

磁化回転プラズマ中の径方向イオン流

静岡大理 佐伯紘一

- 1) 円筒磁化プラズマの中心軸上の電位を負にすることによって、プラズマを回転させながら中心軸に流れ込むイオン流の負電位依存性を観測した。負電位を増すにしたがい、次の4領域が存在する。
 - a) 衝突イオン流の形成
 - b) 中心部へのイオン流入とらせん波によるイオン放出の不安定状態
 - c) イオン流の減少と偏心運動
 - d) 径方向イオン流の抑制

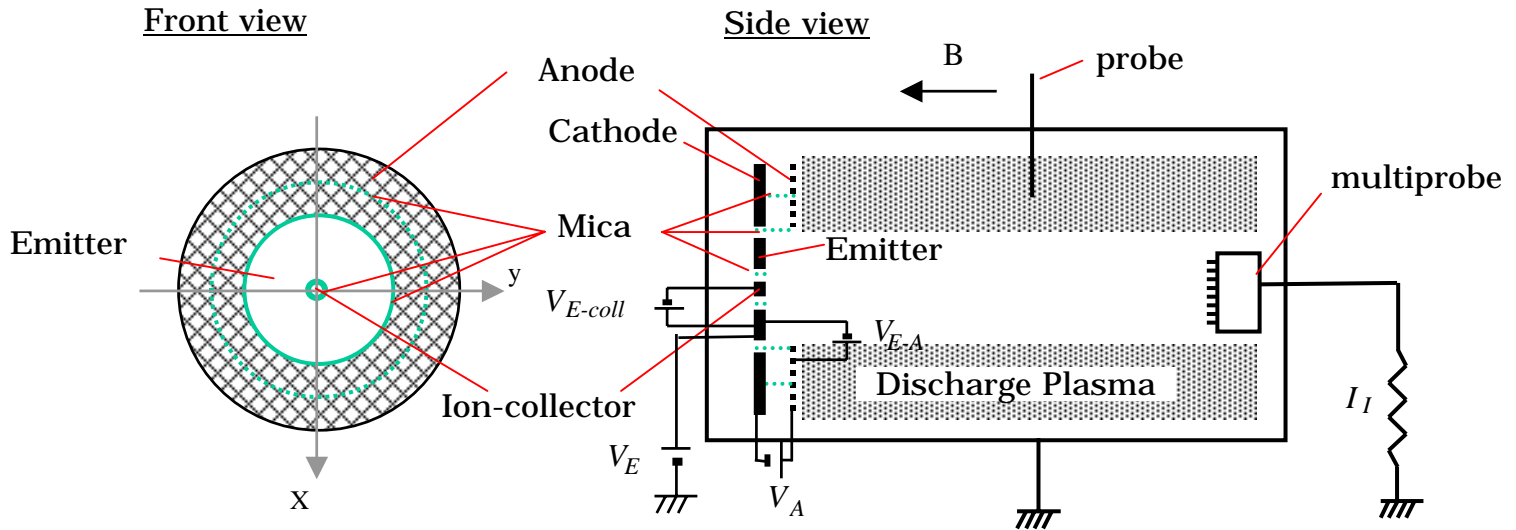
- 2) 径方向イオン流の抑制やらせん波を説明するために、Kono-Tanakaが導いた磁化プラズマ中の低周波波動微分方程式を見直し、Rosenbulth-Simonの式を用いて、イオンラーモア半径効果を含ませ、軸方向の波数領域を拡張した結果、不均一径方向電場により、プラズマ密度勾配領域における電位・密度変動や径方向イオン流が抑制される領域が存在する。

「プラズマと凝縮物質の科学」研究討論会

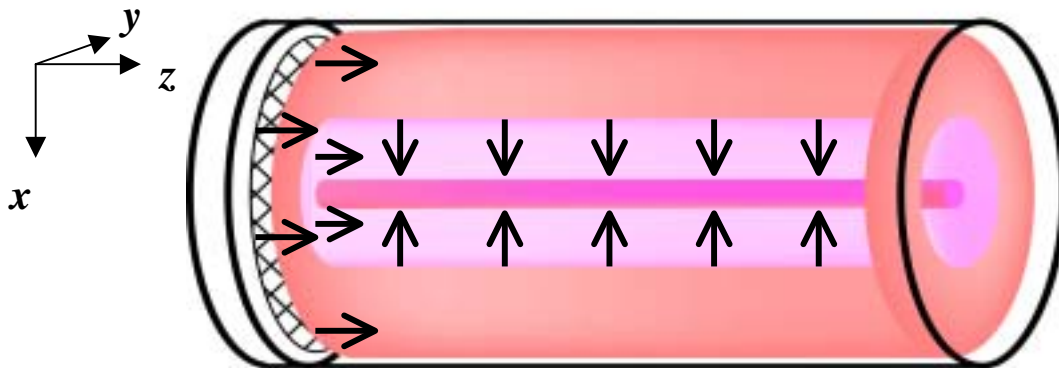
核融合科学研究所研究棟1、401会議室、

2003年12月18日(木)

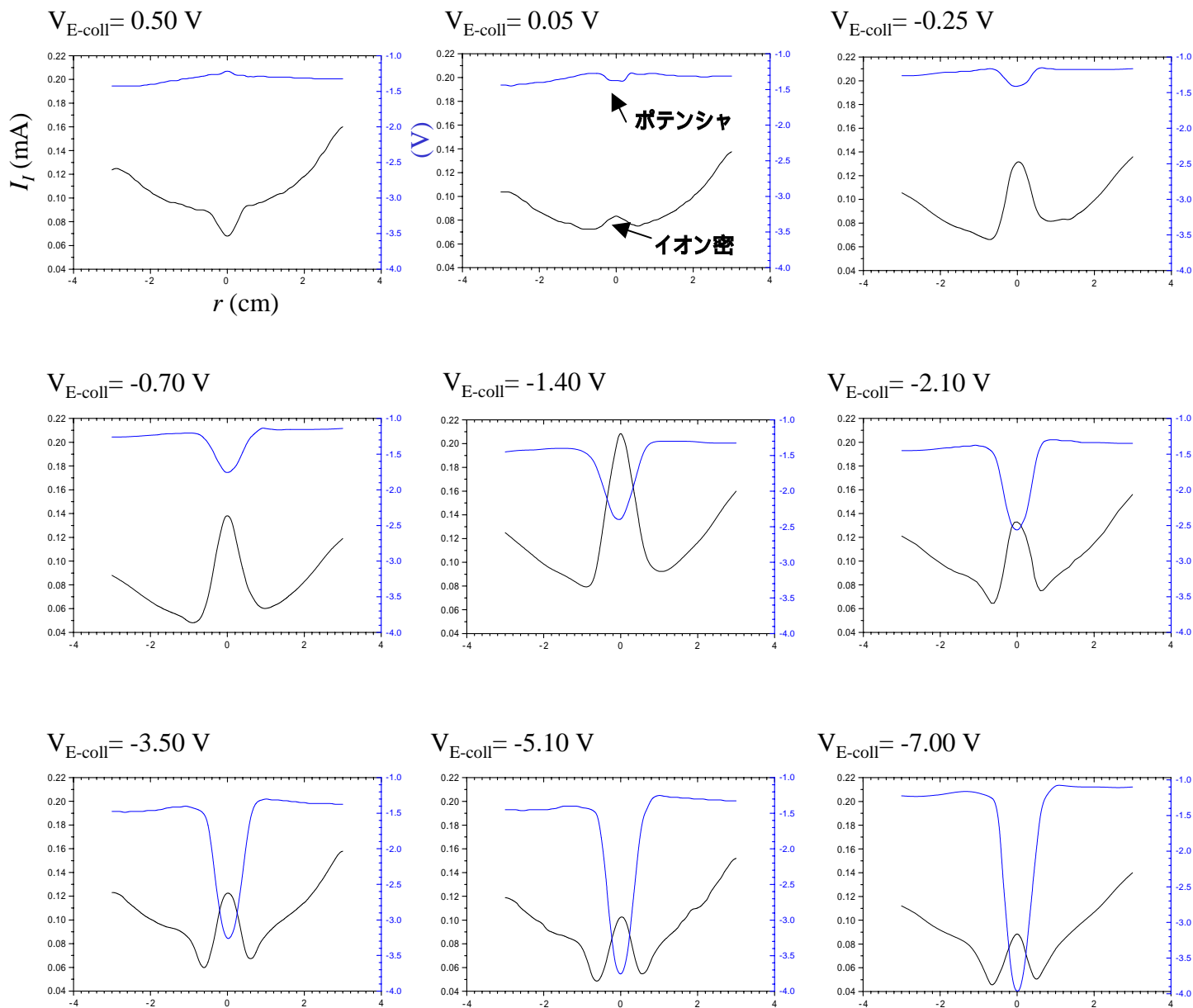
実験装置



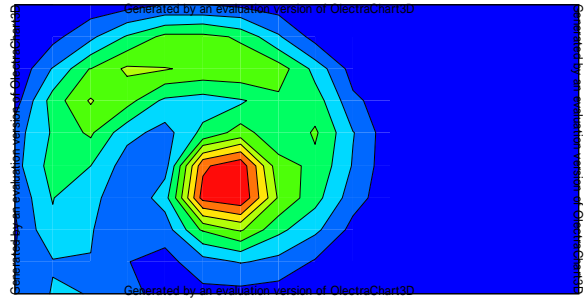
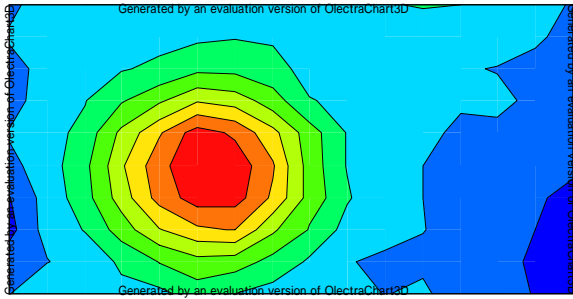
中心軸負電位と径方向イオン流



ポテンシャルとイオン密度の径方向依存性 ($p=0.43 \times 10^{-3} \text{ Torr}$)

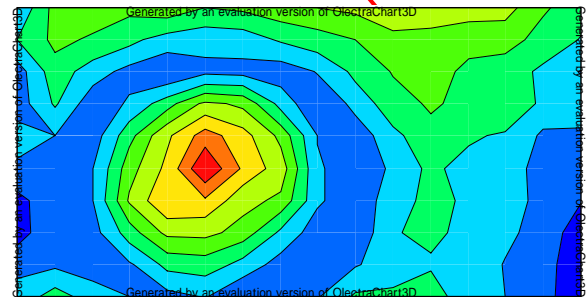
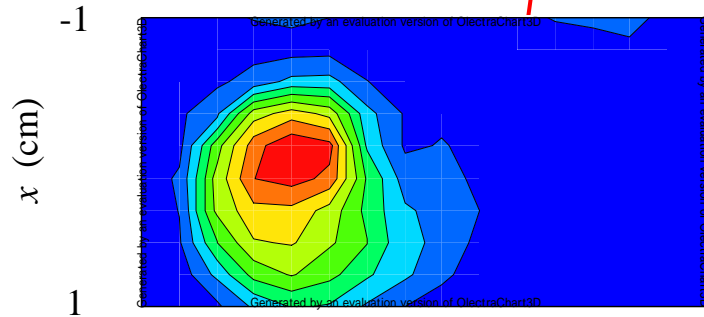
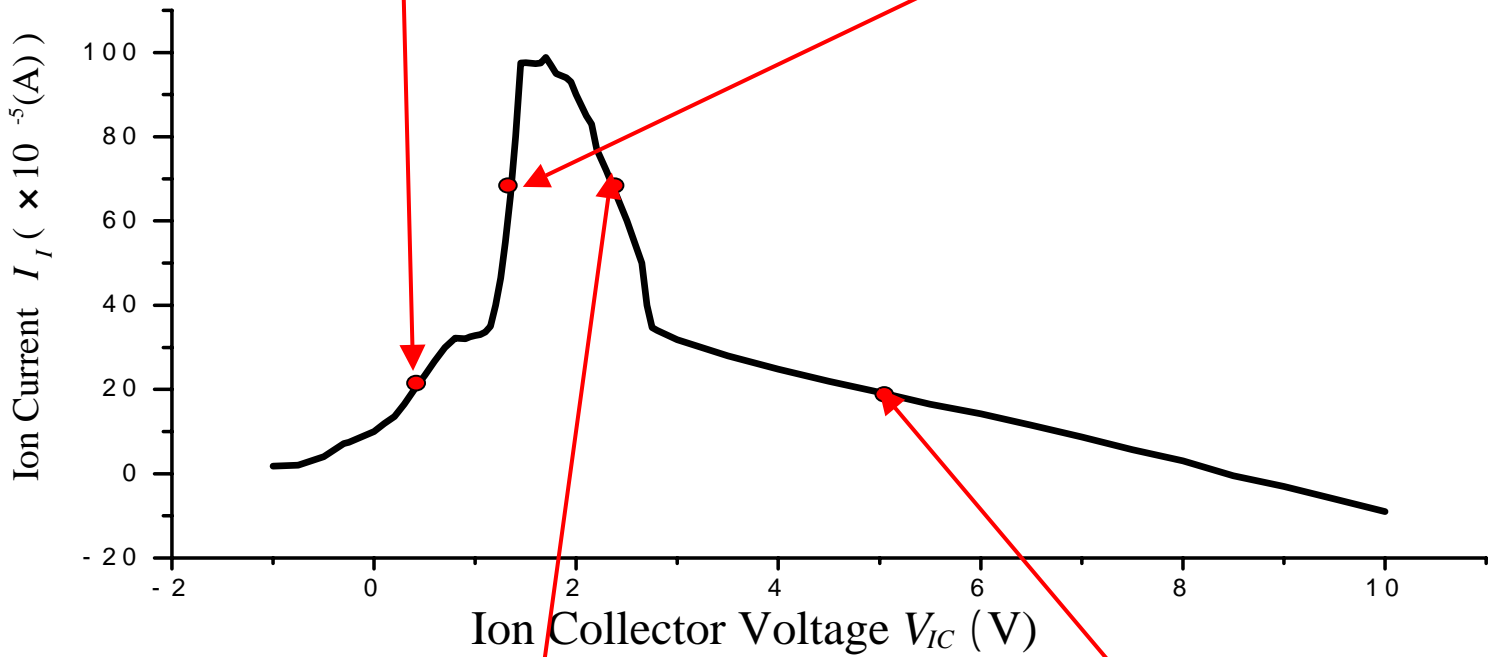


グリッドなし装置のプラズマ形状



回転

らせん



x (cm)

-2

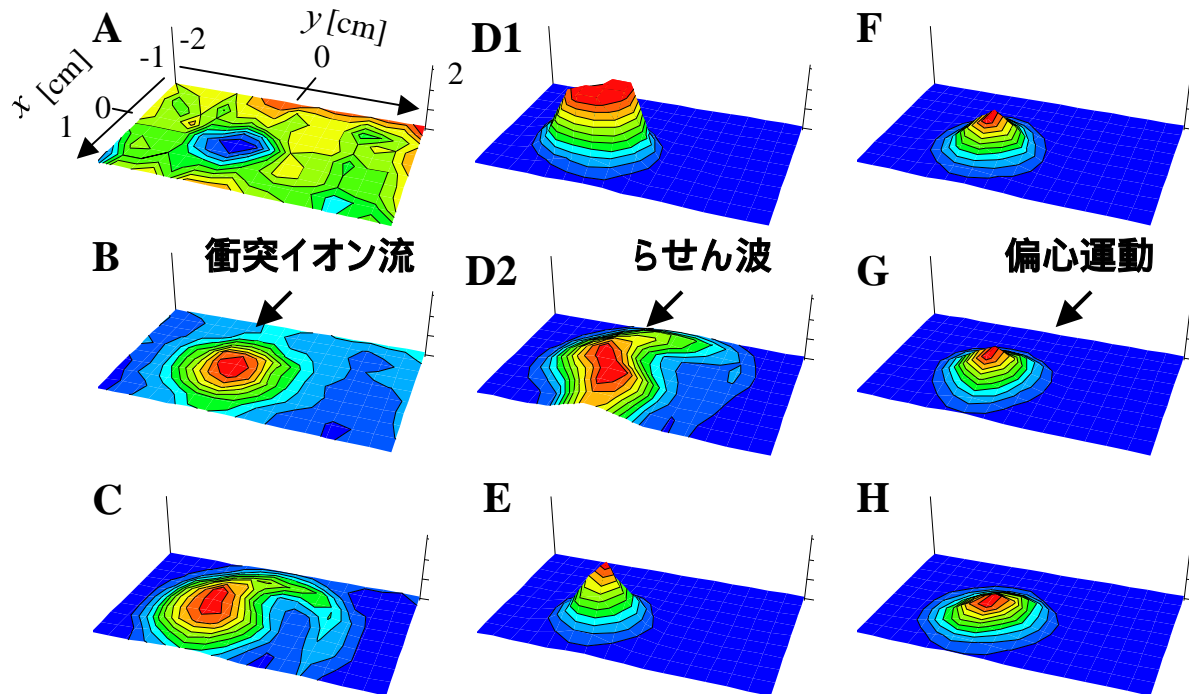
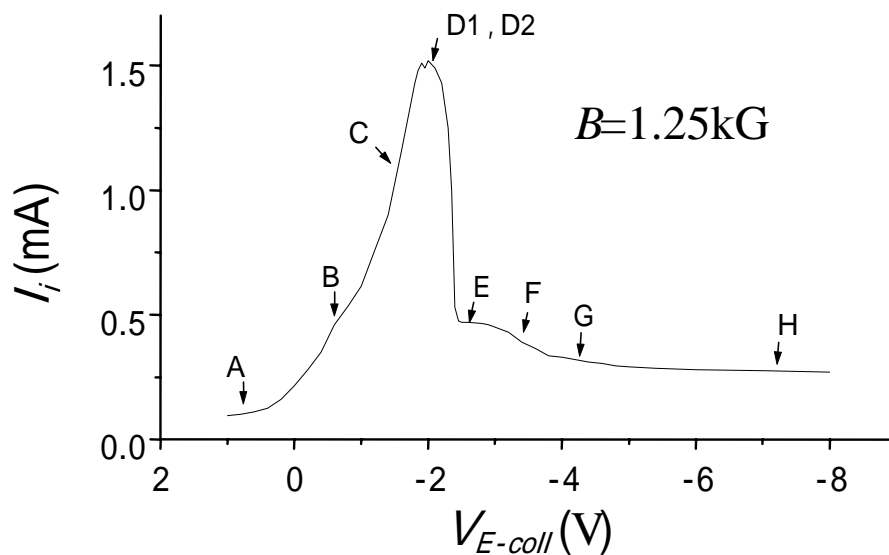
y (cm)

2

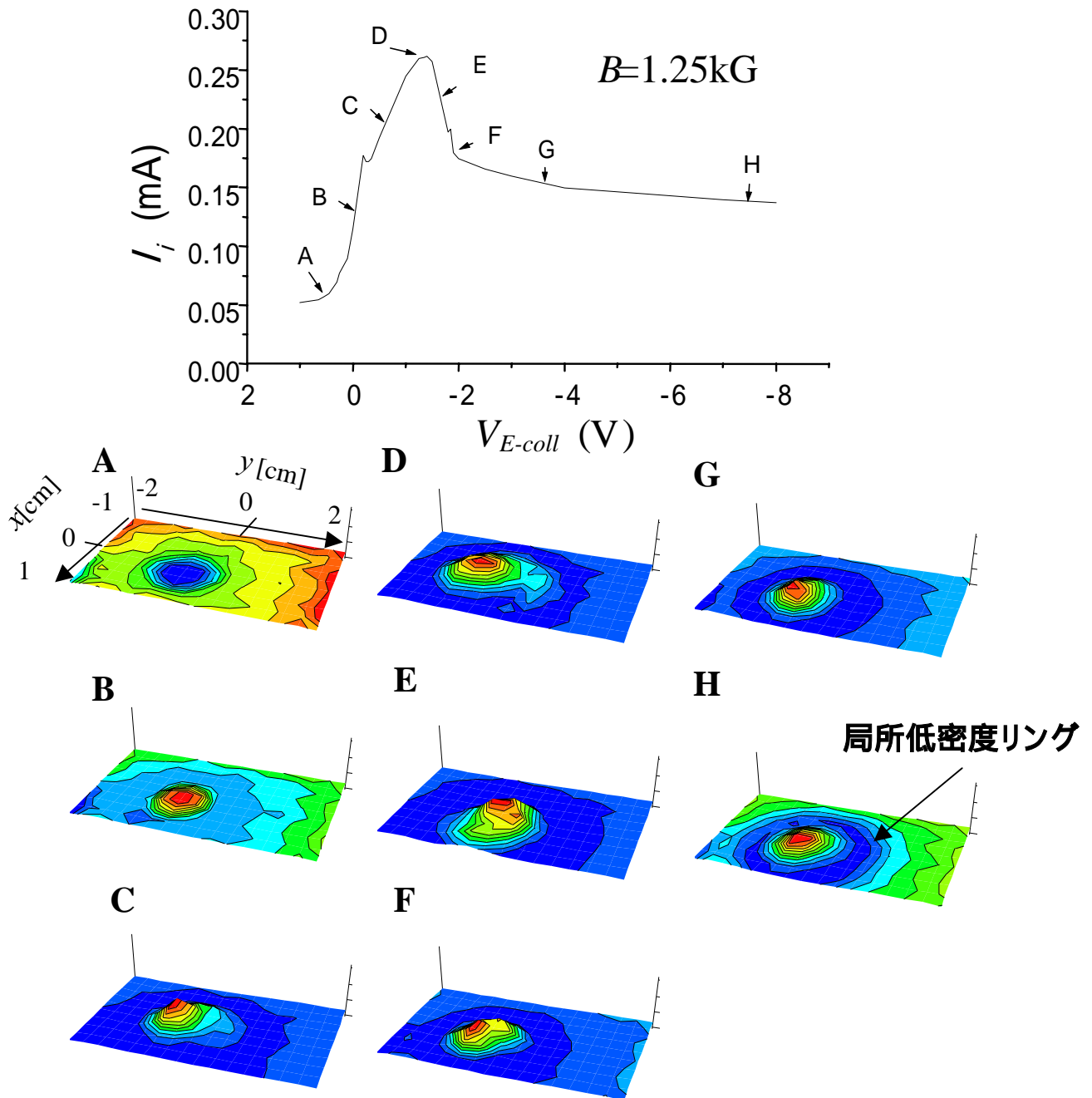
偏心

リング

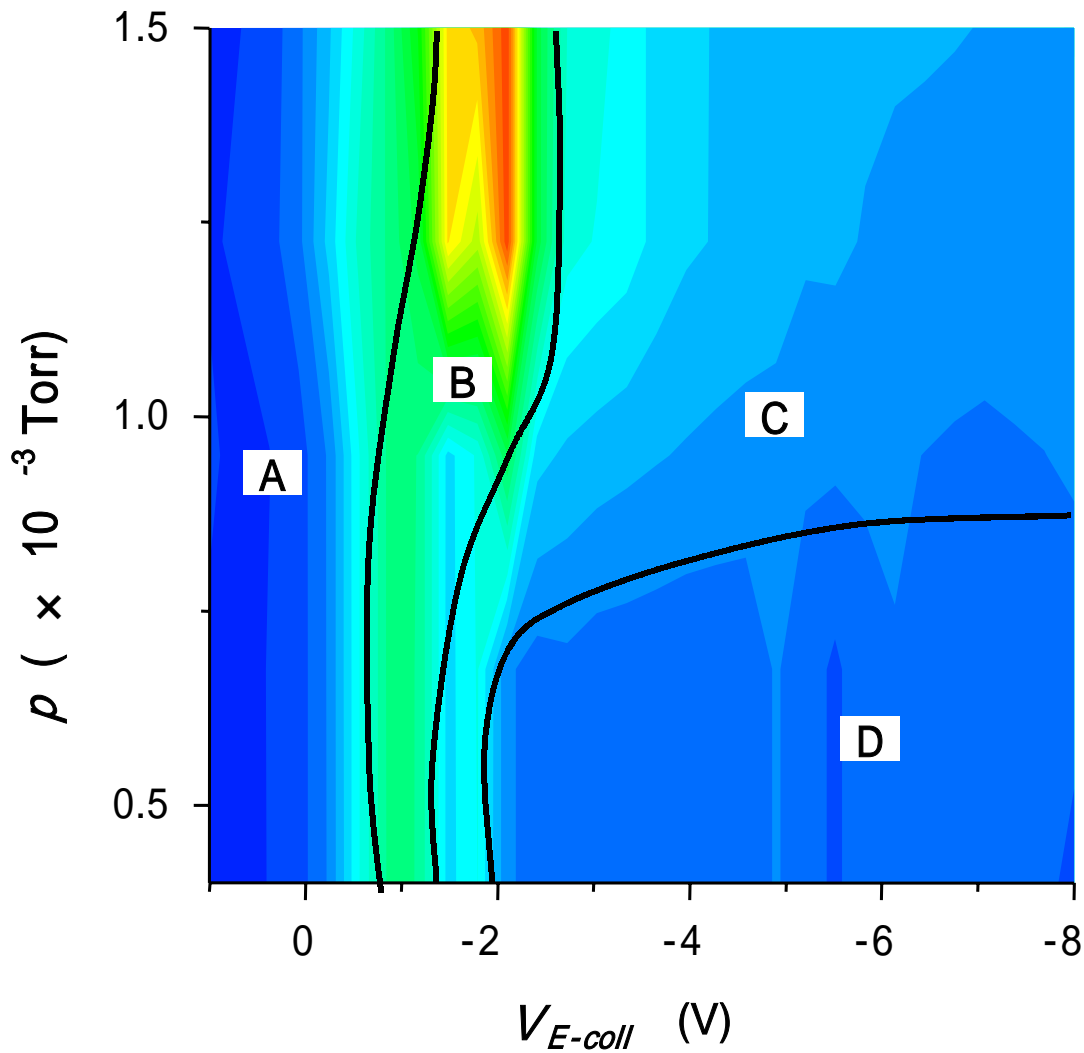
径方向イオン流のコレクター電位依存性 ($p=1.5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$)



径方向イオン流のコレクター電位依存性 ($p=0.43 \times 10^{-3} \text{ Torr}$)

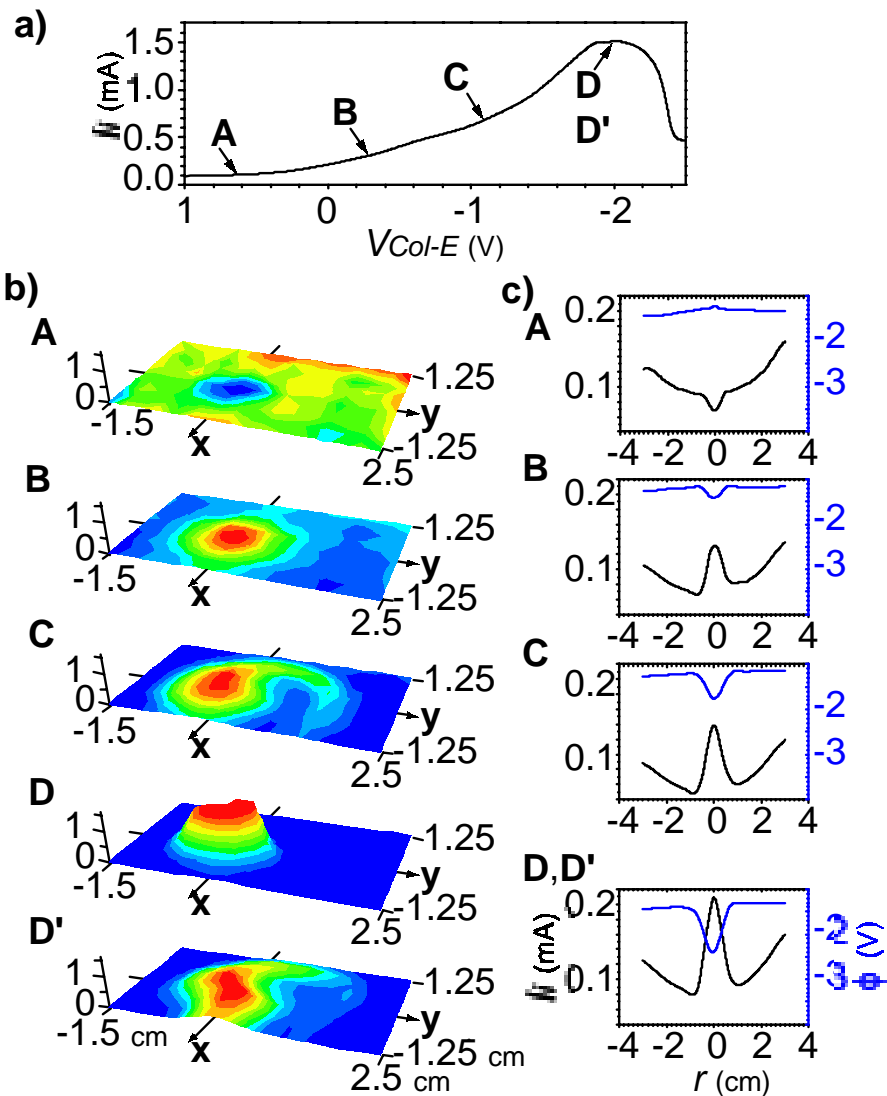


プラズマ形状の領域

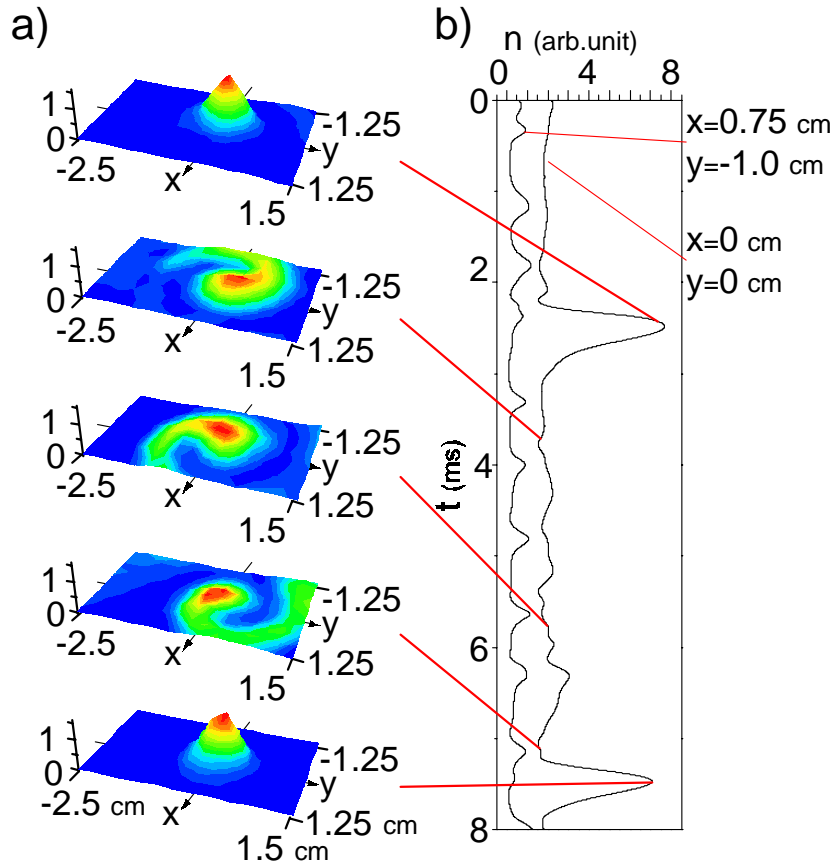


- (A) 衝突イオン流の形成
- (B) らせん波によるイオン流の放出と
中心部へのイオンの流入の不安定状態
- (C) 偏心運動とイオン流の減少
- (D) 局所低密度リングの形成によるイオン流の抑制

電位の谷におけるプラズマの振る舞い



イオン輸送パルセーション



低周波波動微分方程式

ポアソン方程式をデバイ波数 k_{De} を用いて変形

$$\frac{1}{k_{De}^2} \nabla^2 \frac{e\phi_1}{k_B T_e} + \left(\frac{n_i}{n_0} - \frac{n_e}{n_0} \right) = 0$$



プラズマ準中性条件 $n_i = n_e$

+ 電子の変動, イオンの変動



$$0 = \frac{m\omega_e^*}{\bar{\omega}} \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \quad \dots \text{(a) イオンの反磁性ドリフト項}$$

$$+ \rho_s^2 \left[\frac{1}{n_0 r^2} \frac{d}{dr} \left\{ n_0 r^3 S_0(r) \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \right\} \right] \quad \dots \text{(b) 径方向波数分散項}$$

$$+ \frac{1-m^2}{r^2} S_0 \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \quad \dots \text{(c) 方位角方向波数分散項}$$

$$+ \frac{1}{\omega} \left[-\frac{\omega_e^*}{\omega_c} \frac{(\bar{\omega} + m\omega_E)^2}{\bar{\omega}} \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \right] \quad \dots \text{(d) 遠心力項}$$

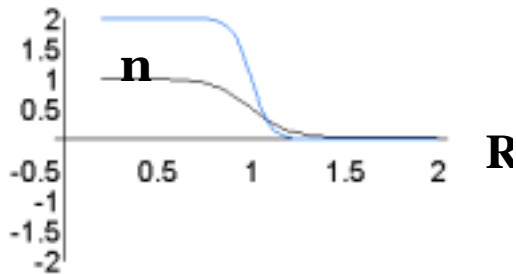
$$- \frac{r\omega_e^*}{\omega_c} \frac{d m\omega_E}{dr} \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \quad \dots \text{(e) 角速度シア一項}$$

$$+ \frac{\rho_s^2}{r^3} \frac{d}{dr} \left(r^3 S_0(r) \frac{d m\omega_E}{dr} \right) \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \quad \dots \text{(f) 角速度シア一勾配項}$$

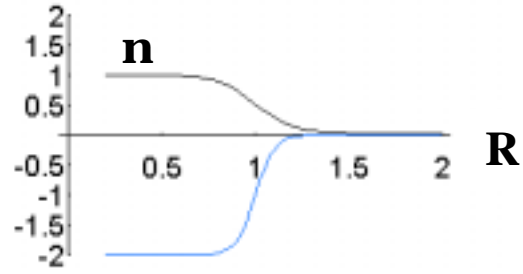
$$- \frac{m\omega_e^*}{\bar{\omega}} \left(\frac{1 - \frac{k_z^2 v_{Te}^2}{i v_e} \left(\frac{1}{\omega_e^*} - \frac{1}{\bar{\omega}} \right) + \frac{(k_z^2 v_{Te}^2)^2}{v_e^2 \omega_e^* \bar{\omega}}}{1 + \left(\frac{k_z^2 v_{Te}^2}{v_e \bar{\omega}} \right)^2} \right) \left(\frac{e\phi_1}{k_B T_e} \right) \quad \dots \text{(g) 電子の衝突, 磁場方向の波数 } k_z \text{ を考慮した電子の反磁性ドリフト項}$$

径方向電場がある場合の衝突性不安定

> 0



< 0



衝突ドリフト波不安定性の不安定領域

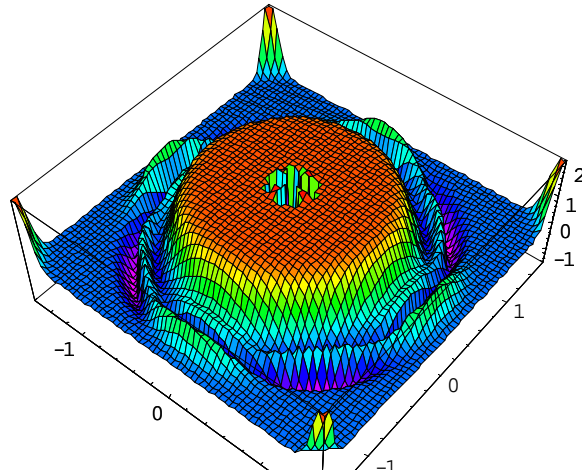
$$\gamma = W_e^* - \overline{W_r} = W_e^* + W_E - W_r > 0$$

不安定性による径方向イオン流束

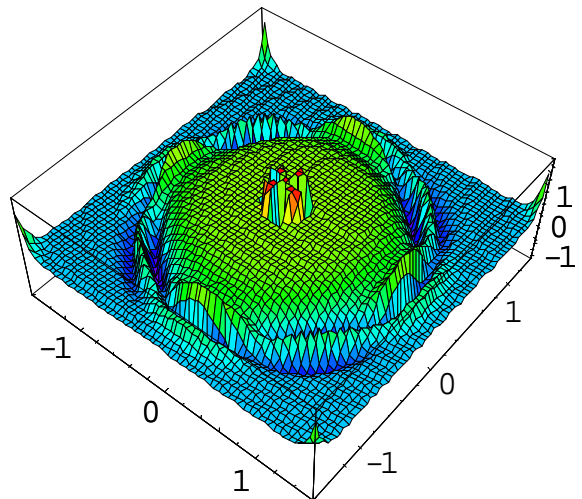
$$\begin{aligned} \Gamma &= \overline{\tilde{n} \tilde{V}} \\ &= \text{Re}[n \bullet V^*] \frac{e^{2\omega it}}{2} \\ &= n_0 \frac{k\phi_0}{B} \text{Re}[ie^{i\theta_{n\phi}}] \frac{e^{2\omega it}}{2} \end{aligned}$$

固有振動解

$m=8, n=2$



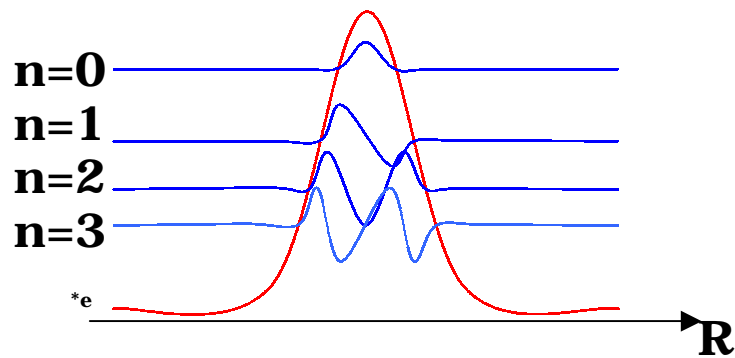
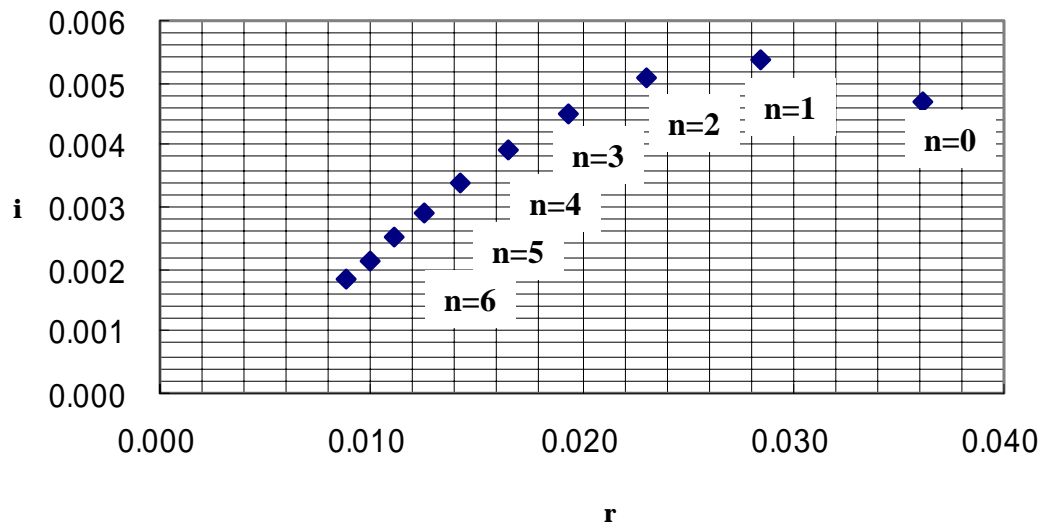
ポテンシャルの振動



密度の振動

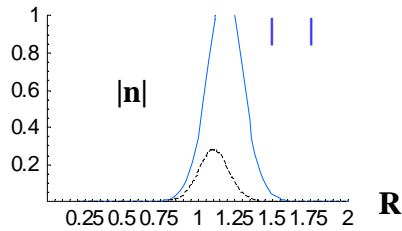


$m = 8$ における固有値の分布

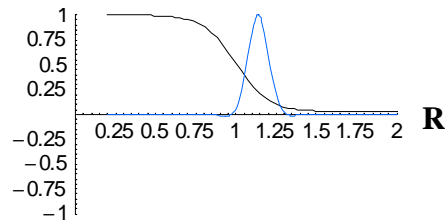


m=8における計算結果

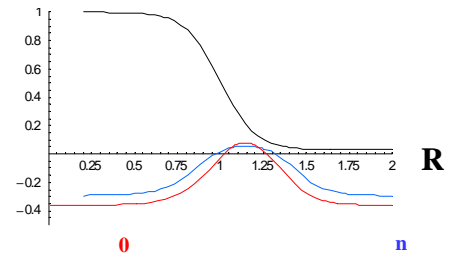
n=0



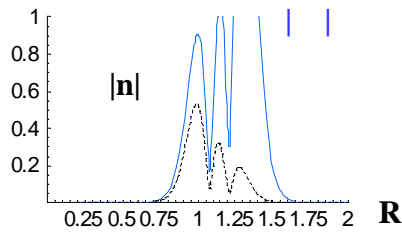
n



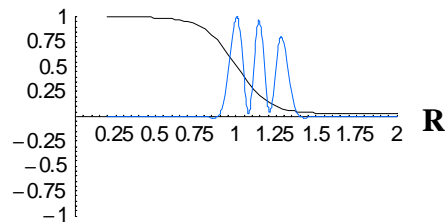
n



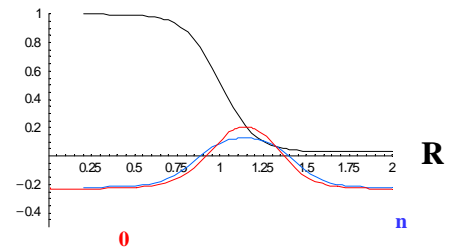
n=2



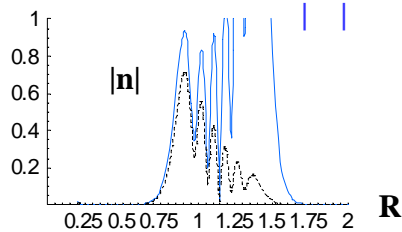
n



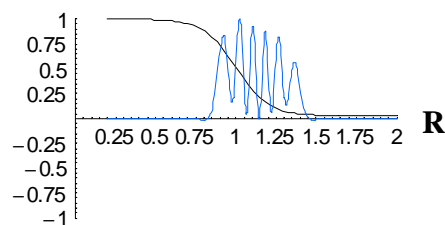
n



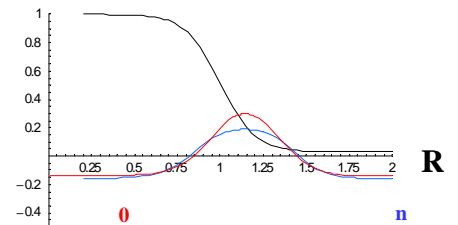
n=5



n

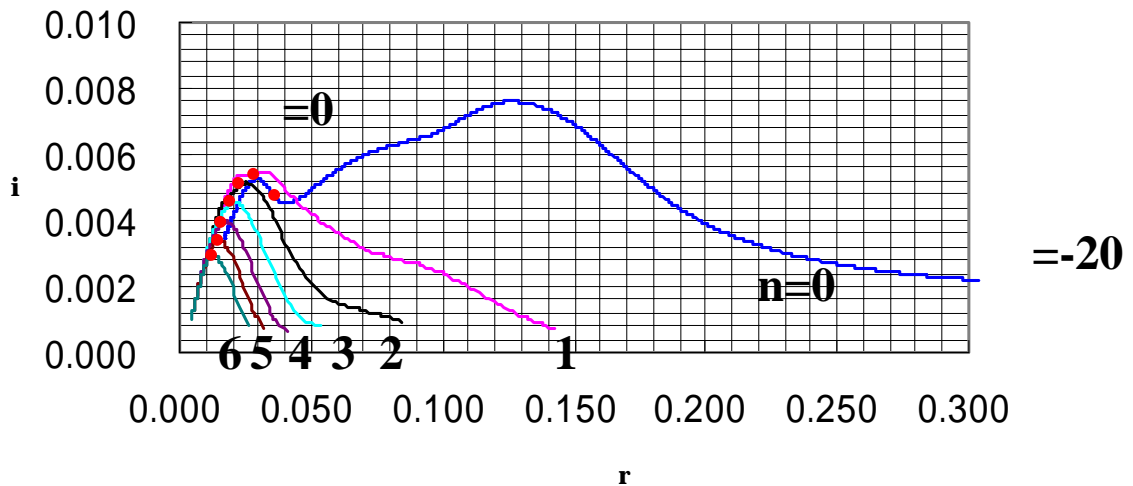
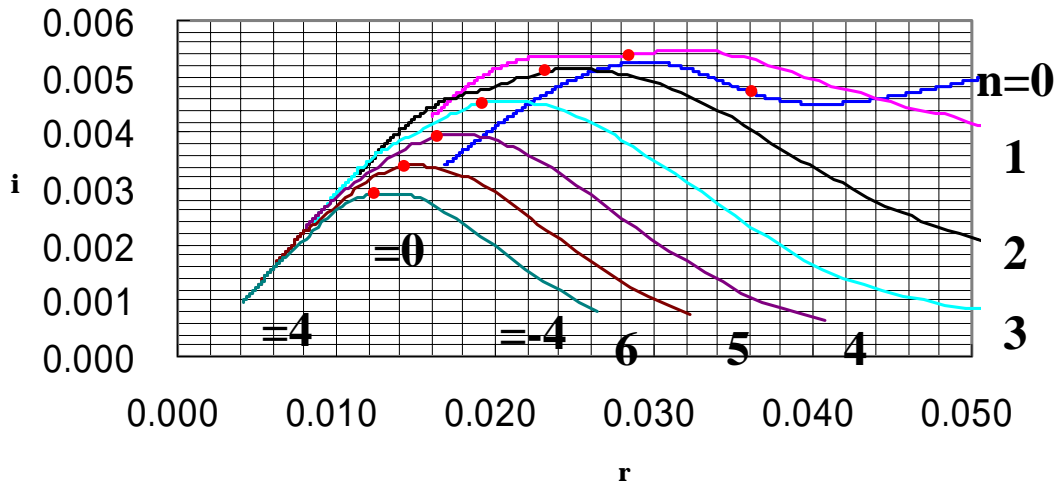


n



固有値の依存性

$m=8$

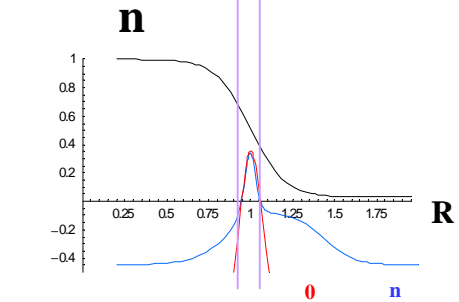
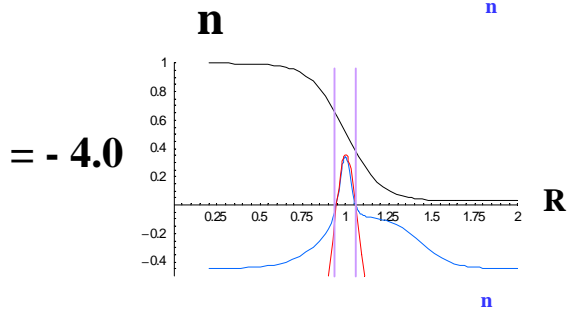
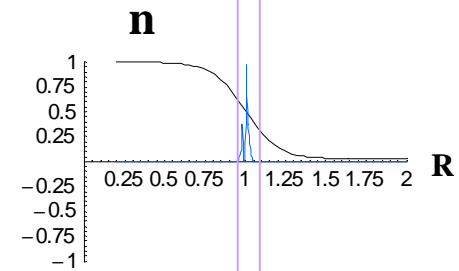
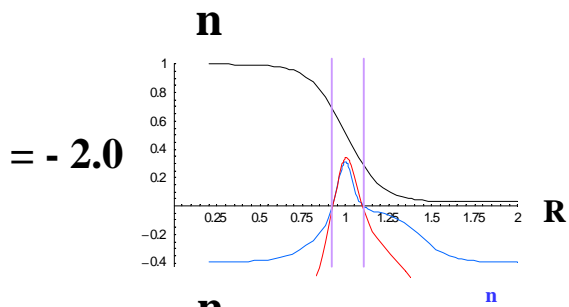
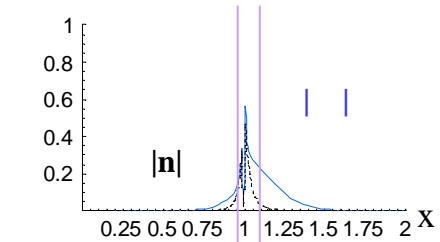
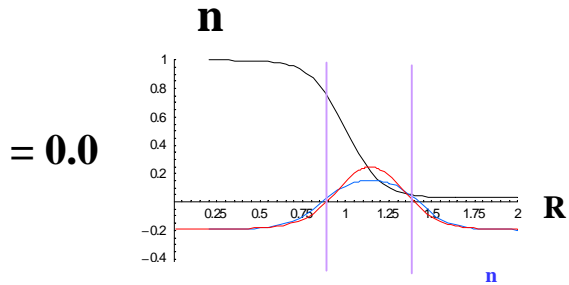


すべての径方向モード n について
電場をかけることで i が小さくなる

不安定性の抑制

$m=8, n=2$

$m=8, n=2, \quad = -4.0$



電場をかけることで
不安定波の領域が狭くなる

結論

- 1) 実験的には,
 - a) 磁化プラズマ中において、径方向電場を増すと、径方向イオン流が増大し、らせん波が励起される。径方向電場が閾値を越えると、らせん波は抑えられ、径方向イオン流は抑制される。
 - b) 径方向電場の閾値近傍では、イオンの流入とらせん波によるイオン放出の繰り返しによるイオン輸送パルセーション現象が観測された。
 - c) $m = 2$ モードの2本の腕が融合することによる、 $m = 2$ モードから $m = 1$ モードへのモード変換の非線形現象が見出された。

- 2) 理論的には、Rosenbluth-Simonの式に、軸方向の電子の動きを取り入れることにより,
 - a) らせん波が励起されること以外に、局所径方向電場によりドリフト波は抑制される。
 - b) 方位各方向モード m 、径方向モード n によらずドリフト波は抑制される。
 - c) 不安定波の抑制は、径方向電場シア（回転角速度シア）により、不安定の励起される径方向の領域が狭くなるためである。
 - d) 角速度シア項や角速度シア勾配項の効果は少ない。