujioka, H. Higaki, K. Ito, H. Okamoto, H. Sugimoto and S. M. Lund, “Experimental study of coherent betatron resonances with a Paul trap”, *Phys. Rev. STAB* **13** (2010) 044201. (12 pages), 査読有り
- ② K. Ito, S. Ohtsubo, H. Higaki, K. Izawa, and H. Okamoto, “Tune depression of ion plasmas observed in a linear Paul trap”, *J. Plasma Fusion Res.*, Vol. **8** (2009) pp. 959 – 962. 査読有り

[学会発表] (計 7 件)

- ① 伊藤清一, ”大強度ビームのコヒーレント共鳴現象に関する非中性プラズマを使った模擬実験”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010/3/20, 岡山大学津島キャンパス.

[その他]

ホームページ等

[http://home.hiroshima-u.ac.jp/beamphys/
index.html](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

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :