回転する非中性プラズマの
波動圧縮と３次元平衡分布形成

京都大学人間・環境学研究科
曽我之泰　青木順　河井洋輔

1. 回転する外部波動の励起に伴うプラズマ密度分布の圧縮・膨張実験（日本学術振興会特別研究員奨励費研究・曽我）

2. 不安定性を抑えた３次元平衡分布形成（NIFS共同研究・青木）

（3. ３次元平衡分布に固有な軸対称波動特性（河井））

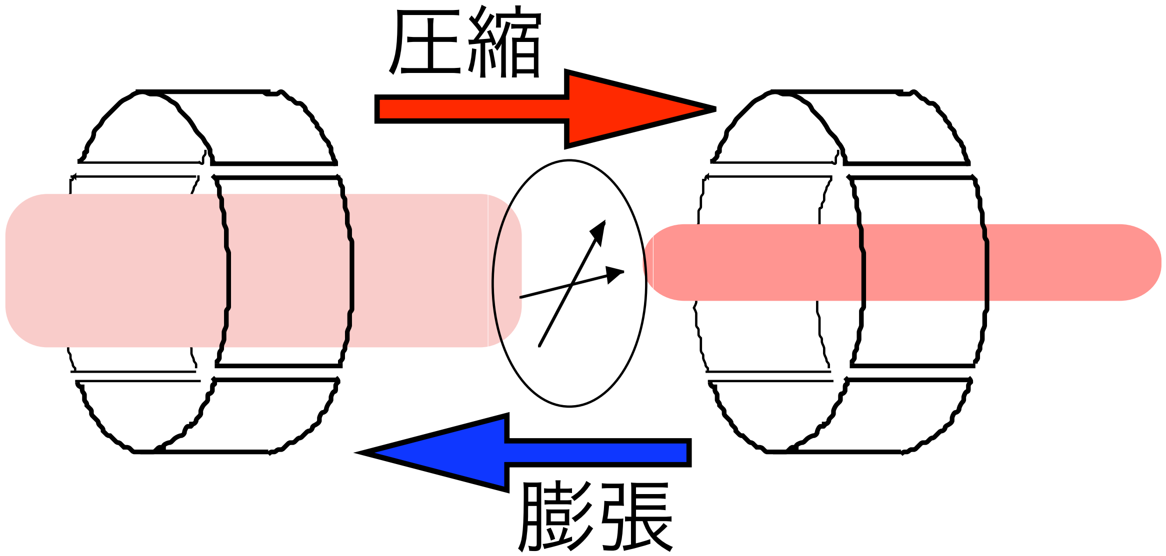
1. 外部回転波によるプラズマ密度分布の圧縮・膨張実験

背景　Malmberg Trap に閉じ込めた純電子プラズマに $m_\theta=1$ の回転電場を与える。

↓

密度分布の軸上圧縮、径方向膨張が起こる。

外部摂動に対するプラズマの応答として捉える



目的　この現象を構成する物理過程の各要素を定量的に計測・解析し、輸送過程としての再統合を試みる。

今回の報告（前半）

実験方法

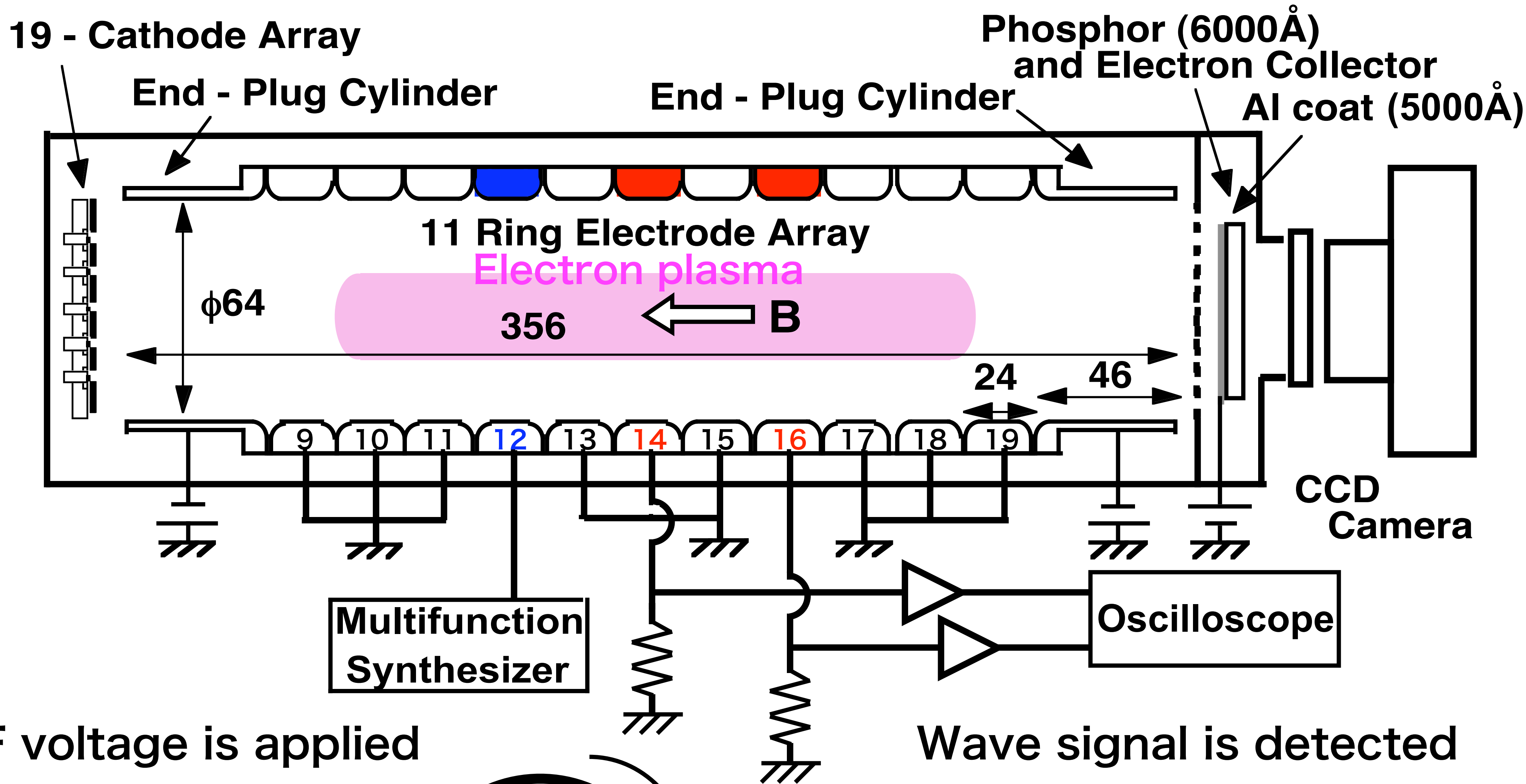
密度分布計測（実験）

波動計測・分散特性（数値計算・実験）

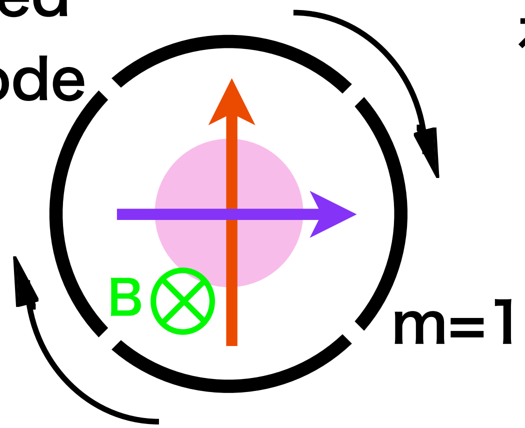
粒子流束による密度変動の検討（数値計算・実験）

まとめ

Experimental configuration

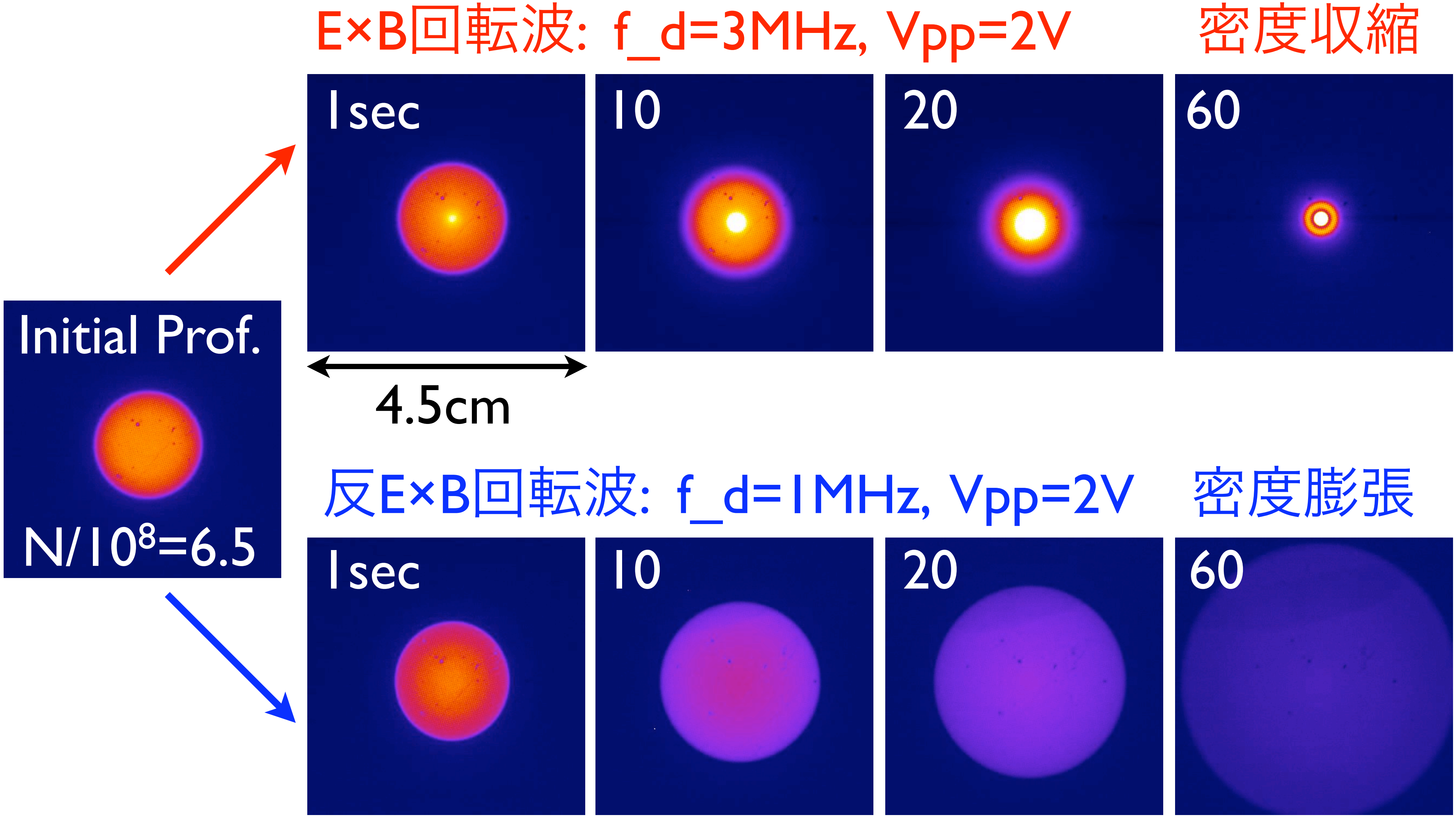


RF voltage is applied
to 4 sector-electrode
at No.12.

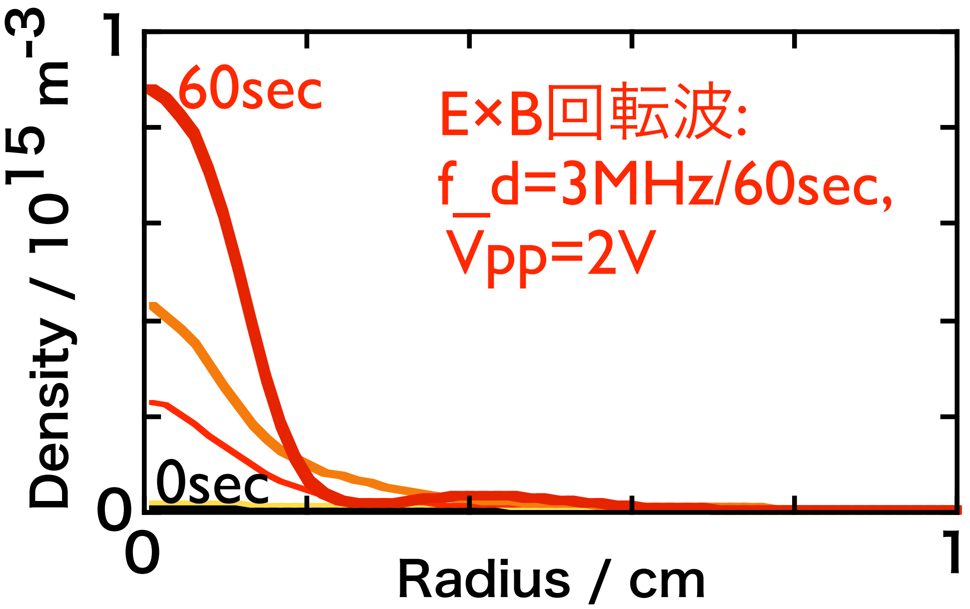


Wave signal is detected
on electrodes at No.14
and 16.

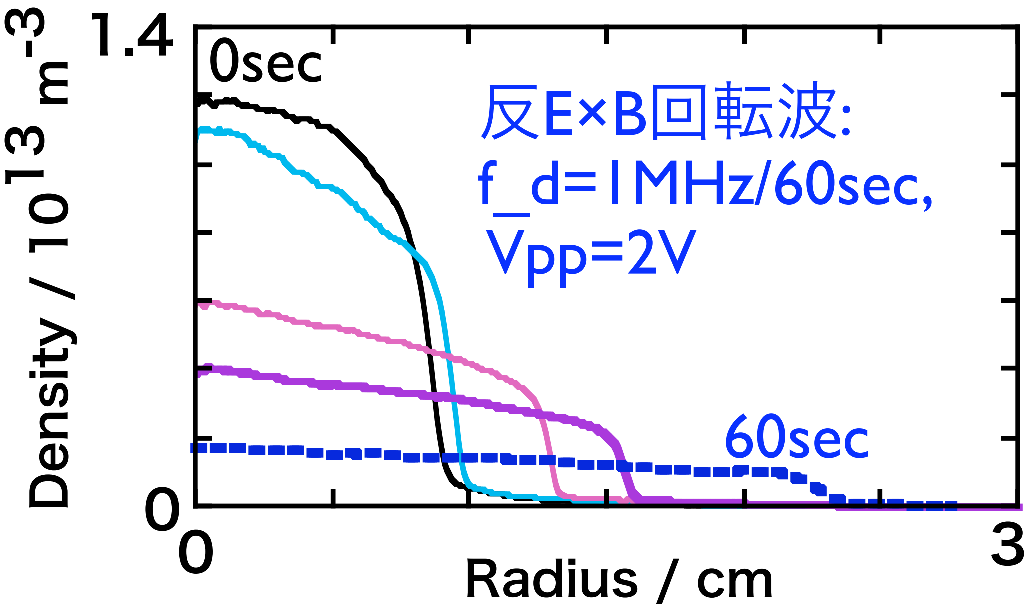
外部回転波により密度分布は収縮・膨張する

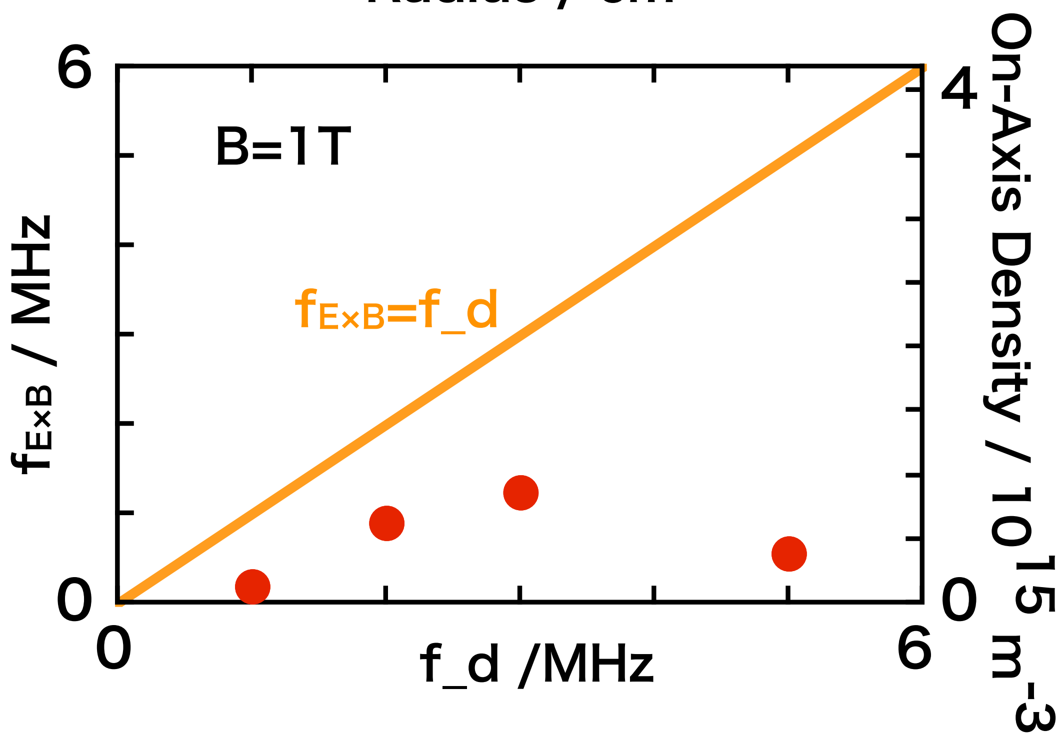


収縮
軸上密度が75倍に上昇



膨張
1/e半径が2.5倍に拡大



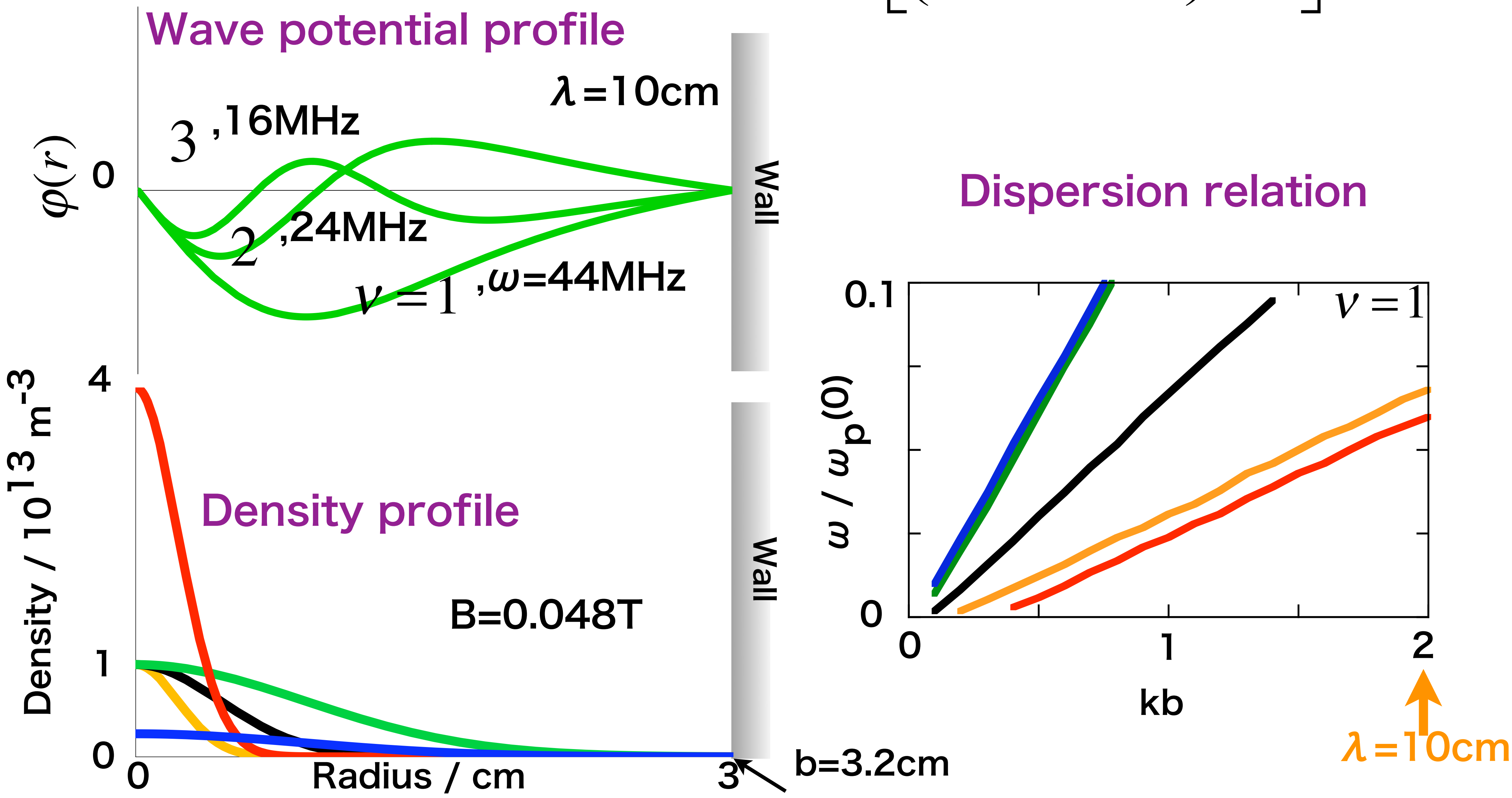


プラズマに誘起される波動を計測し密度収縮との関係をみる

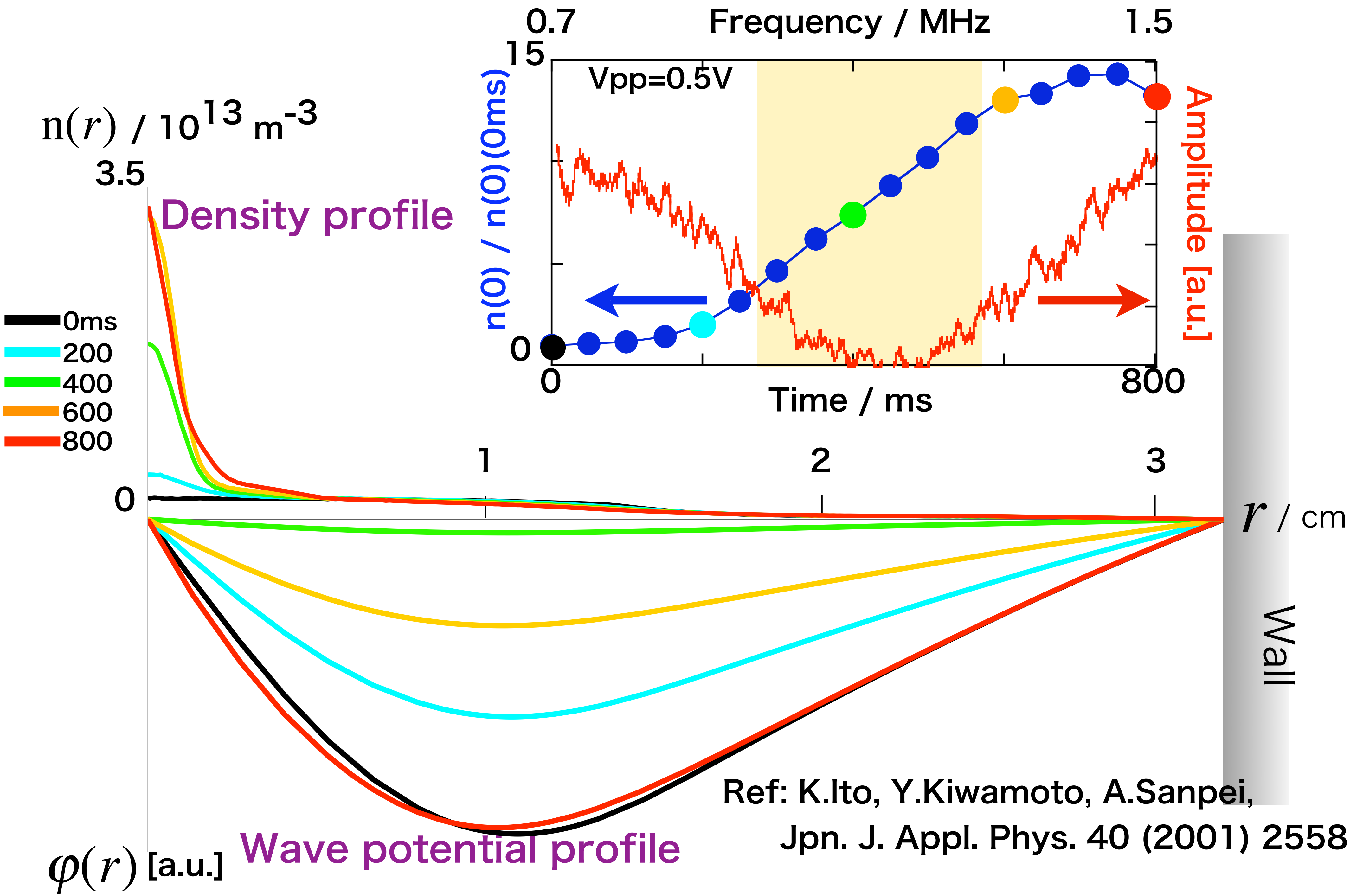
Dispersion relation of T-G wave (m=1)

Perturbation $$\phi = \varphi(r)\exp(-i\omega t + il\theta + ikz)$$

Wave Equation $$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\varphi}{dr} - \frac{\ell^2}{r^2}\varphi + \left[\left(\frac{\omega_p(r)}{\omega - \ell\omega_r(r)}\right)^2 - 1\right]k^2\varphi = 0$$



The excited T-G wave is damped when the on-axis density increases fast



Ref: K.Ito, Y.Kiwamoto, A.Sanpei, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2558

外部回転波による密度収縮の機構

マクロ：T-G波からプラズマへの角運動量輸送
による解釈→物理的内容の理論化は
進んでいない

ミクロ：Landau減衰による波から粒子への共鳴的
エネルギー移送

⬇

T-G波により誘起される粒子fluxにより説明を試みる

T-G wave induced radial flux

$$\Gamma = \int dv \langle \delta v_r \cdot \delta f \rangle = \frac{e n_0 \ell}{2mBr} |\phi|^2 \int dv \, \mathrm{Im}\{\hat{L}\} = -\frac{\varepsilon_0 \ell k^2 |\phi|^2}{2eBr} \mathrm{Im}\{\varepsilon_{\parallel}\}$$

$$\delta v_r = \frac{E_\theta}{B} = \frac{-i\ell\phi}{rB} \qquad \delta f = \frac{\frac{e}{m} k n_0 \frac{\partial \hat{f}_0}{\partial v} - \frac{\ell}{rB} \frac{\partial n_0}{\partial r} \hat{f}_0}{\omega - \ell\omega_r - kv} \phi(r) \equiv -\frac{e}{m} n_0 \hat{L} \phi(r)$$

E×B速度

$$\Gamma = \frac{\pi e n_0 \ell |\phi|^2}{2mBr} \left\{ \underbrace{\frac{\partial \hat{f}_0}{\partial v}}_{\text{Landau 減衰による内向きの流れ}} - \underbrace{\frac{\ell}{kr\omega_c} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial r} \hat{f}_0}_{\text{密度勾配による外向きの流れ}} \right\}_{v=(\omega-\ell\omega_r)/k}$$

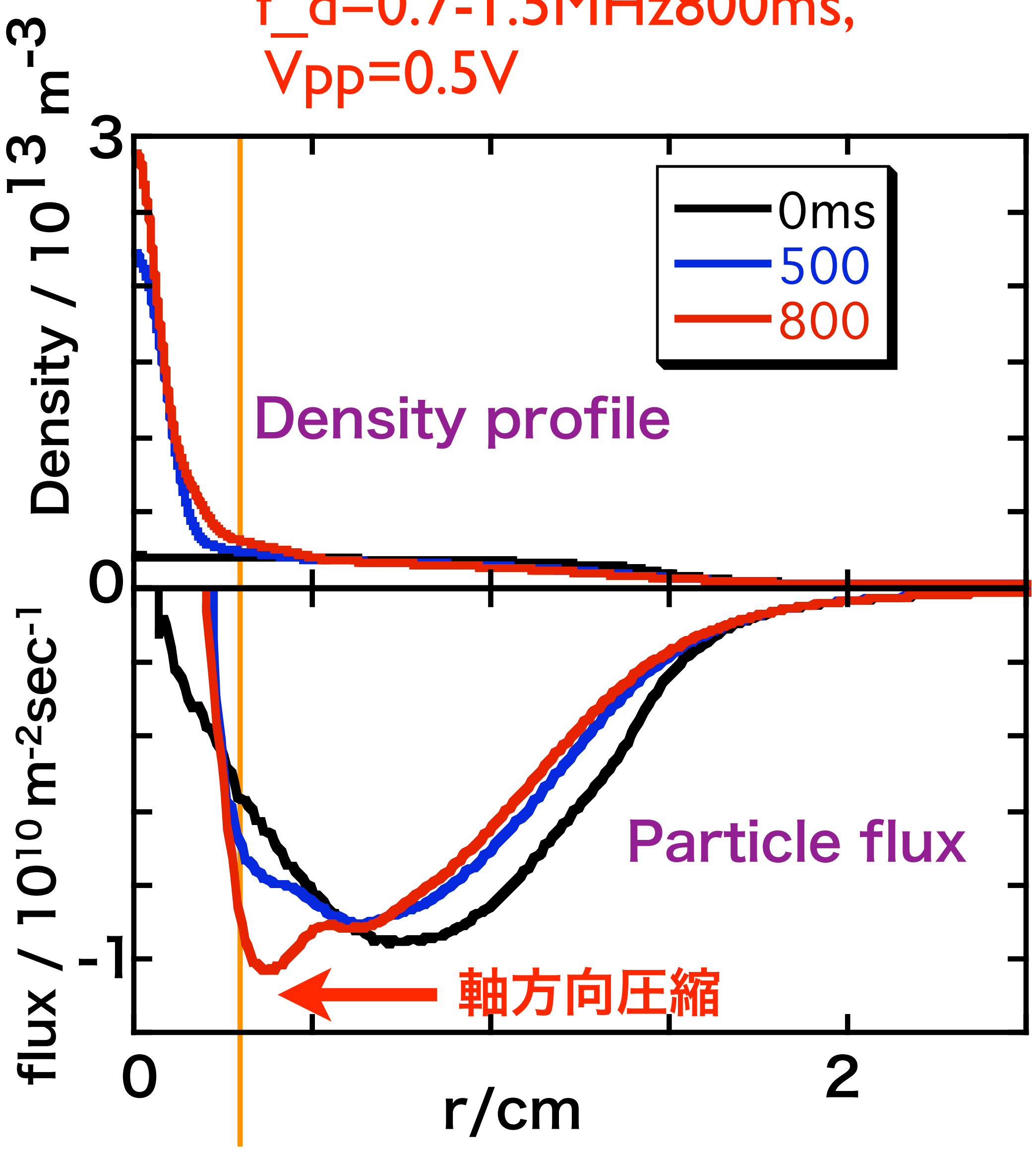
D.L. Eggleston and T. M. O'Neil, Phys. Plasmas. 6 (1999) 2699

プラズマの収縮はz方向の粒子速度と波の位

相速度が共鳴することによって生じる

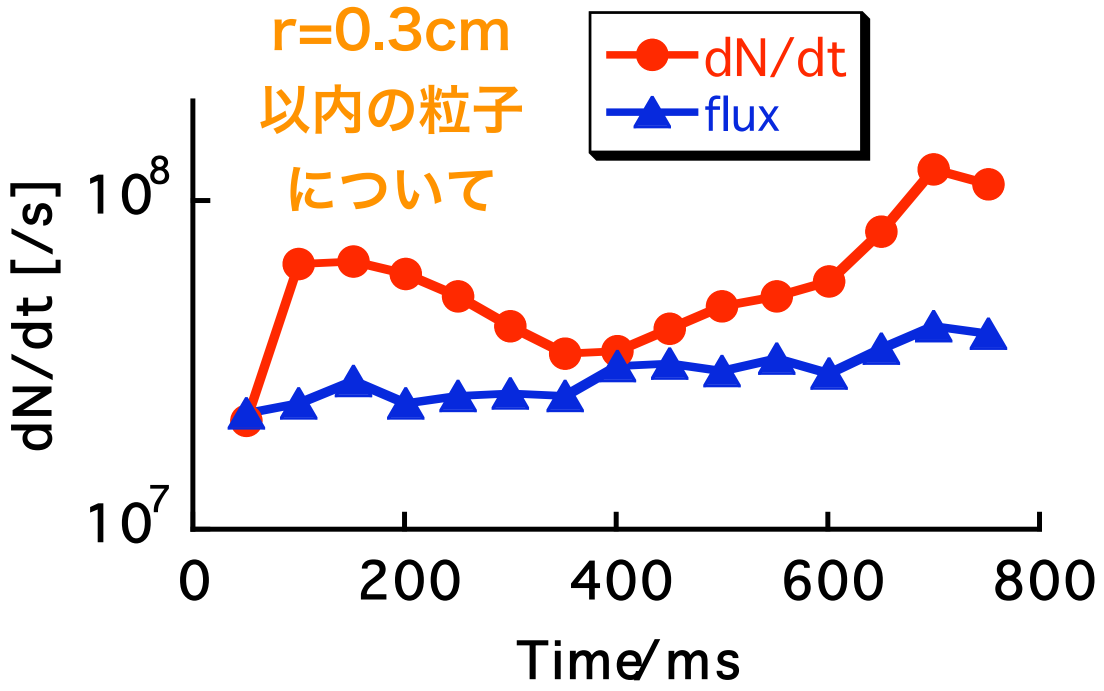
密度収縮とともにfluxのピークが軸方向に移動する

E×B回転波:
f_d=0.7-1.5MHz800ms,
Vpp=0.5V



粒子数時間変化（実験値）と
flux（計算値）の比較

r=0.3cm
以内の粒子
について



まとめ

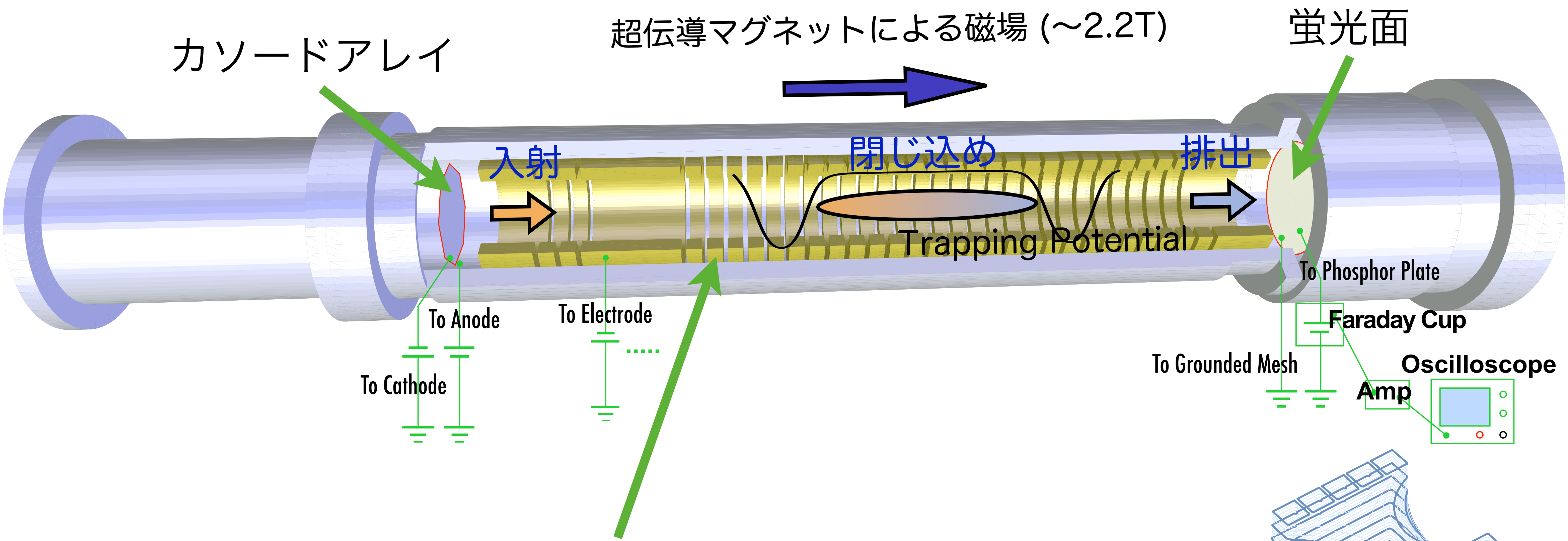
外部回転波により純電子プラズマの密度収縮・膨張が生じる

密度収縮はLandau減衰により波から粒子へ運動量・エネルギーが共鳴的に移送されることで生じると解釈できるデータを得た

輸送過程の理解の第一歩としてfluxの計算を行い、粒子が軸方向に圧縮される様子をミクロな立場から説明することができた

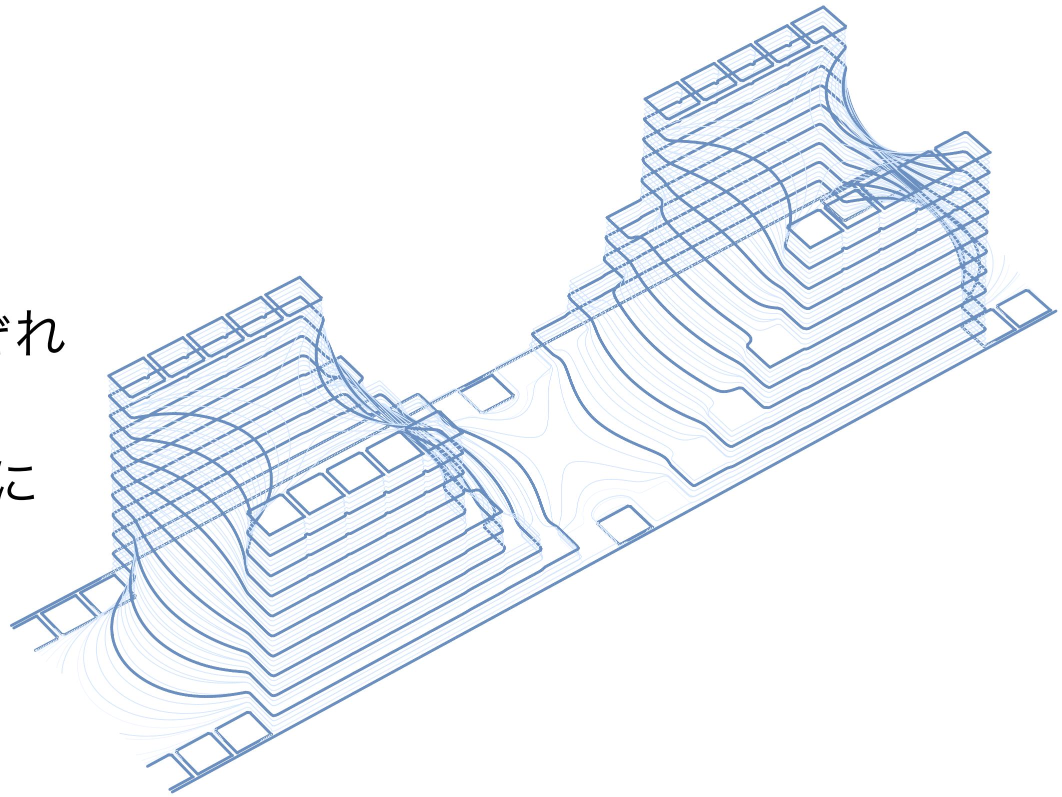
2. 不安定性を抑えた３次元平衡分布形成

実験装置



マルチリング電極

- 27個のリング電極を24mm間隔で配置し、それぞれの電極にかける電位は独立に制御可能である。
- 各電極に適当な電圧を与えることで閉じ込め領域にHarmonic Potentialを形成。



実験手順

1. 入射

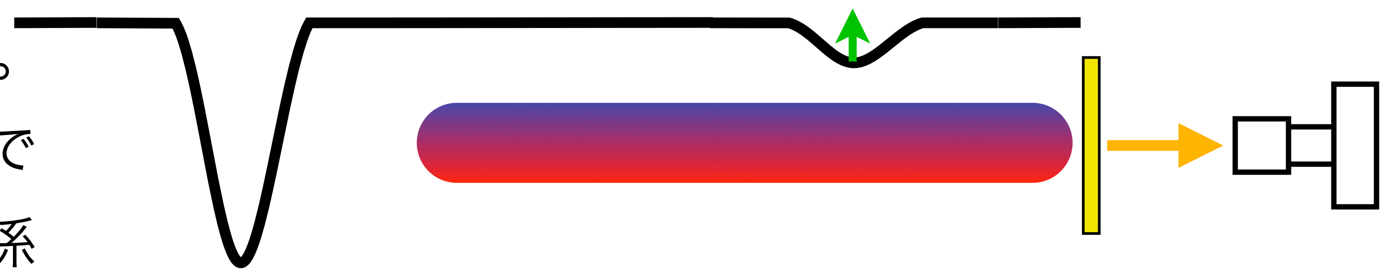
入射側の電位障壁をあげて、カソードより電子を入射。

2. 閉じ込め

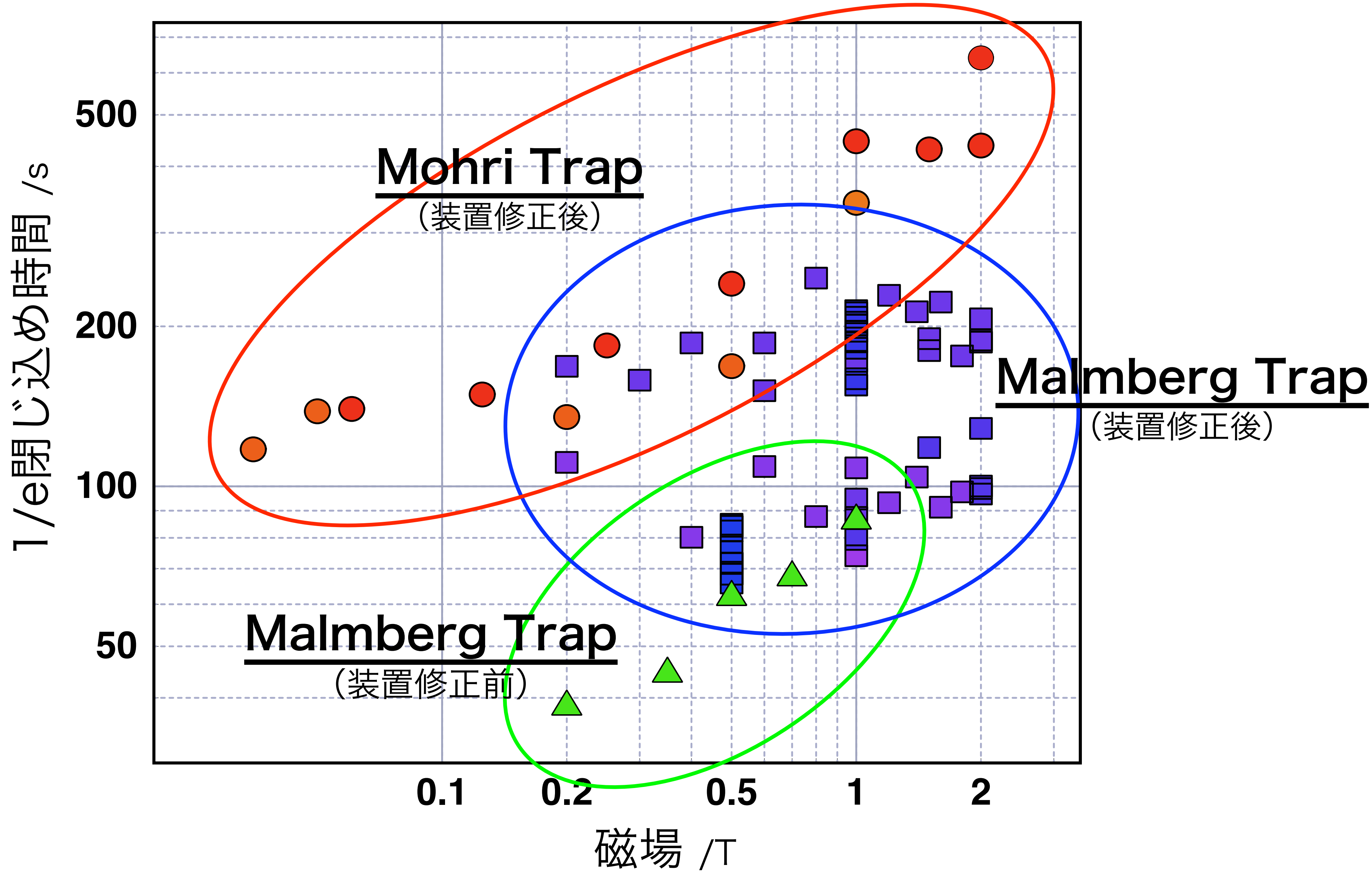
両端の電極による電位障壁の間に閉じ込める。

3. 排出と観測

排出側の電位障壁をあげて電子を排出し、５kVで加速した後に蛍光面へ衝突させる。その発光による輝度分布をＣＣＤカメラで観測する。発光強度と電子密度は比例関係にある。

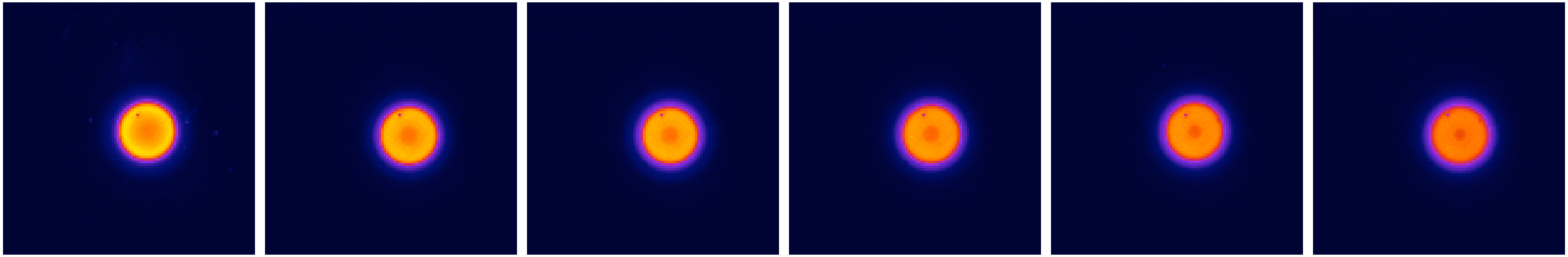


純電子プラズマの閉じ込め時間

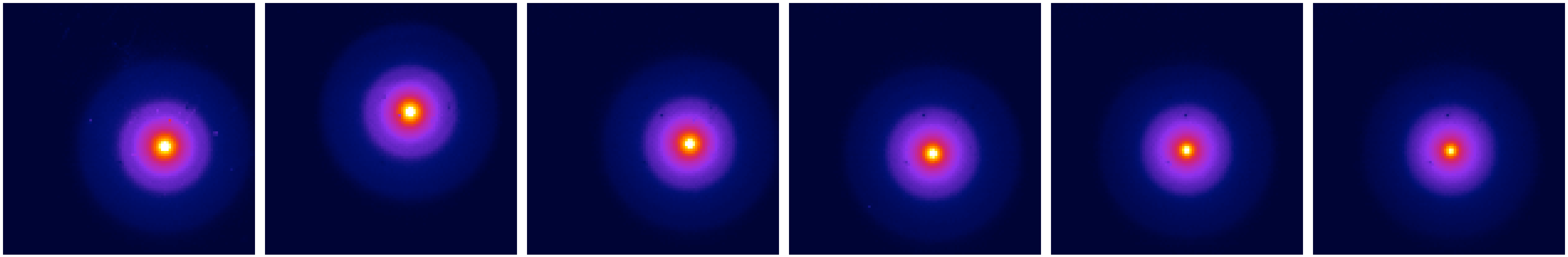


ディオコトロン不安定性

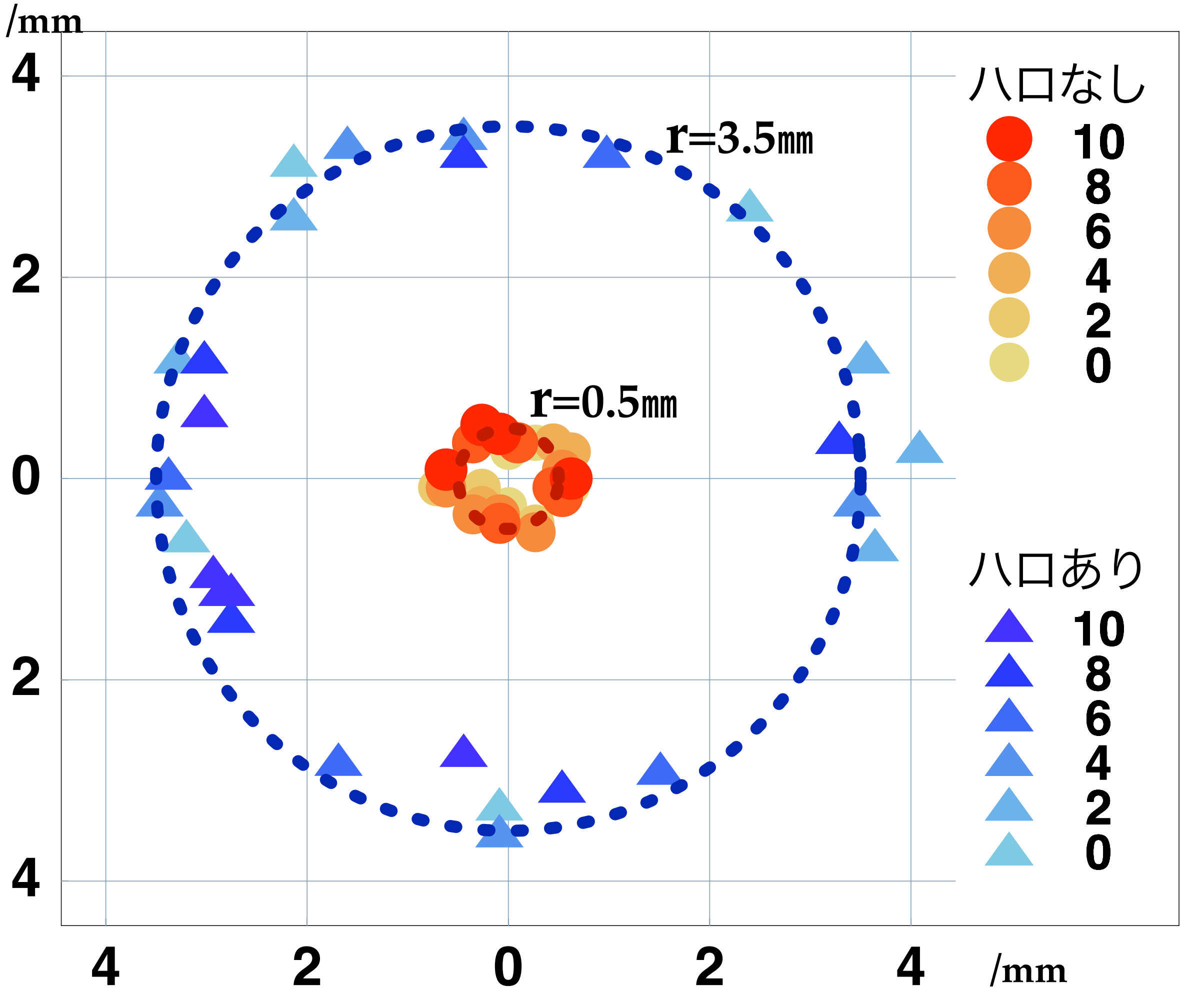
ハロがない場合



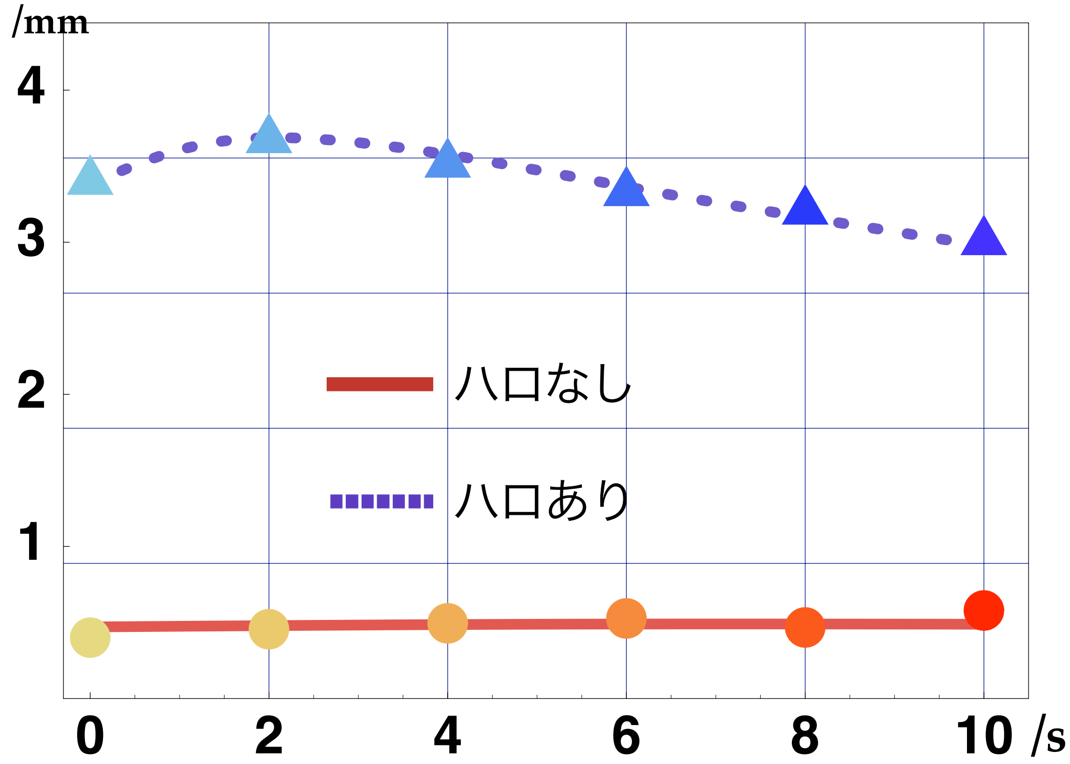
ハロがある場合



重心位置の変化



中心軸からの距離の変化

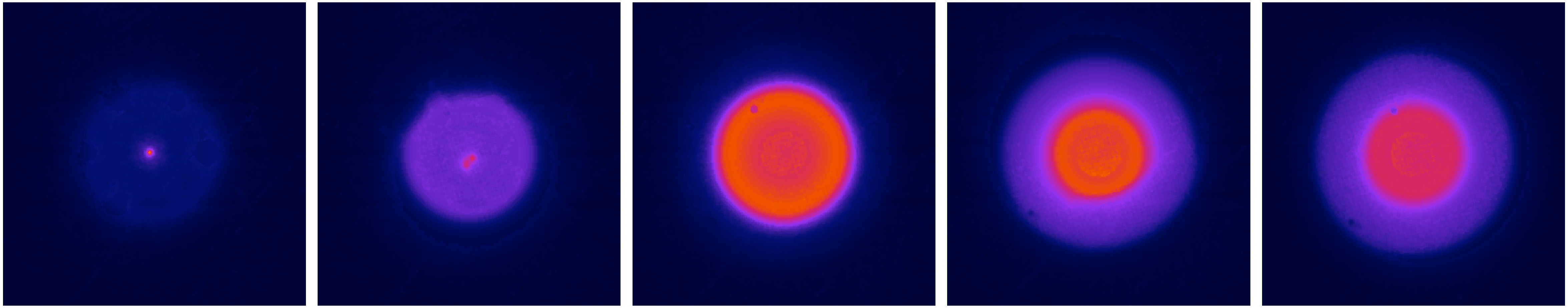


- ハロがあるとディオコトロン不安定性が発生する。
- ディオコトロン振動の回転半径は強い保存性を持っている。

入射条件の制御による初期分布の形成

カソード電圧　-55V

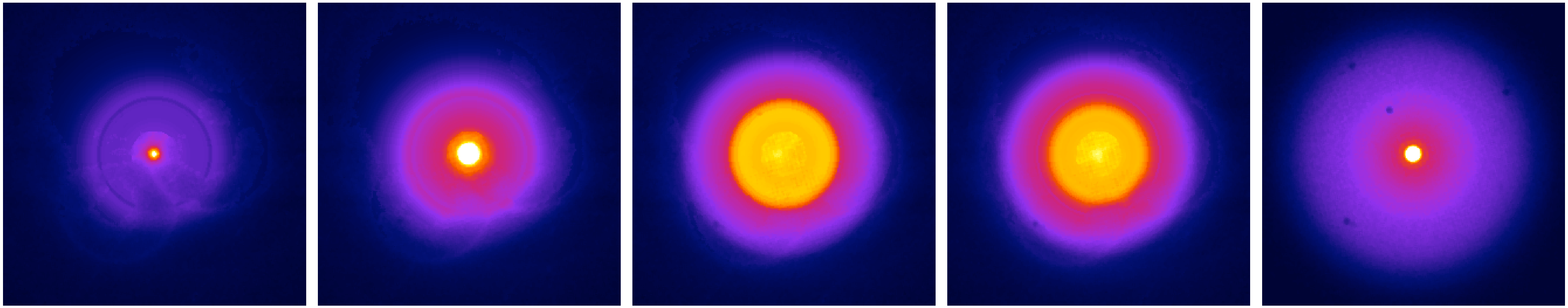
20　60　300　800　2000 [pulses]



！入射パルスが多すぎるとハローができる

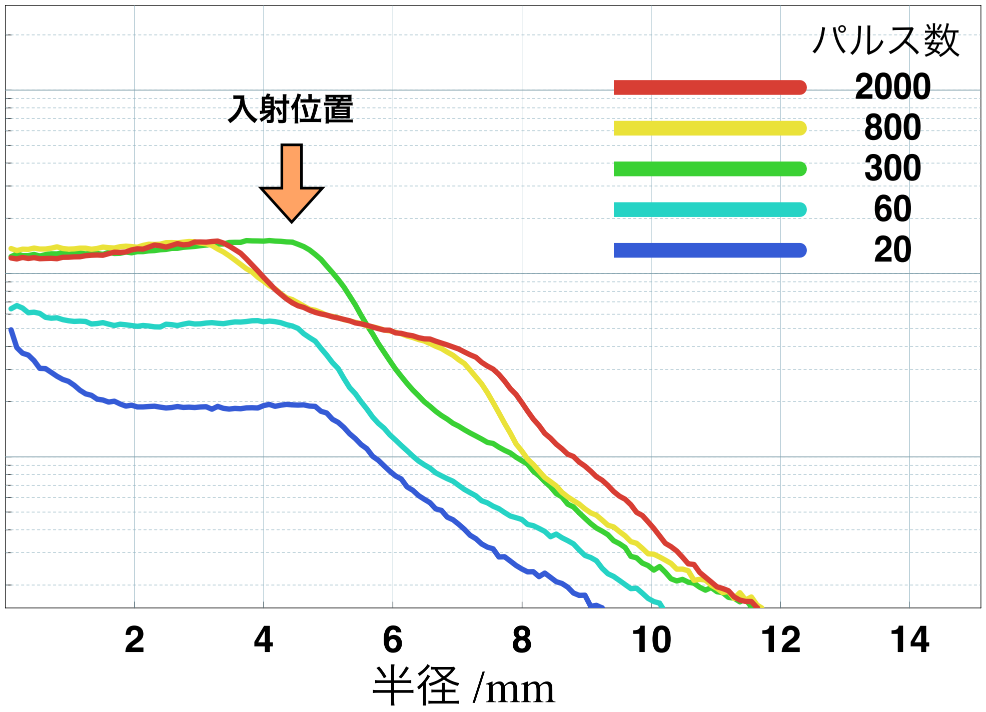
カソード電圧　-65V

20　60　300　800　2000 [pulses]

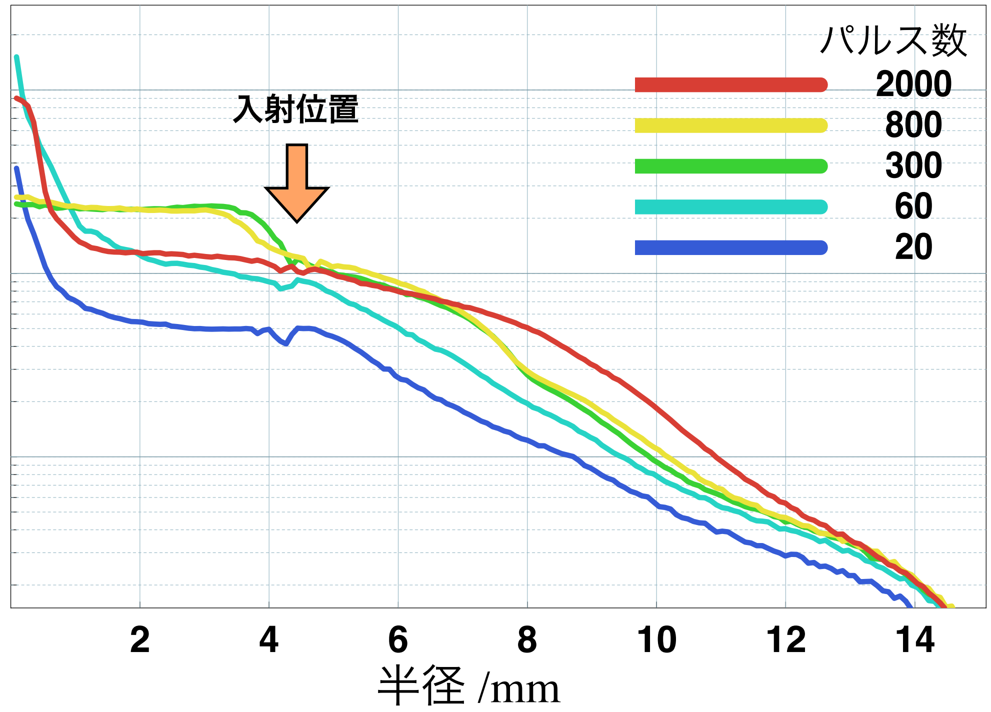


電子密度の径方向分布

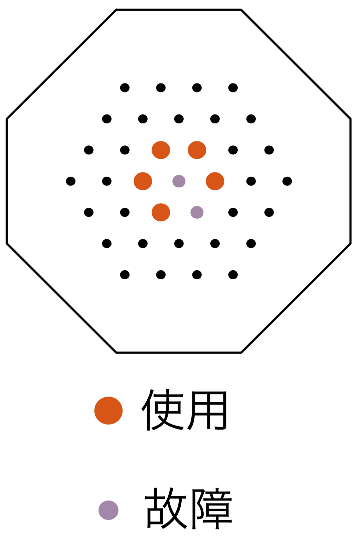
カソード電圧　-55V



カソード電圧　-65V



カソードアレイ



入射条件による初期分布制御

- 入射時の電極電圧は-50Vである。
- 入射エネルギーが大き過ぎると初期分布は平衡分布から大きくずれる。
- 入射量が多すぎると、周縁部の低密度領域が広がる。

フーリエ・ベッセル展開を用いた円筒系におけるプラズマポテンシャルの数値解法

円筒系のPoisson方程式： $\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial\varphi(r,z)}{\partial r}+\frac{\partial^2\varphi(r,z)}{\partial z^2}=\frac{e}{\varepsilon_0}n(r,z)$

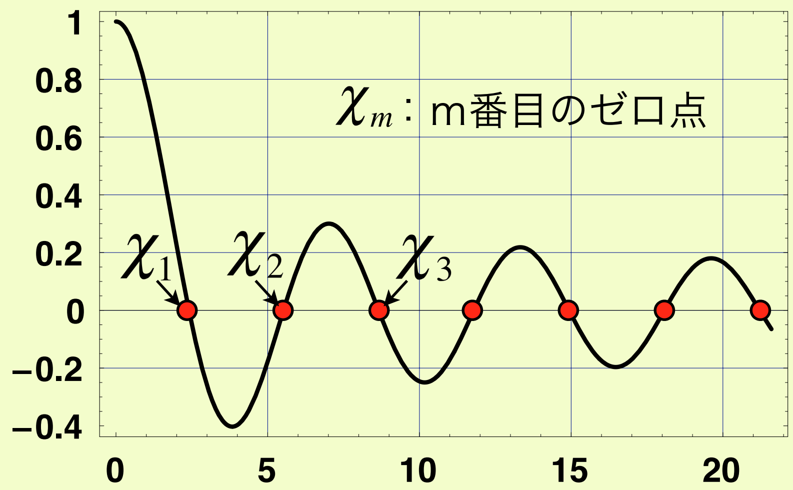
- プラズマの自己ポテンシャルをEq.1に示す級数関数で表し、Poisson方程式の左辺に代入するとEq.2が得られる。

$$\varphi(r,z)=\sum_{m,n}A^c_{m,n}J_0(\chi_m\frac{r}{a})\cos k_n\frac{z}{b}+A^s_{m,n}J_0(\chi_m\frac{r}{a})\sin k_n\frac{z}{b}\quad\cdots\text{(Eq.1)}$$

χ_m：下注参照　　$k_n=2\pi n\ (n=0,1,2...)$

$$\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\varphi(r,z)=\sum_{m,n}\left(\frac{\chi_m^2}{a^2}+\frac{k_n^2}{b^2}\right)\left\{A^c_{m,n}J_0(\chi_m\frac{r}{a})\cos k_n\frac{z}{b}+A^s_{m,n}J_0(\chi_m\frac{r}{a})\sin k_n\frac{z}{b}\right\}\quad\cdots\text{(Eq.2)}$$

$J_0(x)$：０次の第一種ベッセル関数



- プラズマの密度分布をEq.1と同様な級数関数(Eq.3)で表すと、それぞれの係数にはEq.4の関係が成り立つ。

$$n(r,z)=\sum_{m,n} B^c_{m,n} J_0(\chi_m \frac{r}{a}) \cos k_n \frac{z}{b} + B^s_{m,n} J_0(\chi_m \frac{r}{a}) \sin k_n \frac{z}{b} \quad \cdots \text{(Eq.3)}$$

$$A_{m,n}=\frac{e}{\varepsilon_0}\left(\frac{\chi_m^2}{a^2}+\frac{k_n^2}{b^2}\right)^{-1} B_{m,n} \quad \cdots \text{(Eq.4)}$$

- 直交性を利用したフーリエ・ベッセル展開を用いて、密度分布から級数の各係数を求める。

$$B^c_{m,n}=\int_0^a\left(\int_0^b N(r,z)\cos k_n\frac{z}{b}\,dz\right) r\,J_0(\chi_m\frac{r}{a})dr \Big/ \int_0^b \cos^2 k_n\frac{z}{b}\,dz \int_0^a r\,J_0(\chi_m\frac{r}{a})^2 dr$$

$$\int_0^a r\,J_0(\chi_p\frac{r}{a})\,J_0(\chi_q\frac{r}{a})dr=\begin{cases}\frac{1}{2}a^2 J_1(\chi_p)^2 & (p=q)\\ 0 & (p\neq q)\end{cases}$$

$$\int_0^b \cos k_p\frac{z}{b}\ \cos k_q\frac{z}{b}\,dz=\begin{cases} b & (p=q=0)\\ \frac{b}{2} & (p=q=1,2,3...)\\ 0 & (p\neq q)\end{cases}$$

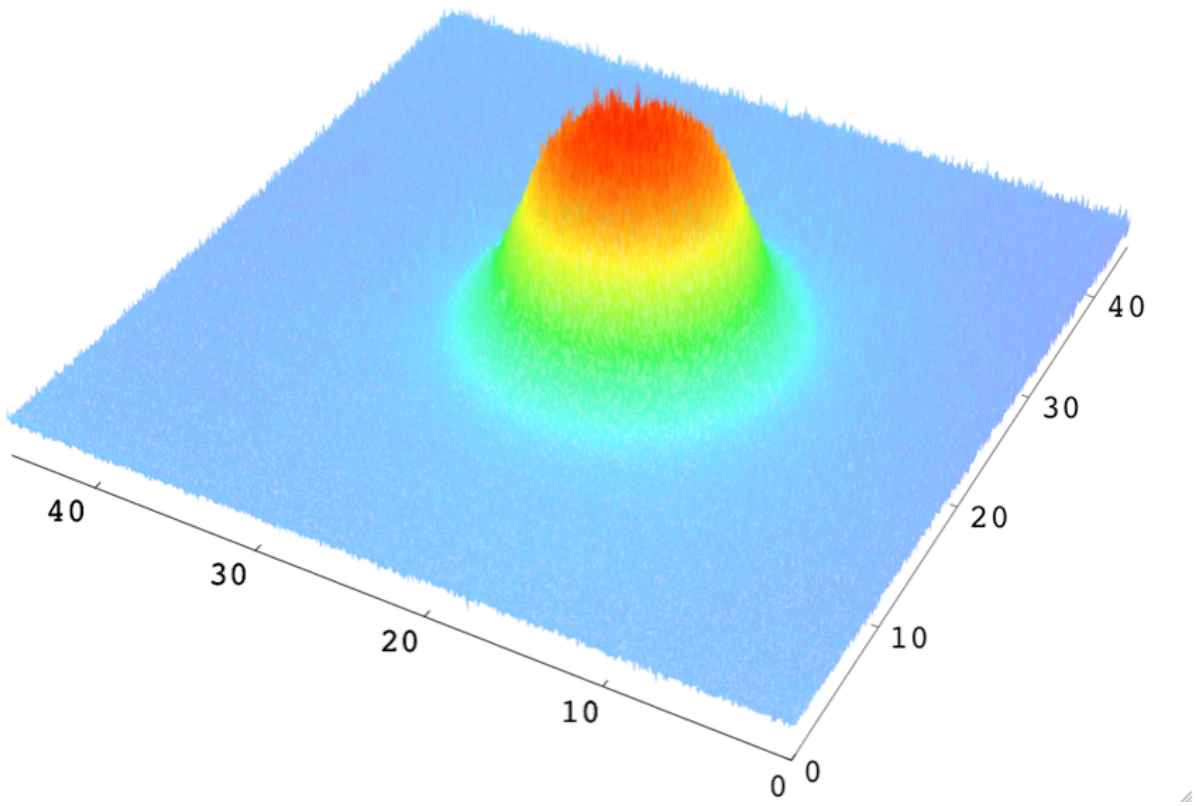
純電子プラズマのHarmonic Potential中における３次元平衡分布

平衡状態にある純電子プラズマのボルツマン分布を仮定した密度分布関数

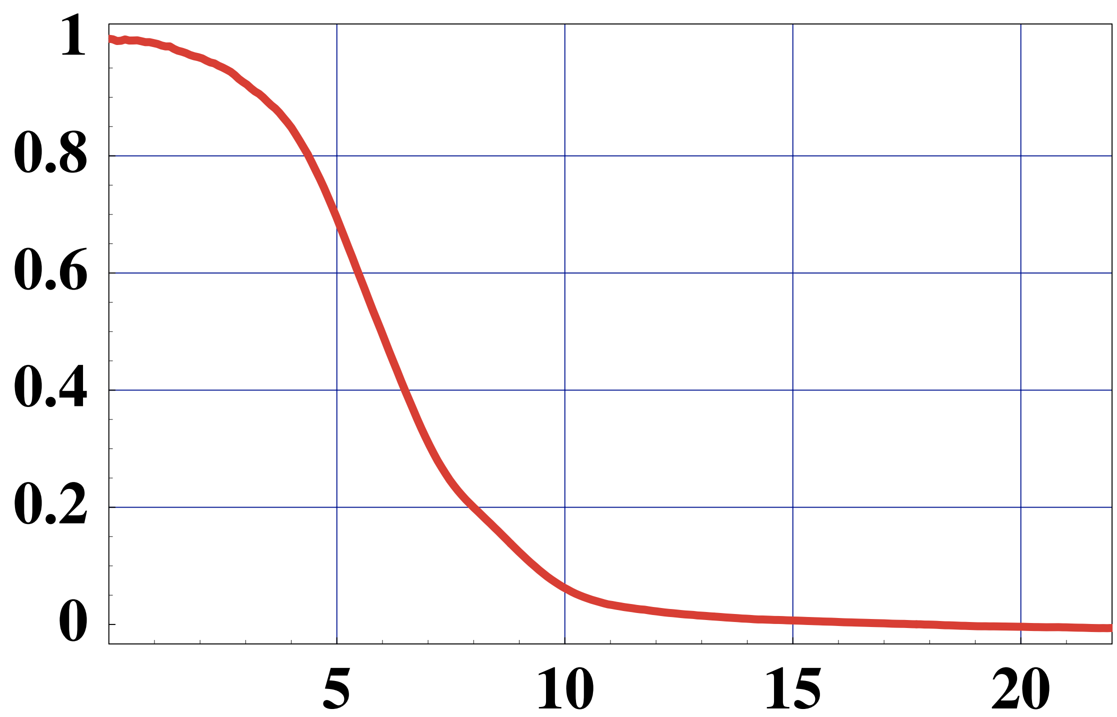
$$N\ (r,\ z) = n\ (r)\ \frac{\mathrm{Exp}\left(-\frac{\phi\,(r,z)}{T}\right)}{\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{Exp}\left(-\frac{\phi\,(r,z)}{T}\right)dz}$$

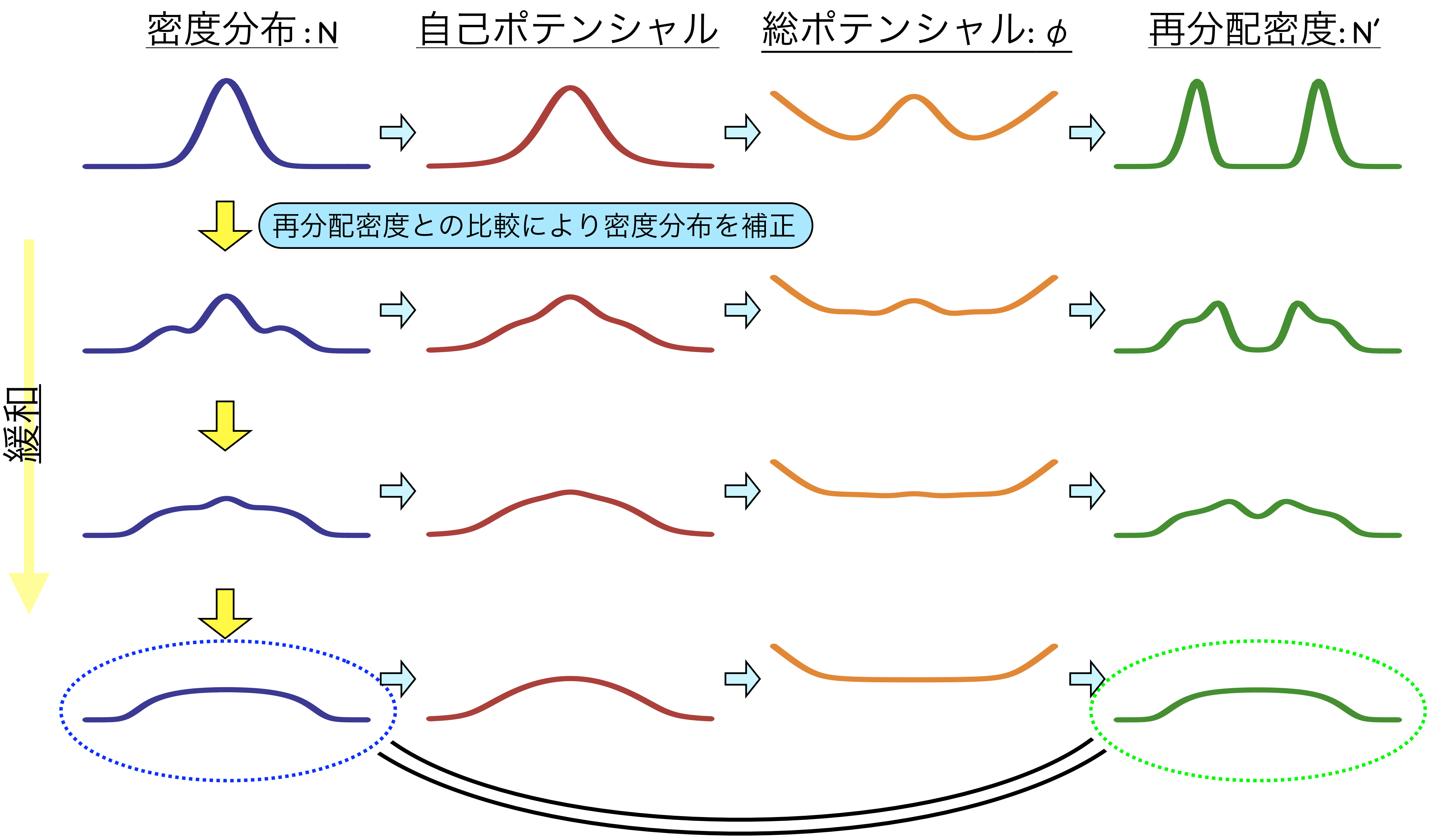
/mm

ＣＣＤカメラで計測した電子の軸方向線密度分布



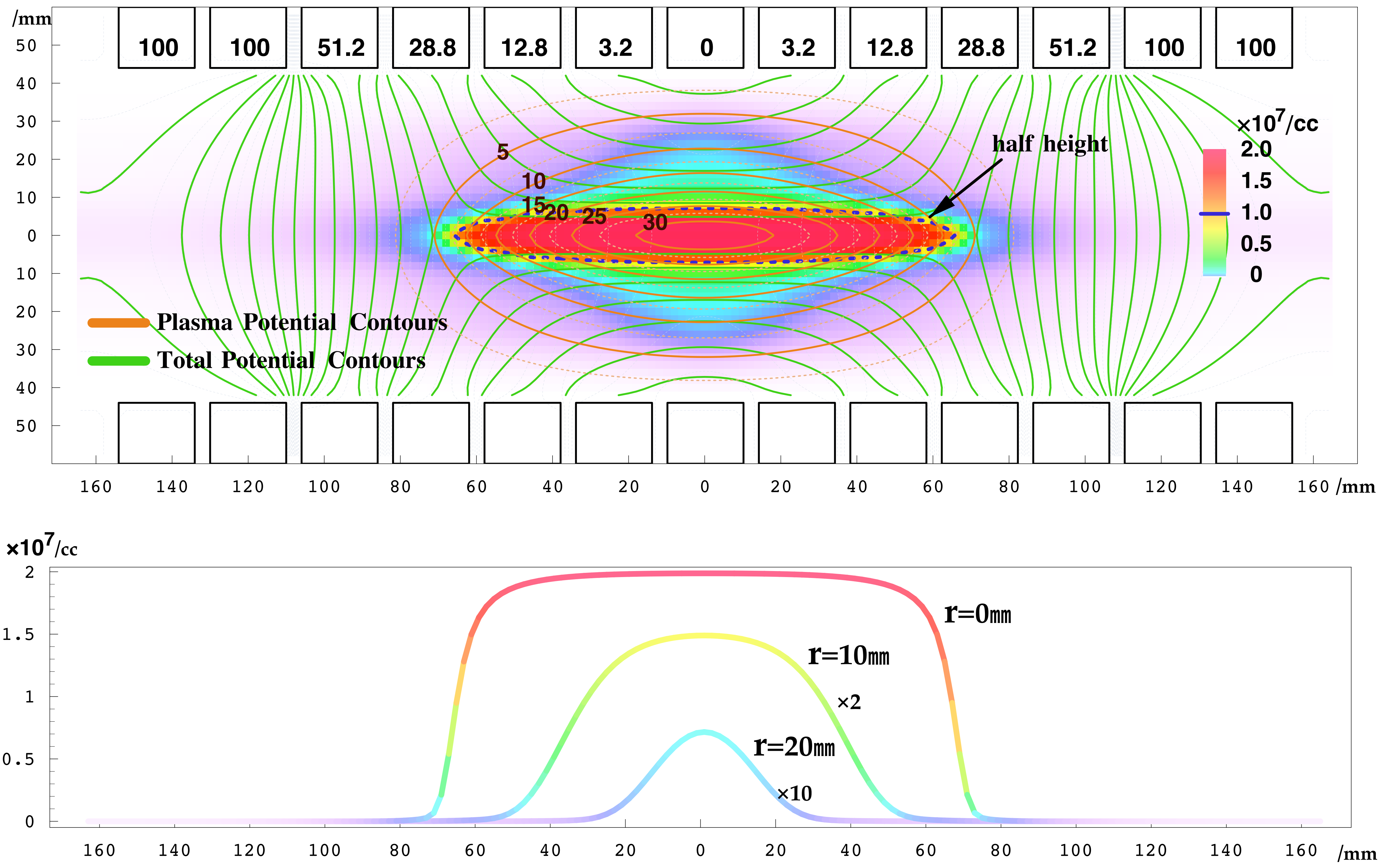
線密度径方向分布：n(r)





密度分布 : N
自己ポテンシャル
総ポテンシャル: ϕ
再分配密度: N′
再分配密度との比較により密度分布を補正
緩和

平衡分布(T=1eV)



/mm
100
100
51.2
28.8
12.8
3.2
0
3.2
12.8
28.8
51.2
100
100
5
10
15
20
25
30
half height
×10^7/cc
2.0
1.5
1.0
0.5
0
Plasma Potential Contours
Total Potential Contours
160 140 120 100 80 60 40 20 0 20 40 60 80 100 120 140 160 /mm
×10^7/cc
r=0mm
r=10mm
×2
r=20mm
×10
/mm

結 論

- 入射条件の制御により初期分布を平衡分布に近接させることができた。
- 実験で計測した線密度分布を用いて、数値計算により軸方向の分布も含めた平衡分布を導出した。

今 後 の 課 題

- 軸方向エネルギー分析により内部ポテンシャルを計測し、計算ポテンシャルの妥当性を検証する。
- さらに、エネルギー分析の応用から温度を導出する。