

機関番号：15401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20540483

研究課題名 (和文) 磁気ミラーを用いた低エネルギー荷電粒子蓄積の実験研究

研究課題名 (英文) Experimental study on the accumulation of
low energy charged particles with a magnetic mirror field

研究代表者

檜垣 浩之 (HIGAKI HIROYUKI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、低エネルギー陽電子を荷電粒子閉じ込め装置に蓄積することを念頭に置き、磁気ミラー配位を用いて低エネルギーかつ低電流(数 pA)の荷電粒子を蓄積する際の特性を実験的に調べた。また、磁気ミラー中に閉じ込められた非中性電子プラズマの諸特性について実験を行い、磁場勾配中における、サイドバンド冷却による径方向密度分布制御、プラズマの密度および電位分布、さらにはソリトン波の伝播特性について新たな知見を得ることができた。

研究成果の概要 (英文)：

For the purpose of accumulating low energy positrons in a trap, properties of accumulating low energy and low current (a few pA) charged particles were investigated experimentally. Also, properties of non-neutral electron plasmas in a magnetic field gradient were studied. New insights were obtained in the control of radial density distribution with sideband cooling, the density and potential distribution, and the propagation of solitary waves in a magnetic field gradient.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：非中性プラズマ、磁気ミラー、荷電粒子閉じ込め

1. 研究開始当初の背景

低エネルギー($<0.1\text{eV}$)の非中性電子プラズマを用いて、それまで実現できなかった 1keV 以下の質の良い低エネルギー反陽子ビームの供給が可能になり、バッファーガス冷却を用いて蓄積された低エネルギー陽電子プラズマは低エネルギー反陽子との相互作用により、大量の反水素合成に

利用される等、低エネルギーの荷電粒子多体系(非中性プラズマ)を蓄積制御することにより新たな基礎物理研究が進展していることが明らかであった。

従来、磁気ミラーを用いた荷電粒子閉じ込めは核融合を目的とした高エネルギー中性プラズマの閉じ込め特性を中心に盛んに研究され、一方で低エネルギー非中性

プラズマは主に一様磁場で精力的に研究されてきた。が、磁気ミラー中での低エネルギー非中性プラズマの閉じ込め特性については、研究代表者を中心とする当時の実験研究が先駆的なものであった。

磁気ミラーを用いた低エネルギー荷電粒子蓄積については、過去にごく少数の陽電子蓄積に使われた例はあるが、閉じ込め時間が $100\mu\text{s}$ と非常に短く、磁気ミラー比 R も 2 と小さかった。結果的に当時、磁気ミラーを用いて低エネルギーの荷電粒子を蓄積する技術は十分に確立されず、系統的な研究はされなかった。一方、研究代表者らの実験により、磁気ミラーによる非中性電子プラズマの閉じ込め時間は $R\sim 5$ で、約 50ms あることが確認された。

低エネルギー陽電子の蓄積方法については、固体 Ne 減速材とバッファガス冷却による方法が唯一 10^7 個以上の陽電子を蓄積できているが、高価な大強度放射性同位元素が必要なうえ、バッファガスの供給、排気などのため超高真空 ($<10^{-9}\text{torr}$) との整合性が悪い。さらに、バッファガスの導入は減速材の劣化を促進するという欠点がある。

バッファガスが不要であり超高真空のまま蓄積可能であること、将来的に低エネルギー反水素ビームの生成が期待されるカस्प磁場にも応用可能であることから、磁気ミラーを用いた効率のよい低エネルギー荷電粒子蓄積方法が確立することの意義は大きいと考えられた。

2. 研究の目的

上記のような申請時の状況をもとに、本研究では磁気ミラー配位を用いて低エネルギーかつ低電流(数 pA)の荷電粒子を蓄積する際の特性を明らかにすると共に、効率の良い、新しい荷電粒子蓄積方法を実験的に確立することを第一の目的とした。また、第二の目的として低強度($<30\mu\text{Ci}$)の放射性同位元素を用いて極低電流の低エネルギー陽電子ビームを生成し、実際に新しい蓄積方法を適用して蓄積実験を行うこととした。具体的には以下のような特性を調べることを研究目的として掲げた。

- (1) 単純磁気ミラーによる電子蓄積特性
- (2) 強磁場側に電位を加えた時の蓄積特性
- (3) 蓄積領域に調和ポテンシャルを形成し、サイドバンド冷却する場合の蓄積特性
- (4) 極低電流の低エネルギー陽電子を用いた蓄積実験

3. 研究の方法

本研究ではすべての実験において図 1 に示した磁気ミラー閉じ込め装置を用いた。これは広島大学ビーム物理研究室に既設の装置で、2 系統の軸対称ソレノイドコイルによって $R\sim 5$ までの磁気ミラーを形成可能である。また、真空容器中には 45 個のリング電極が設置されており、荷電粒子の蓄積や閉じ込めに必要な電位を自由に形成可能となっている。軸対称磁気ミラー中の非中性プラズマの研究に特化した世界で唯一の装置と言える。強磁場側に設置された電子銃によって $2\text{pA}\sim 10\mu\text{A}$ までの実験に必要な低エネルギー電子ビームを供給し、弱磁場側に設置された蛍光面と CCD カメラからなる撮像系により粒子密度分布が測定可能となっている。

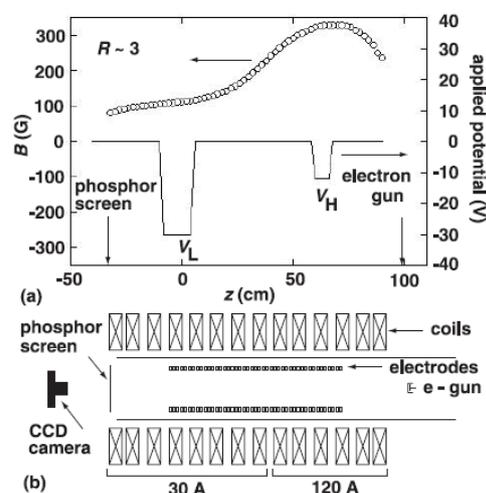


図 1 実験装置模式図

4. 研究成果

研究目的(1),(2)と(3)の一部を調べるため、強磁場側から低エネルギー電子を入射し、低磁場側で電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)をする時の蓄積効率の変化をミラー比 R 、加熱位置、電子の入射エネルギー等をパラメーターとして実験した。

図 2(a)は加熱位置($z=8\text{cm}$)付近での磁場強度分布の測定値で、図 2(b)に示したのは蓄積電子数を加熱周波数の関数として R で色分けした図である。この結果から ECRH により電子が蓄積されていることが確認された。また、単純磁気ミラーでは R が大きいほうが閉じ込め時間が長く、蓄積量が多い傾向があること、ECRH は弱磁場側で行うと蓄積量が増え、強磁場側に電位を加えると閉じ込め時間が長くなり蓄積量が 1 桁増えることも明らかになった。

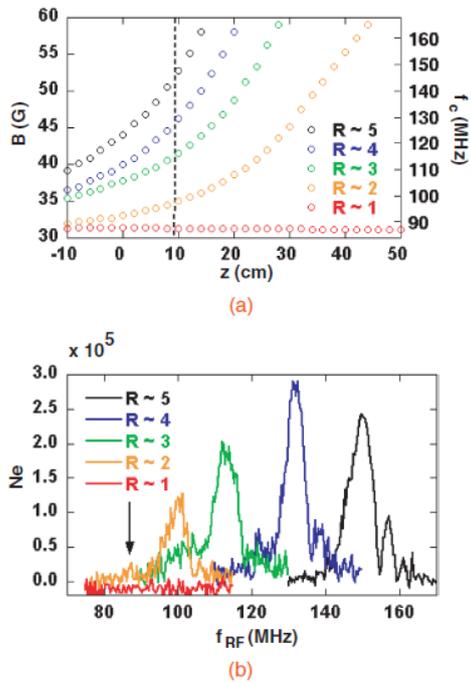


図 2 サイクロトロン共鳴による電子の蓄積

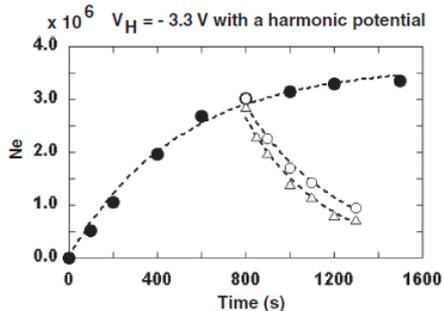


図 3 調和ポテンシャルによる電子蓄積

図 3 は蓄積領域に調和ポテンシャルを形成した場合の結果で、蓄積効率は下がるが閉じ込め時間が非常に長くなるため蓄積量はさらに 1 桁増えることが判明した。

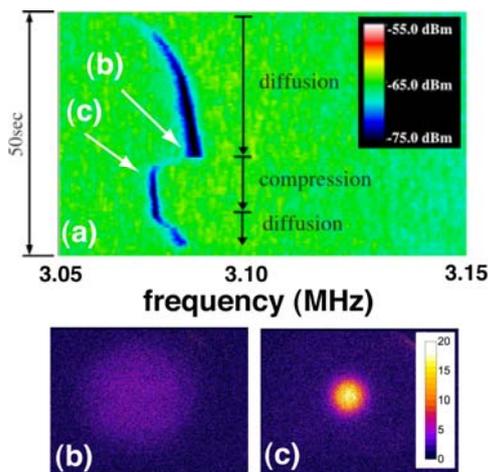


図 4 磁場勾配中のサイドバンド冷却

この調和ポテンシャルは磁場勾配中に形成されており、研究目的(3)を調べるのに適している。図 4(a)に示したのは閉じ込め

られた非中性プラズマの振動周波数の時間変化を非破壊測定したもので、図 4(b),(c)に示したのはサイドバンド冷却を加える前後の径方向密度分布である。閉じ込められたプラズマの密度が 5 倍以上増加していることがわかる。従って、磁場勾配中でも調和ポテンシャル内の電子群に対してサイドバンド冷却が有効であることが確認された。

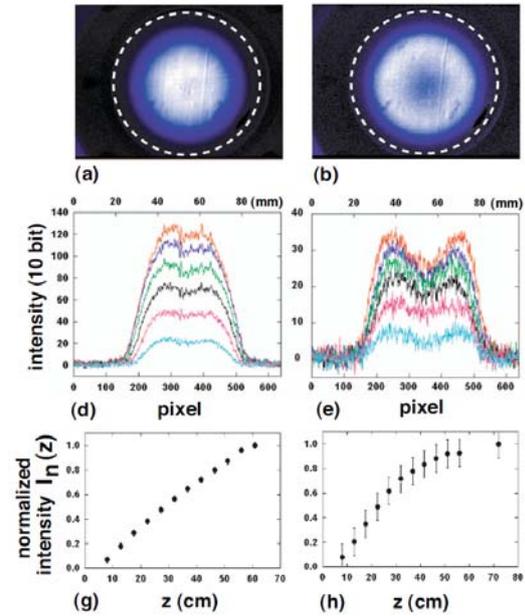


図 5 磁気ミラー中の電位閉じ込め(a), (d), (g)と磁場閉じ込め(b), (e), (h)

また、磁気ミラーに閉じ込められた非中性プラズマの密度および電位分布を実験と計算機シミュレーションによって調べた。図 5 に示したのは、電位閉じ込めと磁気ミラー閉じ込めの径方向密度分布と軸方向密度分布を初めて実験で測定した結果である。また、図 6 に示したのは実験条件を再現した計算機シミュレーションによって得られた密度分布と電位分布である。

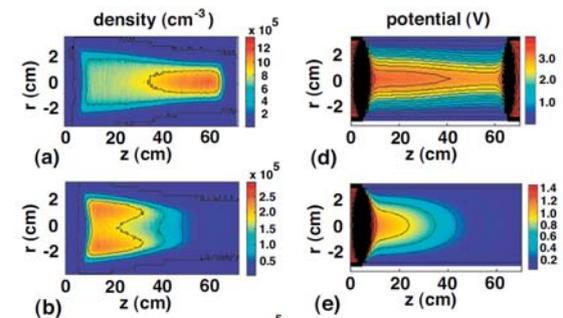


図 6 計算機シミュレーションによる電位閉じ込めの(a)密度分布,(d)電位分布と磁場閉じ込めの(b)密度分布,(e)電位分布

結果として、磁気ミラー中の電位閉じ込めでは高磁場側が、磁場閉じ込めでは弱磁場側が高密度になること、中心軸上の電位分布としては、弱磁場側に異なる符号の電荷を閉じ込めるように 1V 程度の電位が形成され、その電位は磁場閉じ込めのほうが高い傾向があることが明らかになった。

さらに、磁場勾配ならびに密度勾配をもった非中性電子プラズマにおいて静電波振動(磁力線方向のプラズマ振動や磁気軸と垂直な方位角方向の diocotron 振動)やソリトン波の計測を行った。図 7 に示したのは磁場閉じ込めと電位閉じ込めの各々について静電波振動とソリトン波の伝播の様子を初めて測定した結果である。

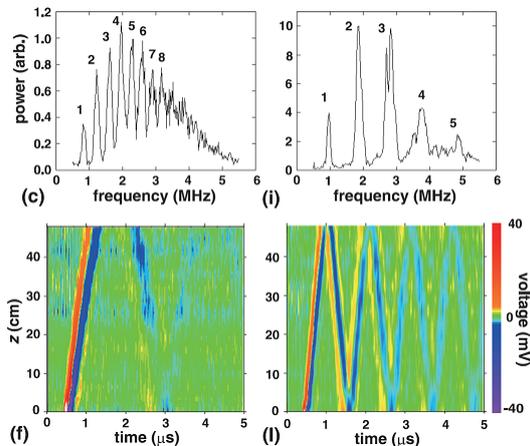


図 7 磁場閉じ込めの(c)静電波振動,(d)ソリトンの伝播、及び、電位閉じ込めの(i)静電波振動,(e) ソリトンの伝播

この実験により、静電波振動の周波数はプラズマの密度や温度に依存するため一様磁場の場合と同様に非破壊診断に利用可能であることや、磁場勾配中に閉じ込められた非中性プラズマに励起されるソリトン波は、伝播方向によらず高磁場側で伝搬速度が減少することが明らかになった。なお、上記実験データの一部は「プラズマ核融合学会誌」2010年9月号表紙に掲載された。

結論として本研究では、磁気ミラー配位を用いて低エネルギーかつ低電流(数 pA)の荷電粒子を蓄積する際の実験的に調べると共に、磁気ミラー中に閉じ込められた非中性電子プラズマの諸特性について実験を行い、磁場勾配中における、サイドバンド冷却による径方向密度分布制御、プラズマの密度および電位分布、さらにはソリトン波の伝播特性について新たな知見を得ることができた。現時点で研究目的(4)を実施するには至っていないが、測定されたプラズマ振動数(数 MHz)の周期は閉じ込め時間(数 10ms)よりも十分短いことから、将来的には磁気ミラーを用いた電子-

陽電子プラズマの実験研究も可能であることが示唆された。

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 3 件)

- 1) H. Higaki, K. Ito, and H. Okamoto
 “Electrostatic Oscillations Observed in Non - Neutral Electron Plasmas Confined in a Magnetic Field Gradient”
 Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.5, 2010, 029-1~029-3
- 2) H. Higaki, K. Fukata, K. Ito, H. Okamoto, and K. Gomberoff
 “Density and potential profiles of non-neutral electron plasmas in a magnetic mirror field”
 Physical Review, 査読有, Vol. E81, No.1,2010, 016401-1~016401-8
- 3) Hiroyuki Higaki, Kiyokazu Ito, Kentaro Kira, Hiromi Okamoto,
 “Accumulating Low Energy Charged Particles with a Magnetic Mirror Trap and Cyclotron Resonance Heating”,
 Applied Physics Express, 査読有, Vol.1, No.6, 2008, 066002-1~066002-3

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 檜垣浩之、「磁気ミラーに閉じ込められた非中性電子プラズマのソリトン」
 プラズマ核融合学会第27回年会
 2010年12月2日、北海道大学(札幌市北区)
- 2) 檜垣浩之、「磁気ミラーに閉じ込められた非中性電子プラズマの密度および電位分布」
 プラズマ核融合学会第 26 回年会
 2009年12月2日、
 京都市国際交流会館(京都市左京区)
- 3) 檜垣浩之、「磁気ミラーに閉じ込められた非中性電子プラズマの密度分布計測」、
 日本物理学会第 64 回年次大会
 2009年3月27日、立教大学(東京都豊島区)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/hhigaki/jindex.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

檜垣 浩之 (HIGAKI HIROYUKI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

(2) 研究分担者

()

(3) 連携研究者

()