

SYSTEMATIC EXPERIMENTS ON THE MISMATCH INDUCED HALO FORMATION USING NON-NEUTRAL ELECTRON PLASMAS IN A UNIFORM MAGNETIC FIELD

Masahiro Endo[#], Hiroyuki Higaki, Kiyokazu Ito, Hiromi Okamoto

Department of Quantum Matter, Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530

Abstract

Non-neutral electron plasmas confined in a uniform magnetic field can be used to simulate a beam dynamics in a uniform focusing channel. Here, a halo formation due to a mismatch induced on an electric confinement potential (harmonic potential) is reported. A beam halo is measured with a conventional beam imaging system composed of a phosphor screen and a charge-coupled device (CCD) camera. Obtained results show that the growth rate of a halo is a few tens microseconds in the present experimental condition.

一様磁場中の非中性電子プラズマを用いた不整合駆動ハロー生成の系統的实验

1. 序論

加速器の用途が広がり、ビームの制御が高度化するにつれ大強度の荷電粒子ビームが有用となってきたが、これに伴い荷電粒子のクーロン相互作用による空間電荷効果の影響が無視できなくなった。加速器にはビームエネルギー、ビーム強度、ルミノシティなど様々なパラメータが存在し、加速器の設計の段階から決まっているものもある。そのため、加速器を用いて空間電荷効果の系統的研究を行うのは得策ではない。また、多粒子シミュレーションを用いた研究では、粒子各々のクーロン相互作用を計算するには膨大な計算時間が必要であり、時間の制約を受ける。

そこで、広島大学ビーム物理研究室では加速器中の荷電粒子ビームと、荷電粒子閉じ込め装置(トラップ)中の荷電粒子群(プラズマ)が、物理的に等価であることを用いてビーム物理に関連する研究を進めている。[1,2]トラップ中のプラズマはパラメータの変更が容易であるばかりでなく、実験室系で静止しているため観測も容易であるという利点がある。したがって、空間電荷効果の性質を調べるのに、トラップを用いたプラズマの研究が有用となる。

本研究では、ビーム強度の低下の原因であるビームハロー生成に着目し、一様磁場と静電場(調和ポテンシャル)を用いたトラップ中に非中性電子プラズマを閉じ込め、調和ポテンシャルの大きさを急激に変化させることによって、加速器中のハロー生成の原因となるミスマッチに相当する効果をプラズマに与える実験を行った。[3,4]ここではミスマッチを加えてからの経過時間をパラメータとして実験を行い、ハロー生成率を評価した結果について述べる。

2. 磁場トラップ中の荷電粒子の運動

外部電場がないとき、 z 方向に一様な磁場 B を持つトラップ中での荷電粒子(質量 m , 電荷 q)の xy 平面内でのハミルトニアンは空間電荷による電位 ϕ を用いて

$$H_{sol} = \frac{1}{2m} \left[\left(p_x + \frac{qBy}{2} \right)^2 + \left(p_y + \frac{qBx}{2} \right)^2 \right] + q\phi(x, y; t)$$

と表される。これを xy 面内において、角周波数

$$\frac{qB}{2mc}$$

で回転する座標系に変換し $\kappa_z = \left(\frac{qB}{2mc} \right)^2$ とし、エネルギー、運動量を mc^2 および mc で規格化すると次式が得られる。

$$H_{sol} = \frac{\tilde{p}_x^2 + \tilde{p}_y^2}{2} + \frac{1}{2} \kappa_z (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2) + \frac{q}{mc^2} \phi(\tilde{x}, \tilde{y}; t)$$

さらに実空間で密度 n 、半径 a の円形断面を持つ Kapchinsky-Vladimirsky 分布を仮定し、その自己場

$$\phi = -\frac{qn}{4\epsilon_0} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)$$

$$H_{sol} = \frac{\tilde{p}_x^2 + \tilde{p}_y^2}{2} + \frac{1}{2} \left(\kappa_z - \frac{\kappa_s}{a^2} \right) (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)$$

となる。ただし、 $\kappa_s = \frac{\pi a^2 n q^2}{2\pi \epsilon_0 mc^2}$ で、半径 a は次のエンベロープ方程式を満たす。

$$a'' + \kappa_z a - \frac{\kappa_s}{a} - \frac{\epsilon^2}{a^3} = 0$$

このとき space-charge limit は $\kappa_z - \kappa_s/a^2 = 0$ のときに

$$n_{lim} = \frac{\epsilon_0 B^2}{2m}$$

で与えられる。また、space-charge depressed tune σ 及び bare tune σ_0 はそれぞれ

$$\sigma = \sqrt{\kappa_z - \frac{\kappa_s}{a^2}}, \quad \sigma_0 = \frac{qB}{2mc}$$

で与えられ、tune depression は

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{1 - \frac{n}{n_{lim}}}$$

で表される。

[#] m126389@hiroshima-u.ac.jp

上記は 2 次元の場合であるが 3 次元の場合もスームス近似の下で、調和ポテンシャルによる収束力で安定な粒子分布として密度一定の回転楕円体プラズマが知られている。そのため、進行方向に長い荷電粒子ビームのみではなく、バンチビームの場合も同様の議論が成立すると考えられる。

3. 実験装置と実験方法

図 1 に実験装置の模式図を示す。各ソレノイドコイルに 20 A の電流を流し、z 軸方向に 63 G の一様磁場を形成する。真空容器内部には内径 70mm のリング電極 45 個が設置されており、そのうち電子銃側の 27 個、閉じ込め領域近傍の 3 個、蛍光面側の 15 個を組として各電極に適当な電圧 V1, V2, V3 をそれぞれ印加することにより閉じ込め領域に、

$$\phi \propto (r^2 - 2z^2)$$

で表される調和ポテンシャルを形成する。なお、装置内部は 4×10^{-8} torr 程度の真空度になっている。

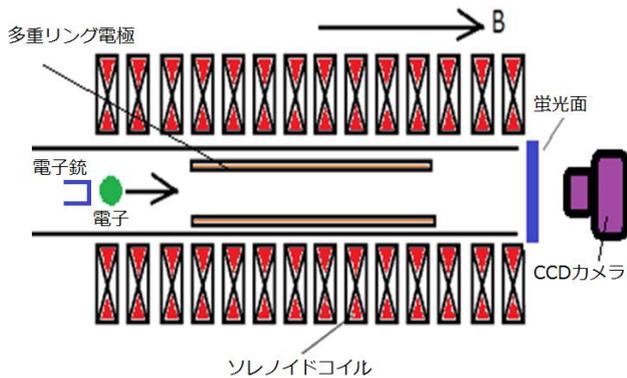


図 1: 実験装置の模式図

実験手順は以下のとおりである。

- 1) 各電極を $V1 = -19V$, $V2 = -10V$, $V3 = -50V$ として、カソード電位が $-35V$ の電子銃から閉じ込め領域に電子ビームを約 $500\mu s$ 入射する(図 2 の $t < 20\mu s$ の時間帯)。
- 2) 電子を入射している状態で、電子銃側の電極の電位を $V1 = -50V$ として、電子の閉じ込めを開始する(図 2 の $t = 20\mu s$ の時点)。その後電子の入射は止める。典型的には 10^8 個程度の電子が閉じ込め領域に捕獲される。
- 3) さらに $20 \mu s$ 閉じ込めた後、閉じ込め領域の電極電圧 $V2$ を $-10V$ から $+10V$ まで $150ns$ で変化させ、電子を閉じ込めている調和ポテンシャルに実効的なミスマッチを与える(図 2 の $t = 40\mu s$ の時点)。この場合、 $\Delta V = 20V$ のミスマッチを加えたと定義する。また、ミスマッチを印加しない場合は $\Delta V = 0V$ と考える。
- 4) ミスマッチを加えてからの時間をパラメータとして変化させながら(図 2 の場合、約 $40\mu s$)、蛍光面側の電極電位を $V3 = 0V$ とすると電子は磁力線に沿って閉じ込め時の実空間分布を保ったまま

$V_p = +8kV$ にバイアスされた蛍光面に入射する。電子が蛍光面に入射した際の光は、 480×640 pixels のアナログ CCD カメラで撮像し、10bit のフレームグラバに外部トリガーをかけてデータ収集を行う。測定される光強度(intensity)は電子密度に比例しているため、軸方向に積分されたビームプロファイルが測定可能となる。ここでの画像データは S/N 比を改善するために 100 回平均をとると共に CCD カメラのバックグラウンドノイズも差し引いたものを使用する。

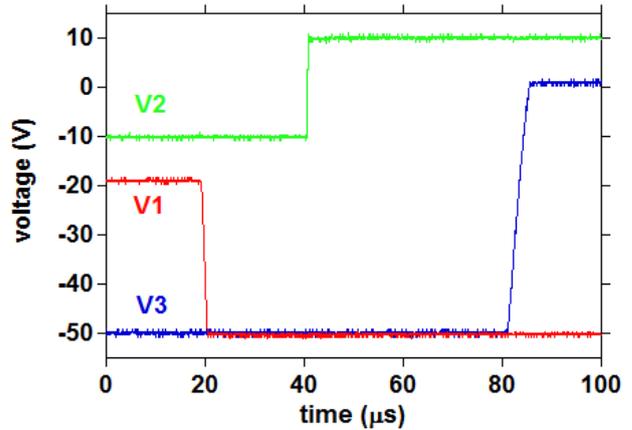


図 2: 各電極電圧の時間変化

4. 実験結果

図 3 および図 4 に示したのは、それぞれ $\Delta V = 0V$, $\Delta V = 20V$ のミスマッチを加えてから約 $40\mu s$ 後に電子を蛍光面に引き出した際の画像である。図 4 は図 2 の場合に対応している。ただし、色勾配は各画像データの最大光強度 I_p で規格化してある。これらと比較するとミスマッチ印加により径方向にハローが生成されたことが分かる。

図 5 は、ビームコアの中心を半径 $r = 0$ とし、光強度を半径の関数として片対数プロットしたものである。黒点は図 3 のミスマッチなし($\Delta V = 0V$) の場合のビームプロファイルで、閉じ込め初期の段階からガウシアン分布のビームコアの周辺にハローが生じてしまっている。残念ながら現時点では初期条件としてハローの全くない状態を実現するには至っていない。それを実現するのは今後の課題である。

一方、赤点は図 4 のミスマッチありの場合の径方向分布を示している。これらの図から明らかなようにミスマッチを印加することによりビームコア周辺の半径 $30 \sim 60$ pixel の間にハローが形成されていることが分かる。ハロー生成量の評価に当たっては、ミスマッチの有無に依らず光強度が変化していない $r > 60$ pixel の領域を無視し、 $r < 60$ pixel までのデータ点に対し次式のようなフィッティングを行った。

$$f(r) = f_{core}(r) + f_{halo}(r) \\ = n_{core} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma_{core}^2}\right) + n_{halo} \exp\left(-\frac{r^4}{\sigma_{halo}^4}\right)$$

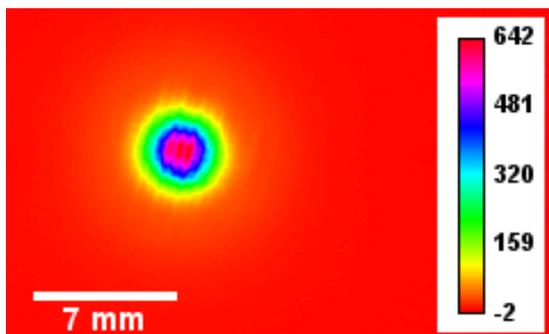


図 3 : ミスマッチなしの場合の蛍光面の画像

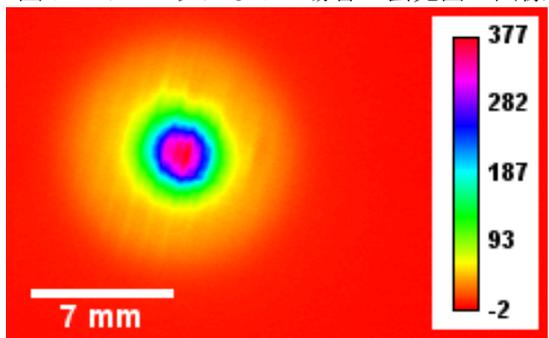


図 4 : ミスマッチありの場合の蛍光面の画像

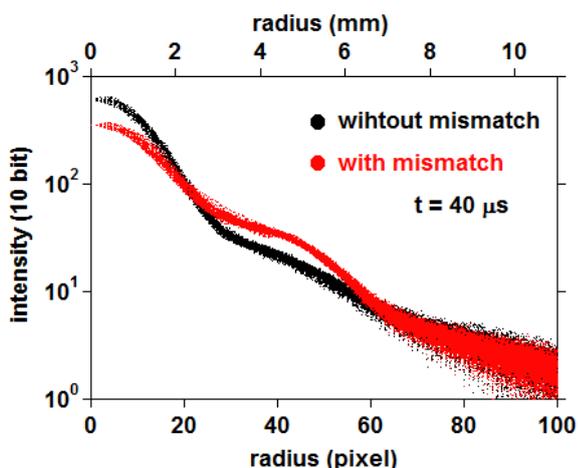


図 5 : 図 3 と図 4 の光強度の径方向分布

次に、ミスマッチありの場合のハローの量

$$H_w = \int_0^{60} 2\pi r f_{halo}(r) dr$$

とミスマッチなしの場合のハローの量

$$H_{w/o} = \int_0^{60} 2\pi r f_{halo}(r) dr$$

の差をとり、ミスマッチなしの場合の 100pixel までの光強度の和 $N_{w/o}$ で割ることによりハロー生成率

$$P = \frac{H_w - H_{w/o}}{N_{w/o}}$$

を定義した。

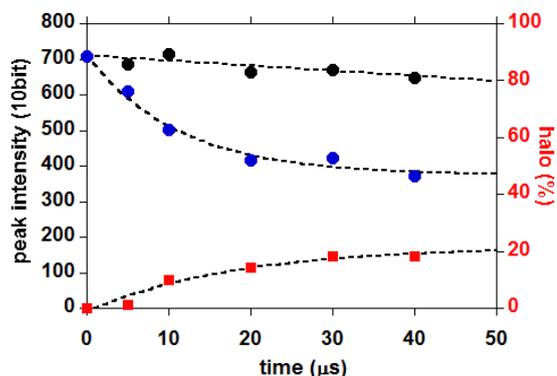


図 6 : I_p とハロー生成率の時間発展

図 6 はビームプロファイルの最大光強度 I_p とハロー生成率 P を、ミスマッチを印加してから時間の関数としてプロットしたものである。黒丸はミスマッチなし ($\Delta V = 0V$)、青丸はミスマッチあり ($\Delta V = 20V$) の I_p を示し、赤四角がハロー成長率である。

結論として、ミスマッチを印加した場合は印加しない場合に対して I_p が急激に下がり、それとともにビームコアの一部の電子は径方向に発散しハローが生成されたことが分かる。さらに、今回の実験条件では、ハローは $20\mu s$ 弱の時間スケールで成長していることが明らかになった。実際の実験では入射条件を少し変えることによりミスマッチを加えてもハローがほとんど生じないようにすることも可能であり、実際にハロー生成の主要因となっている物理的なパラメーターを特定することが今後の重要課題である。

謝辞

本研究は一部、KEK 大学等連携支援事業、ならびに日本学術振興会科学研究費補助金の支援を受けている。

5 参考文献

- [1] H.Okamoto, H.Tanaka., "Proposed experiments for the study of beam halo formation", Nucl. Instr. Meth. A **437** (1999) 178.
- [2] H.Okamoto, Y.Wada, R.Takai, "Radio-frequency quadrupole trap as a tool for experimental beam physics", Nucl. Instr. Meth. A **485** (2002) 244.
- [3] K. Fukata, H. Higaki, K. Ito, M. Kuriki, H. Okamoto, "Development of a beam imaging system for a solenoid trap", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 451 (2008).
- [4] H.Higaki, S.Fujimoto, K.Fukata et al, "Mismatch induced oscillations of space charge dominated beams in a uniform focusing channel", Proceedings of IPAC'10, 1336 (2010).