

Development of a beam imaging system for a solenoid trap

Kyohei Fukata, Hiroyuki Higaki, Kiyokazu Ito, Masao Kuriki, 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 plasmas confined in a solenoid trap can be used to study the beam dynamics in an accelerator or a storage ring. Here, a conventional beam imaging system composed of a phosphor screen and a charge-coupled device (CCD) camera is newly installed to the solenoid trap. The light intensity measured by the CCD camera is calibrated against the particle area density. The preliminary experimental results shows that a peak density of a spheroidal Gaussian beam was about $2.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, which corresponds to a tune depression $\eta \sim 0.92$.

磁場トラップを用いたビーム物理研究のためのビーム撮像系の開発

1. はじめに

加速器の大強度化と共にビームの空間電荷効果に起因する集団運動の研究の重要性は高まっており、中でも大強度ビームではビームハローが加速器の放射化の原因となることからその特性を知る必要性が指摘されてきた。

空間電荷効果の研究において自己充足的な解析的手法を用いるのは難しい。その為、多粒子シミュレーションが行われてきたのだが、大強度ビームにおいてはビームの粒子数はかなり多く、その粒子ひとつひとつの間のクーロン相互作用を計算することはほぼ不可能である。この解決策として PIC(Particle-In-Cell)を用いたシミュレーションがしばしば用いられるがこれも粒子の状態を完全に予測できるものではない。空間電荷効果研究用の加速器を建造することも方法の1つであるが高速で移動する大強度ビームを十分な精度で観測することはコスト面も含めて容易ではない。

そこで、より汎用性が高いテストベンチとして、一様磁場と静電場を用いた荷電粒子閉じ込め装置(solenoid trap or Penning-Malmberg trap)やポールトラップをビーム物理研究用に用いることが提案されてきた[1,2]。

本研究では、磁場トラップをビーム物理研究に用いることを念頭に置いて、従来の分割型のファラデーカップを改良し、より空間分解能の高いフォスファースクリーンを設置するとともに、CCDカメラを用いた画像計測を可能にするため、新たに計測系を構築した。本稿では蛍光量と電子数の関係を示す較正結果と調和型ポテンシャルを用いた非中性電子プラズマ閉じ込めによる初期実験の結果を報告する。

2. 磁場トラップのビーム物理

z 方向に一様磁場 B を持つ磁場トラップ中の荷電粒子(質量 m , 電荷 q)の xy 面内の運動のハミルトニア

ンは空間電荷による電位を ϕ として、

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

と表される。これを xy 面内において、角周波数 $qB/2mc$ で回転する座標系で $\kappa_z = (qB/2mc)^2$ としてエネルギー、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

$\phi = -\frac{qn}{4\epsilon_0} (\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2)$ を代入すると

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

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

$$a'' + \kappa_z a - \frac{\kappa_s}{a} - \frac{\mathcal{E}^2}{a^3} = 0 \quad (2)$$

このとき space-charge limit は $\kappa_z - \kappa_s/a^2 = 0$ のときに $n_{lim} = \epsilon_0 B^2 / 2m$ で与えられる。また、space-charge depressed tune σ 及び Bare tune σ_0 はそれぞれ

$$\sigma = \sqrt{\kappa_z - \kappa_s/a^2}, \sigma_0 = qB/2mc \quad (3)$$

で与えられ、Tune depression は $\eta = \sigma/\sigma_0 = \sqrt{1 - n/n_{lim}}$ で表される。

以上は2次元の場合であるが、3次元のバンチビームの場合にもスムーズ近似の調和ポテンシャルによる収束力で安定な粒子分布が解析的に求められ数値計算でも確認されており、進行方向に長いビームばかりでなく、バンチビームの場合でも同様の議論が成り立つと考えられる[3,4]。

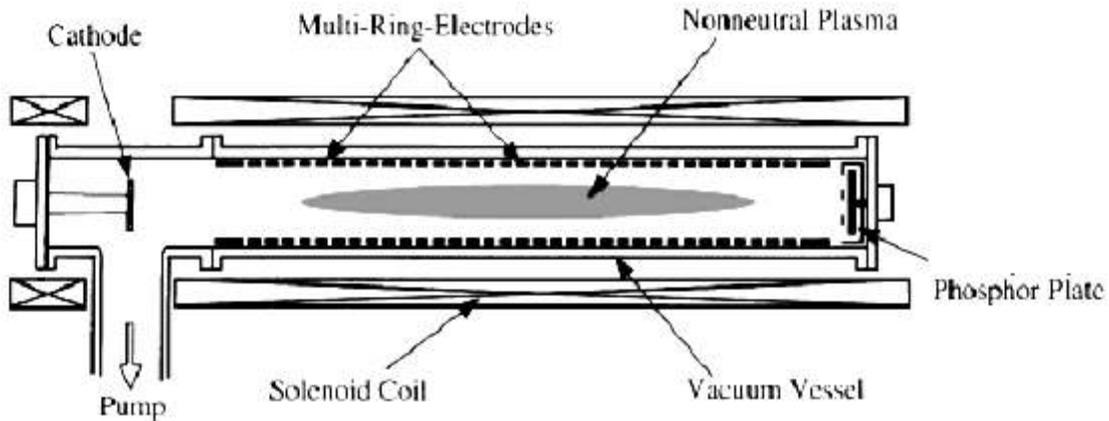


Fig.1 A schematic of the experimental set up. Aligned along the uniform magnetic field are 45 ring electrodes with the inner diameter of 70mm.

3. 実験装置

実験装置の概要をFig.1に示す. 14個のソレノイドコイルに30Aの電流を流すことにより, z軸方向にほぼ一様な約94Gの磁場を閉じ込め領域に作る事ができる. また, 真空度約 2.2×10^{-10} torrの真空容器内には, 45個のリング状電極(厚さ12mm, 内径70mm)がz軸に沿って16mm間隔で設置されている. 各電極に適当な電位を加えることにより, 閉じ込め領域内で,

$$\phi = \frac{U}{2z_0^2 + r_0^2} (2z^2 - x^2 - y^2) \quad (4)$$

で表される調和ポテンシャルを形成できるばかりでなく, より複雑な電位を形成することも可能である. さらに, リング電極の一部は方位角方向に4分割されており, 閉じ込められたプラズマに摂動を加えたり, プラズマ中に励起された振動を電氣的に計測したりすることが可能になっている.

典型的な計測手順は以下のとおりである. 電子を閉じ込める際には, まずカソード側(上流)の電極電位を入射電子のエネルギー(約20eV)よりも低くしてから電子を一定時間(t_{inj})入射する. 入射された電子は下流側の電位で反射されカソードに戻っていくが, その一部は衝突やビームビーム不安定性により閉じ込め領域内に蓄積される[5]. そのため, 入射時間を変えることで蓄積される電子数を制御することができる. 電子入射後, 上流の電位を元に戻して電子の閉じ込めを開始し, 一定時間(t_c)保持した後に計測側(フォスファースクリーン側)の電位を設置し, 電子を磁力線に沿って引き出すことにより実空間分布や電子数の測定を行う.

本実験装置では従来, 可動式のファラデーカップを用いてプラズマの実空間分布を測定してきたが[6], ビームハローを観測するためには空間分解能や測定時間に問題があることから, 今回新たに Beam Imaging Solutions 社のフォスファースクリーン(P20, 15 μ m厚, 有効面積75mm, 500Åアルミニウム蒸

着)を導入した. Fig.2に示した写真はこれをCF203の真空容器に高電圧を印加できるようにして設置した様子であり, 背面には撮像用のビューポートが付いている. 通常であればビームエネルギーが高いので, 高電圧を加える必要はないが, 今の場合, 電子のエネルギーが数eVであるため, 電子の実空間分布を測定する際は $V_p = +8kV$ の電圧を加えている.

電子がフォスファースクリーンに入射した際の蛍光は, 480 x 640pixels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.

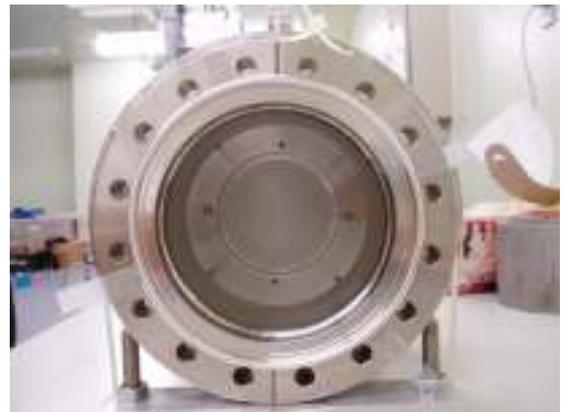


Fig.2 A picture of phosphor screen with the effective diameter of 75mm mounted inside a CF203 tube, which has a view port on the backside.

4. 結果

まず, 計測系の較正を行うために, パルス幅 2-200 μ s の電子ビームをカソードから直接フォスファースクリーンに入射し, 電子数(電子面密度)を

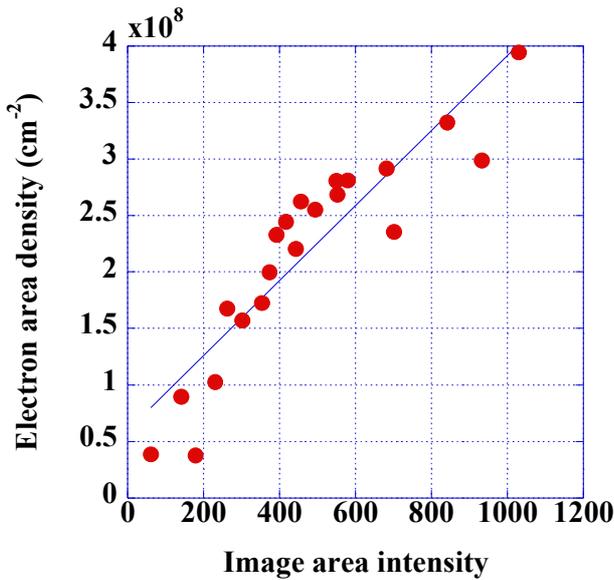


Fig.3 A calibration of the observed image intensity (10bit) against the electron area density.

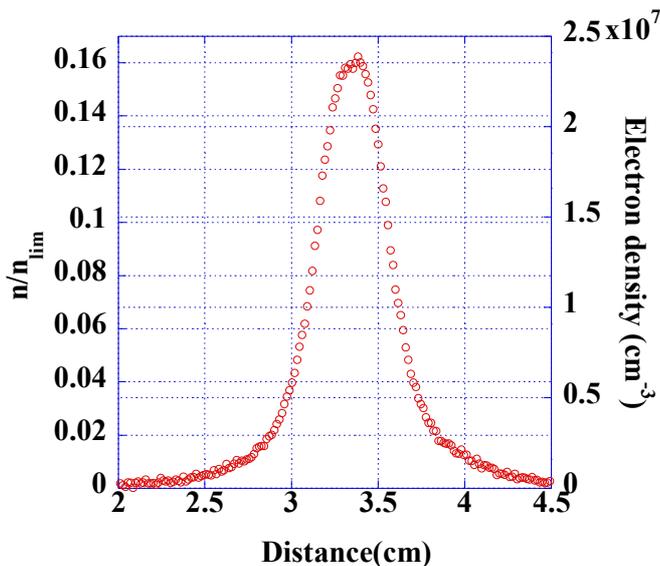
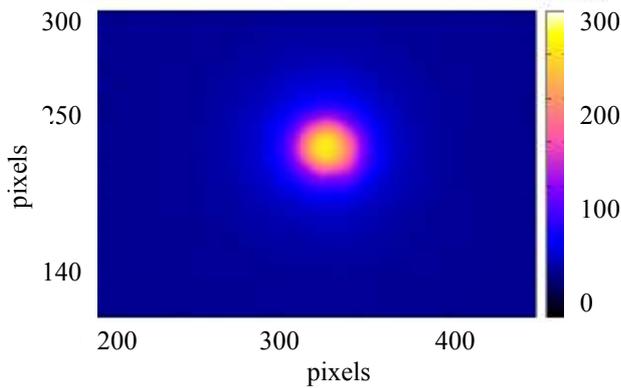


Fig.4 (a) An example of an observed phosphor screen image. (b) The electron density as a function of radius obtained with the above image.

変えながら撮像を行った. 電子ビームを直接入射するのはビーム断面積の広がりが無視できるからである. 撮像されたビームプロファイルはほぼガウス関数で近似できたので, 測定した電子数とガウス fitting からピーク面密度を求め, これを画像のピーク蛍光強度に対応させた. Fig.3 に示した結果からわかるように, カメラの絞りやゲイン, V_p を固定した条件下では画像計測による蛍光強度と電子面密度にほぼ線形性がある事が確認できた.

そこで実際に電子を調和ポテンシャル中に $t_c = 2\mu\text{s}$ 閉じ込めたうえで, 撮像したものをカラーグラデーションで示したのが Fig.4(a)である. 実際のプラズマの軸方向の長さが約 6.4cm であることを考慮して, この画像データの断面を横軸に距離, 縦軸に電子密度を $n_{\text{lim}} = 1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で規格化した値で示したのが Fig.4(b)である. 今回の初期実験ではピーク値で n_{lim} の 16%程度の密度を持ったガウス分布の電子ビームを調和ポテンシャル中に閉じ込めることができたが, これは $\eta \sim 0.92$ 程度に相当している.

5. まとめ

電子ビームの実空間分布の測定に必要な撮像システムを構築し, 電子プラズマの分布を測定した. これまでのところ $\eta \sim 0.92$ 程度のプラズマを閉じ込めることに成功しているが, より高密度のプラズマの閉じ込めや収束力の変化による mismatch の導入, さらに breathing mode の励起を実現することで, 計算機シミュレーションと比較可能な実験ができると考えられる.

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] R.L.Gluckstern, A.V.Fedotov, S.Kurennoy, and R.Ryne, "Halo formation in three-dimensional bunches", Phys. Rev. E **58** 4977 (1998).
- [4] A.V.Fedotov, R.L.Gluckstern, S.Kurennoy, and R.Ryne, "Halo formation in three-dimensional bunches with various phase space distributions", Phys. Rev. ST Accel. Beams **2**, 014201 (1999).
- [5] V.Gorgadze, T.A.Pasquini, J.Fajans, and J.S.Wurtele, "Injection into Electron Plasma Traps", AIP Conf. Proc. **692** (2003) 30.
- [6] H.Higaki, K.Ito, W.Saiki, Y.Omori and H.Okamoto, "Properties of non-neutral electron plasmas confined with a magnetic mirror field", Phys. Rev. E **75** 066401 (2007)