

---

# Qマシーンプラズマ中フロー速度シア駆動低周波不安定性

## Low-Frequency Instabilities Driven by Flow Velocity Shear in Q-machine Plasmas

---

市來龍大, 金子俊郎, 齋藤洋孝, 畠山力三

R. Ichiki, T. Kaneko, H. Saito, and R. Hatakeyama

東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻

*Department of Electronic Engineering, Tohoku University*

---

---

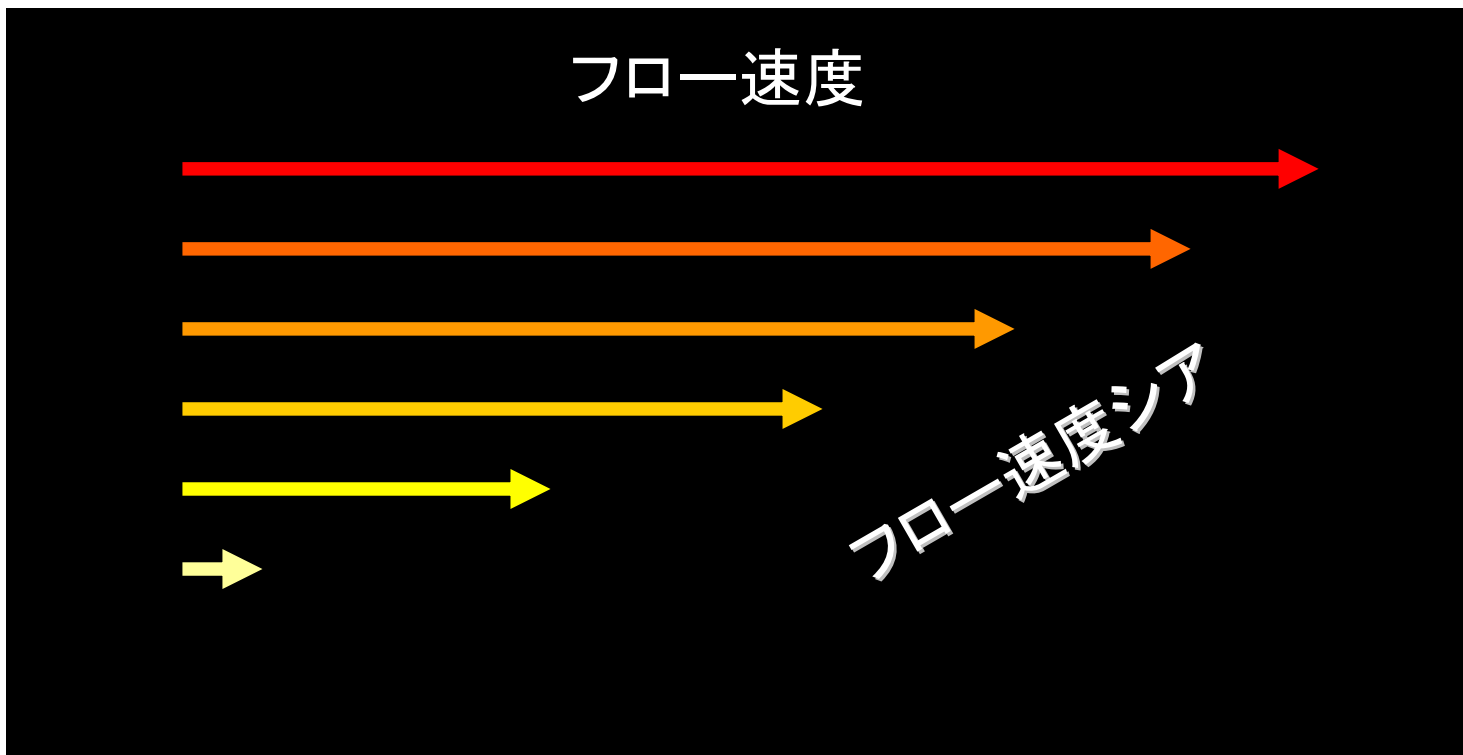
# 研究背景

---

---

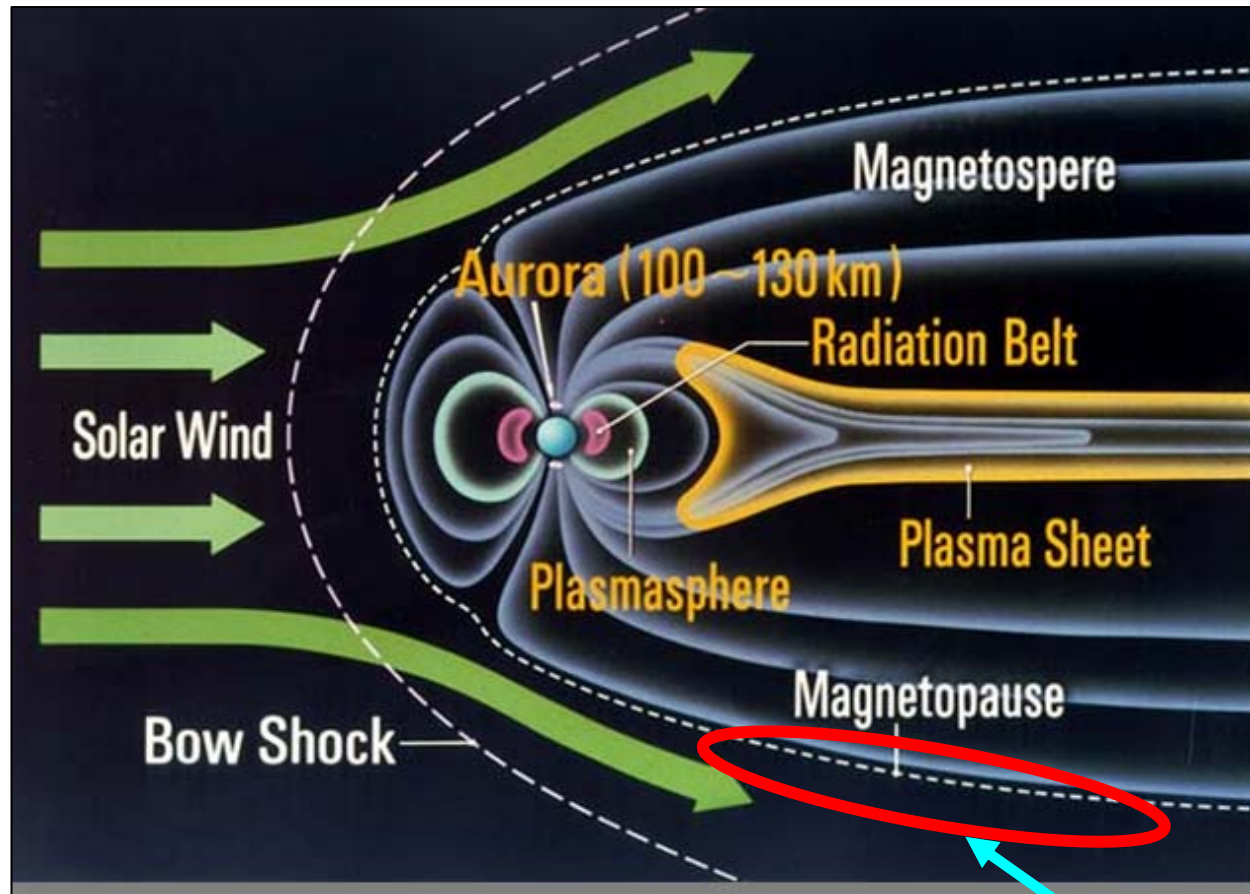
# フロー速度シア

---



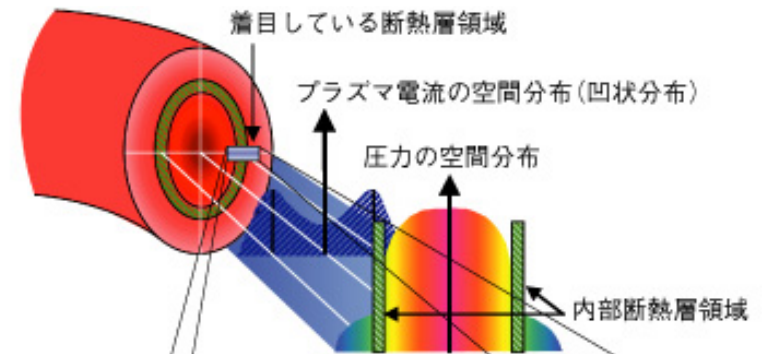
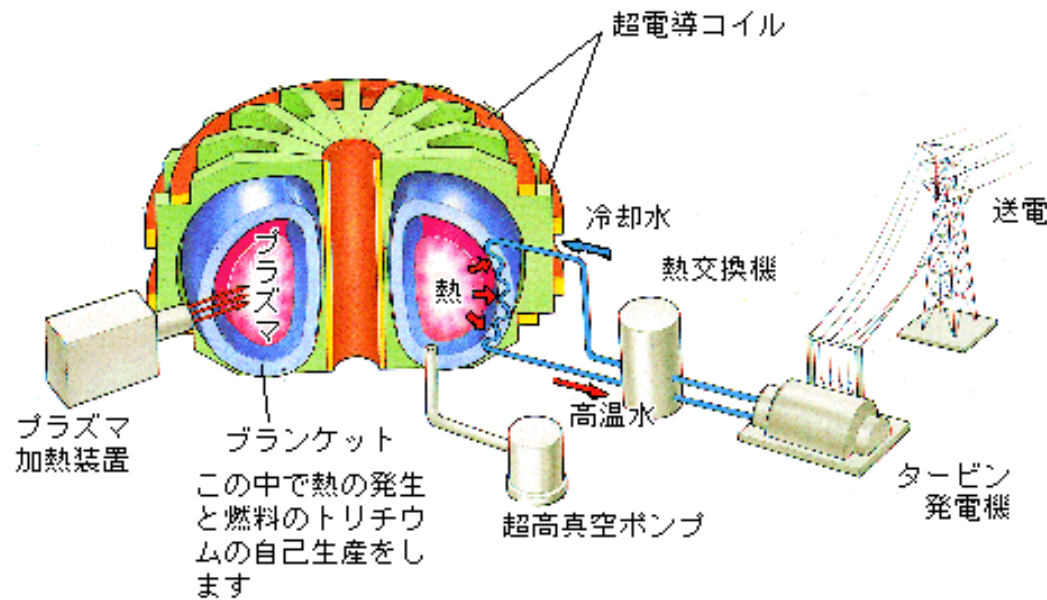
フロー方向と垂直方向に速度の勾配がある

# 宇宙空間プラズマにおけるフロー速度シア

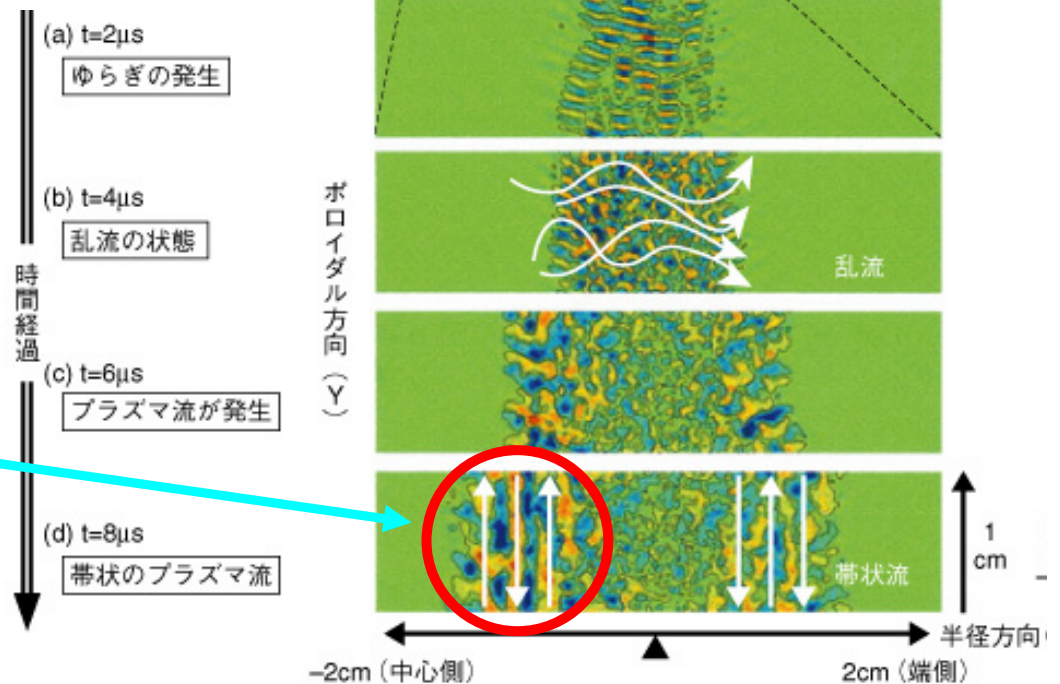


フロー速度シアの発生

# 核融合プラズマにおけるフロー速度シア



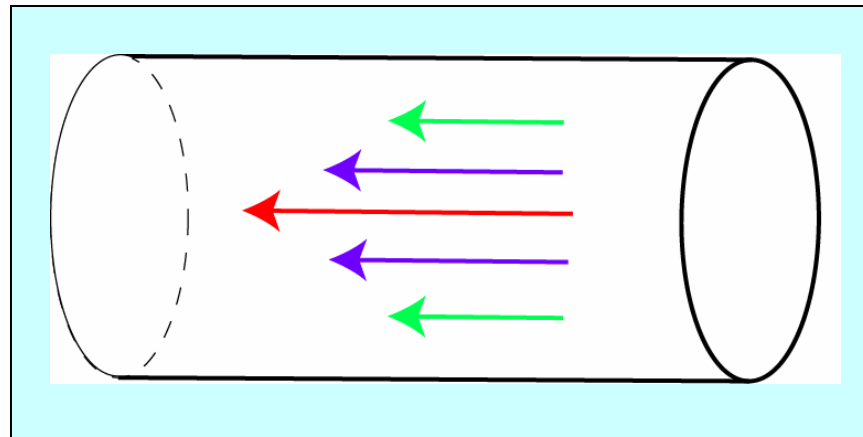
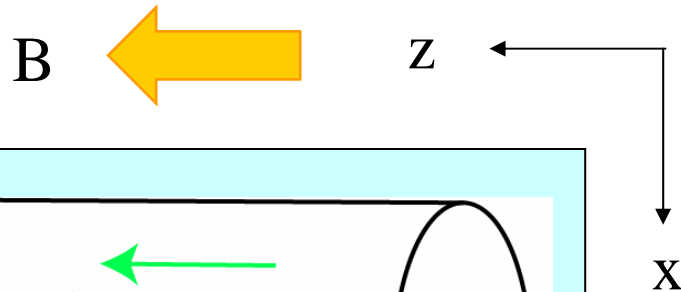
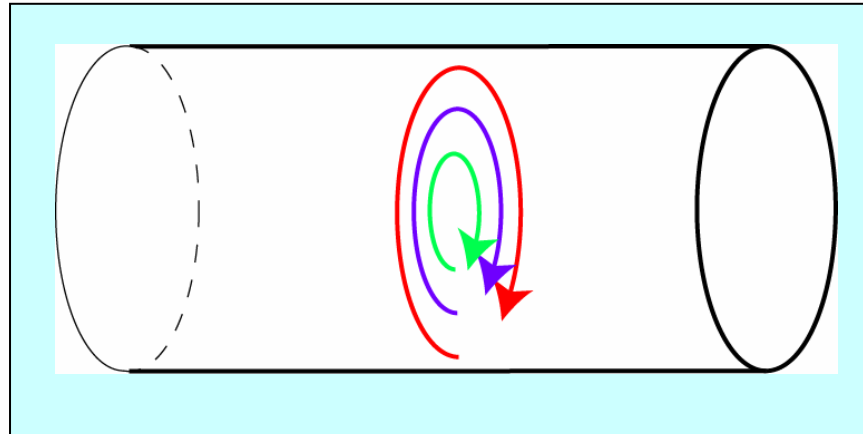
## フロー速度シア



日本原子力研究所HPより

# プラズマフロー速度シア

## 磁力線垂直方向フロー速度シア



## 核融合プラズマ

トカマク装置中で揺動の抑制に伴うL-H遷移によりプラズマ閉じ込めが改善

## 宇宙空間プラズマ

電離層・磁気圏における揺動の発生原因の一つ

平行・垂直フロー速度シアの混在

速度シアの役割を解明するには、磁力線平行・垂直フロー速度シアを**独立**に生成・制御する必要性

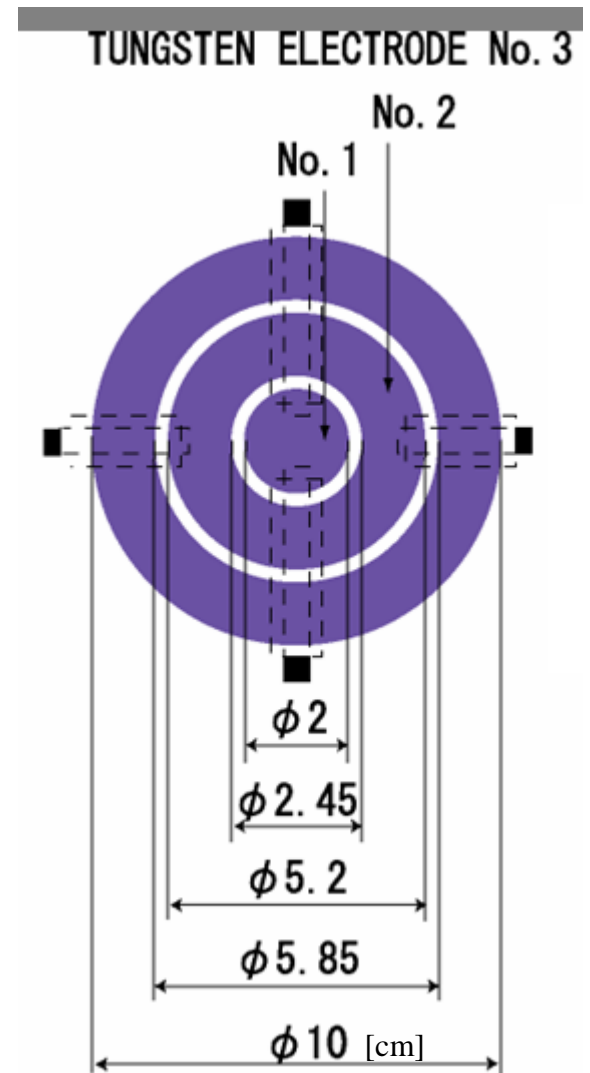
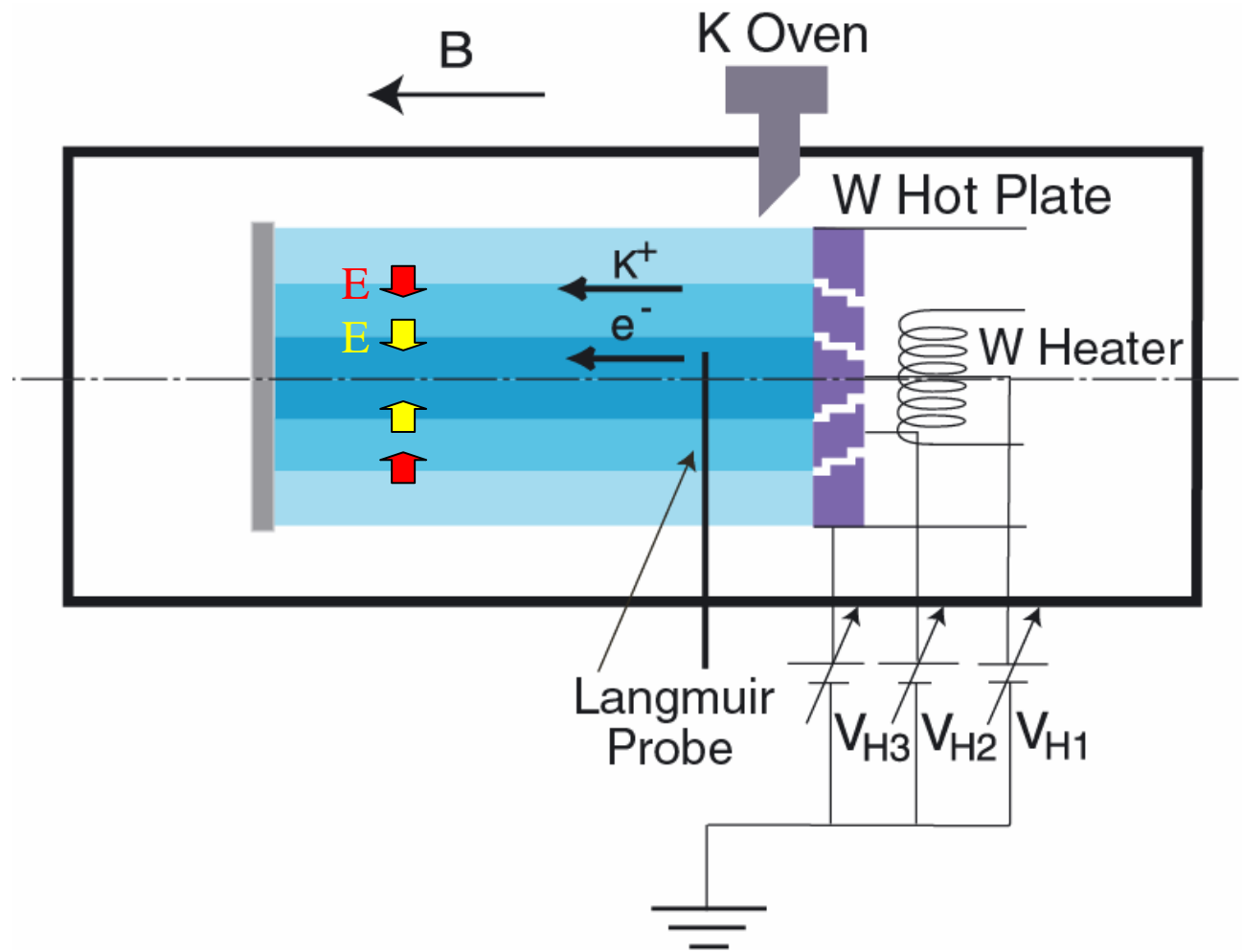
## 磁力線平行方向フロー速度シア

---

# 磁力線垂直方向フロー速度シア

---

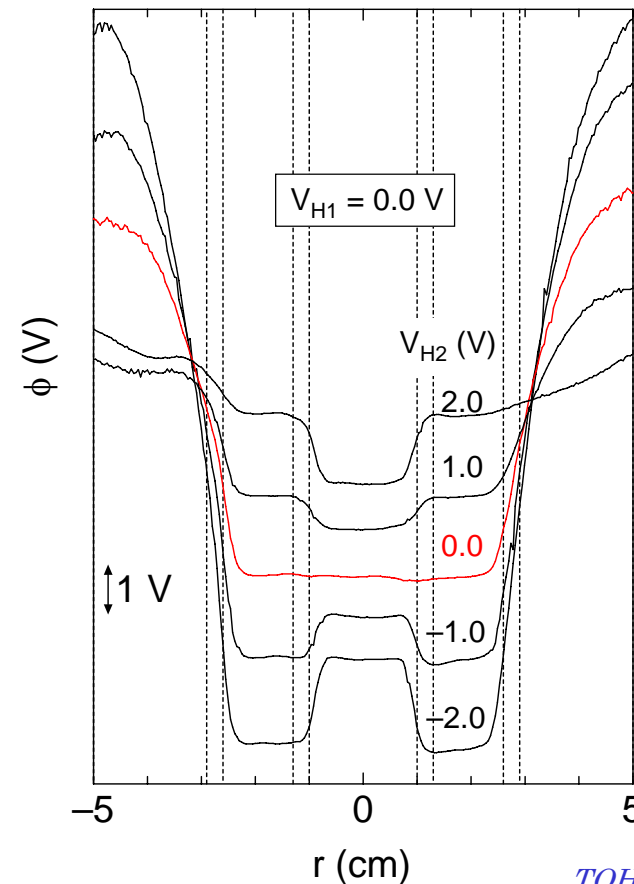
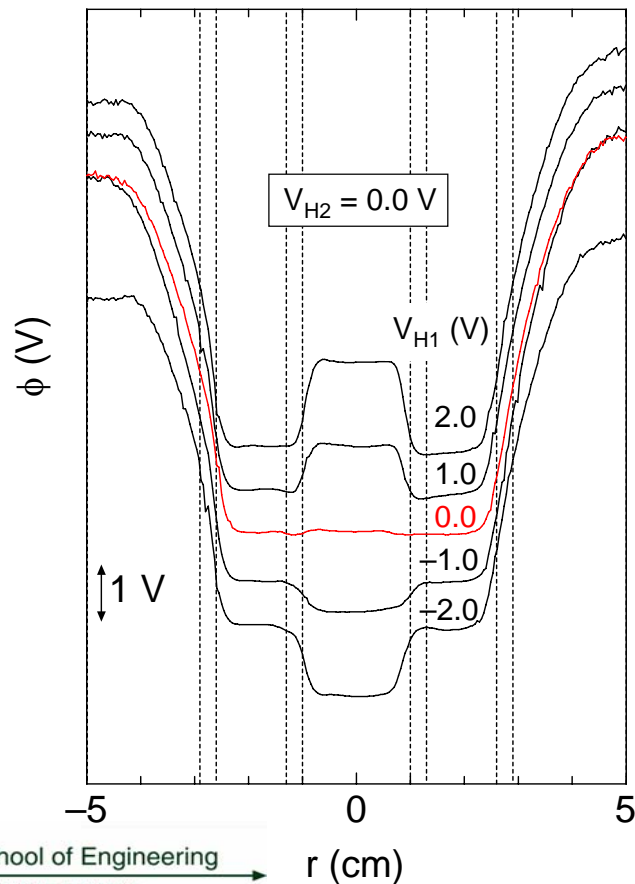
# 磁力線垂直方向プラズマフロー速度シア



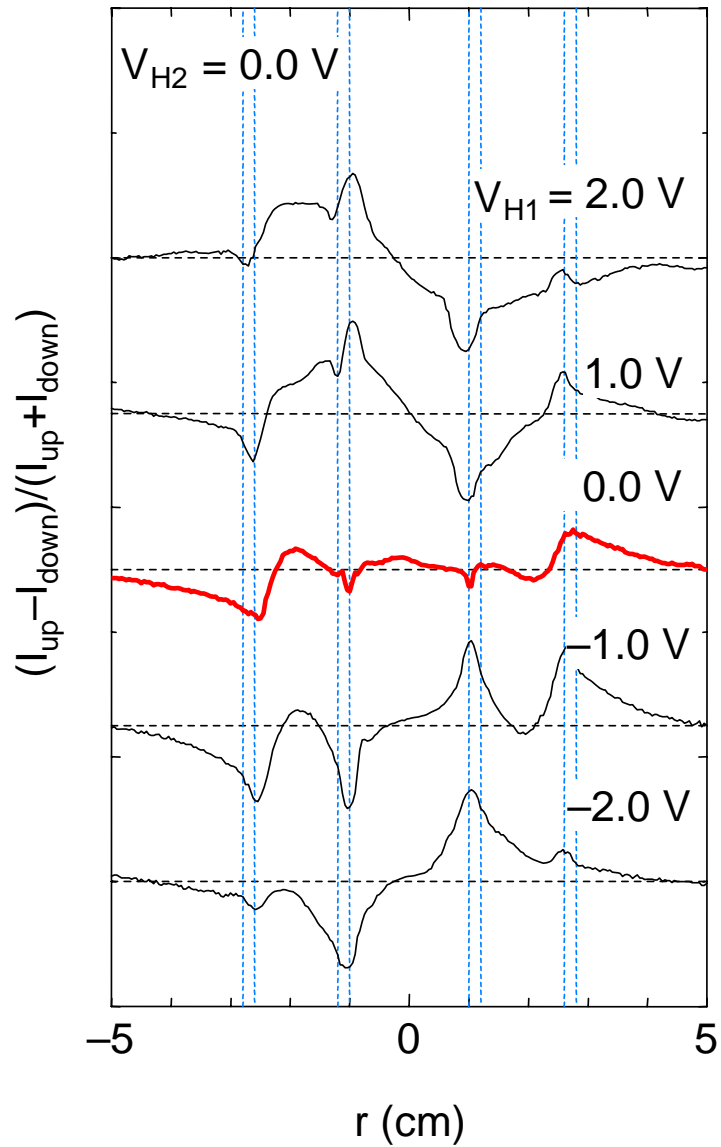


# プラズマ電位 $\phi$ の $V_{H1}$ , $V_{H2}$ 依存性

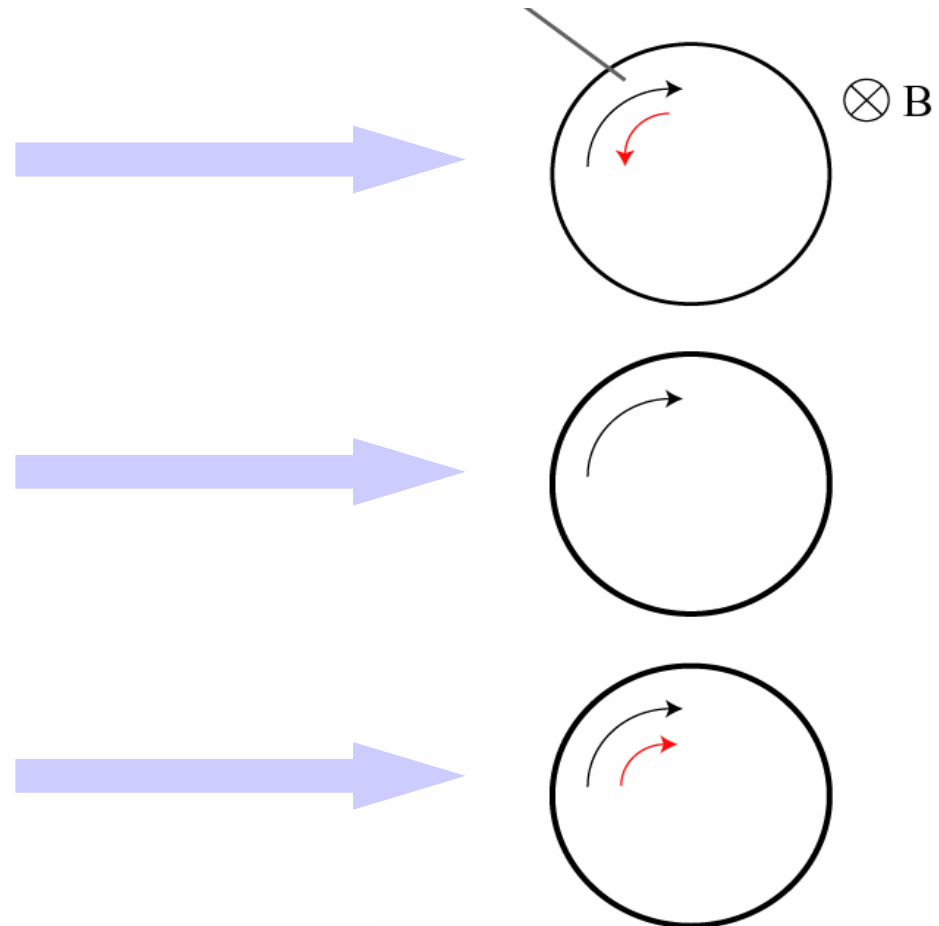
第1電極, 第2電極への電位印加によってそれぞれの位置における**プラズマ電位の制御が可能**.  
⇒各電極間境界領域でE×Bドリフトによる**垂直フロー速度シアの生成・制御が可能**.



# イオンフロー速度の半径方向分布



イオンフローの向き

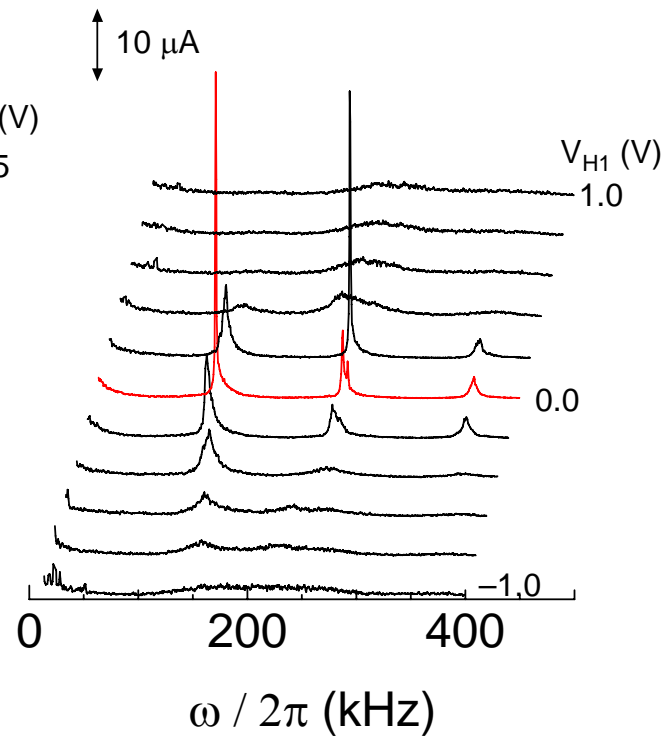
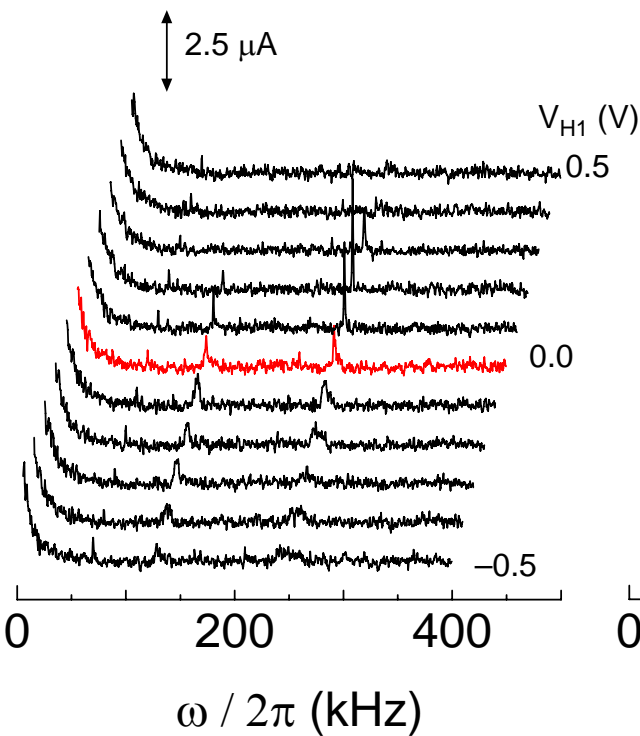


# 揺動スペクトルの $V_{H1}$ 依存性

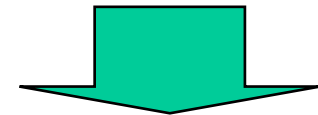
$V_{H2} = 0.0 \text{ V}$   
 $B = 3.0 \text{ kG}$   
 $r = 0.0 \text{ cm}$

$V_D = +50 \text{ V}$

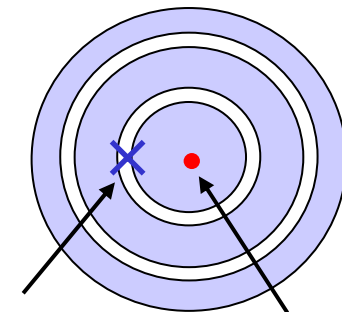
$V_D = +90 \text{ V}$



$V_D$ の大きさにかかわらず  
揺動振幅強度はシア強度の  
増加に伴い小さくなる



垂直フロー速度シアによって  
イオンサイクロトン  
不安定性が抑制される

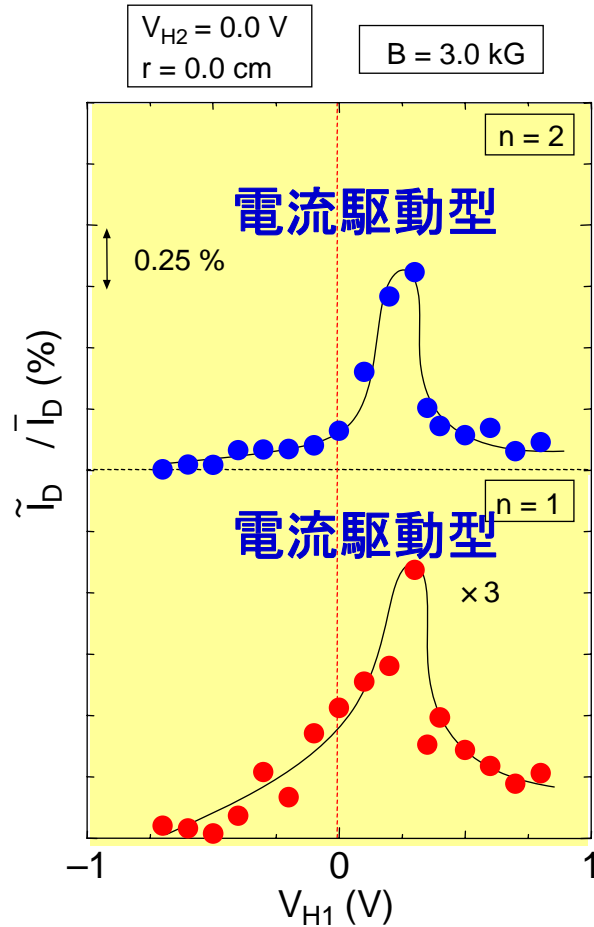


シア領域

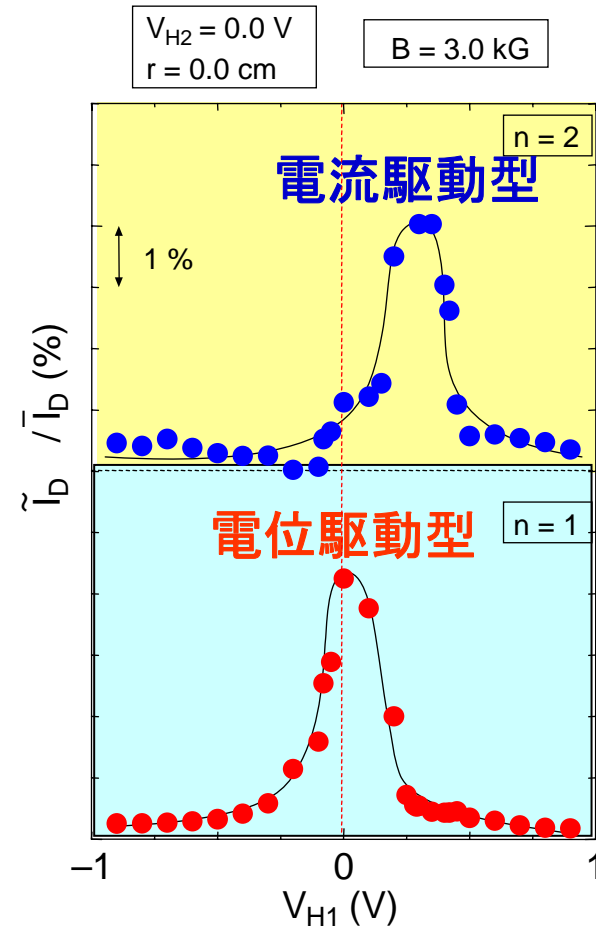
ディスク電極  
( $2r_D = 2 \text{ mm}$ )

# 揺動スペクトル強度の $V_{H1}$ 依存性

$V_D = +50 \text{ V}$

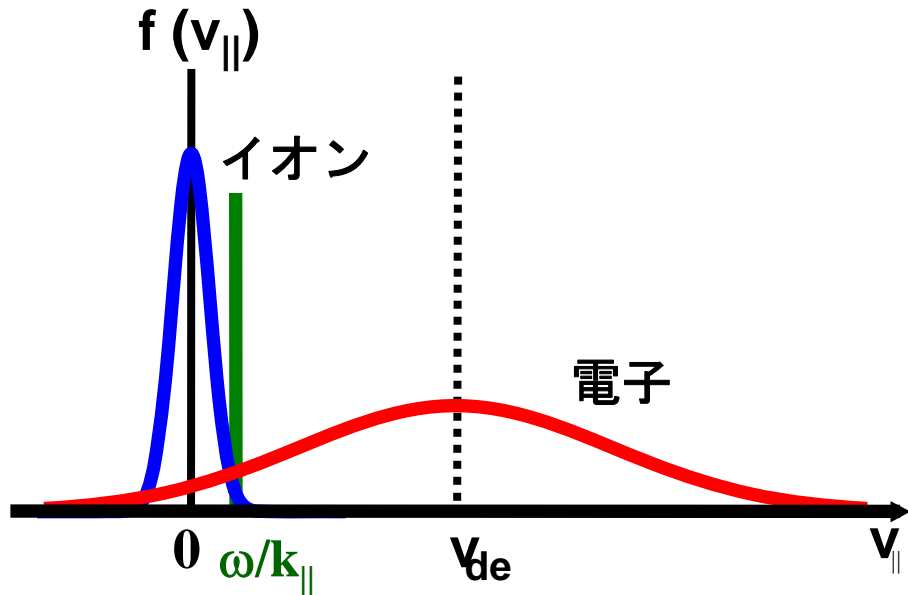


$V_D = +90 \text{ V}$

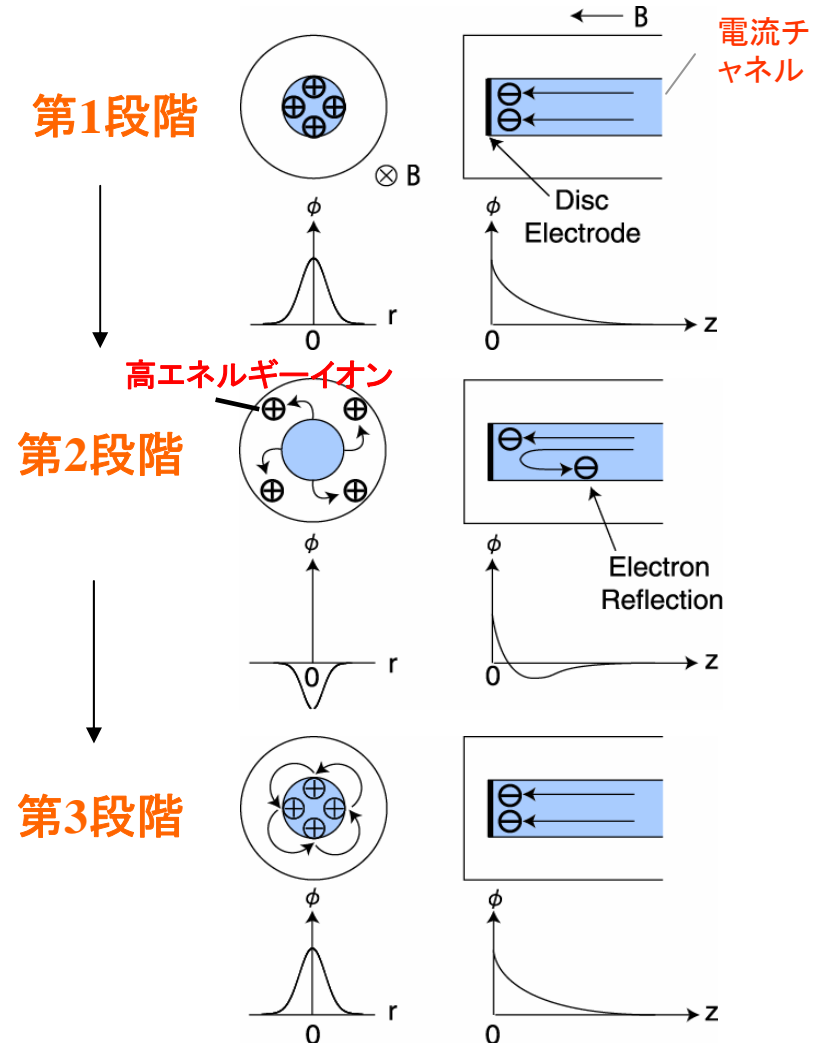


# 電流駆動型 & 電位駆動型

## 電流駆動型イオンサイクロトロン不安定性 電子逆Landau減衰



## 電位駆動型イオンサイクロトロン不安定性 高エネルギーイオンの旋回運動

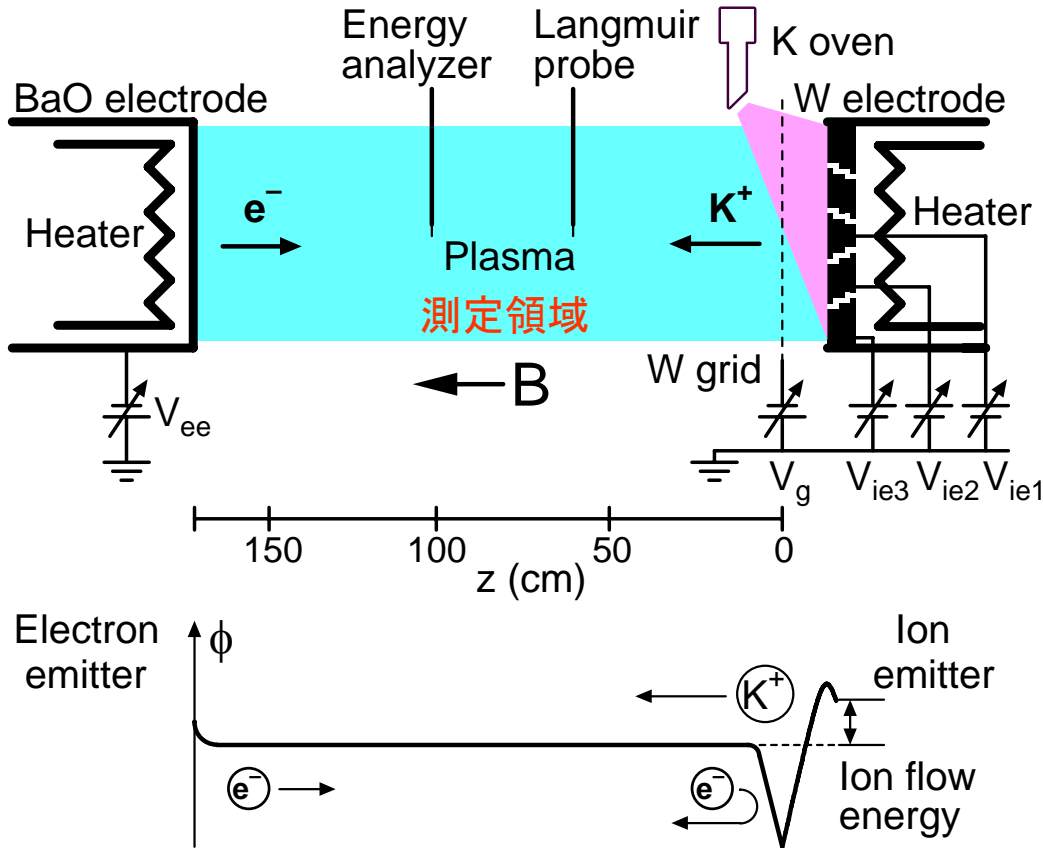


---

# 磁力線平行方向フロー速度シア

---

# 磁力線平行方向プラズマフロー速度シア



## イオン源と電子源を対向に設置

- 測定領域の空間電位は、電子源の電位で決まる
- ホットプレート前面のグリッドで電子源からの電子を反射.



電子はMaxwell分布となる

測定領域の空間電位とイオン源の電位差でイオンが加速される.

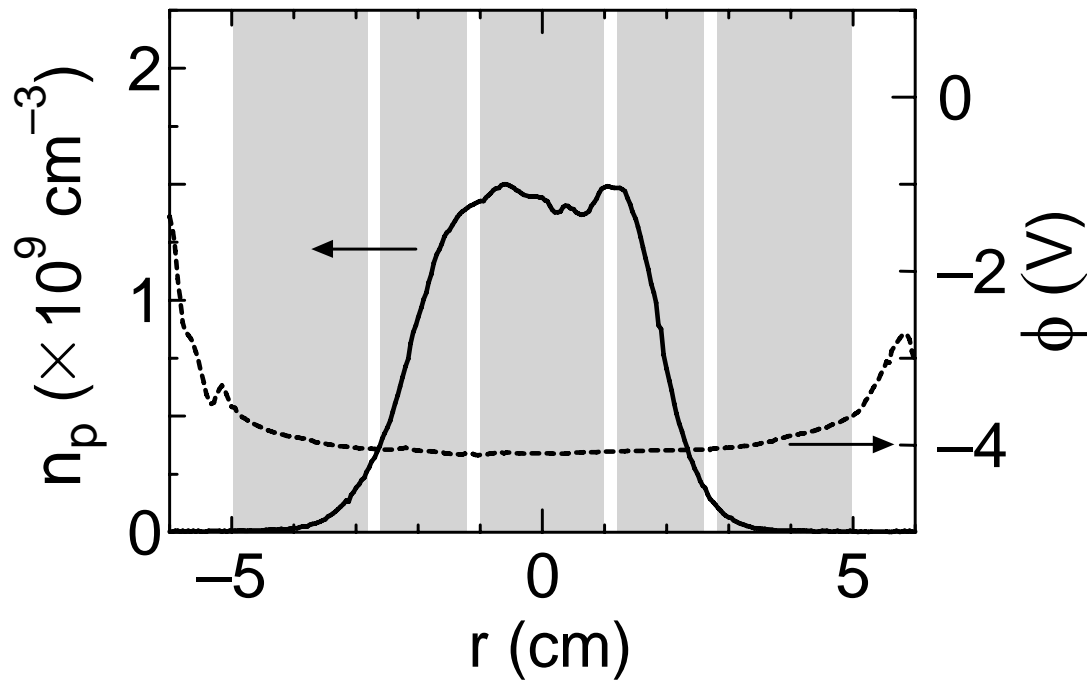


イオン源各電極の電位を独立に制御

磁力線平行方向  
プラズマフロー速度シアの生成

# プラズマ密度 $n_p$ , プラズマ電位 $\phi$ の半径方向分布

$$V_{ie1} = V_{ie2} = 0.0 \text{ V}$$



## Plasma Parameters

$$p = 2.0 \times 10^{-6} \text{ Torr}$$

$$B = 2.0 \text{ kG}$$

$$v_{te} = 2.6 \times 10^7 \text{ cm/s} \quad (T_e = 0.2 \text{ eV})$$

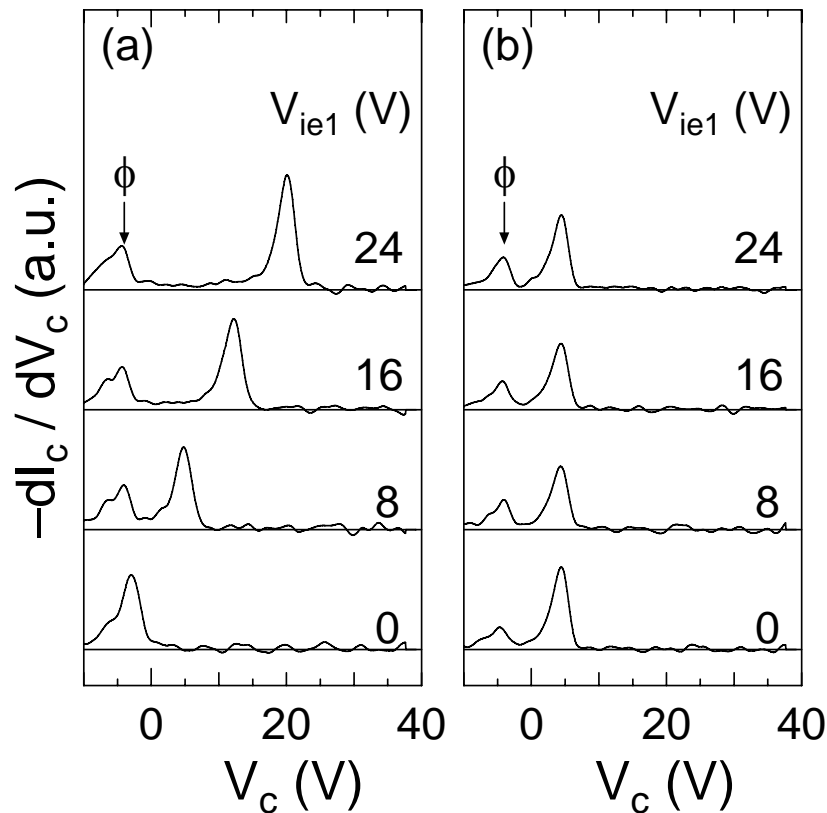
$$v_{ti} = 9.8 \times 10^4 \text{ cm/s} \quad (T_i = 0.2 \text{ eV})$$

$$v_{i||} = 2.2 \times 10^5 \text{ cm/s} \quad (\varepsilon_{1,2} = 1 \text{ eV})$$

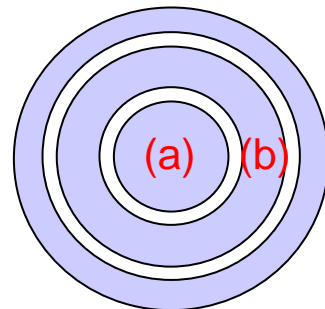
$$\lambda_D = 0.01 \text{ cm} \quad (n_e = 10^9 \text{ cm}^{-3})$$



# イオンエネルギー分布関数の電極電位依存性



$$V_{ie2} = 8 \text{ V}$$



第1電極領域では $V_{ie1}$ に依存して  
ピーク位置がシフト



第2電極領域では $V_{ie1}$ の変化によらず  
ピーク位置は不変



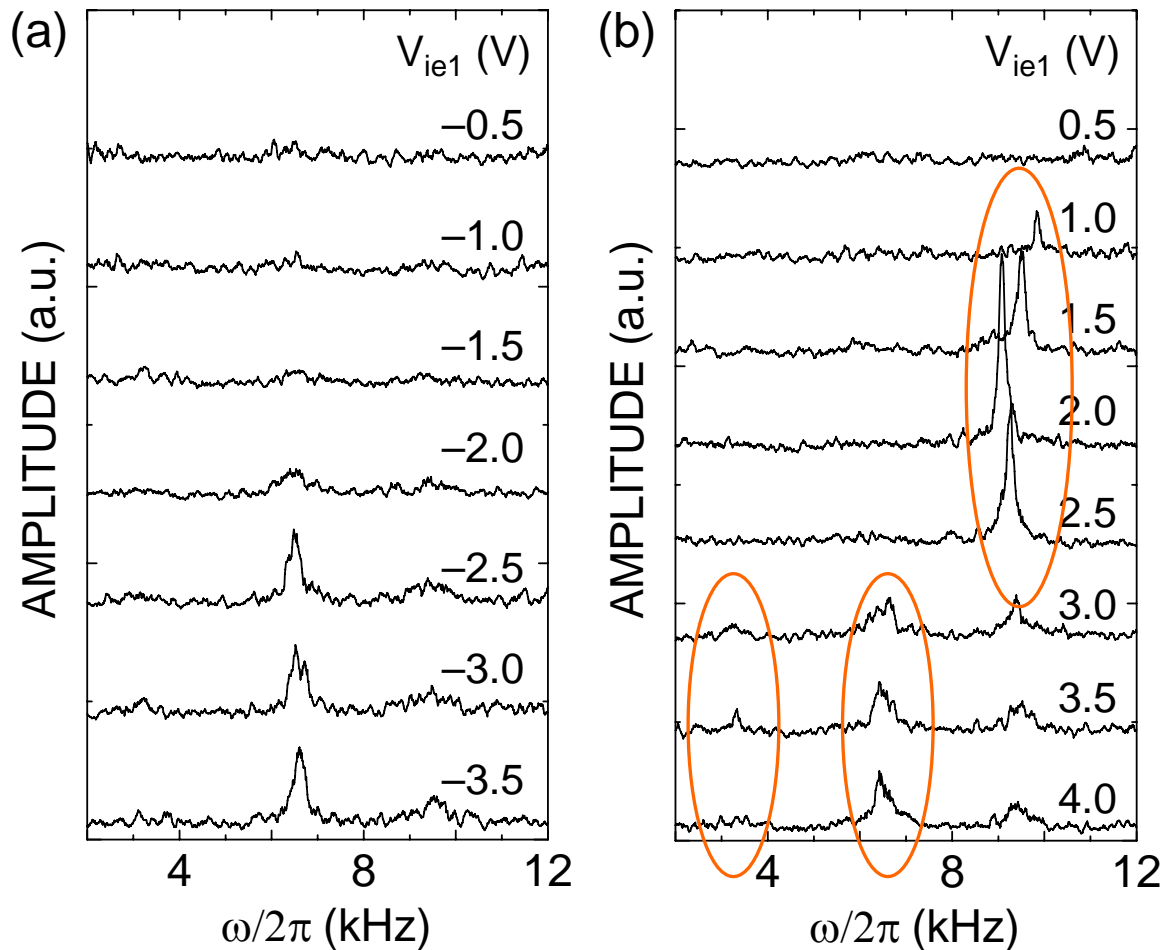
分割されたイオン源電極への電位印加により、  
各電極領域に対応したイオンのみの  
フローエネルギーを独立に制御できる

電極境界領域において、  
磁力線平行方向プラズマフロー速度シア  
の生成に成功した

➡ Rev. Sci. Instrum. **73**, 4218 (2002).

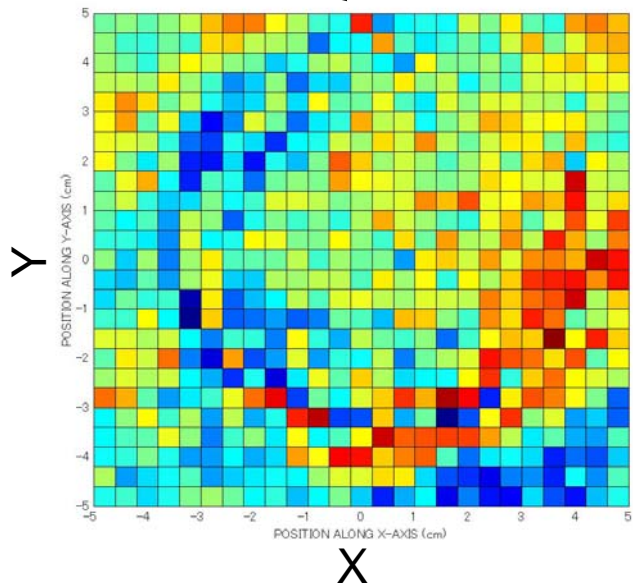
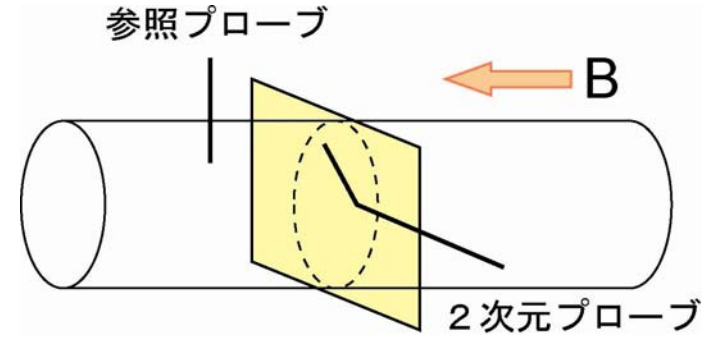
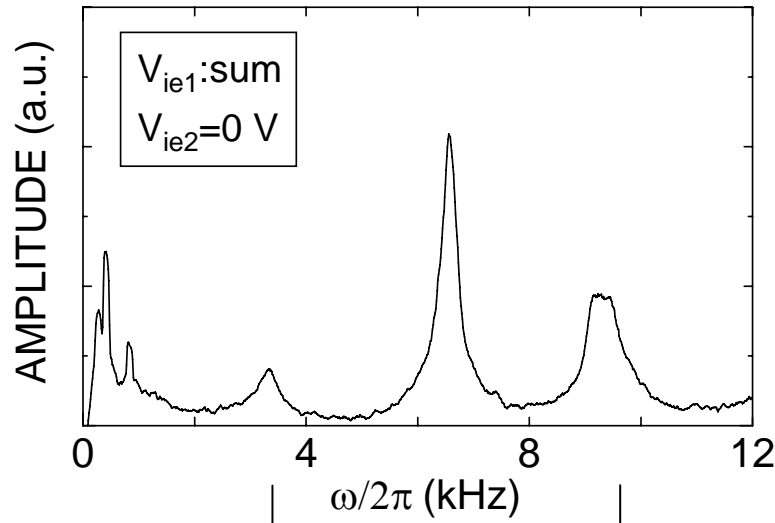
# 電子密度揺動周波数スペクトルの $V_{ie1}$ 依存性

$V_{ie2}=0$  V,  $r = -2.5$  cm

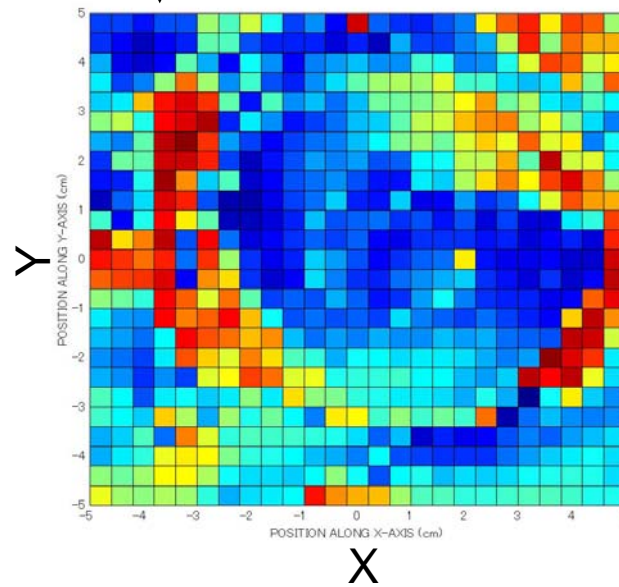


- $|V_{ie1} - V_{ie2}|$ がある閾値を越えると、揺動が励起される.
- $V_{ie1} > V_{ie2}$ のときに、 $\omega/2\pi = 3.5$  kHz, 6.5kHz, 9.5kHz 近傍の揺動が観測された.

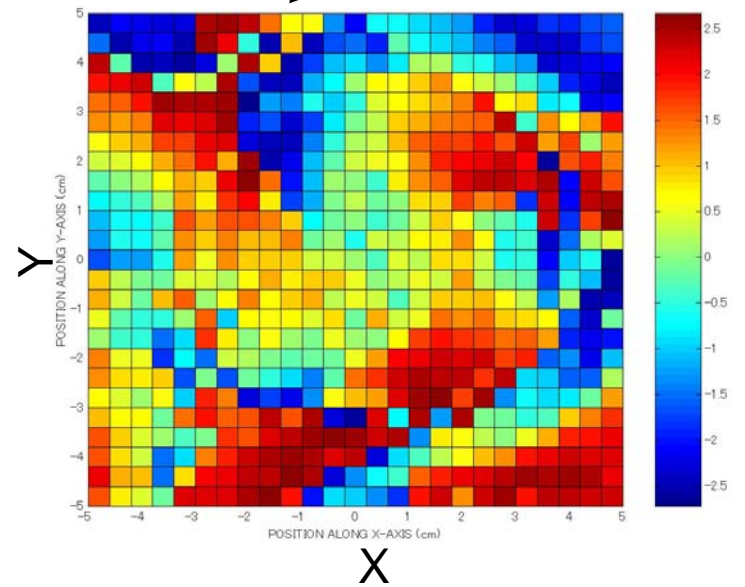
# 低周波揺動位相の2次元分布



$V_{ie1}=4\text{ V}$



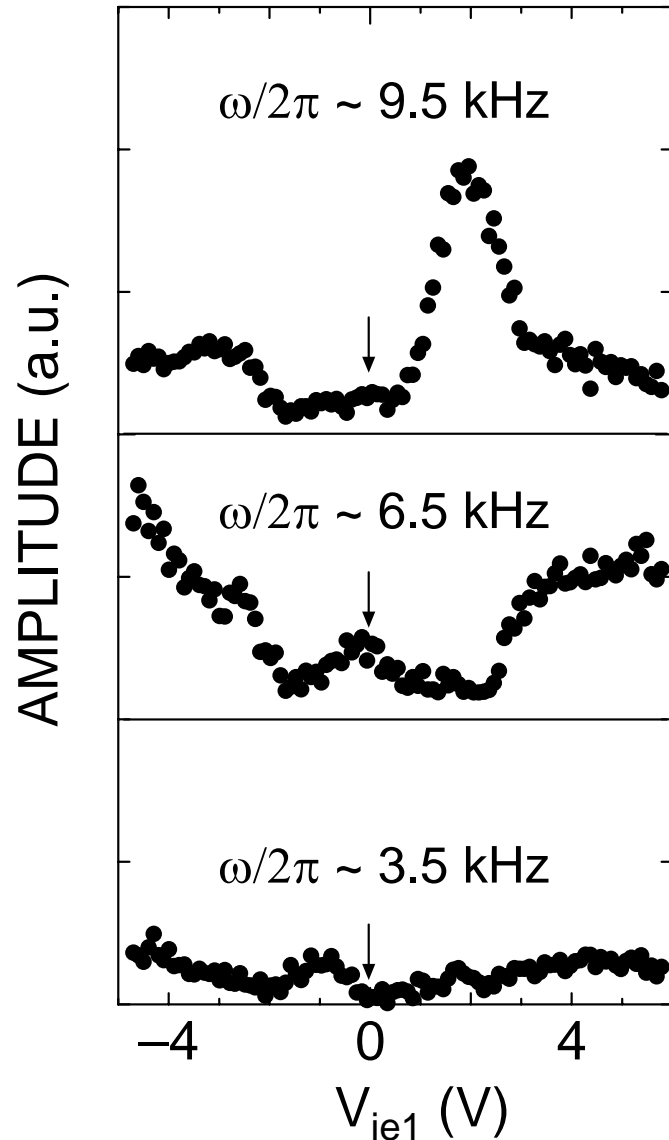
$V_{ie1}=4\text{ V}$



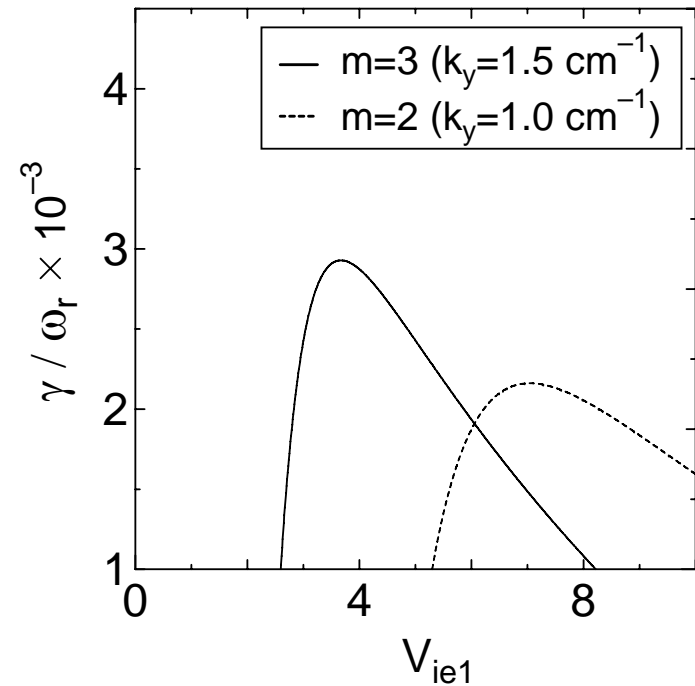
$V_{ie1}=2\text{ V}$

# 低周波揺動強度の $V_{ie1}$ 依存性

## 実験結果



## 理論数値計算結果



- 揺動周波数によって、揺動強度のピークを示す $V_{ie1}$ が異なる
- 周方向モード数によって、励起条件が変化しているため

# ドリフト波不安定性成長率のシア強度依存性

$$\frac{\gamma}{\omega_r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_r}{\tau(2\omega_r - \omega_e^*)} \frac{\omega_r}{k_z v_{ti}} \left[ \sqrt{\frac{\tau^3}{\mu} \left( \frac{k_z v_{0z} + \omega_e^*}{\omega_r} - 1 \right)} - \sigma^2 \exp\left(-\frac{\omega_r^2}{2(k_z v_{ti})^2}\right) \right]$$

磁力線方向の

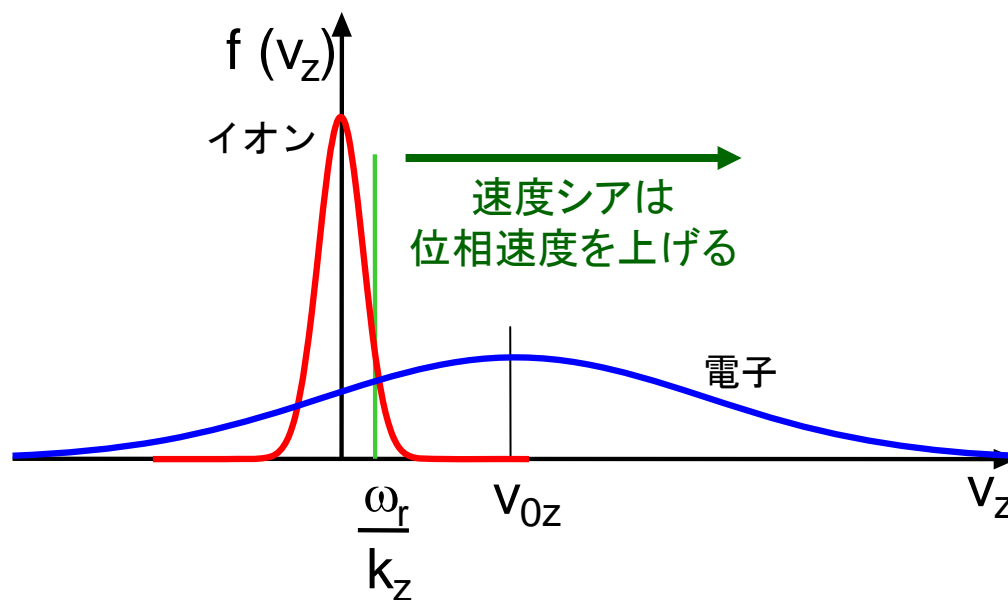
電子逆ランダウ減衰

イオンランダウ減衰

$$\omega_r = \frac{\omega_e^*}{2} + \sqrt{\frac{(\omega_e^*)^2}{4} + \sigma^2 k_z^2 C_s^2}$$

$$\left( \sigma^2 = 1 - \frac{k_y}{k_z} \frac{m_i}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \right)$$

$$\left( \omega_e^* = k_y \frac{T_e}{B_0} \frac{n'}{n} \right)$$



# 負イオンプラズマ中のフロー速度シア駆動不安定性

負イオンプラズマ中の静電波



通常のプラズマ中とは異なる特徴

*プラズマ物理学的な興味*



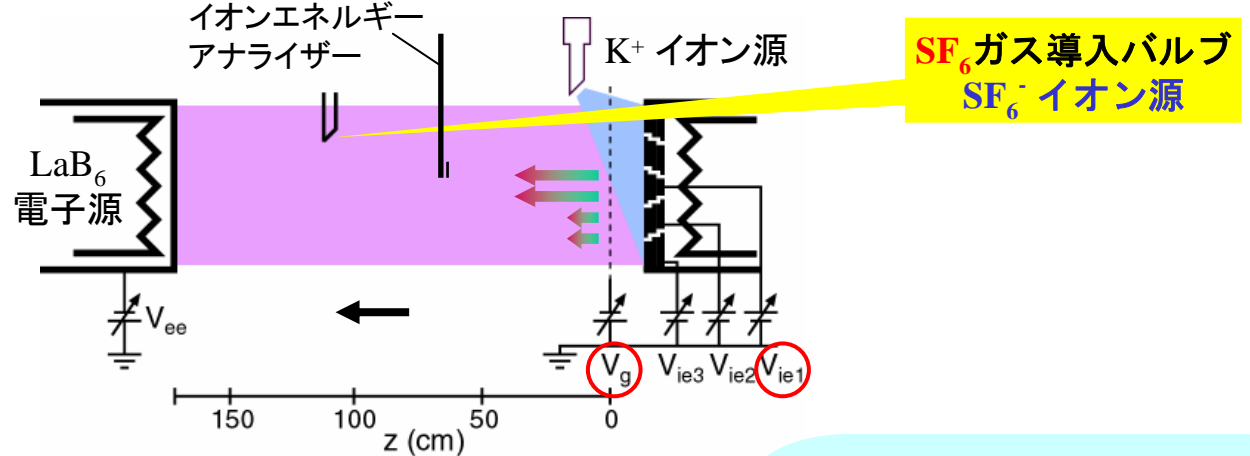
微粒子プラズマと負イオンプラズマの類似性

*宇宙プラズマなどの挙動解明に一石を投じる可能性*

# 負イオンプラズマ生成

負イオン交換率

$$c = \frac{n_-}{n_+} = 1 - \frac{I_{es}}{I_{es}(P_{SF6}=0)} \frac{I_{is}(P_{SF6}=0)}{I_{is}}$$



電子密度のみの減少

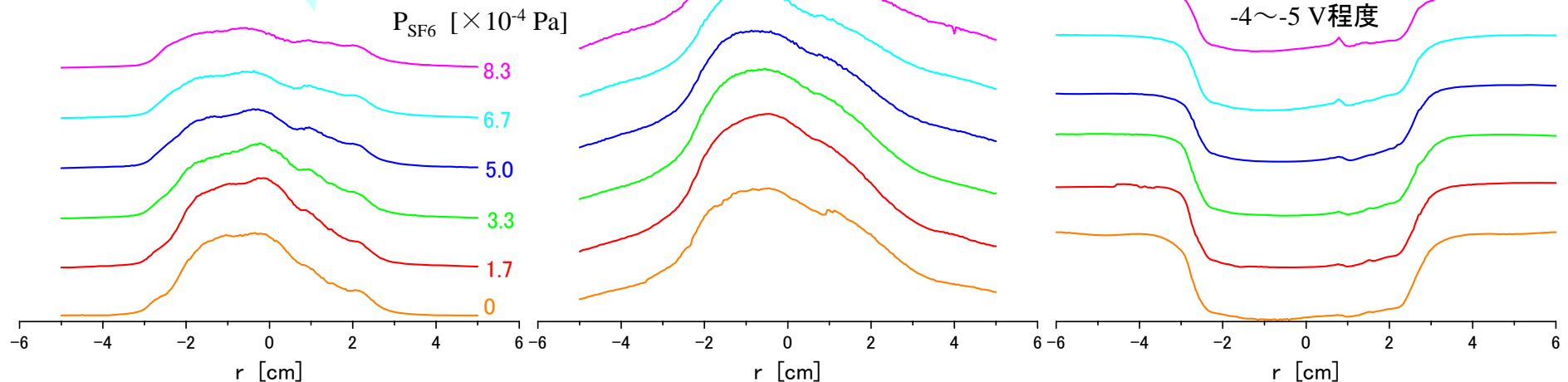
負イオンの生成を意味する

負イオンプラズマ中における磁力線垂直方向フロー速度シアの抑制

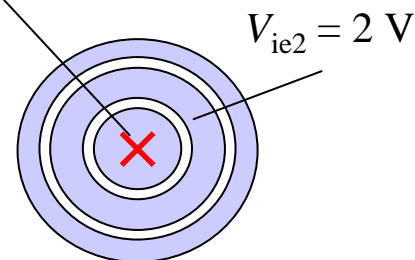
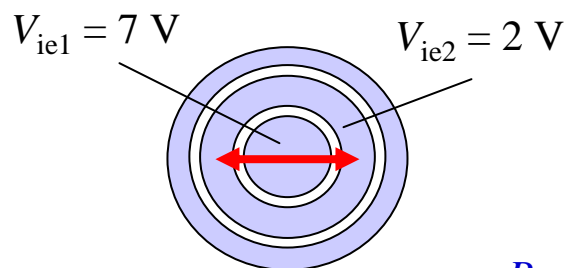
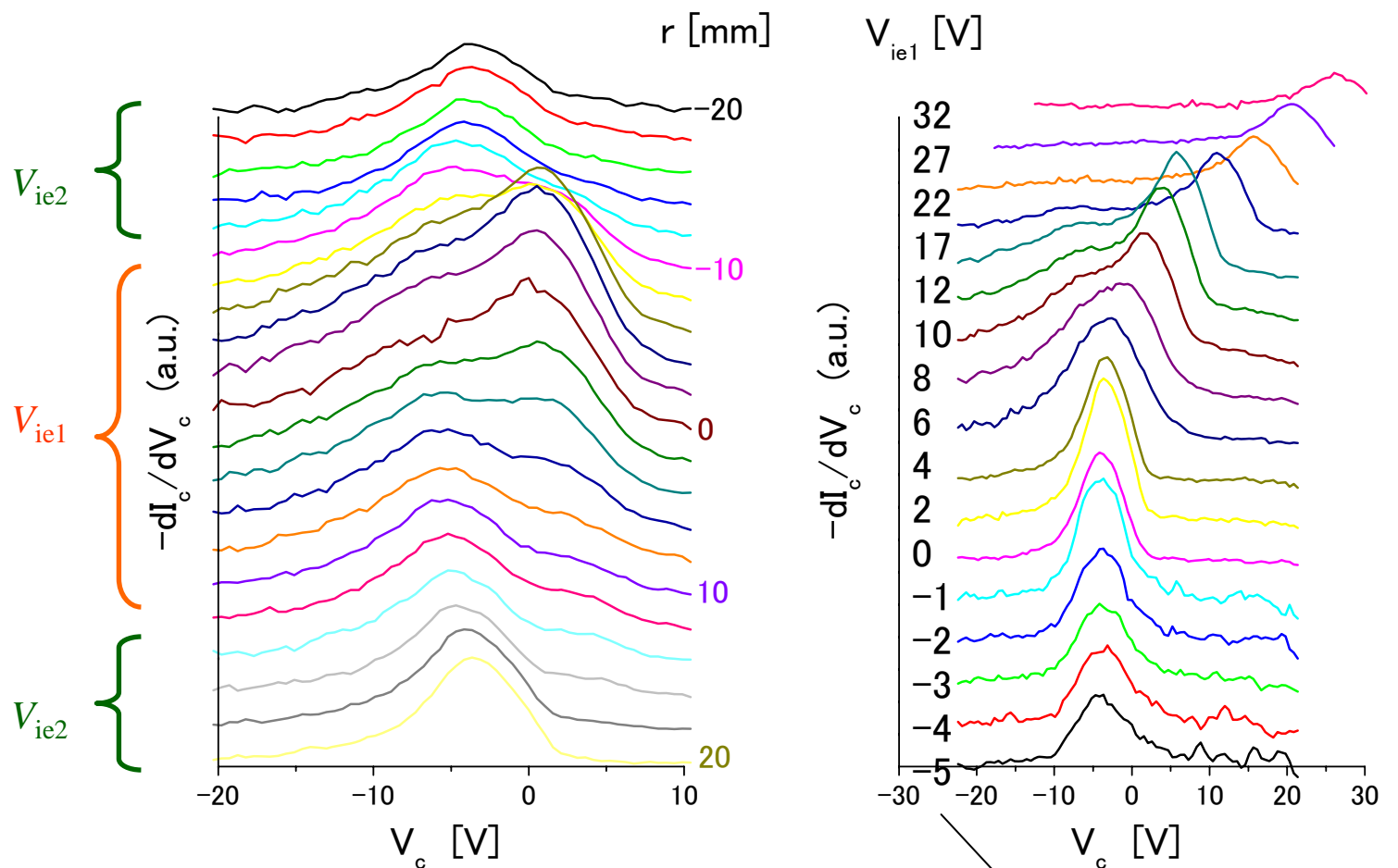
電子飽和電流分布

正イオン飽和電流分布

空間電位分布



# 負イオンプラズマ中磁力線平行方向フロー速度シア



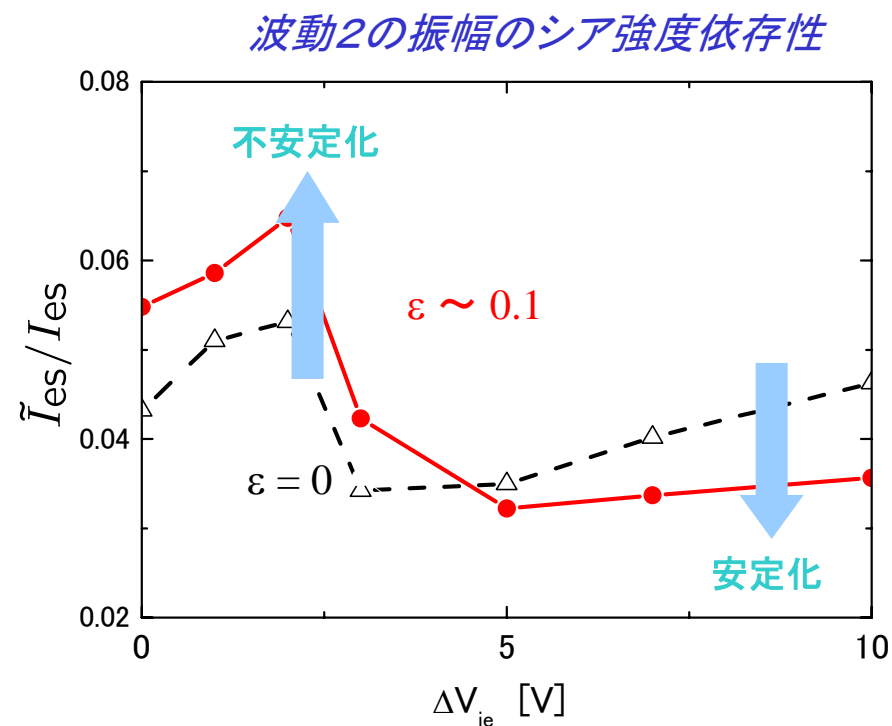
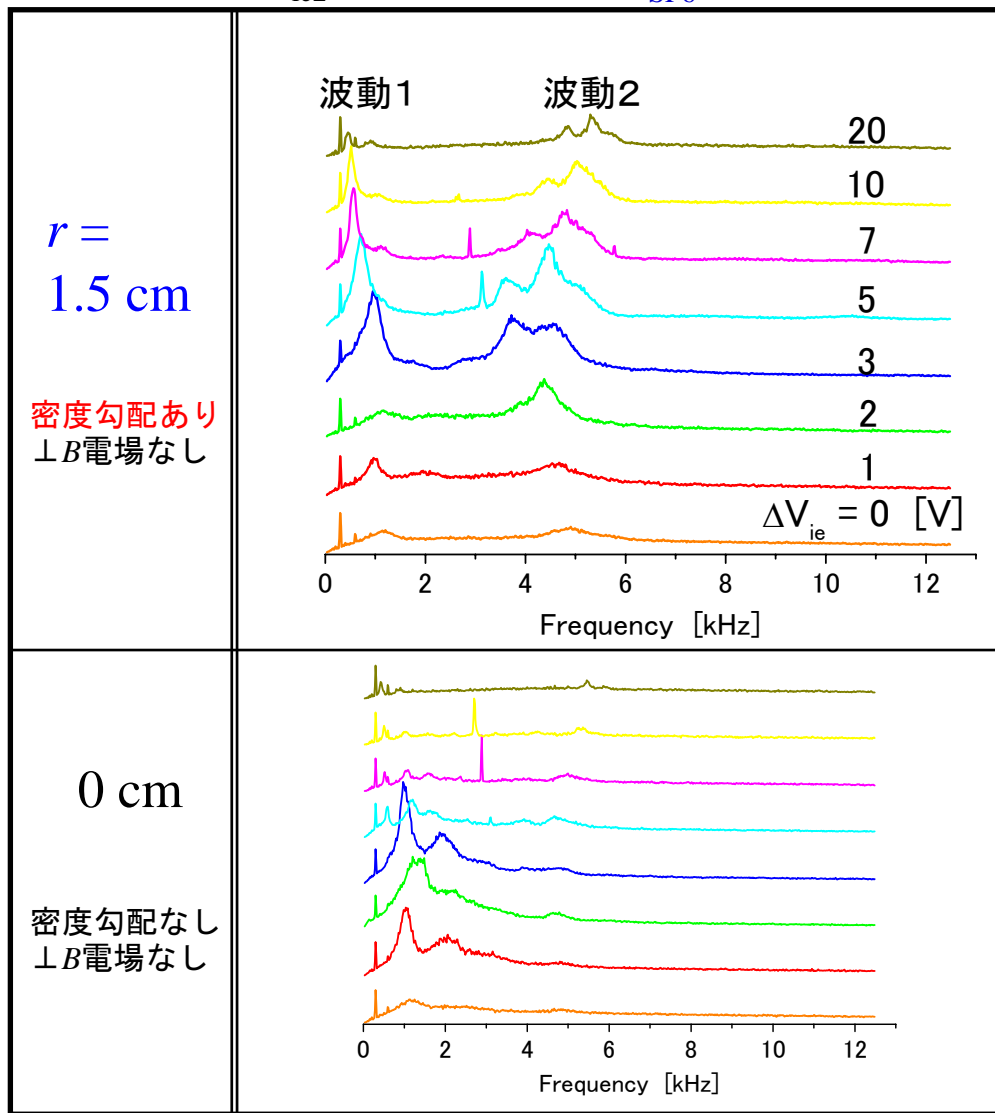
$B = 0.3 \text{ T}$

$P_{\text{SF6}} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$



# 低周波揺動に対する負イオン導入の効果

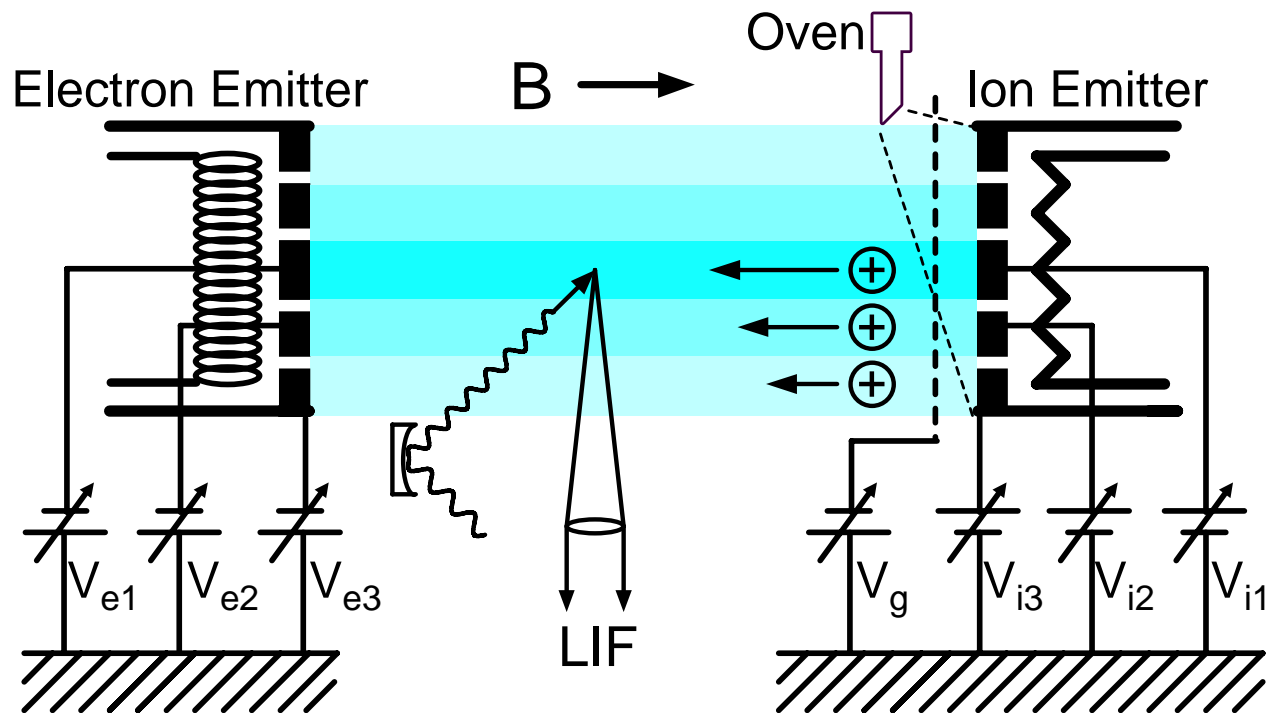
$B = 0.15 \text{ T}$ ,  $V_{ie2} = 2 \text{ V}$   $\epsilon \sim 0.1$  ( $P_{SF6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ )



負イオンの導入による安定化・不安定化の傾向がシア強度に依存する

# 現在進行中の実験計画

## 垂直・平行方向フロー速度シアの同時制御



# まとめ

完全電離無衝突プラズマ発生電極を同心円状に3分割することによって、**磁力線垂直・平行方向フロー速度シア**の選択的生成・制御を達成した。これによりフロー速度シアにより励起、又は抑制される**揺動の詳細な観測**が可能となった。

## **磁力線垂直方向フロー速度シア**

- 電流駆動型・電位駆動型イオンサイクロトロン不安定性が速度シアにより**抑制**されることが明らかとなった。

## **磁力線平行方向フロー速度シア**

- 周方向の波数により速度シア駆動ドリフト波の**励起特性が異なる**ことが分かった。この特徴は、運動論的分散関係から求められる波動励起特性と定性的に一致する。
- **負イオンの導入**による低周波揺動の安定化・不安定化の特性が、**フロー速度シア強度に依存**することを観測した。

**磁力線垂直及び平行フロー速度シアの同時制御実験が進行中**である。

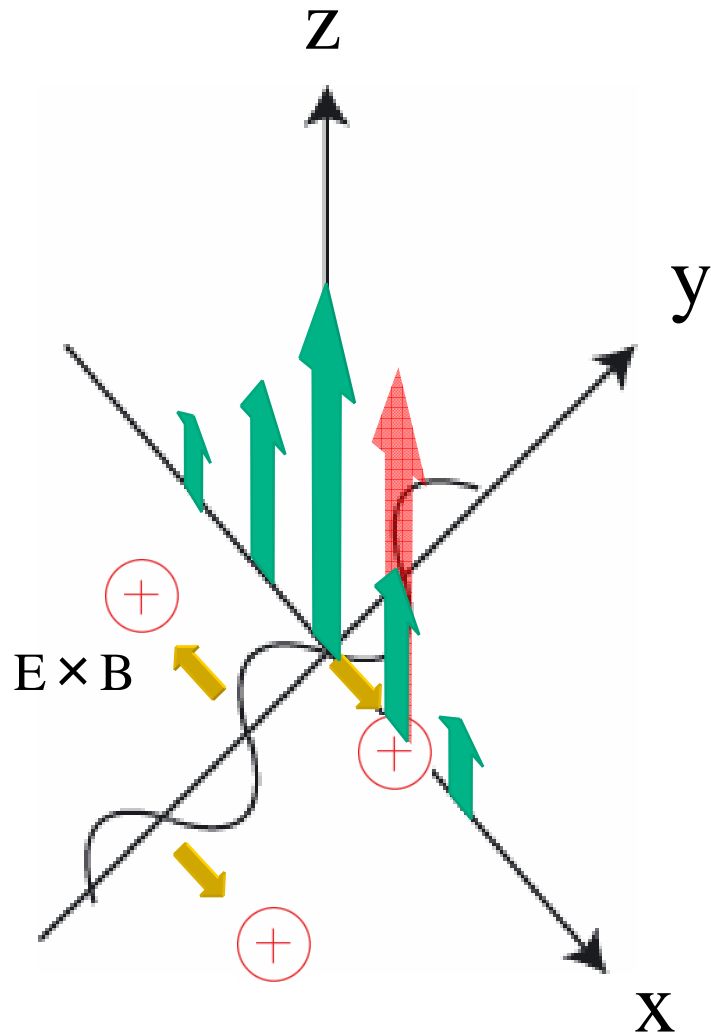
---

ありがとうございました.

---



# シアの効果 ( $\sigma^2$ の意味)



$$\sigma^2 = 1 - \frac{k_y}{k_z} \frac{m_i}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x}$$

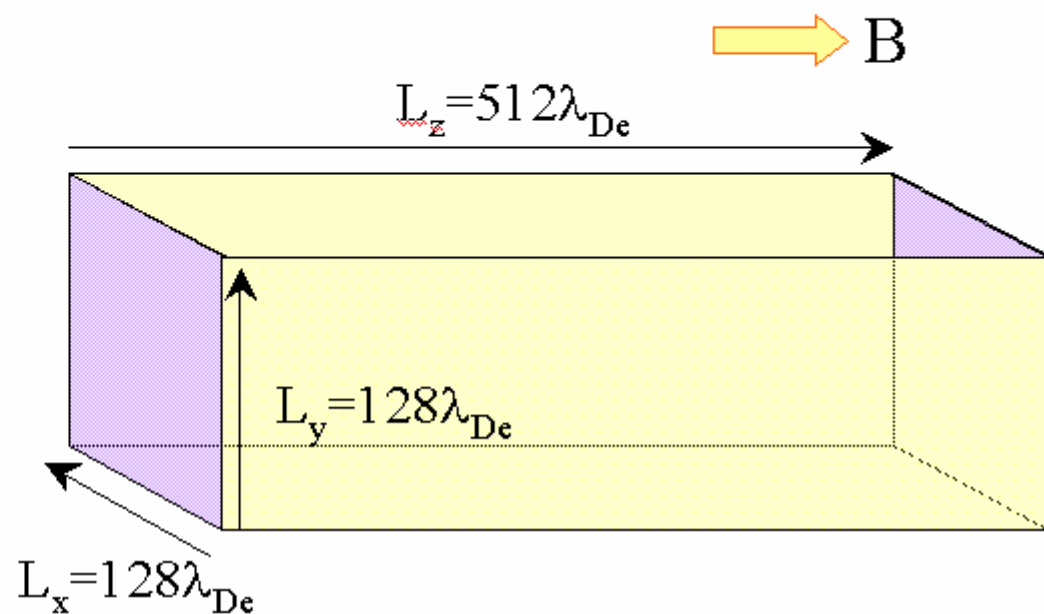
シアによる力

$$= 1 - \frac{m_i \frac{k_y \phi_1}{B_0} \frac{\partial v_d}{\partial x}}{ek_z \phi_1}$$

電場による力

# シミュレーションモデル

	電子(j=e)	イオン(j=i)
超粒子数 N	536870912	536870912
プラズマ周波数 $\omega_{pi} / \omega_{pe}$	1.0	0.05
サイクロトロン周波数 $\omega_{ci} / \omega_{pe}$	-5.0	0.0125
熱速度 $v_{ti} / v_{te}$	1.0	0.035
質量比 $m_i / m_e$	1	400
x方向グリッド数 $ngx$	128	
y方向グリッド数 $ngy$	128	
z方向グリッド数 $ngz$	512	
時間ステップ間隔 $\omega_{pe} \Delta t$	0.1	



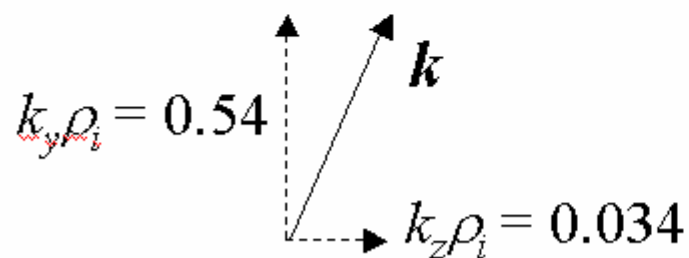
- 3次元PICコード(周期的境界条件)
- 初期粒子密度分布:空間的に一様
- 磁場はz方向に印加し,空間的に一様

主記憶容量: 312GB (256GB × 2ノード) (Work領域を含む)

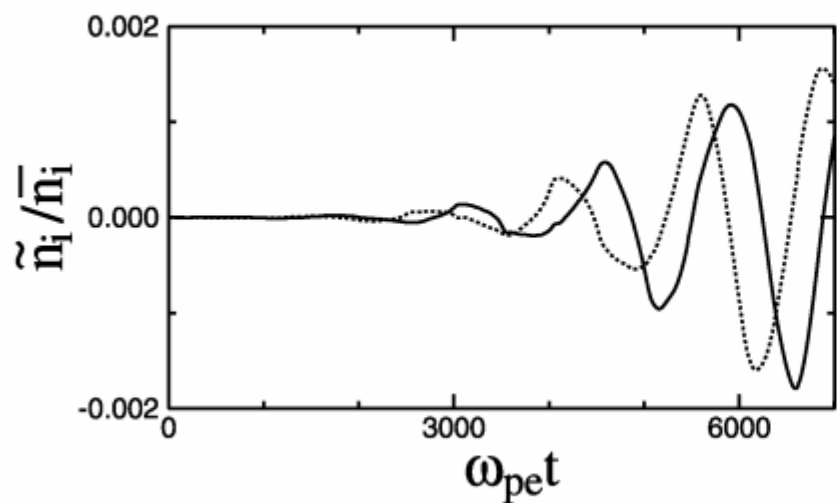
計算時間: 90時間 (70000ステップ)

# イオンフローが励起する低周波不安定性(1)

①の場合の速度シアを導入し,  $(32 \leq \frac{x}{\lambda_{De}} \leq 36)$   
 の領域のみにおける空間フーリエモードを観察

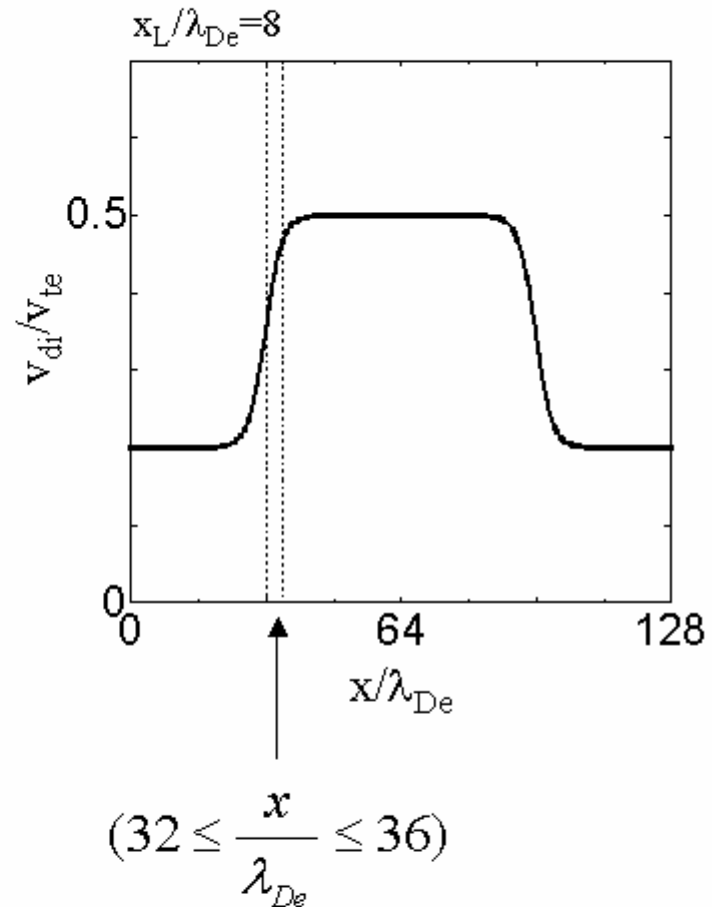


$k_y \rho_i = 0.54, k_z \rho_i = 0.034$ の波数成分に  
 おいて最も揺動の成長が見られる



実部: 実線

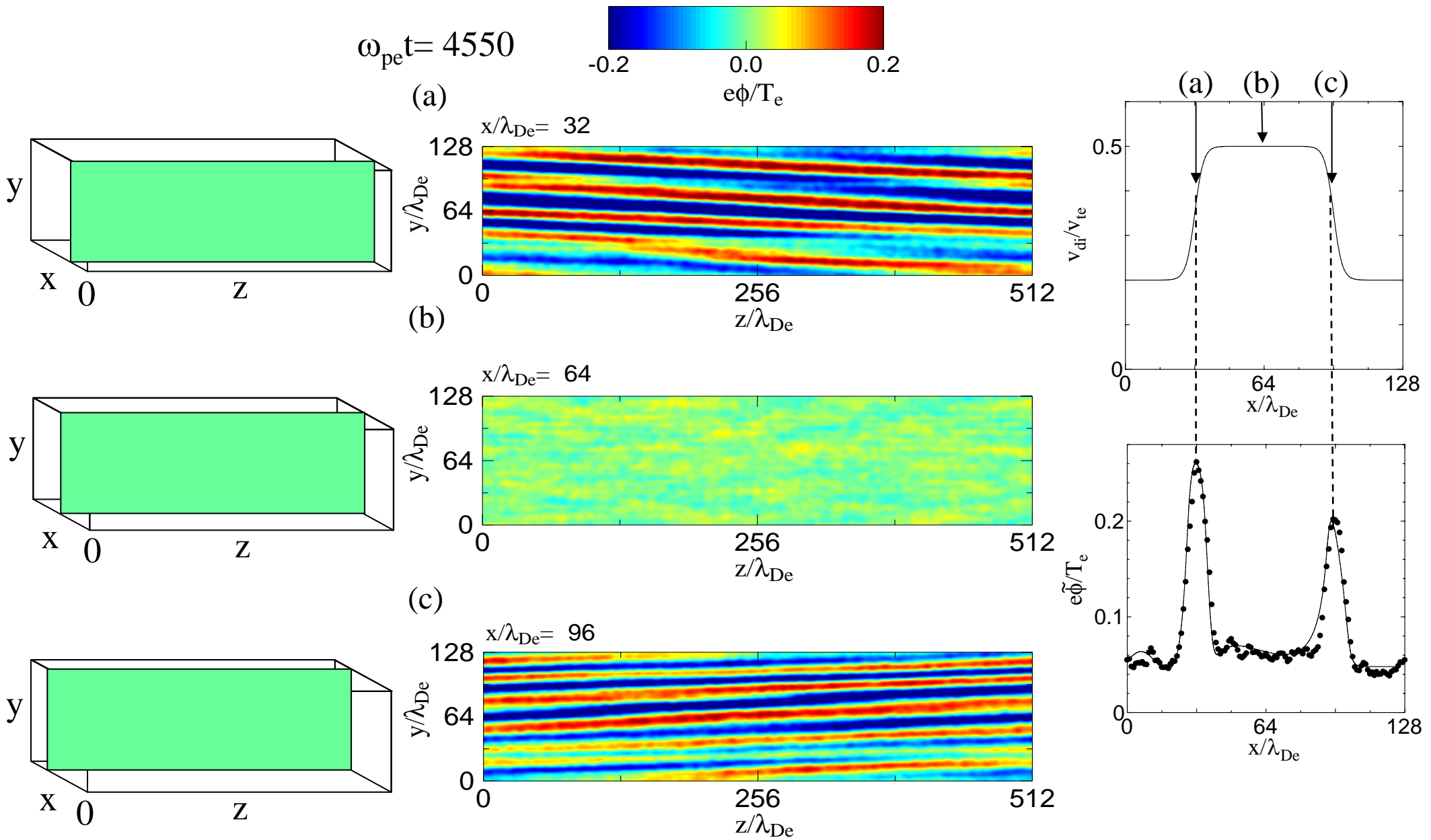
虚部: 破線



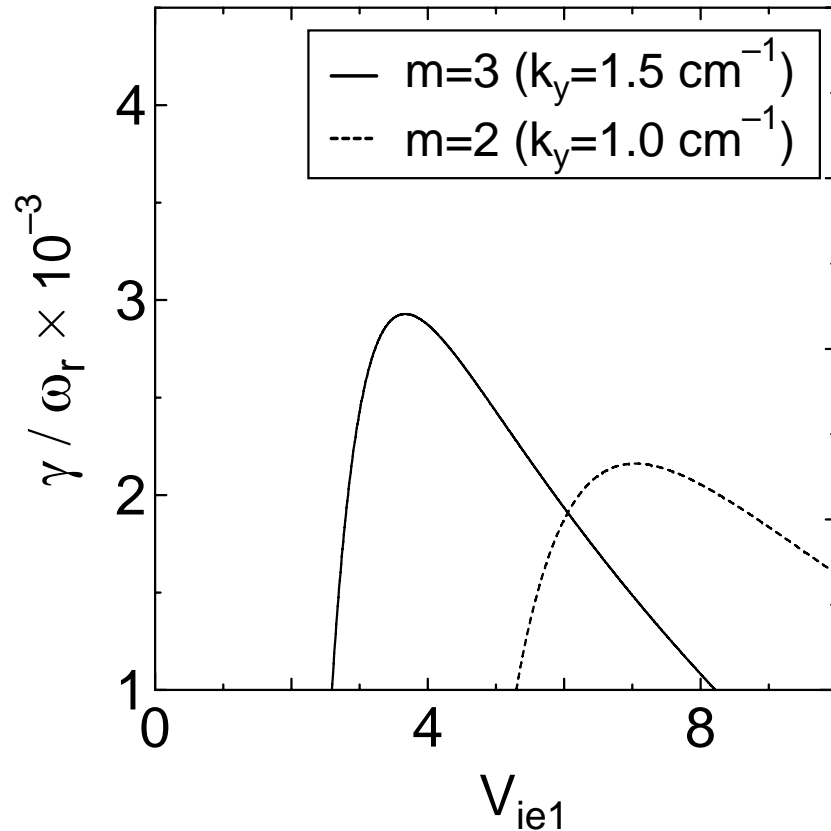
- $\omega_{pe} t = 2000$  までは揺動の成長はみられない
- その後揺動の振幅が指数関数的に増加する



# フロー速度シア駆動不安定性の粒子シミュレーション



# Theoretical Growth Rate of Drift-Wave Insta.



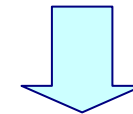
$$V_{ie2} = 0 \text{ V}$$

$$B = 2.9 \text{ kG}$$

$$k_z = 0.2 \text{ cm}^{-1}$$

$$\phi = -4 \text{ V}$$

- Threshold of  $V_{ie1}$  exciting the instability changes due to **azimuthal mode numbers**



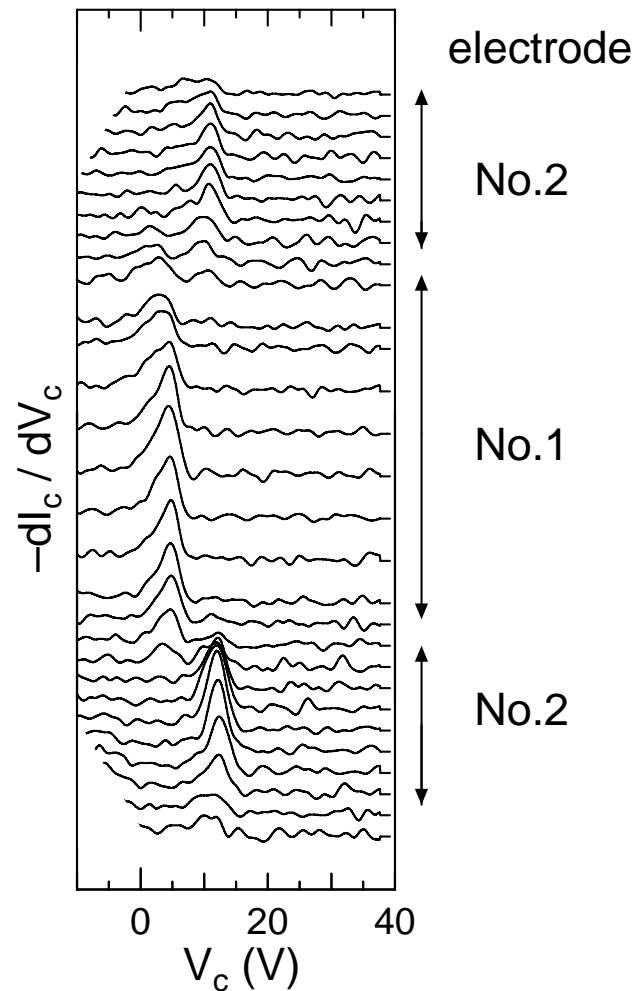
- These calculation results qualitatively agree with the experimental results

$$\sigma^2 = 1 - \frac{k_y}{k_z} \frac{1}{B_0} \sqrt{\frac{2m_i}{e}} \left( \frac{\sqrt{V_{ie2} - \phi} - \sqrt{V_{ie1} - \phi}}{\Delta x} \right)$$

# 平行フロー速度シアが関与する不安定性の研究

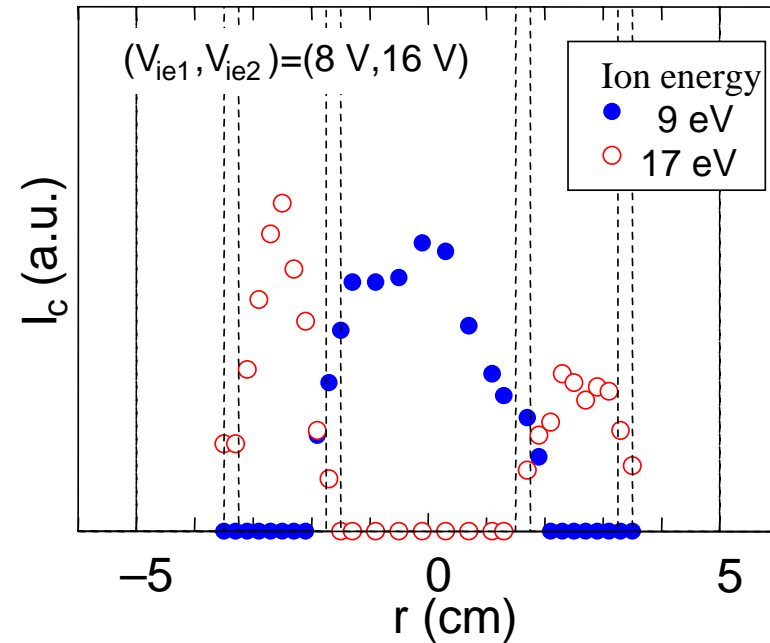
	Theory		Experiment
	Fluid	Kinetic	
D'Angelo Mode (Kelvin-Helmholtz)	D'Angelo (Phys. Fluids, 1965)		D'Angelo and Goeler (Phys. Fluids, 1966)  Univ. Iowa (Phys. Lett. A, 1997)
Ion Acoustic Instability		Naval Res. Lab. et al. (Phys. Rev. Lett., 1998)	Univ. Iowa (Phys. Rev. Lett., 2001)  West Virginia Univ. (Phys. Rev. Lett., 2002)
Ion Cyclotron Instability	Merlino (Phys. Plasmas, 2002)  Shukla (Plasma Phys. Rep., 1999)	Naval Res. Lab. et al. (Phys. Rev. Lett., 2000)	Univ. Iowa (Phys. Lett. A, 2002)  West Virginia Univ. (Phys. Rev. Lett., 2002)
Drift Wave Instability	Shukla (Geo. Res. Lett, 1995)	<b>Tohoku University</b>	

# イオンフローエネルギー半径方向分布



イオンエネルギー分布関数

$(V_{ie1} = 8 \text{ V}, V_{ie2} = 16 \text{ V})$

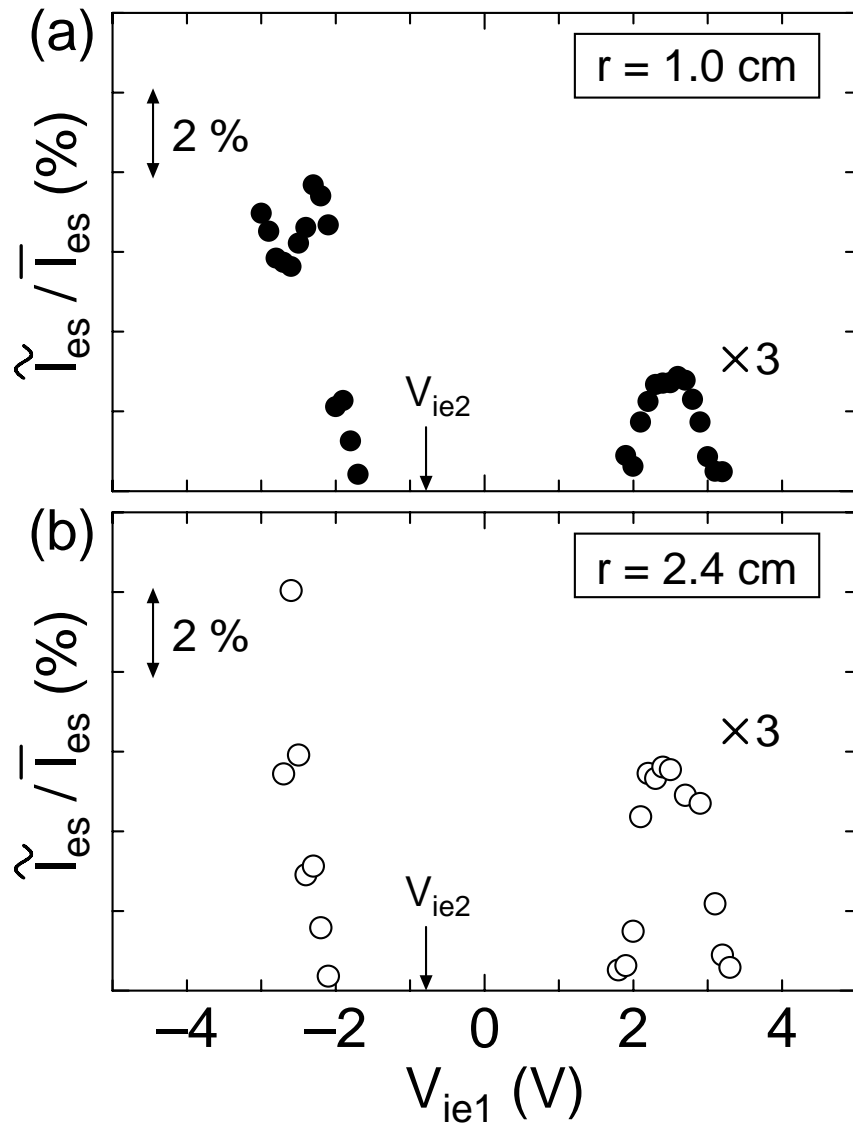


イオンエネルギー分布関数ピーク強度

電極境界領域において、  
磁力線平行方向プラズマフロー速度シア  
の生成に成功した

➡ Rev. Sci. Instrum. **73**, 4218 (2002).

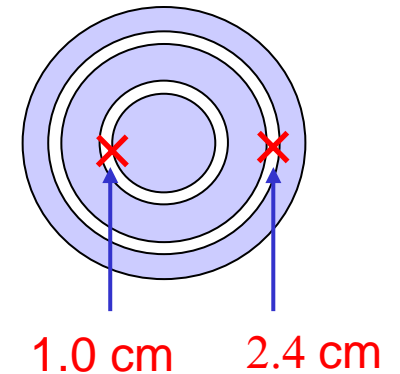
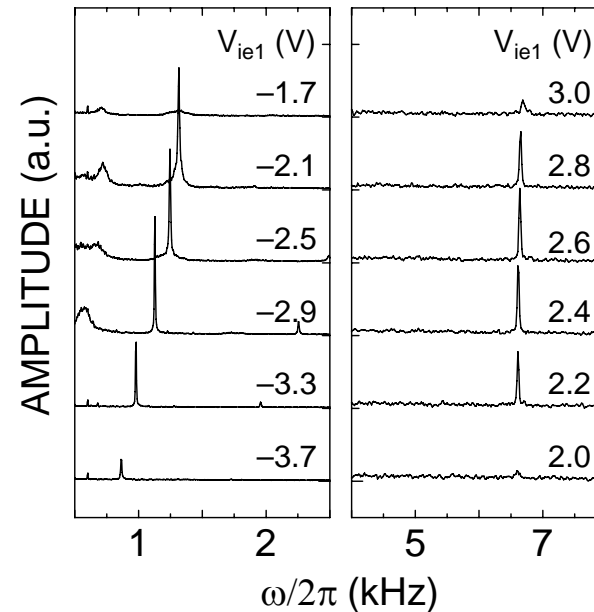
# 密度揺動強度 $\tilde{I}_{es}$ の平行フロー速度シア強度依存性



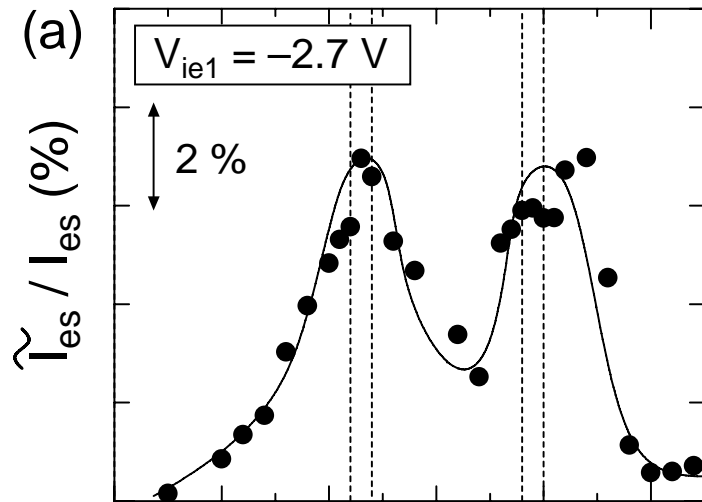
$$V_{ie2} = -0.8 \text{ V}$$

揺動は  $V_{ie1} \neq V_{ie2}$   
の場合に観測される

平行フロー速度シアは低周波  
揺動を励起する



# 揺動強度 $\tilde{I}_{es}$ の半径方向分布

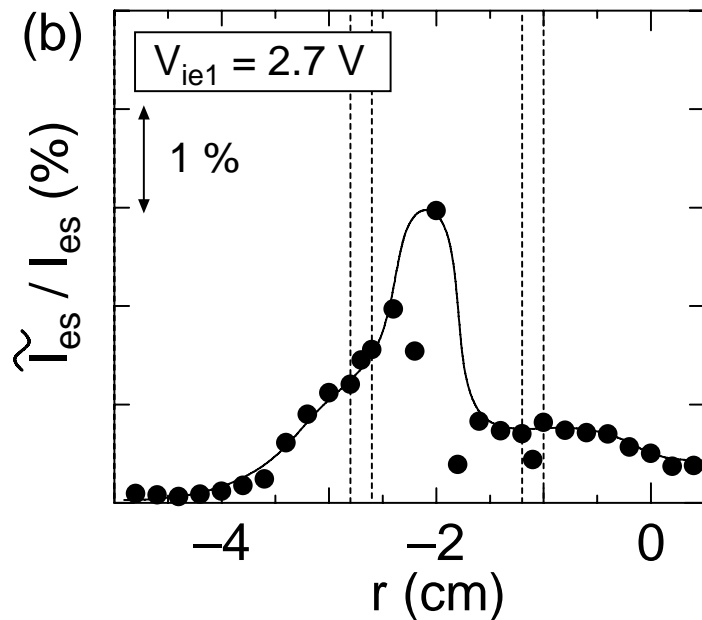


$$\Delta V_{ie} < 0 \quad \left( \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} > 0 \right)$$

揺動は **シア領域** に局在



**ダンジェロモード**

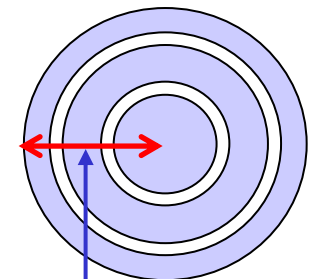


$$\Delta V_{ie} > 0 \quad \left( \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} < 0 \right)$$

揺動は **密度勾配領域** に局在

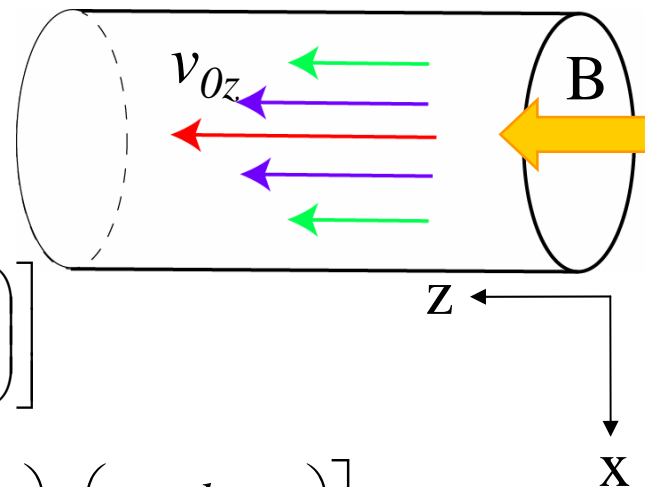


**ドリフト波不安定性**



測定領域

# 速度シア駆動ドリフト波不安定性の運動論による解析



$$1 + \sum_n \Gamma_n(b) F_{ni} + \tau(1 + F_{0e}) + k^2 \lambda_{Di}^2 = 0$$

$$F_{0e} = \left( \frac{\omega - \omega_e^*}{\sqrt{2}k_z v_{te}} \right) Z \left( \frac{\omega}{\sqrt{2}k_z v_{te}} \right) - \frac{k_y}{k_z} \frac{1}{\omega_{ce}} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\sqrt{2}k_z v_{te}} \right) Z \left( \frac{\omega}{\sqrt{2}k_z v_{te}} \right) \right]$$

$$F_{ni} = \left( \frac{\omega + \omega_i^* - k_z v_{0z}}{\sqrt{2}k_z v_{ti}} \right) Z \left( \frac{\omega - k_z v_{0z}}{\sqrt{2}k_z v_{ti}} \right) - \frac{k_y}{k_z} \frac{1}{\omega_{ci}} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \left[ 1 + \left( \frac{\omega - k_z v_{0z}}{\sqrt{2}k_z v_{ti}} \right) Z \left( \frac{\omega - k_z v_{0z}}{\sqrt{2}k_z v_{ti}} \right) \right]$$

G.Ganguli *et al.*: J. Geophys. Res. **99**, 8873 (1994).

実周波数:  $\omega_r = \frac{\omega_e^*}{2} + \sqrt{\frac{(\omega_e^*)^2}{4} + \sigma^2 k_z^2 C_s^2}$

シア効果:  $\left( \sigma^2 = 1 - \frac{k_y}{k_z} \frac{m_i}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \right)$

成長率:  $\frac{\gamma}{\omega_r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_r}{\tau(2\omega_r - \omega_e^*)} \frac{\omega_r}{k_z v_{ti}} \left[ \sqrt{\frac{\tau^3}{\mu}} \left( \frac{k_z v_{0z} + \omega_e^*}{\omega_r} - 1 \right) - \sigma^2 \exp\left( -\frac{\omega_r^2}{2(k_z v_{ti})^2} \right) \right]$

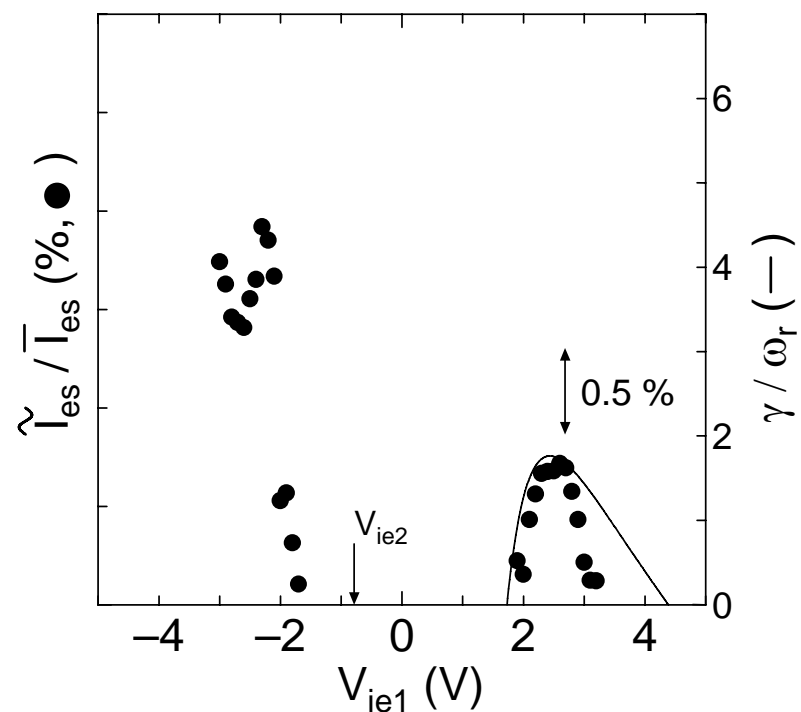
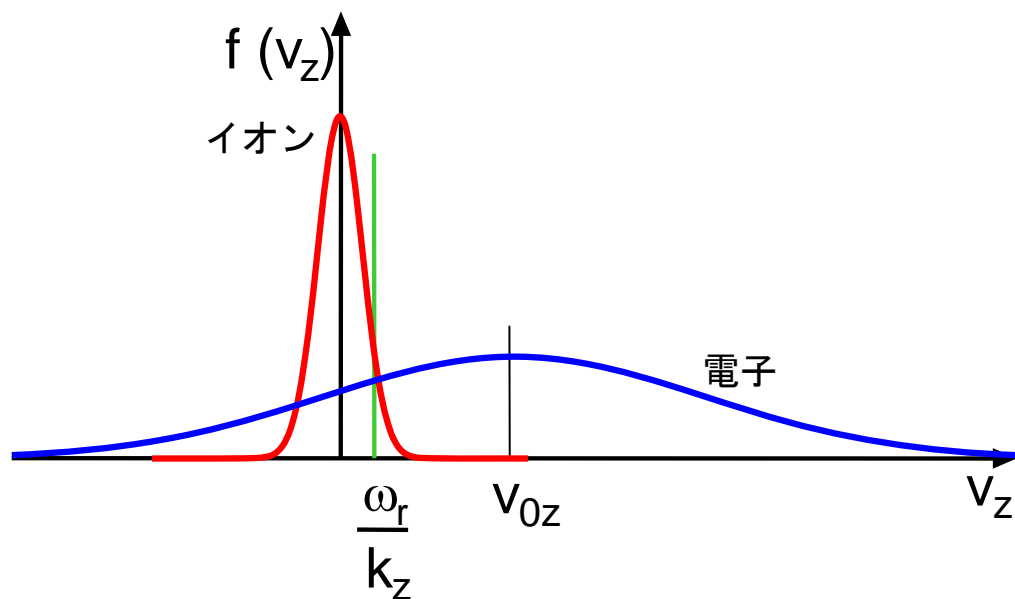
# ドリフト波不安定性成長率のシア強度依存性

$$\frac{\gamma}{\omega_r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_r}{\tau(2\omega_r - \omega_e^*)} \frac{\omega_r}{k_z v_{ti}} \left[ \sqrt{\frac{\tau^3}{\mu} \left( \frac{k_z v_{0z} + \omega_e^*}{\omega_r} - 1 \right)} - \sigma^2 \exp\left( -\frac{\omega_r^2}{2(k_z v_{ti})^2} \right) \right]$$

電子逆ランダウ減衰

イオンランダウ減衰

$$\omega_r = \frac{\omega_e^*}{2} + \sqrt{\frac{(\omega_e^*)^2}{4} + \sigma^2 k_z^2 C_s^2}$$



➡ Phys. Rev. Lett. **90**, 125001 (2003).



$$\omega_r = \frac{\omega_e^*}{2} + \sqrt{\frac{(\omega_e^*)^2}{4} + \sigma^2 k_z^2 C_s^2} \quad \left( \sigma^2 = 1 - \frac{k_y}{k_z} \frac{m_i}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \right)$$

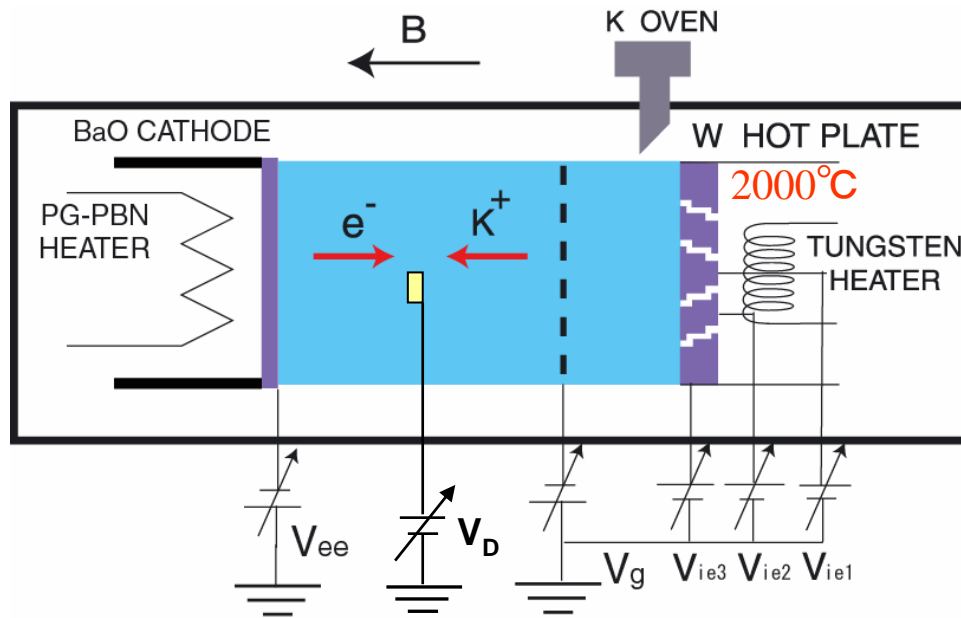
$\sigma^2 \ll 0$  : **不安定** (ダンジェロモード)

$\sigma^2 \gg 0$  : **安定**

$\sigma^2 \gg 0$  でも不安定になり得る

$$\frac{\gamma}{\omega_r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_r}{\tau(2\omega_r - \omega_e^*)} \frac{\omega_r}{k_z v_{ti}} \left[ \sqrt{\frac{\tau^3}{\mu}} \left( \frac{k_z v_{0z} + \omega_e^*}{\omega_r} - 1 \right) - \sigma^2 \exp\left( -\frac{\omega_r^2}{2(k_z v_{ti})^2} \right) \right]$$

# イオンサイクロトロン不安定性



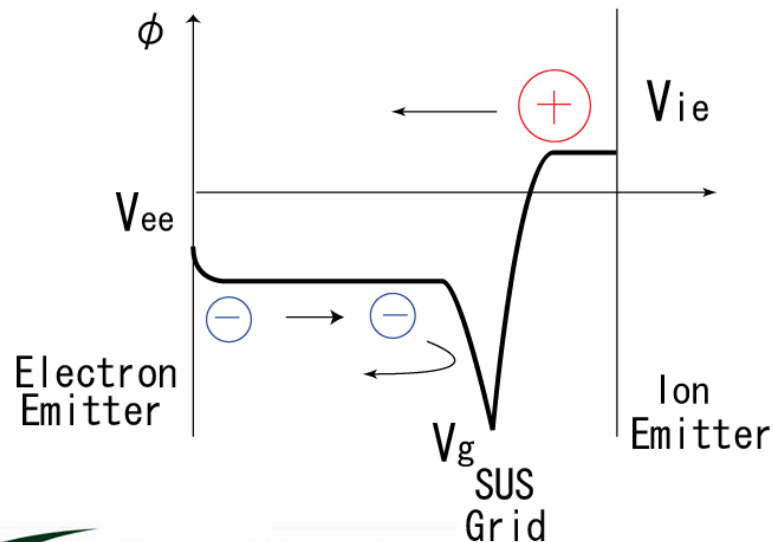
ディスク電極( $2r_D=2$  mm)を  
正 ( $V_D = 0 \sim +80$  V) に印加



イオンサイクロトロン  
不安定性を励起しやすくする

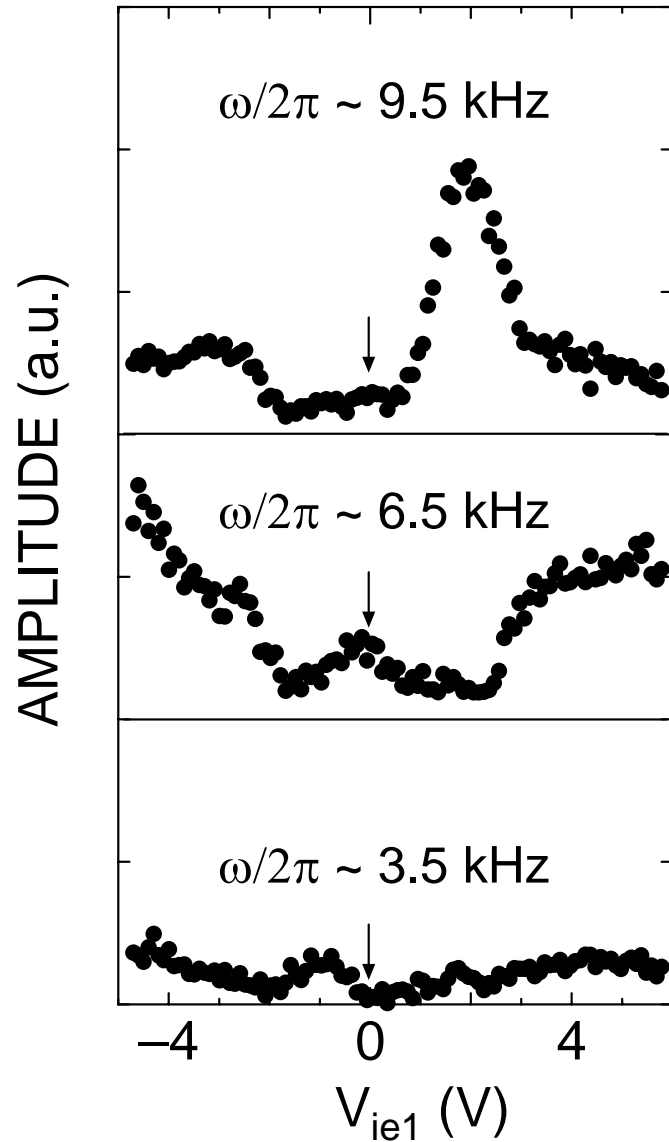


平行フロー速度シアが  
不安定性に与える影響を研究



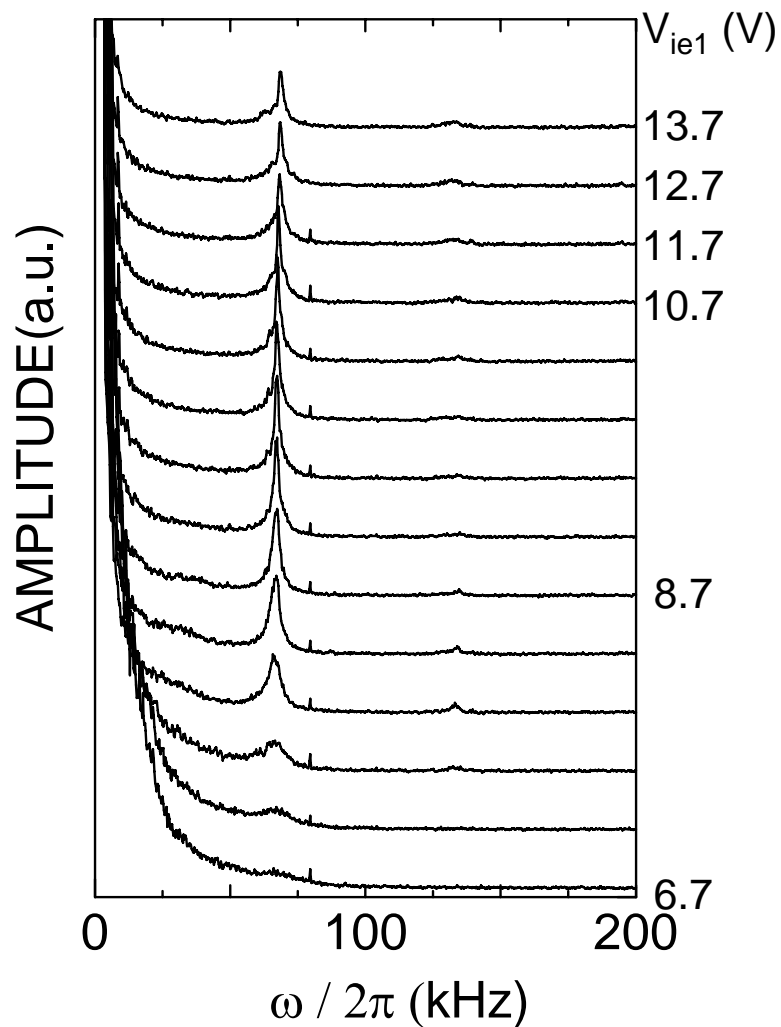
# 低周波揺動強度の $V_{ie1}$ 依存性

## 実験結果

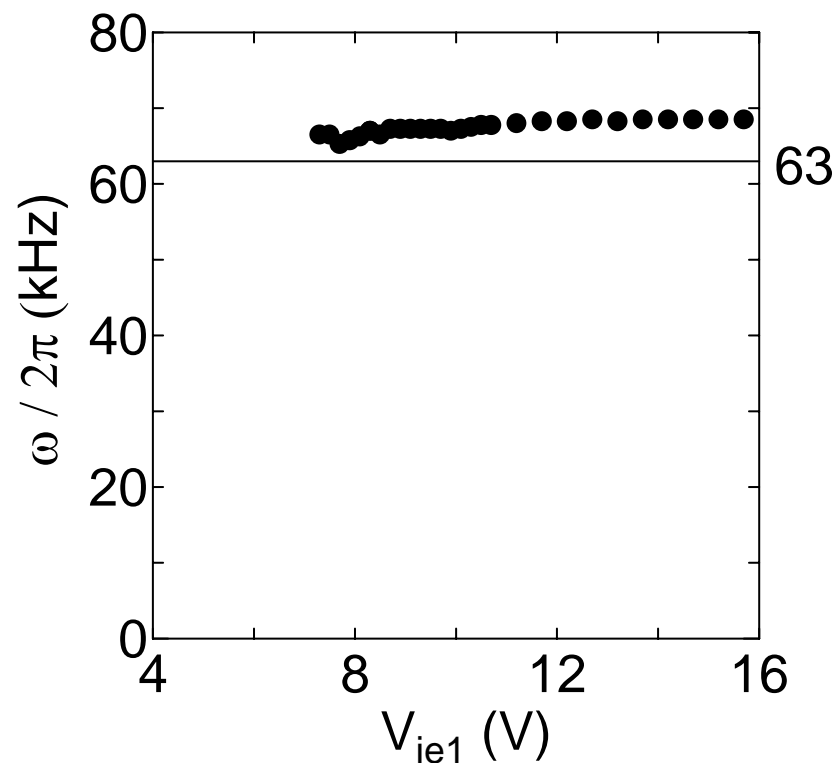


- 揺動周波数によって、揺動強度のピークを示す $V_{ie1}$ が異なる

# イオンサイクロトロン不安定性のシア強度依存性



- $B=1.6$  kG,  $V_D=80$  V
- $V_{ie2} = 2.3$  V



# イオンサイクロトロン不安定性成長率の シア強度依存性

$$\frac{\gamma}{\omega_{ci}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\omega_{ci}}{k_z v_{ti}} \frac{\left[ \sqrt{\frac{\tau^3}{\mu}} \left( \frac{k_z v_{0z}}{\omega_r} - 1 \right) - \sum_n \Gamma_n \sigma_c^2 \exp\left( -\frac{(\omega_r - n\omega_{ci})^2}{2(k_z v_{ti})^2} \right) \right]}{\sum_{n>0} \frac{4n^2 \Gamma_n}{(\omega_r^2 / \omega_{ci}^2 - n^2)^2}}$$

$$\omega_r = n\omega_{ci} + \sqrt[3]{\Gamma_n \sigma_c^2 k_z^2 C_s^2 n \omega_{ci}}$$

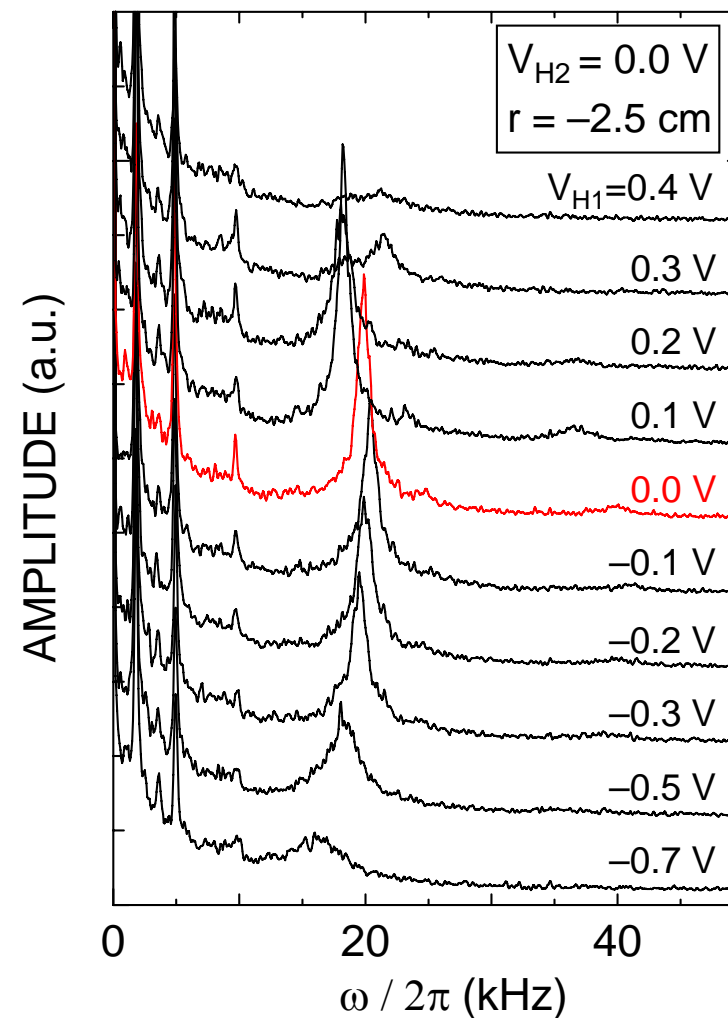
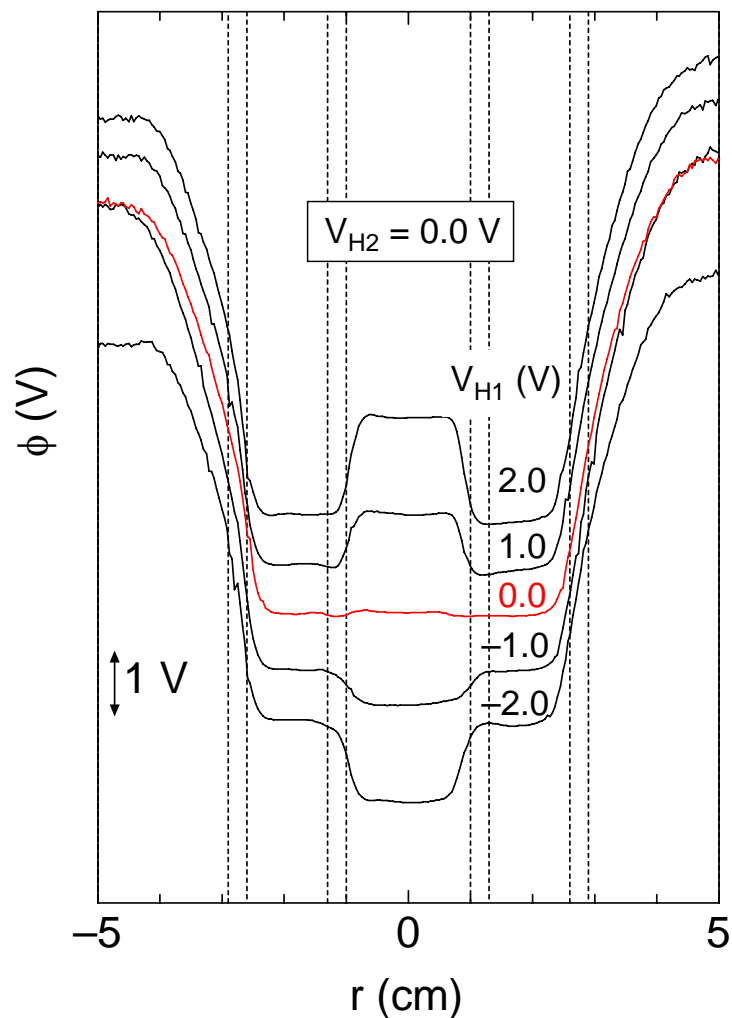
$$\left( \sigma_c^2 = 1 - \left( 1 - \frac{n\omega_{ci}}{\omega_r} \right) \frac{k_y}{k_z} \frac{m_i}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x} \right)$$

G.Ganguli *et al.*: Phys. Plasmas **9**, 2321 (2002).

# 垂直フロー速度シアが関与する不安定性の研究

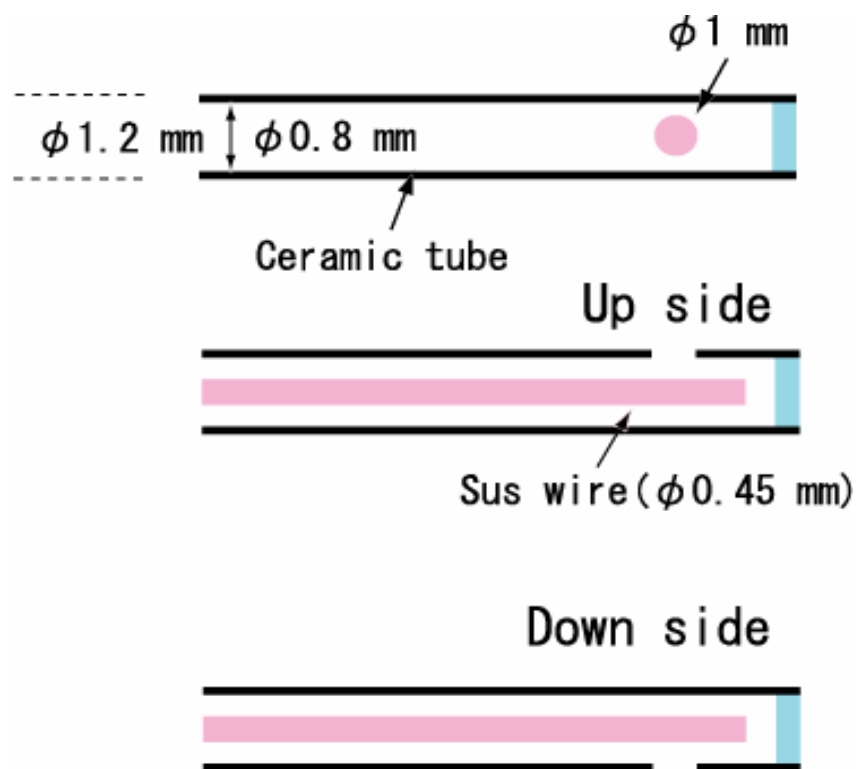
	Theory	Experiment	不安定性への効果
Kelvin-Helmholtz Instability	<b>Rosenbluth &amp; Simon</b> (Phys. Fluids, 1965)	<b>Kent et al.</b> (Phys. Fluids, 1969) <b>Jassby</b> (Phys. Fluids, 1972)	励起
Inhomogeneous Energy-Density Instability	<b>Ganguli</b> (Phys. Plasmas, 1997)	<b>Koeple et al.</b> (Phys. Rev. Lett., 1994) <b>Amatucci et al.</b> (Phys. Rev. Lett., 1996)	励起
Flute Instability	<b>Hojo et al.</b> (J. Phys. Soc. Jpn, 1988)	<b>Komori et al.</b> (Phys. Fluids, 1988)	抑制
Drift Wave Instability	<b>Sanuki</b> (Phys. Fluids, 1984)	<b>Yoshinuma et al.</b> (J. Plasma Fusion Res., 2001) <b>Mase et al.</b> (Phys. Rev. Lett., 1990)	
Ion Cyclotron Instability		<b>Tohoku University</b>	抑制

# 垂直フロー速度シアの低周波揺動への効果

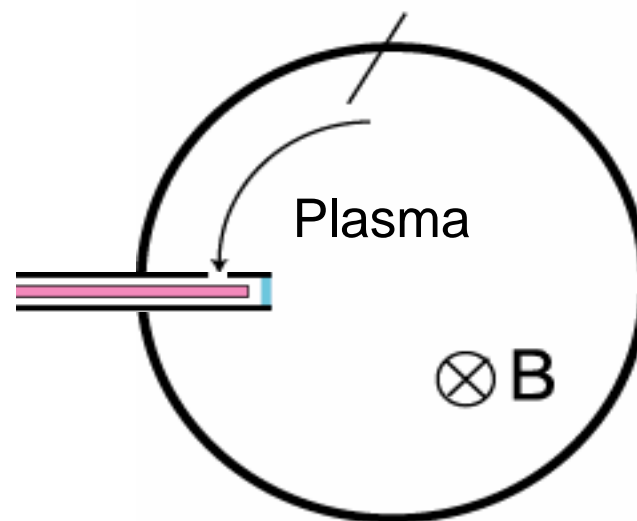


# イオンフロー速度の測定

## Directional Langmuir Probe (方向性プローブ)

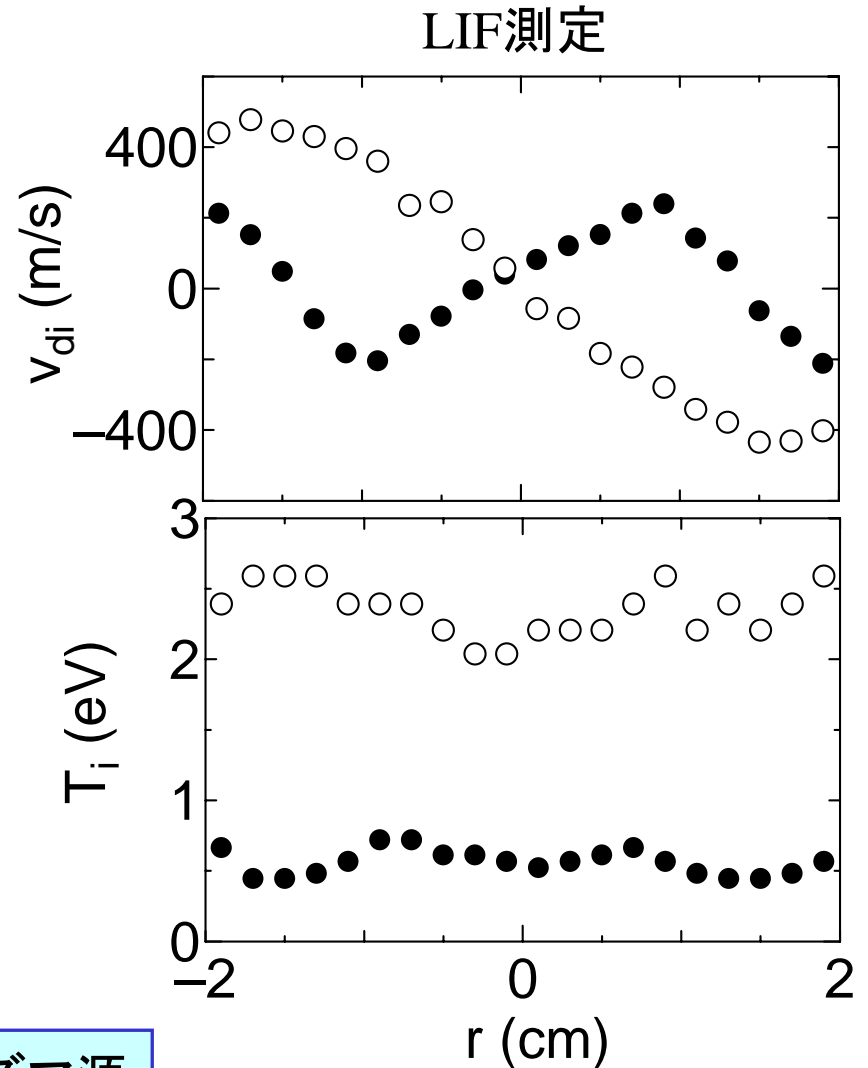
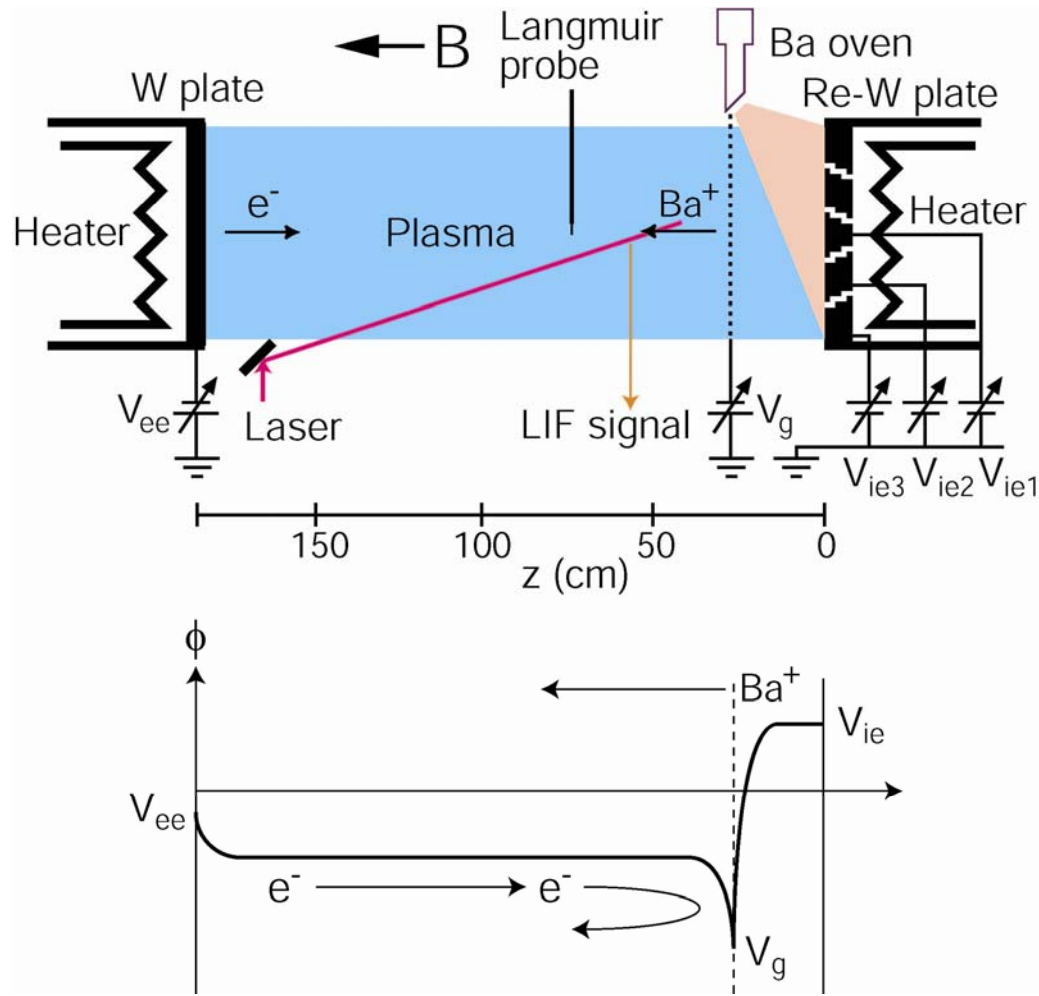


## イオンフロー速度の測定





# レーザー誘起蛍光法によるイオン速度分布関数の精密計測



東北大学で考案・製作した分割型電極合成プラズマ源をWest Virginia 大学に持ち込み共同実験

# 研究背景

磁力線垂直方向フロー速度シア

イオンサイクロトロン不安定性

磁力線平行方向フロー速度シア

ドリフト波不安定性

負イオンプラズマ中

まとめ