

第5回若手科学者によるプラズマ研究会
2002年3月5日 日本原子力研究所 那珂研究所

磁力線平行・垂直方向 プラズマフローシアーによる 低周波揺動の励起・抑制

東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻

金子俊郎, 角山北斗, 多田栄司, 畠山力三

研究背景

プラズマフローシアー

核融合プラズマ

周辺領域

径電場によるLH遷移
垂直フローシアー



中心領域

LH遷移を妨げる
平行フローシアー

宇宙空間プラズマ

電離層

平行フローシアー優勢



磁気圏

相対的に
垂直フローシアー

低周波揺動, 構造形成

平行・垂直フローシアーの混在
フローシアー以外の条件も同時に変化



フローシアーの役割が不明

磁力線平行・垂直フローシアーを
他の条件を均一にしたまま、独立に
生成・制御する必要性

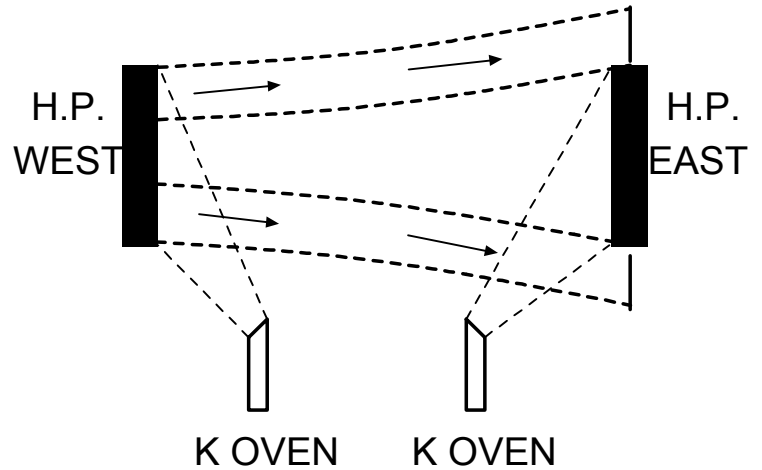
平行フローシアアの従来研究

実験によるアプローチ

不均一磁場中実験のため、
フローシアア以外の条件が
変化

フローの大きさを能動的に
制御できない

純粋なフローシアアの
議論ができない



平行フローシアアによる不安定性の理論研究

	種類	計算法	密度勾配	根号内符号
D'Angelo (1965)	KHI	流体論	○	×
Shukla (1995)	ドリフト波 + イオン音波	流体論	○	×
Ganguli (1998)	KHI イオン音波	運動論	×	○

$$\omega = \omega^* + k_y v_{0y} + k_z v_{0z} \pm \sqrt{(\omega^*)^2 + 2k_z^2 v_s^2 - 2k_y k_z \frac{kT_e}{eB_0} \frac{\partial v_{0z}}{\partial x}}$$

垂直フローシアアの従来研究

基礎実験分野

	揺動の種類	揺動励起	揺動抑制	
Kent [1]	ケルビンヘルムホルツ	電場シアア		実験
Jassby [2,3]	ケルビンヘルムホルツ	電場シアア	強い電場	実験
Ganguli [4]	イオンサイクロトロン	不均一電場		理論
Hojo [5]	フルートモード	不均一電場	電場シアア	理論
Komori [6]	フルートモード	不均一電場	電場シアア	実験
Tokuzawa [7]	回転駆動フルートモード	電場		実験
Hojo [8]	回転駆動	電場		理論
Koepke [9]	不均一エネルギー密度駆動	電場シアア		実験
Amatucci [10]	不均一エネルギー密度駆動	電場シアア		実験
Sen [11]	トロイダルドリフト波	負の電場曲率	正電場曲率	理論
Sen [12,13]	交換型フルートモード	負の電場曲率	正電場曲率	理論
Ganguli [14]	ケルビンヘルムホルツ	B_{\parallel} フローシアア	電場シアア	理論
Mase [15]	ドリフト波モード	密度勾配	電場	実験
Sanuki [16]	ドリフト波モード	密度勾配	電場	理論
Chaudhry [17]	ドリフト波モード	密度勾配	電場	理論
Yoshinuma [18]	ドリフト波モード ケルビンヘルムホルツ	密度勾配 電場シアア	電場 電場	実験

※ 電場 $\Rightarrow E \times B$ ドリフト回転, 電場シアア $\Rightarrow E \times B$ ドリフト回転周波数シアア

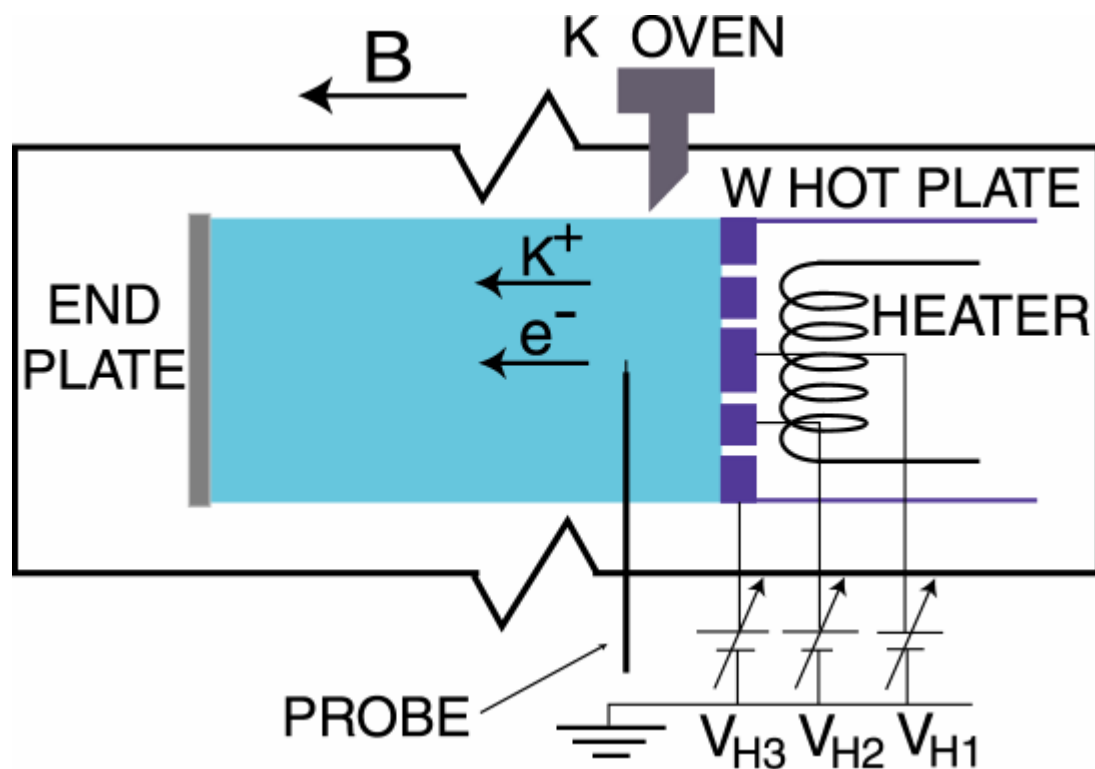
垂直フローシアーの従来研究

参考文献

- 1] G. I. Kent, N. C. Jen and F. F. Chen : Phys. Fluids 12 (1969) 2140.
- 2] D. L. Jassby : Phys. Rev. Lett. 25 (1970) 1567.
- 3] D. L. Jassby : Phys. Fluids 15 (1972) 1590.
- 4] G. Ganguli and Y. C. Lee : Phys. Fluids 28 (1985) 761.
- 5] H. Hojo, M. Shigeta and T. Watanabe : J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1988) 711.
- 6] A. Komori, K. Watanabe and Y. Kawai : Phys. Fluids 31 (1988) 210.
- 7] T. Tokuzawa, A. Mase, A. Itakura, M. Inutake, K. Ishii and T. Tamano : Jpn. J. Appl. Phys. 33 (1994) L807.
- 8] H. Hojo : 核融合研究 65 (1991) 639.
- 9] M. E. Koepke, W. E. Amatucci, J. J. Carroll III and T. E. Sheridan : Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 3355.
- 10] W. E. Amatucci, D. N. Walker, G. Ganguli, J. A. Antoniadis, D. Duncan, J. H. Bowles, V. Gavrishchaka and M. E. Koepke : Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 1978.
- 11] S. Sen and J. Weiland : Phys. Plasmas 2 (1995) 777.
- 12] S. Sen and R. G. Storer : Phys. Plasmas 4 (1997) 3731.
- 13] S. Sen, P. K. Sharma and D. Bora : Phys. Plasmas 5 (1998) 2637.
- 14] G. Ganguli, Y. C. Lee, P. J. Palmadesso and S. L. Ossakow : Geophys. Res. Lett. 16 (1989) 735.
- 15] A. Mase, J. H. Jeong, A. Itakura, K. Ishii, M. Inutake and S. Miyoshi : Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2281.
- 16] H. Sanuki : Phys. Fluids 27 (1984) 2500.
- 17] M. Chaudhry, H. Hojo, T. Watanabe and K. Nishikawa : J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1988) 3043.
- 18] M. Yoshinuma, M. Inutake, R. Hatakeyama, T. Kaneko, K. Hattori, A. Ando and N. Sato : Phys. Lett. A 255 (1999) 301.

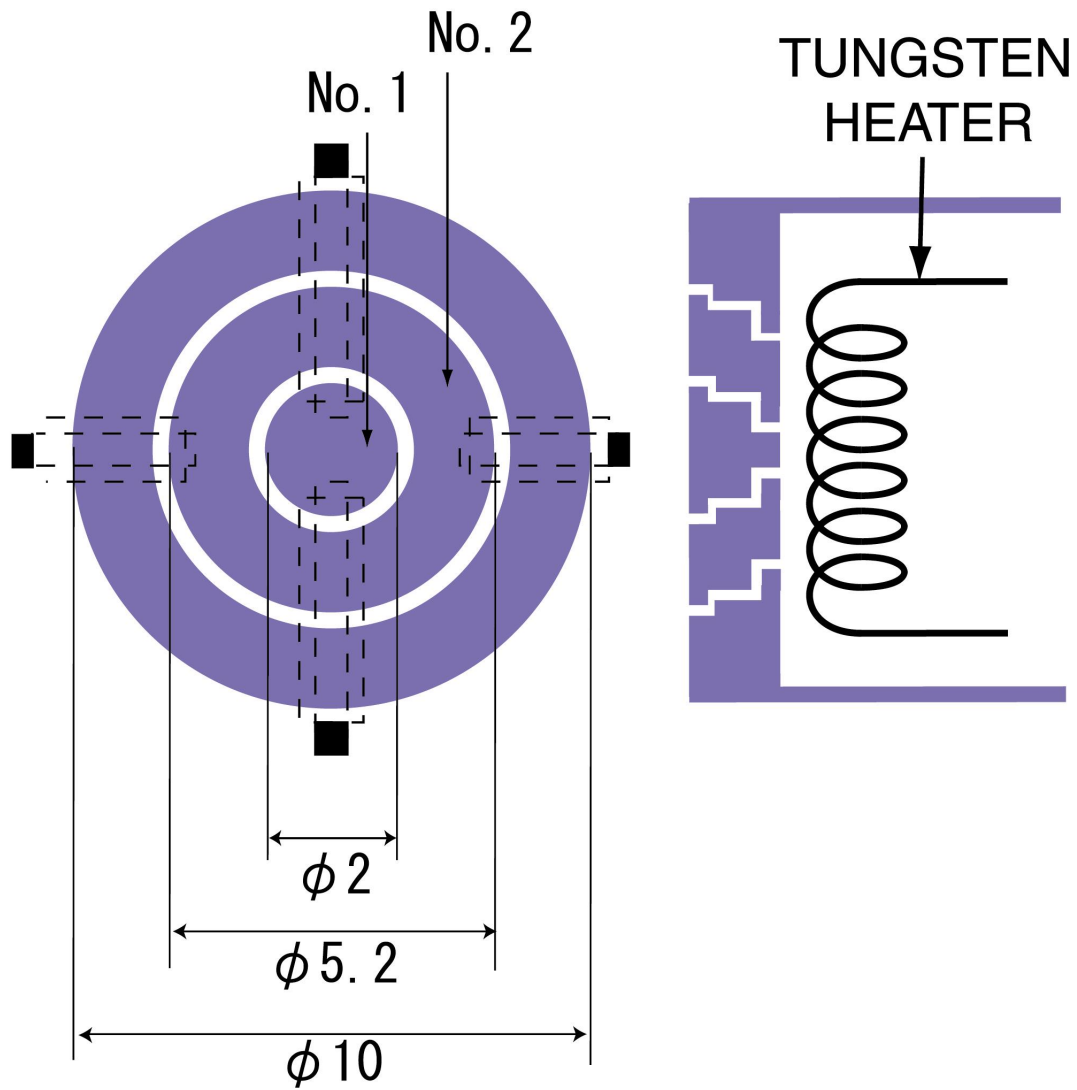
Perpendicular Flow Shear

Experimental Setup



Segmented Hot Plate

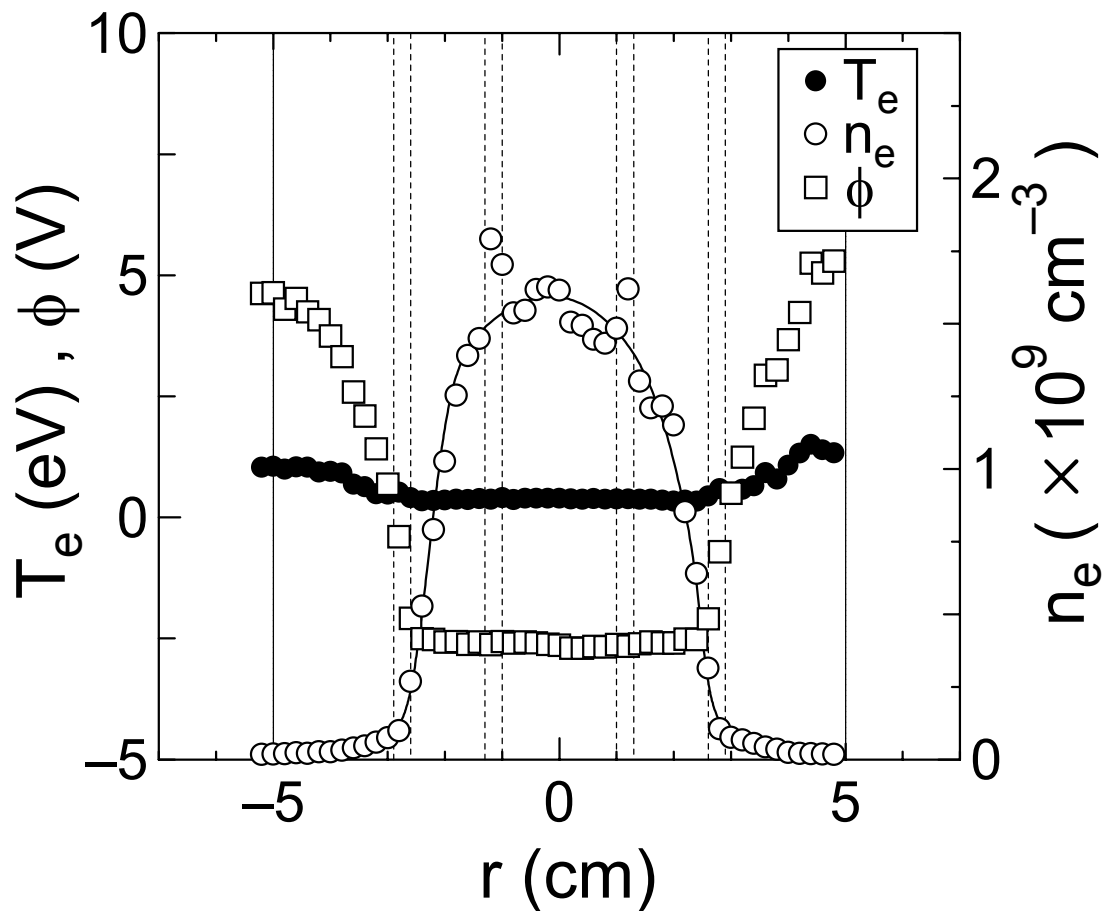
TUNGSTEN ELECTRODE No. 3



•Heated to 2300 K

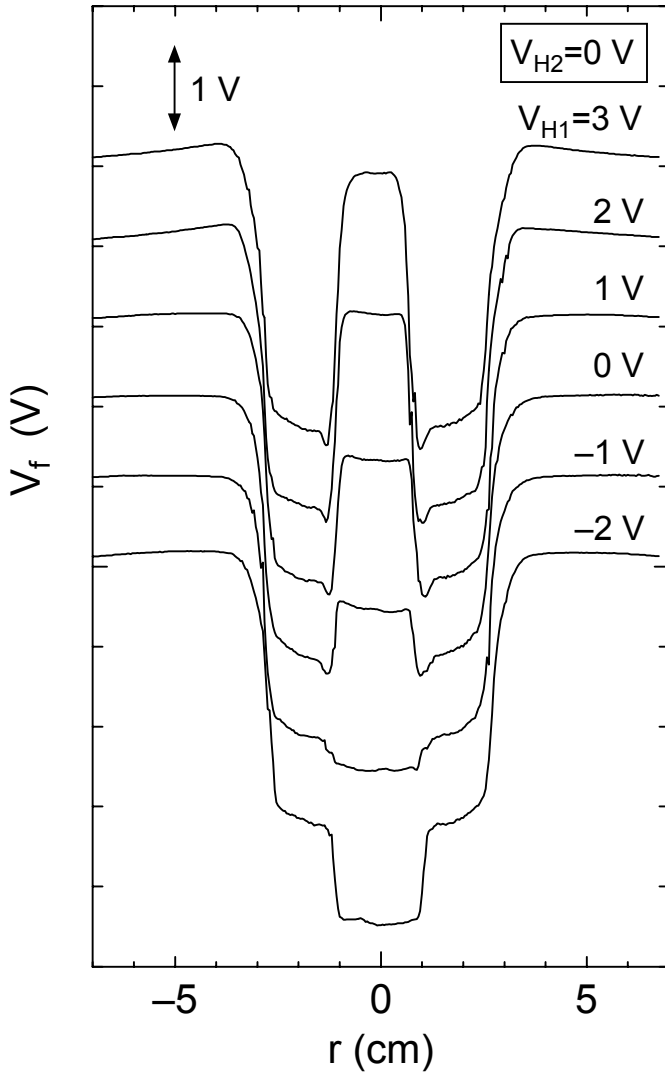
Radial Profiles of n_e , T_e , ϕ

$$V_{H1} = -0.65 \text{ V}, V_{H2} = 0 \text{ V}$$

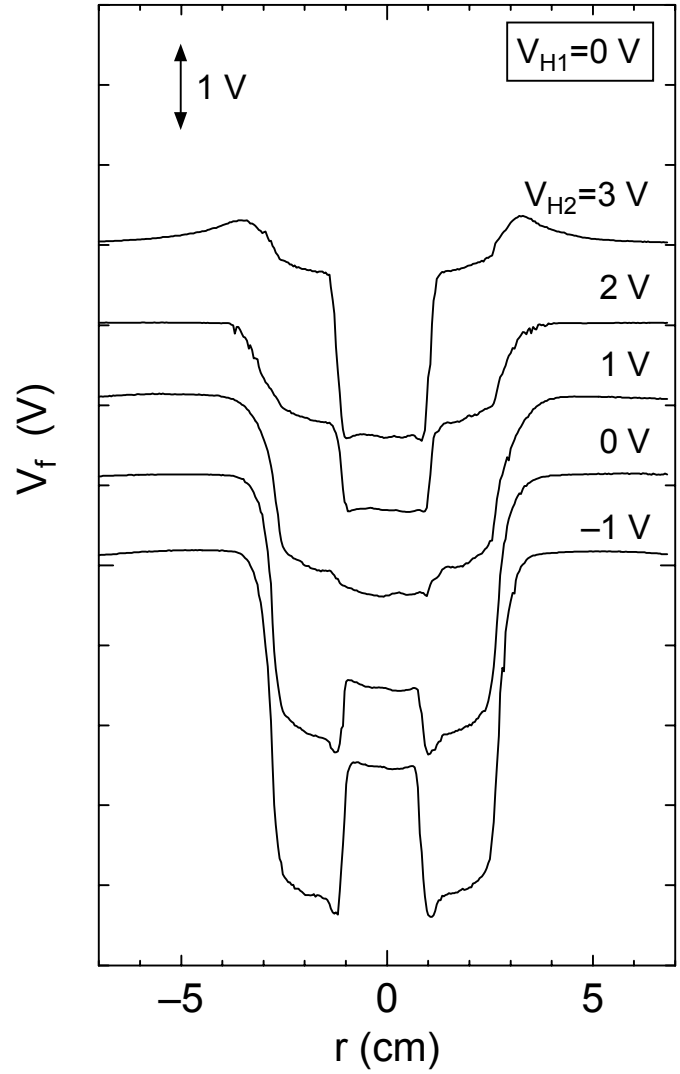


$V_{H3} = 0 \text{ V}$ throughout the present experiment.

Radial Profiles of V_f

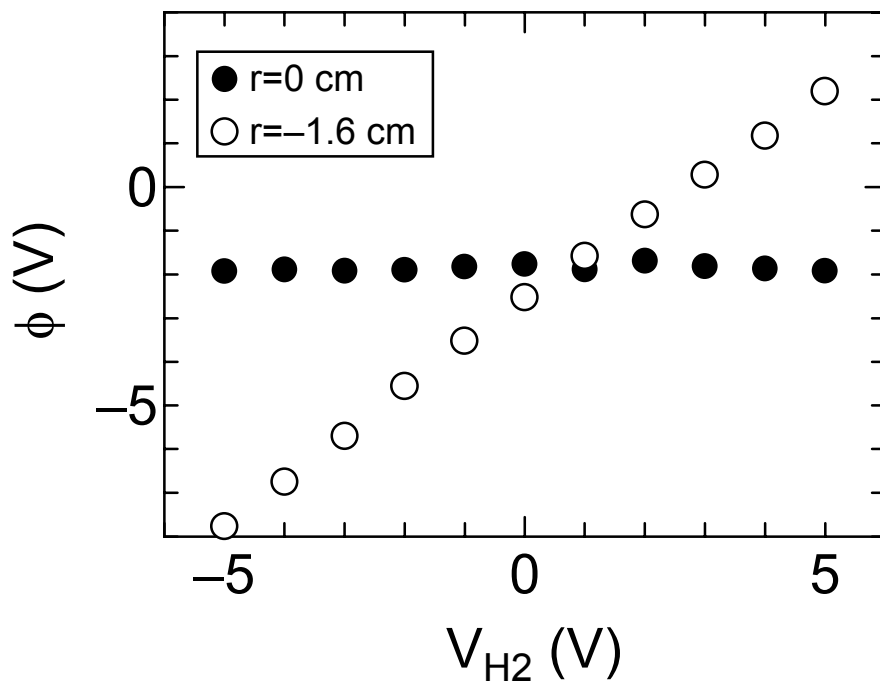
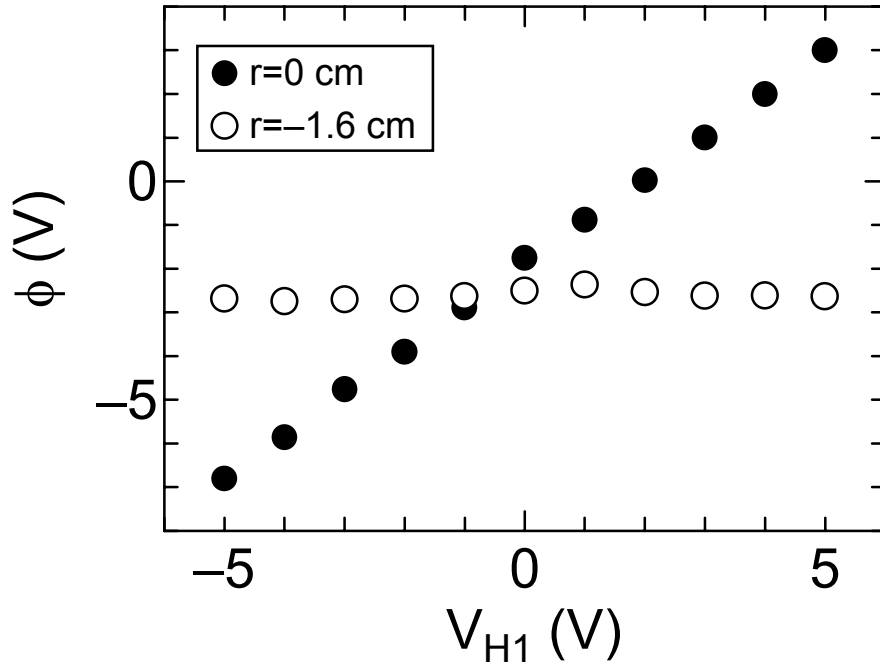


Dependence on V_{H1}

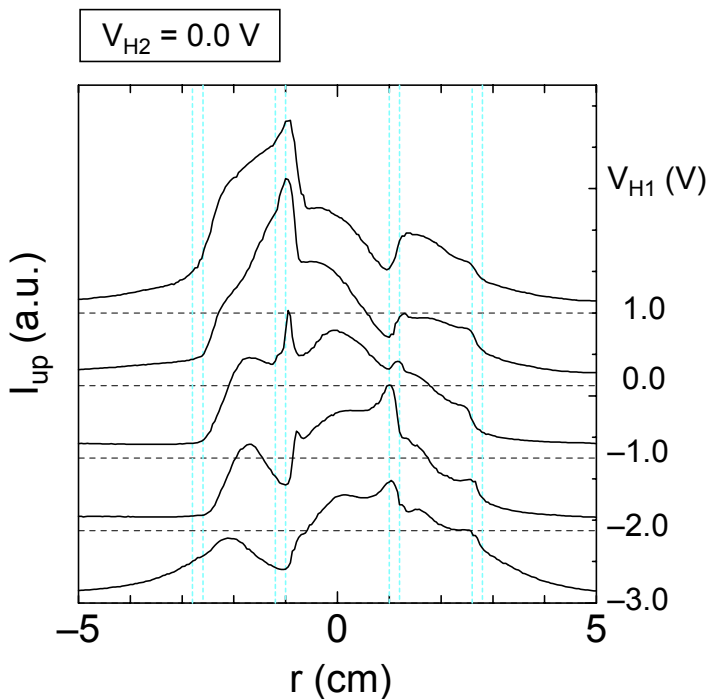
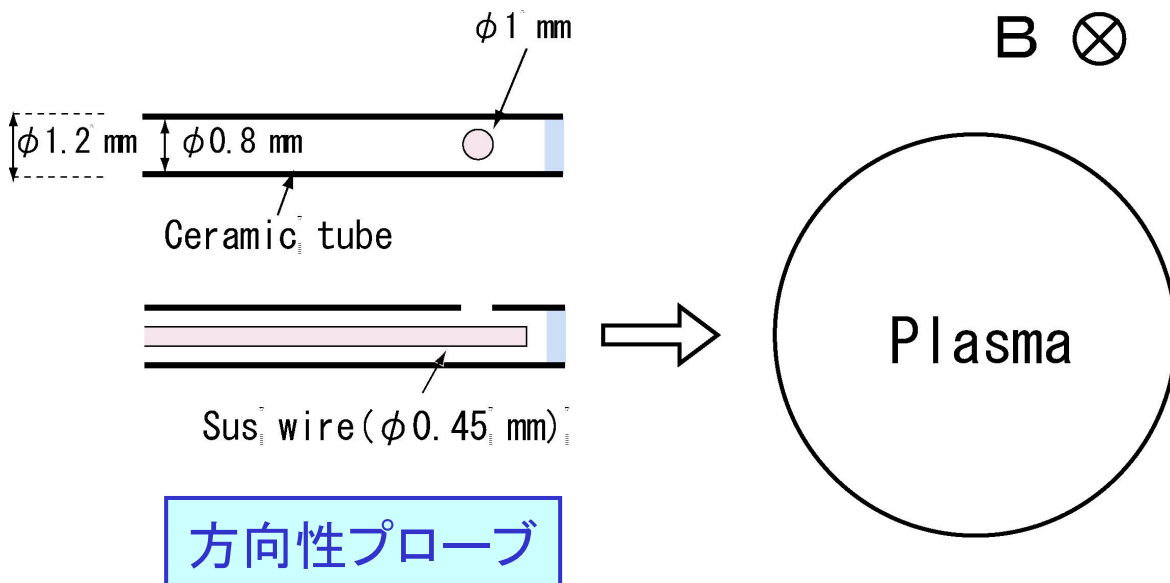


Dependence on V_{H2}

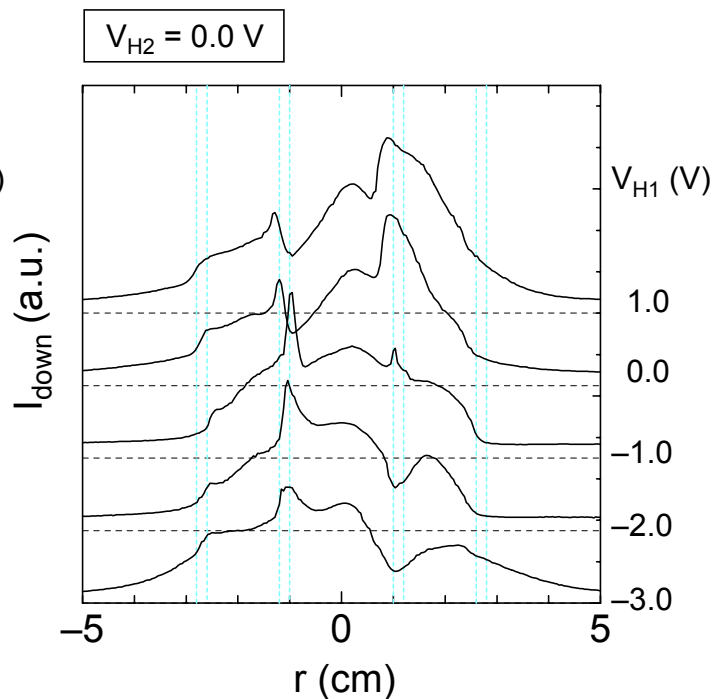
Dependence of ϕ on V_{H1} , V_{H2}



Measurement of Ion Flow

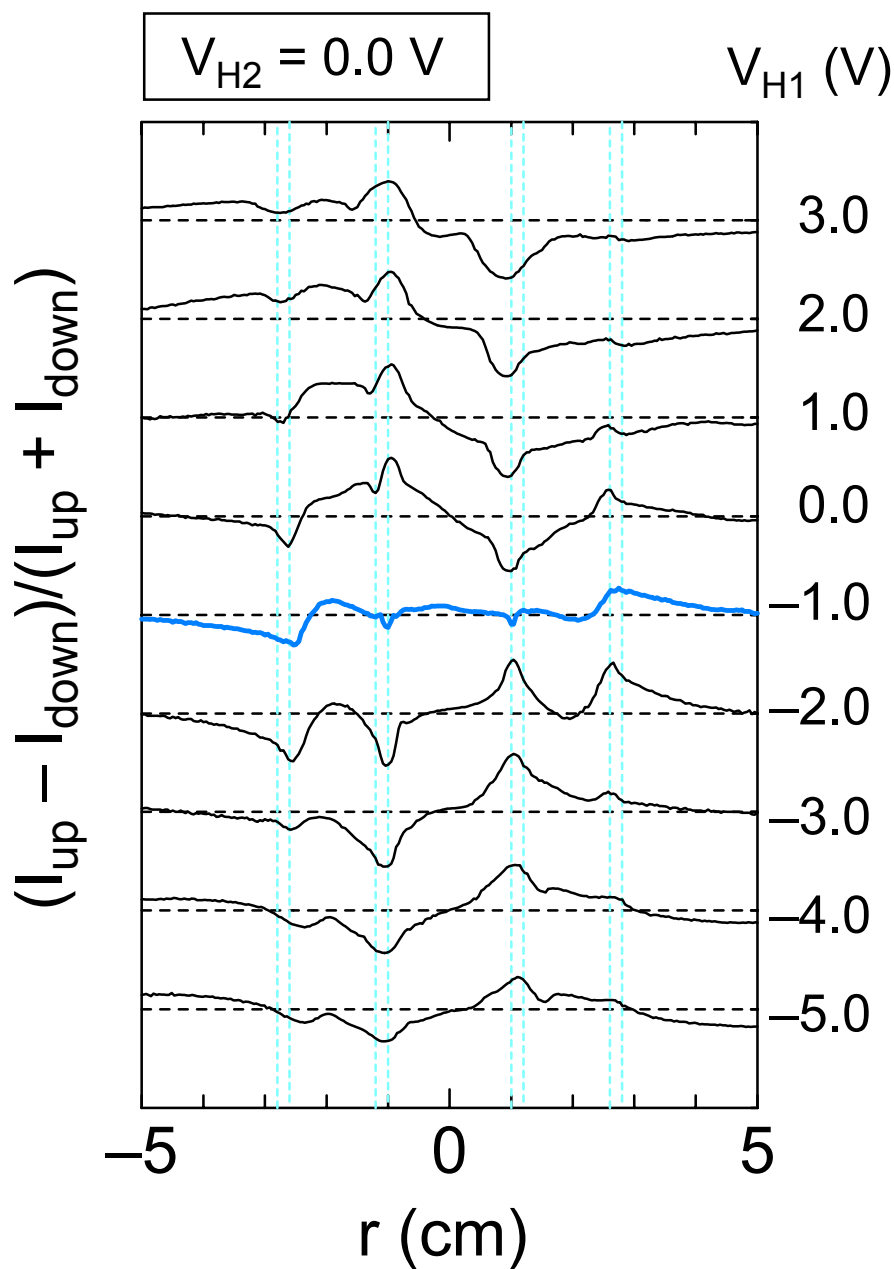


上向き



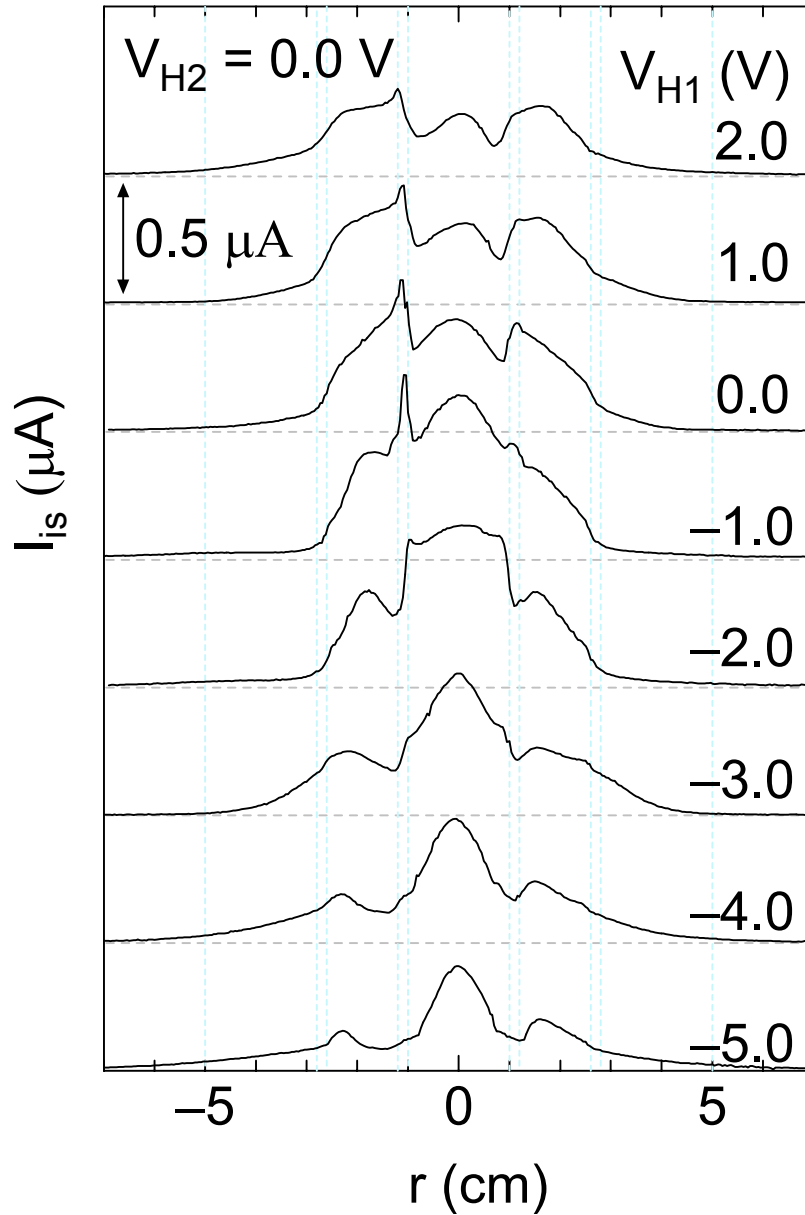
下向き

Radial Profiles of Ion Flow Velocity



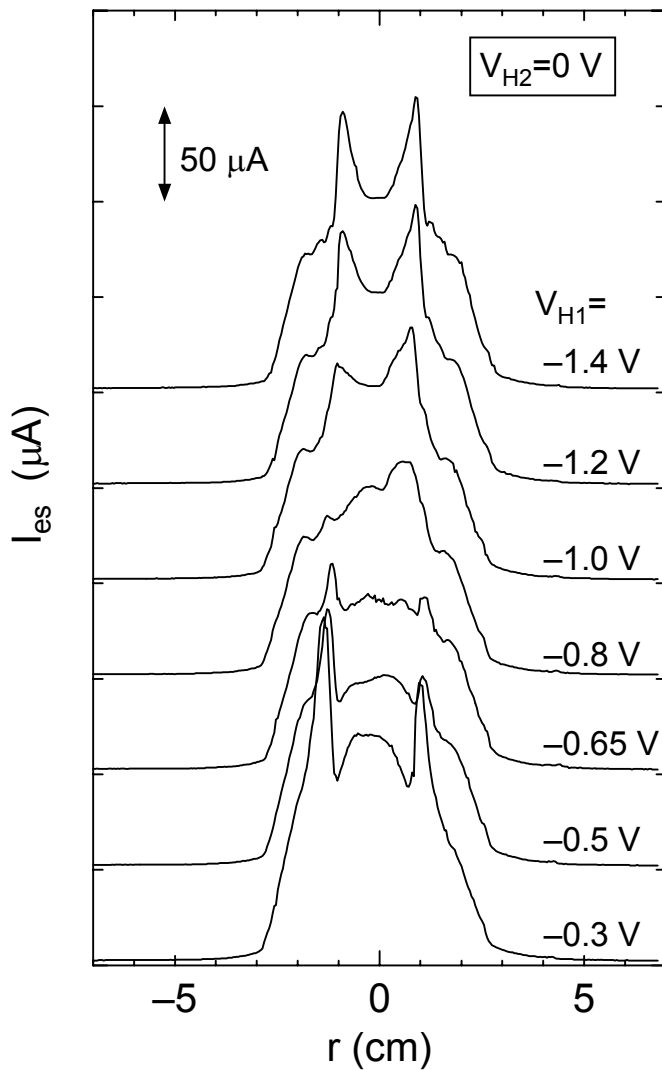
値が正の場合, 上→下の方向へのフローを意味する

Radial Profiles of I_{is}

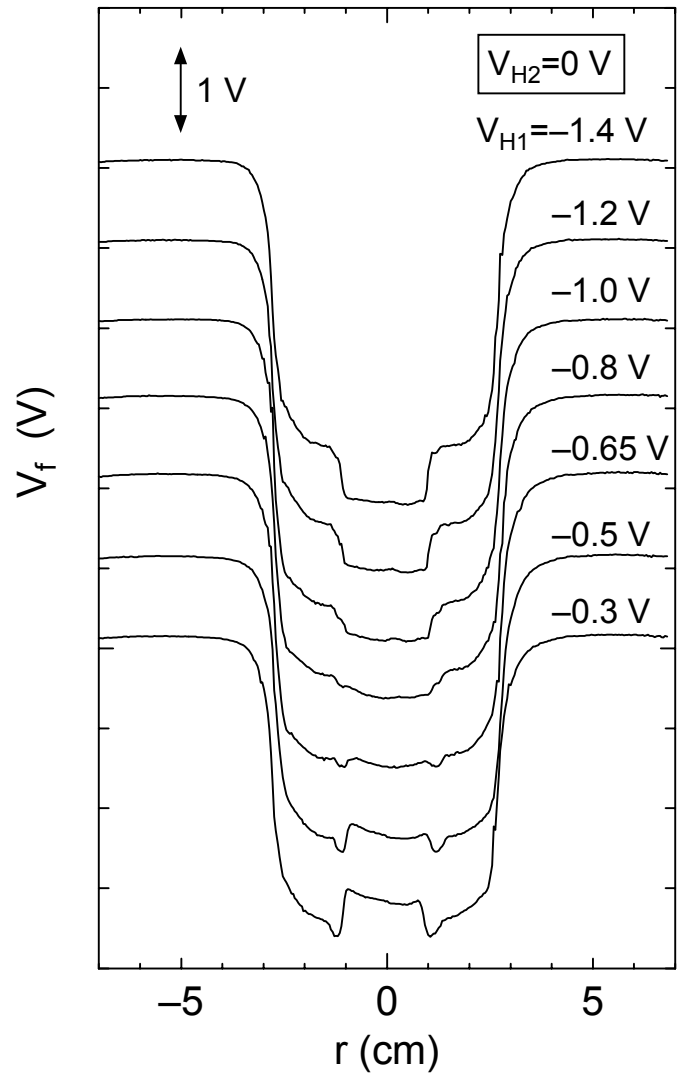


方向性プローブのコレクタ面をプラズマ源側に向けている

Radial Profiles of I_{es} and V_f

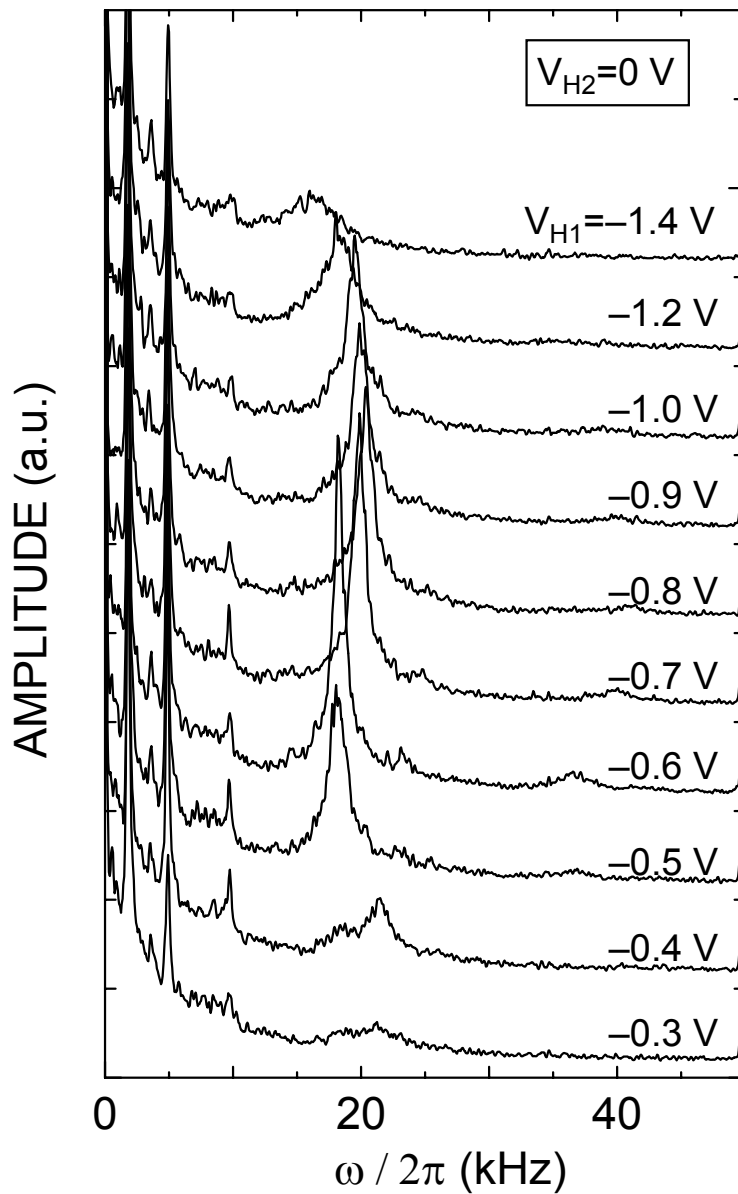


Electron Saturation Current

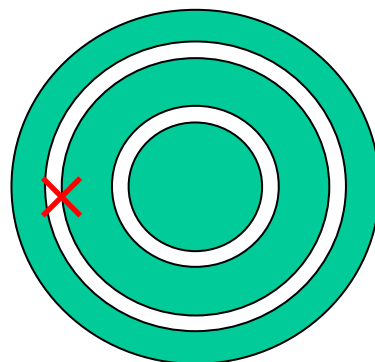


Floating Potential

Frequency Spectra of I_{es}

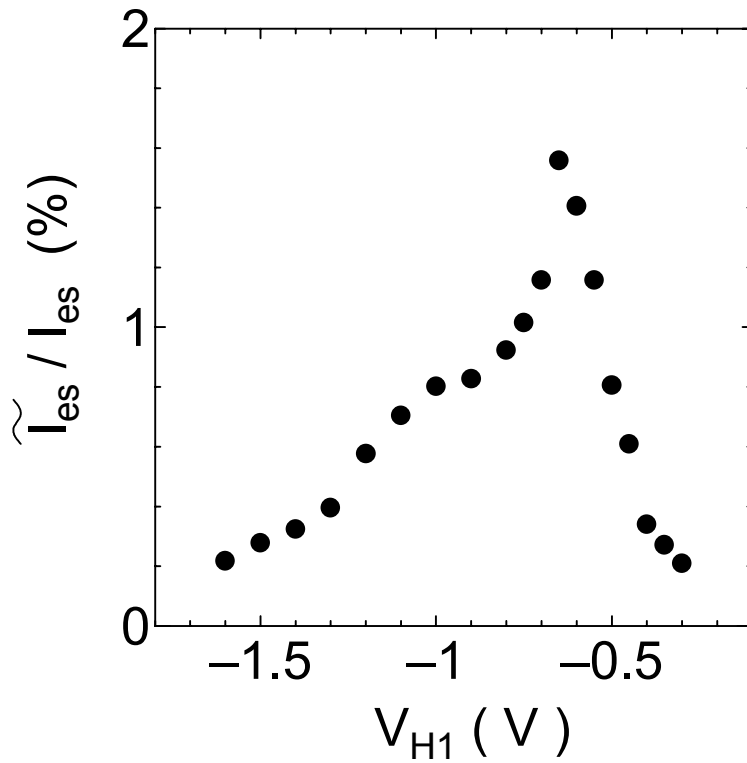


$r = -2.5$ cm



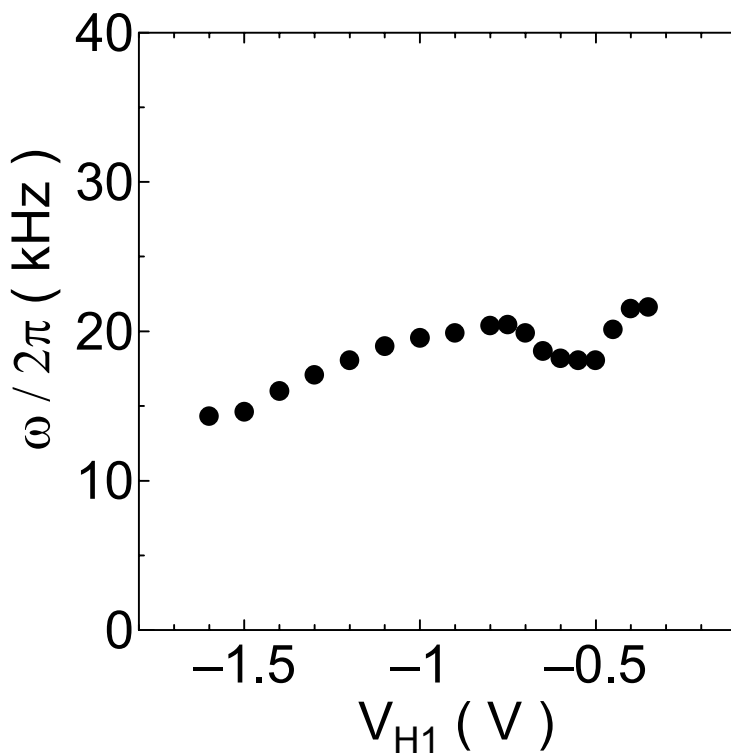
Frequency & Amplitude of Instabilities

$r = -2.5$ cm



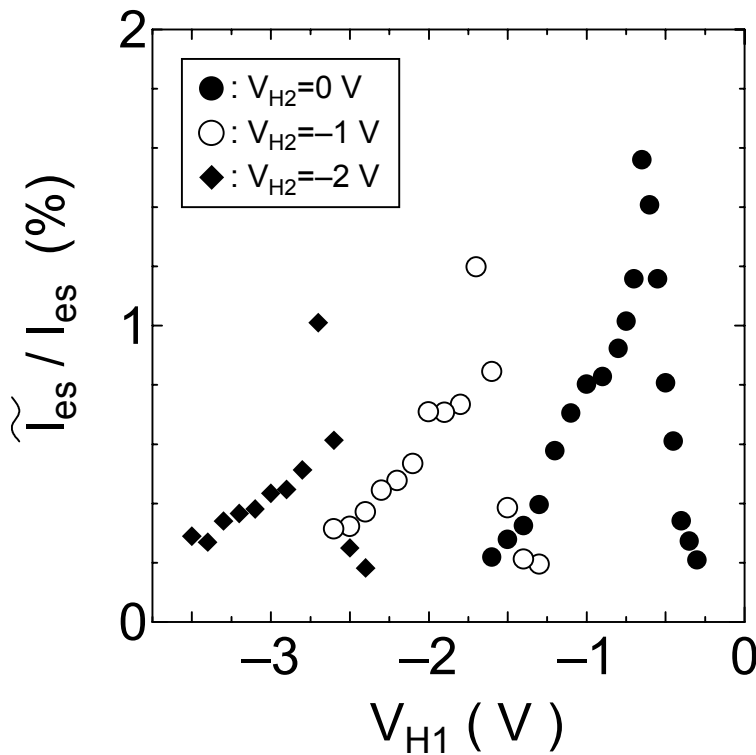
Dependence on V_{H1}

$V_{H2} = 0$ V
 $B = 1.6$ kG



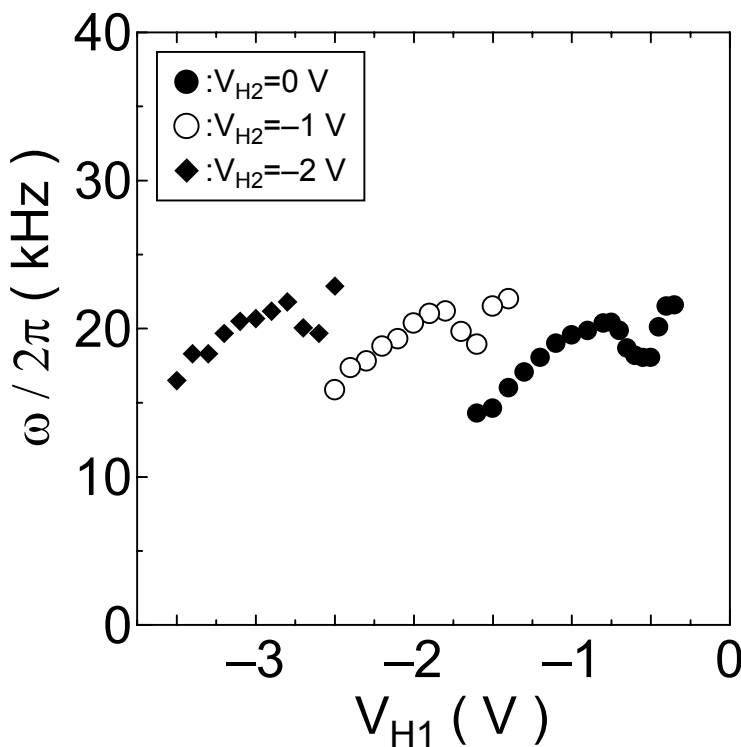
Frequency & Amplitude of Instabilities

$r = -2.5$ cm

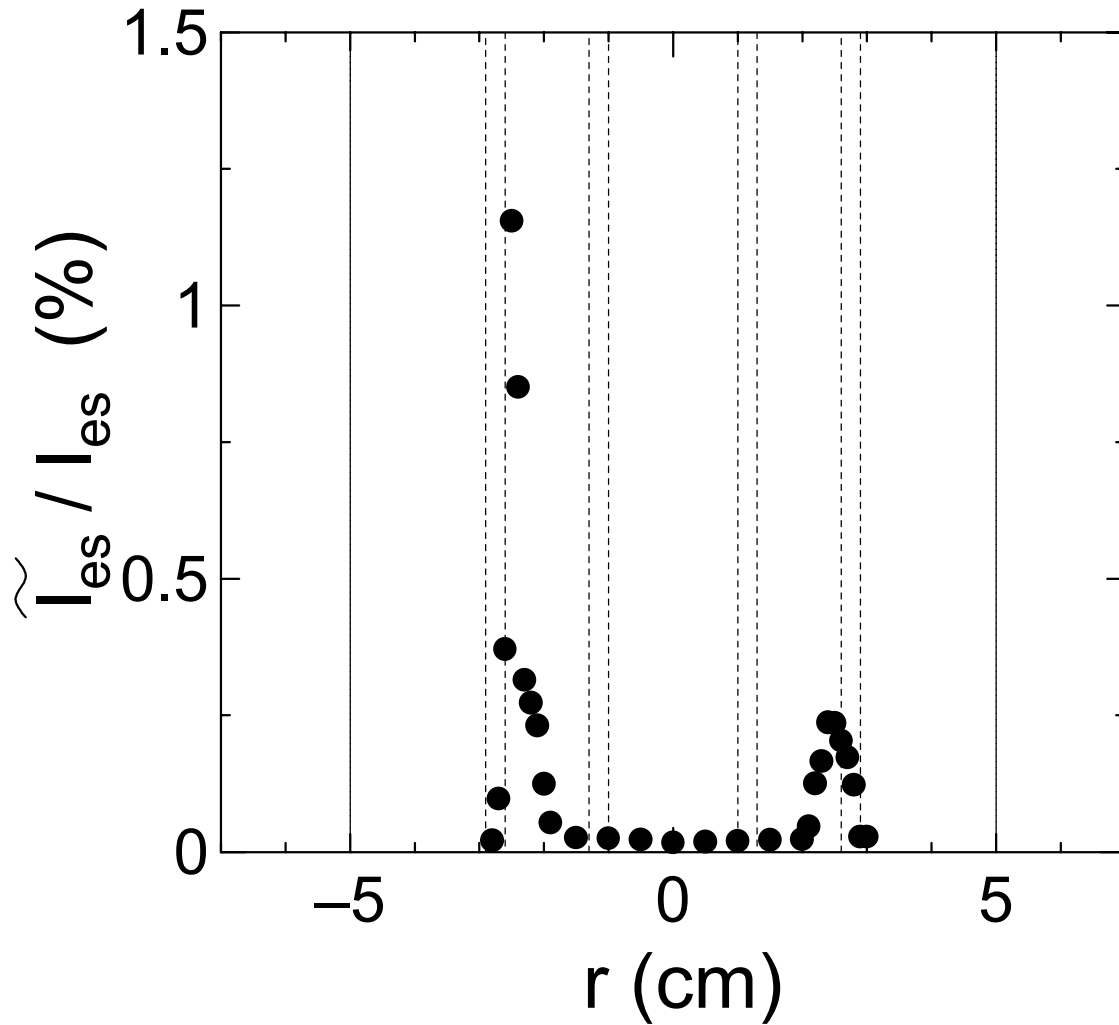


Dependence on V_{H1}

$B = 1.6$ kG

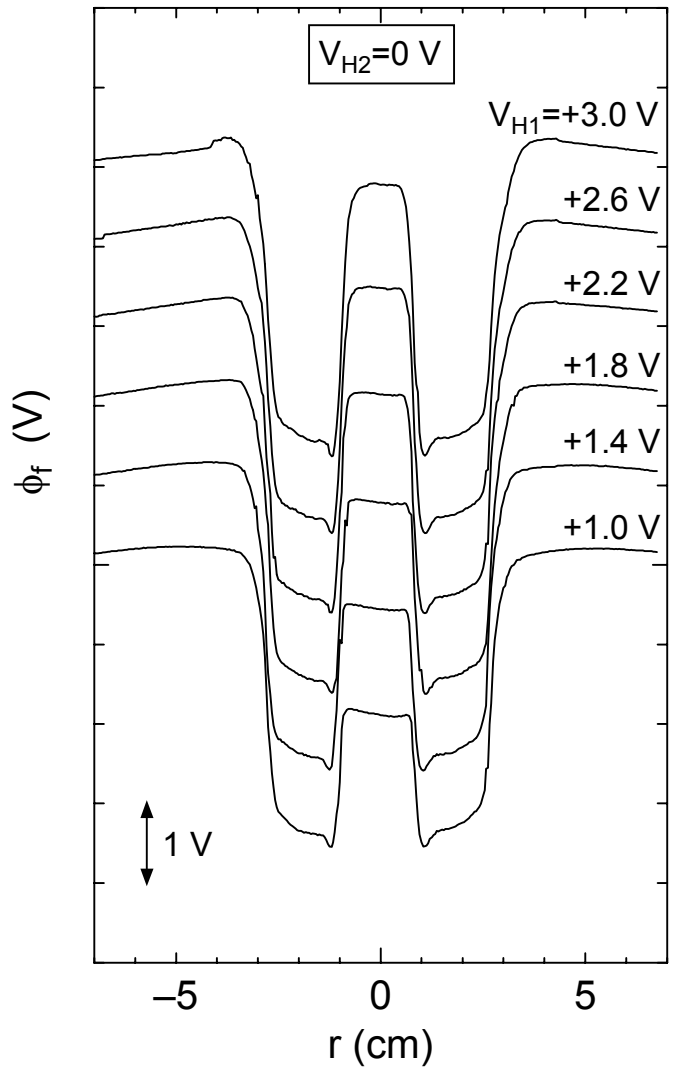
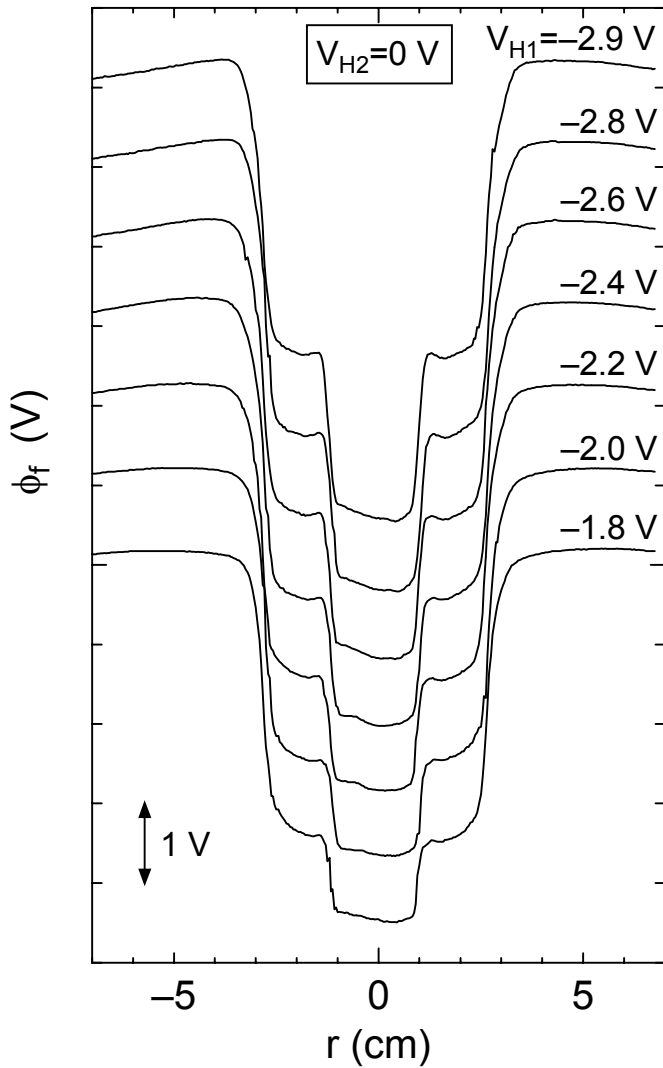


Radial Profile of Amplitude

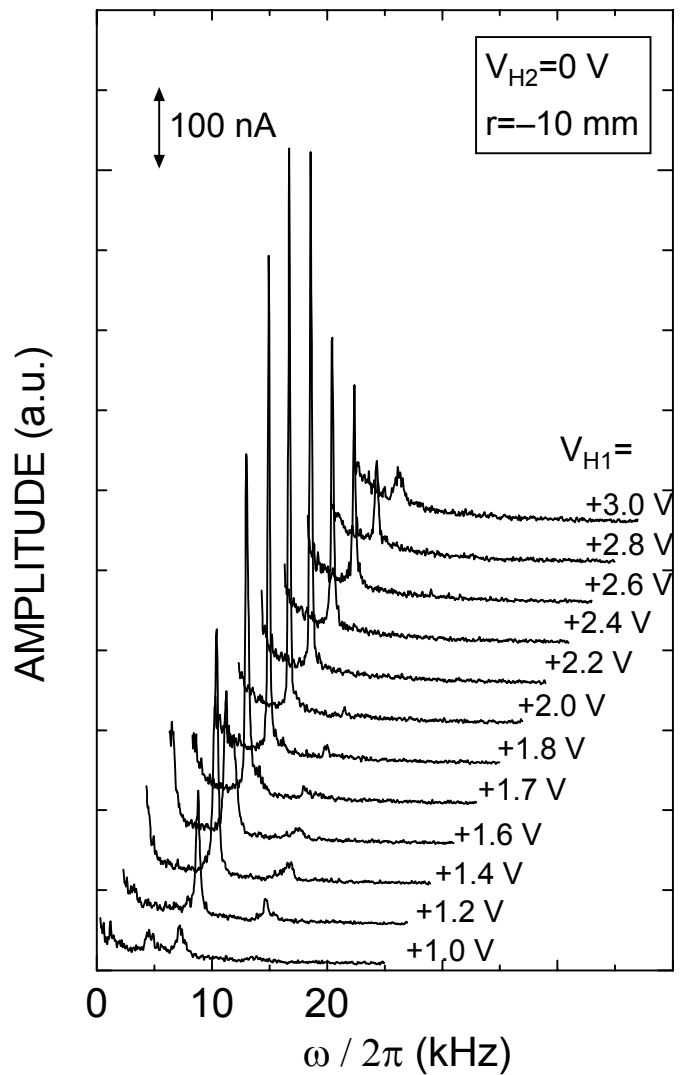
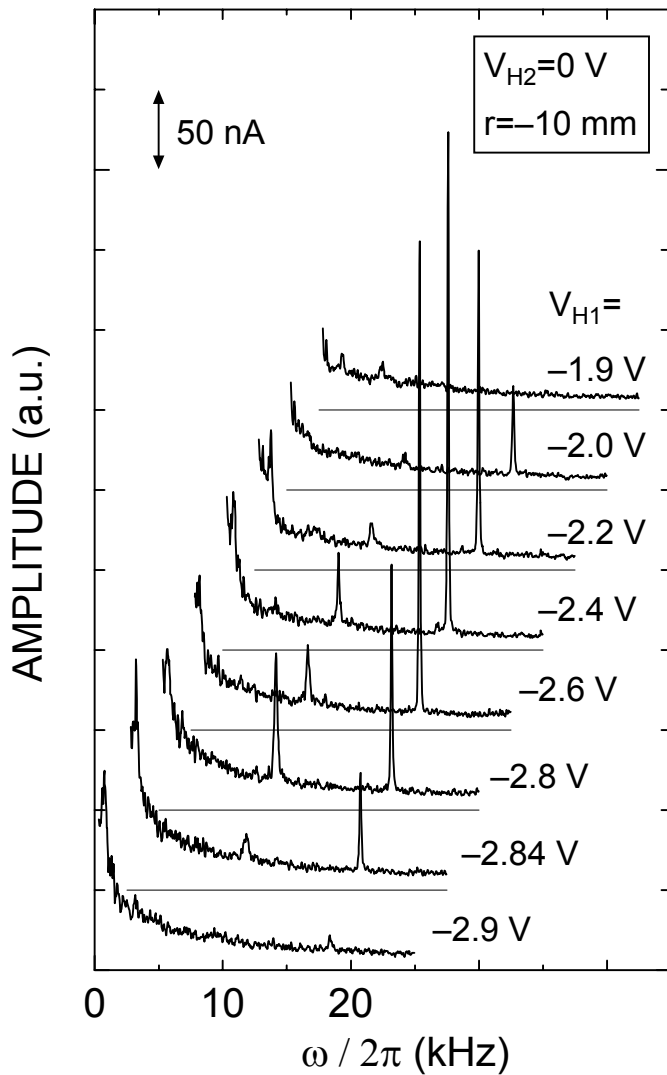


$V_{H1} = -0.65$ V, $V_{H2} = 0$ V, $B = 1.6$ kG, $f \sim 20$ kHz

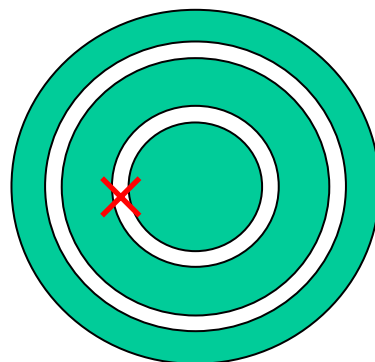
Radial Profiles of V_f



Frequency Spectra of I_{es}

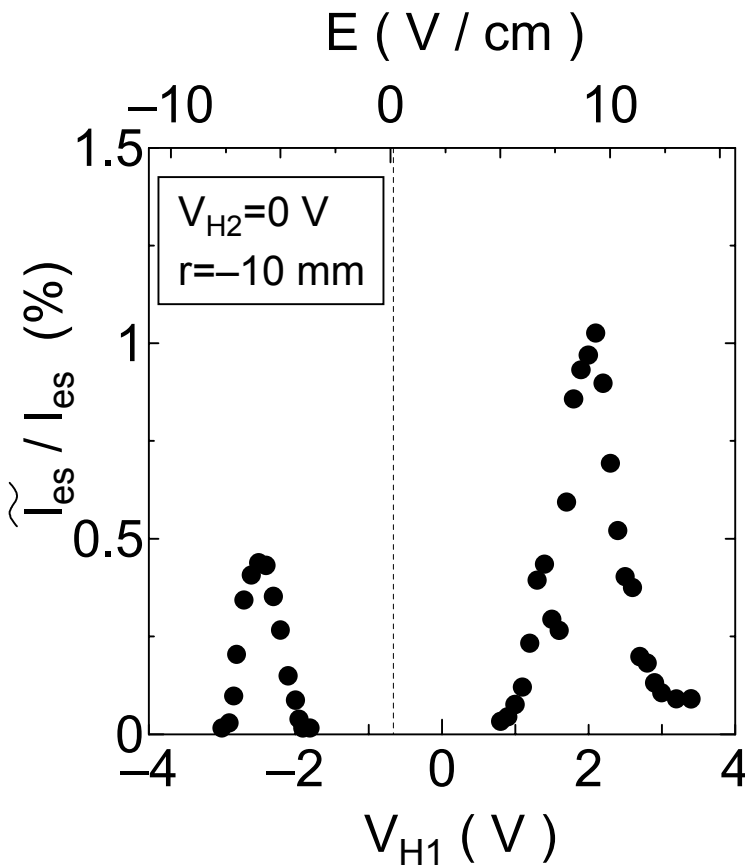


$r = -1 \text{ cm}$



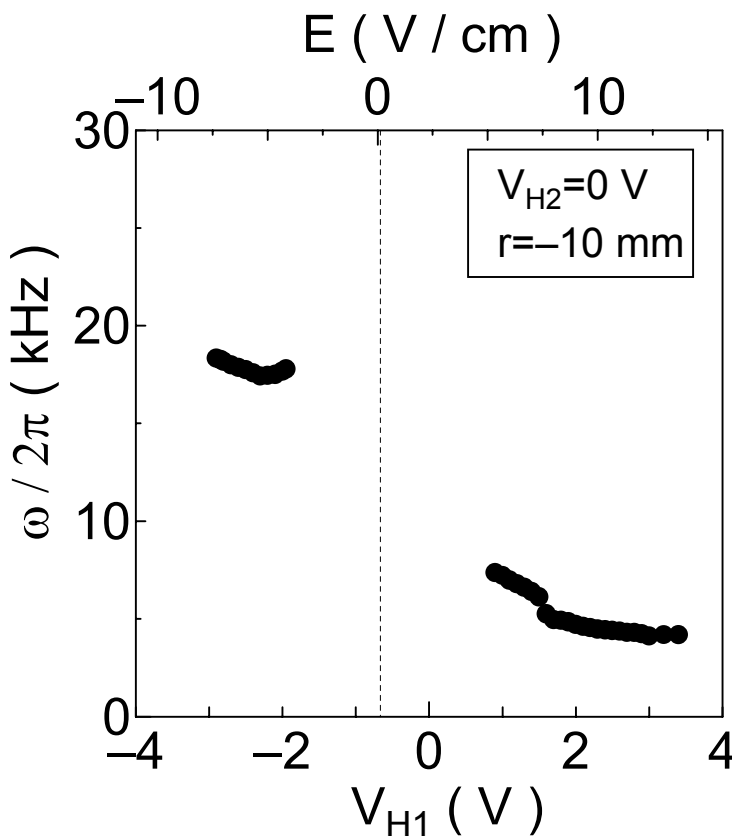
Frequency & Amplitude of Instabilities

$r = -1 \text{ cm}$

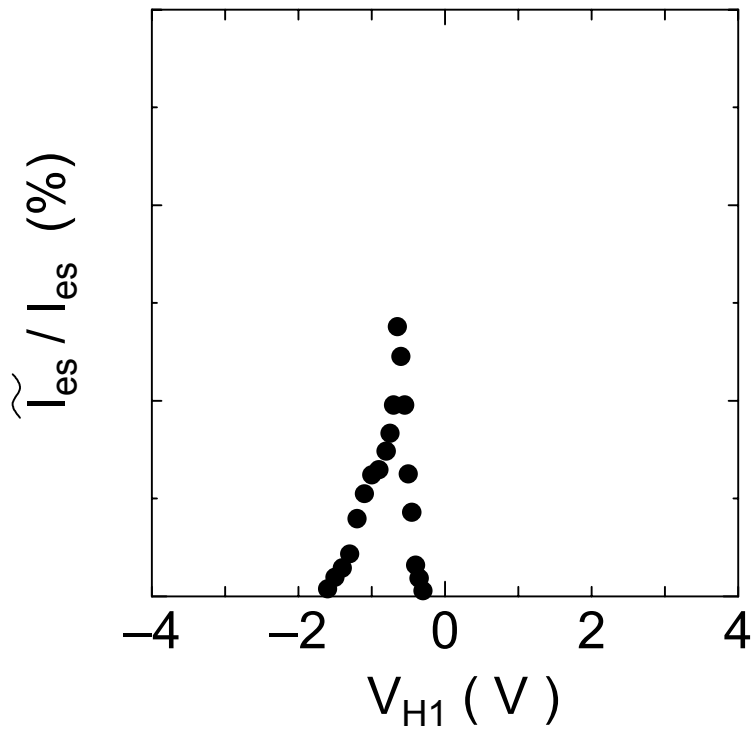


Dependence on V_{H1}

$V_{H2} = 0 \text{ V}$
 $B = 1.6 \text{ kG}$



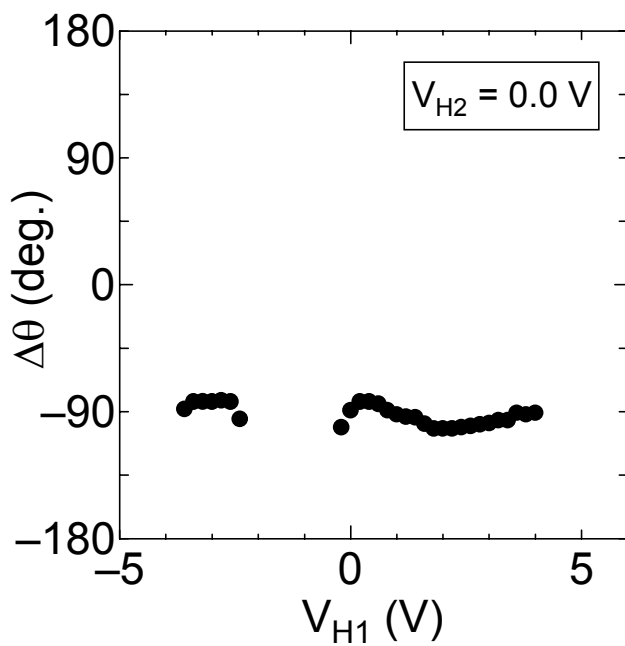
Frequency & Amplitude of Instabilities



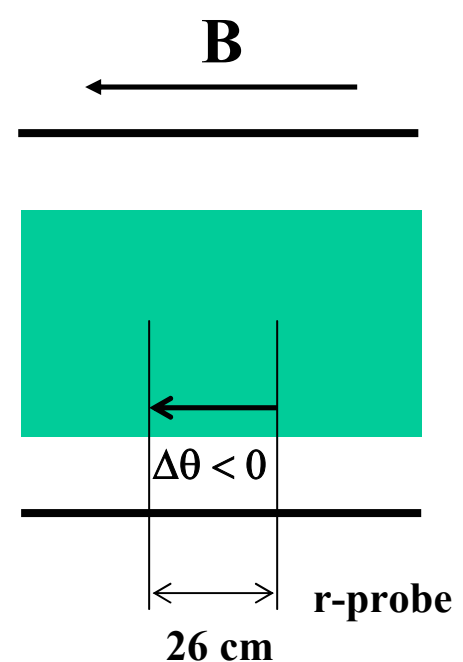
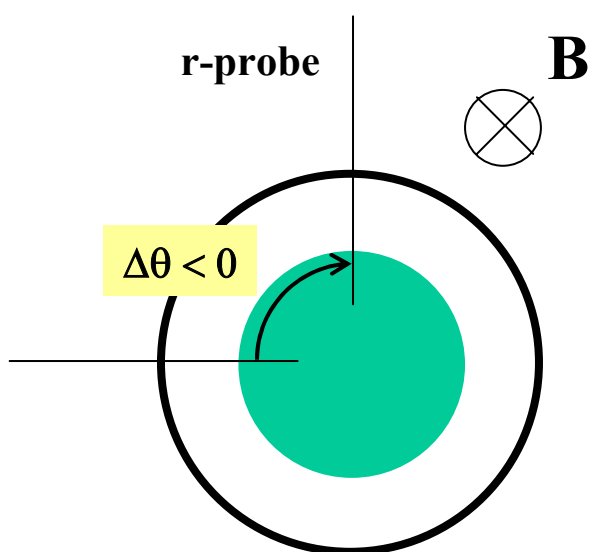
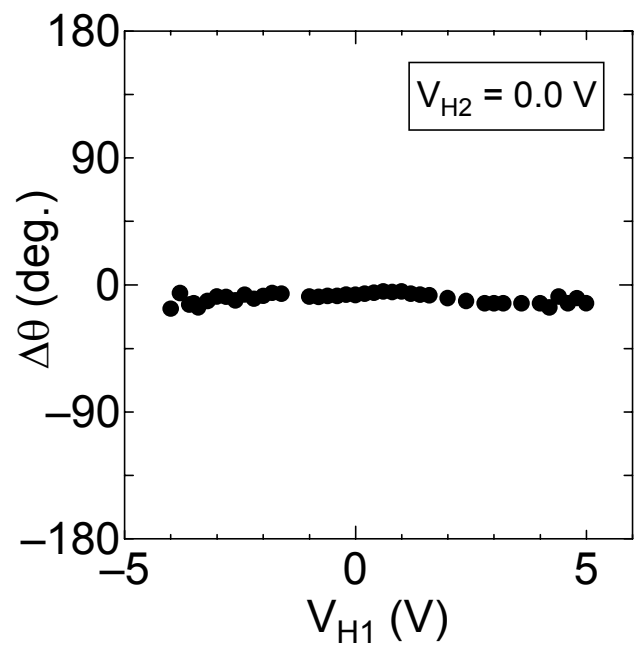
Dependence of $\Delta\theta$ on V_{H1}

$r = -2.7 \text{ cm}$

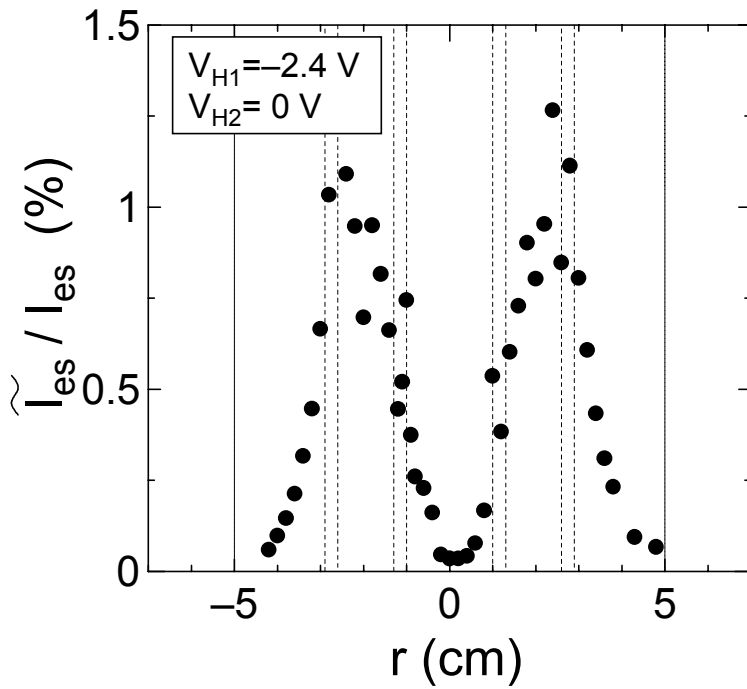
Azimuthal Direction



Axial Direction

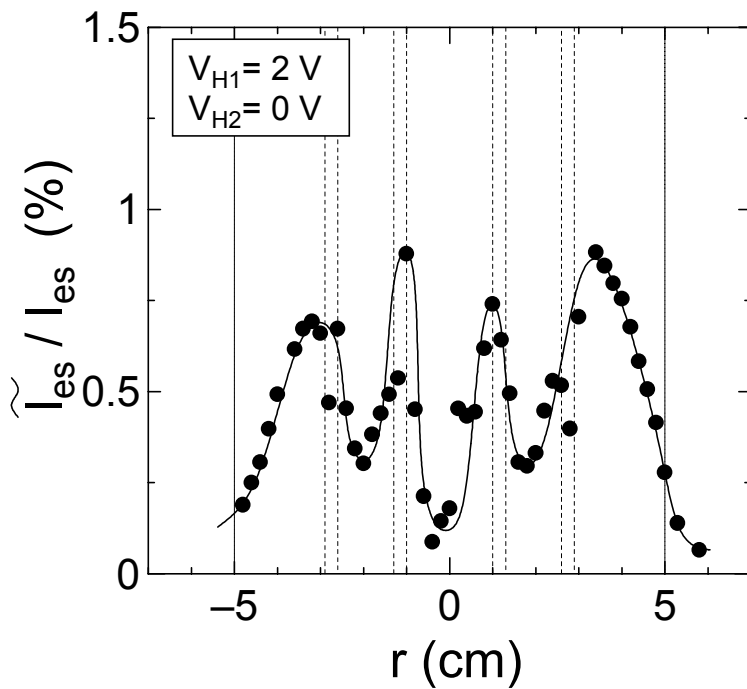


Radial Profile of Amplitude



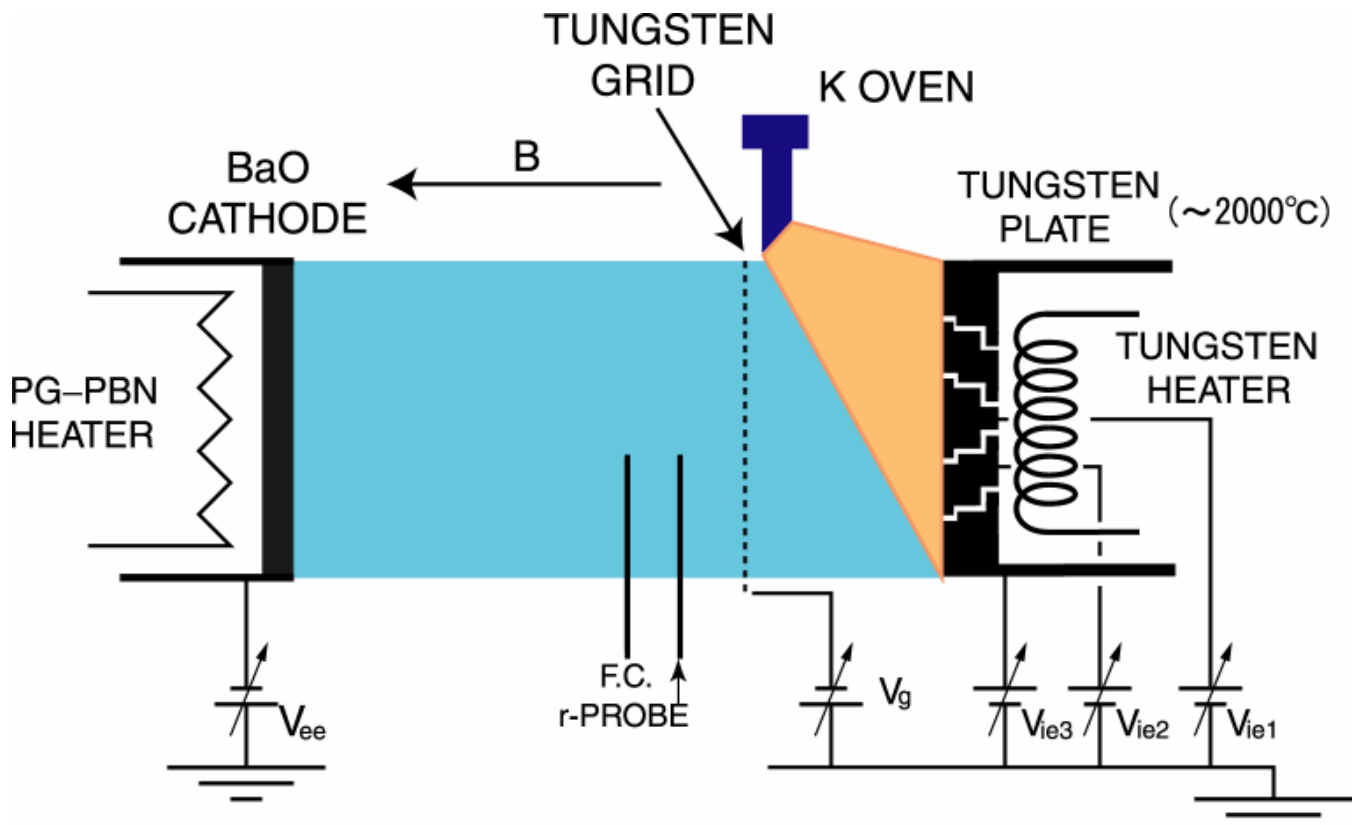
$V_{H2} = 0$ V,

$B = 1.6$ kG,



Parallel Flow Shear

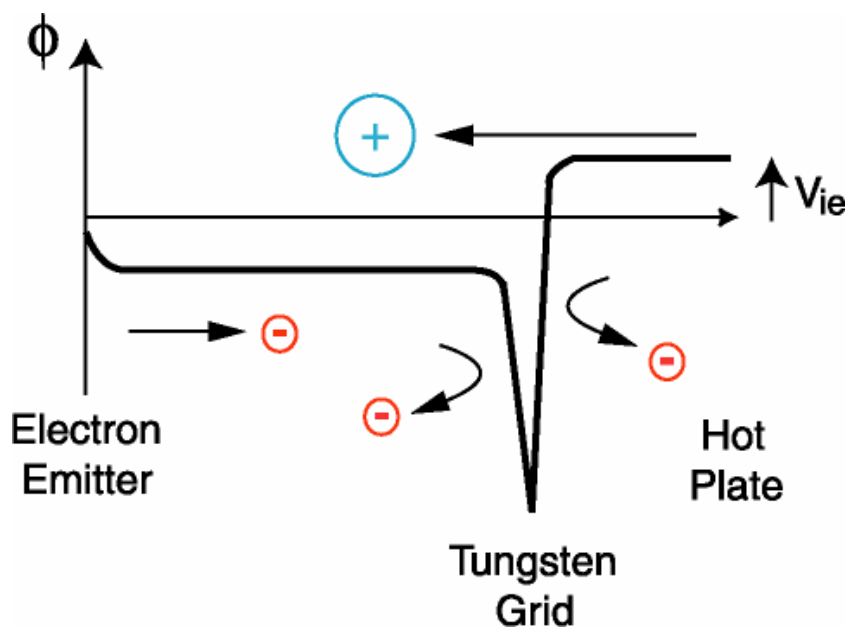
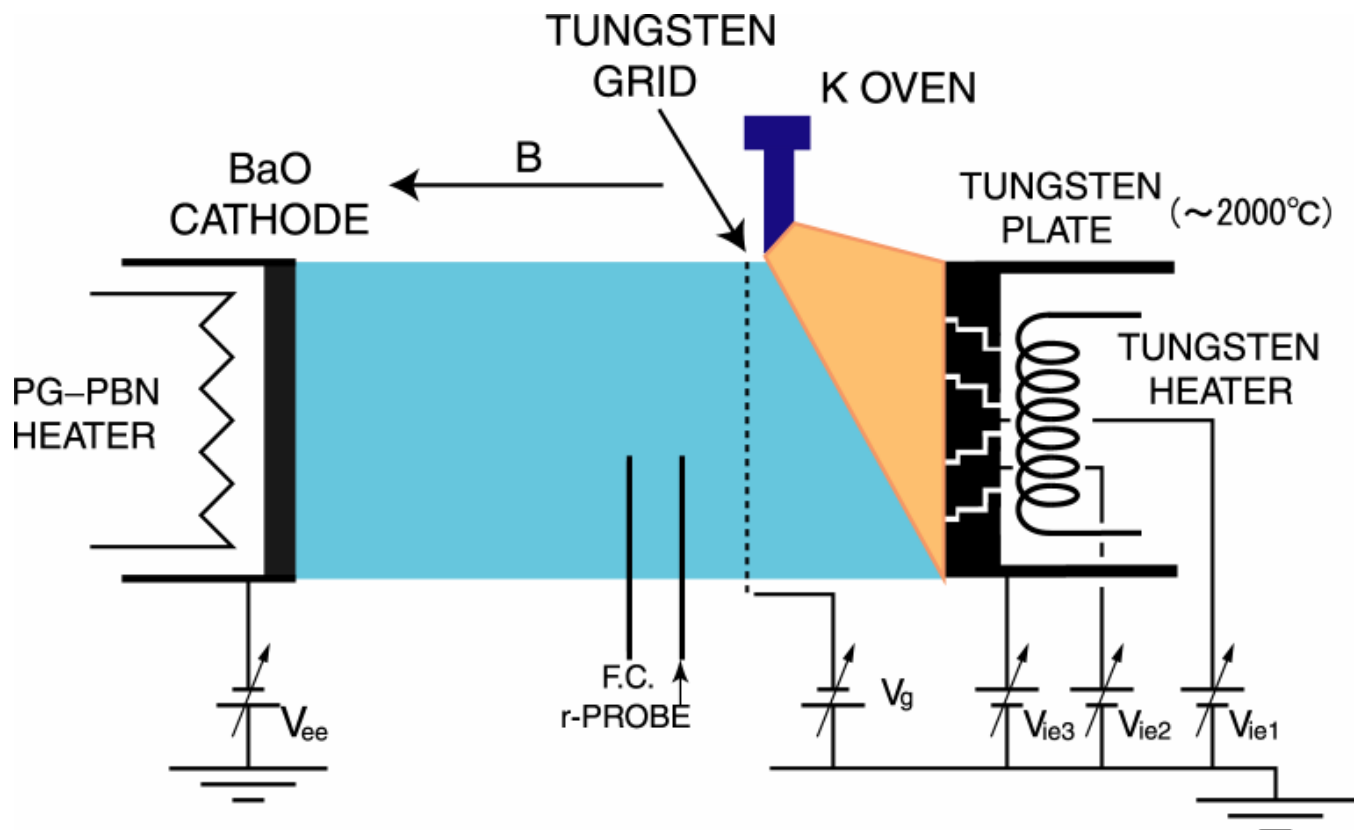
Experimental Setup



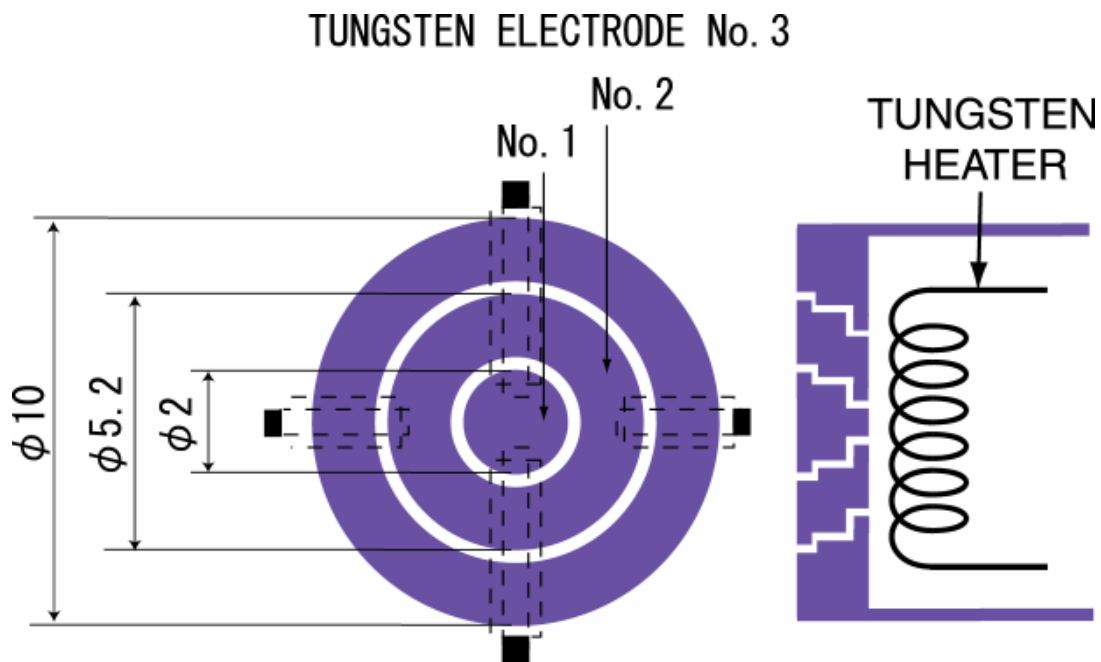
- **Ions: Surface Ionization**
Accelerated by the potential difference between the plasma and the ion emitter
- **Electrons: Thermionic Emission**
Reflected by the grid and become Maxwellian velocity distribution

Parallel Flow Shear

Experimental Setup

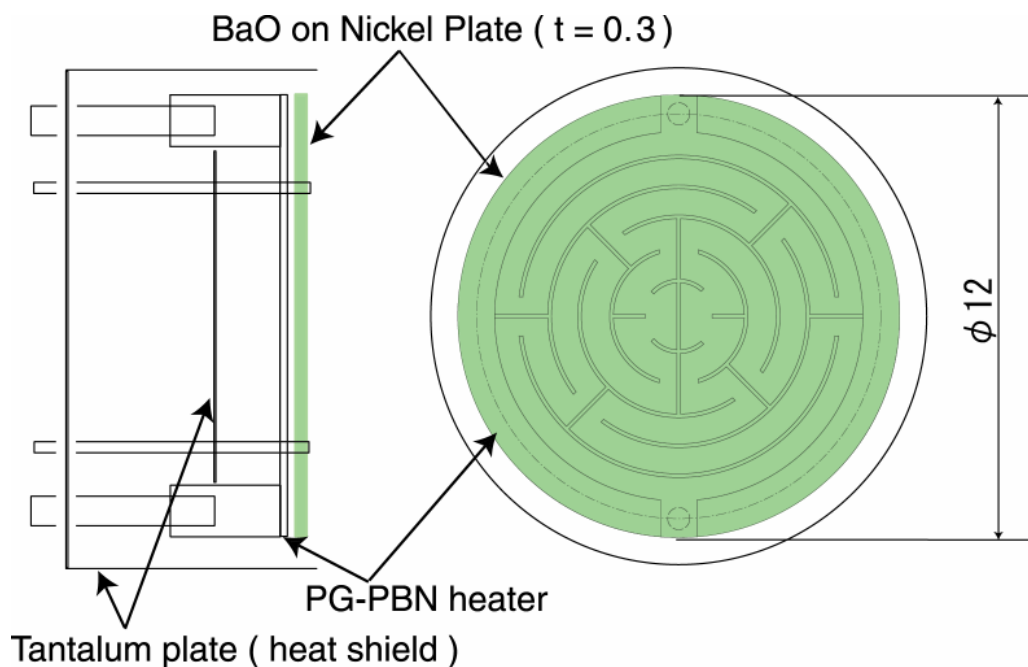


Ion Emitter



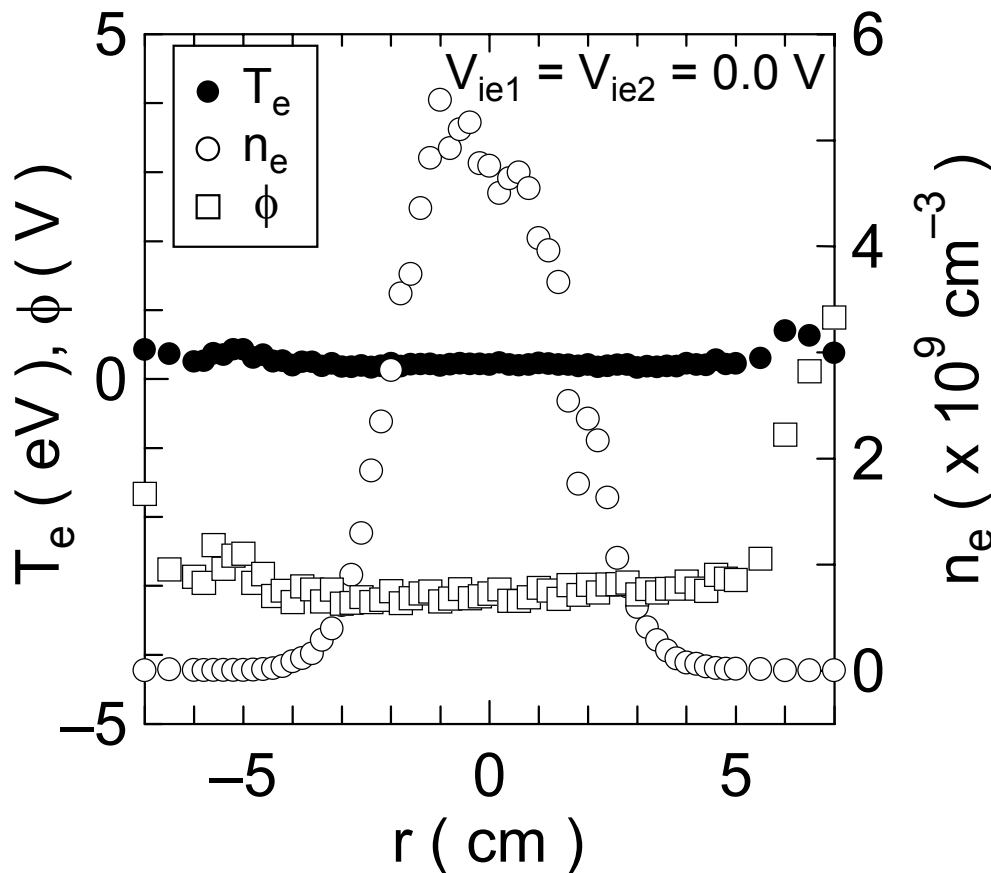
- Segmented into three sections
- Heated to 2300 K

Electron Emitter



- Heated to 1100 K

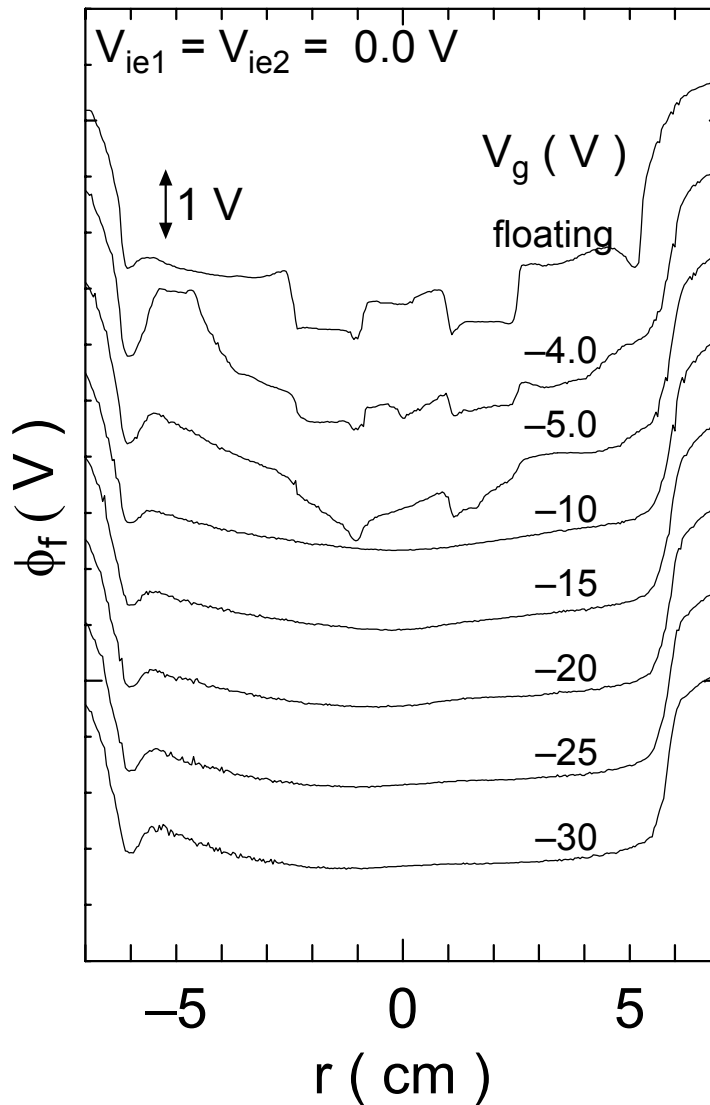
Radial Profiles of n_e , T_e , ϕ



Plasma Parameter

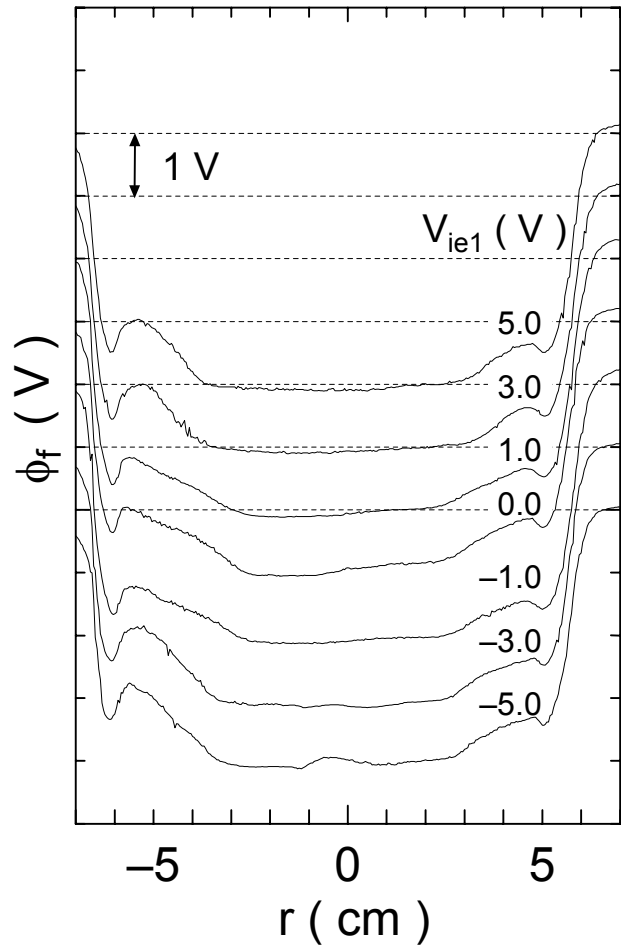
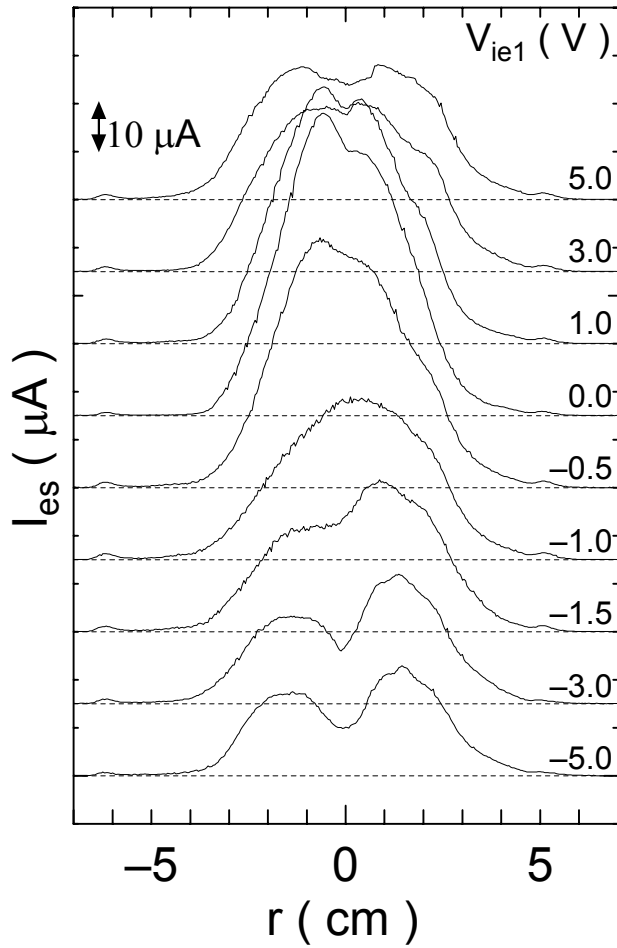
$p = 6.0 \times 10^{-7} \text{ Torr}$	$n_e \simeq 3.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$
$B = 1.6 \text{ kG}$	$\phi \simeq -3.0 \text{ V}$
$v_{te} = 2.6 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ($T_e = 0.2 \text{ eV}$)	$v_{i } = 2.2 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ($\epsilon_{1,2} = 1 \text{ eV}$)
$v_{ti} = 9.8 \times 10^4 \text{ cm/s}$ ($T_i = 0.2 \text{ eV}$)	$\lambda_D = 0.01 \text{ cm}$ ($n_e = 10^9 \text{ cm}^{-3}$)

Dependence of ϕ_f on V_g



$V_g < -10$ V でプラズマ源の空間電位の影響が無くなっている

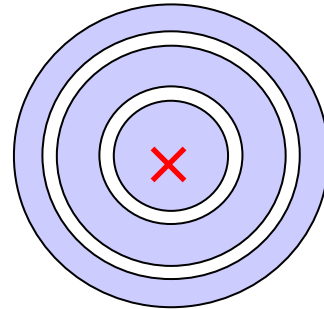
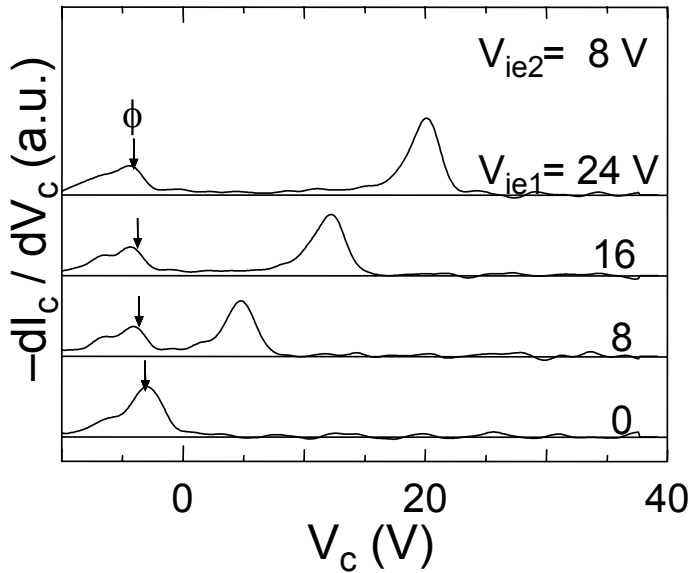
Radial Profiles of I_{es} , ϕ_f



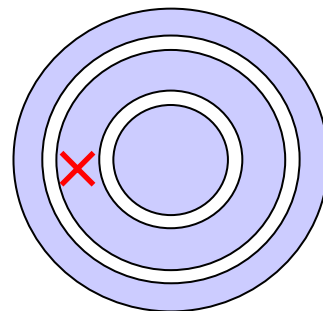
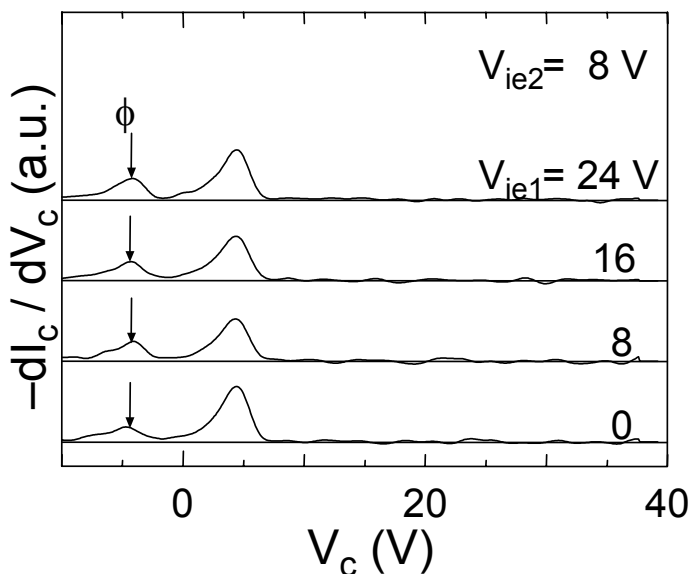
$$V_{ie2} = 0.0 \text{ V}$$

Ion Energy Distribution

Energy distributions of ions parallel to the magnetic field

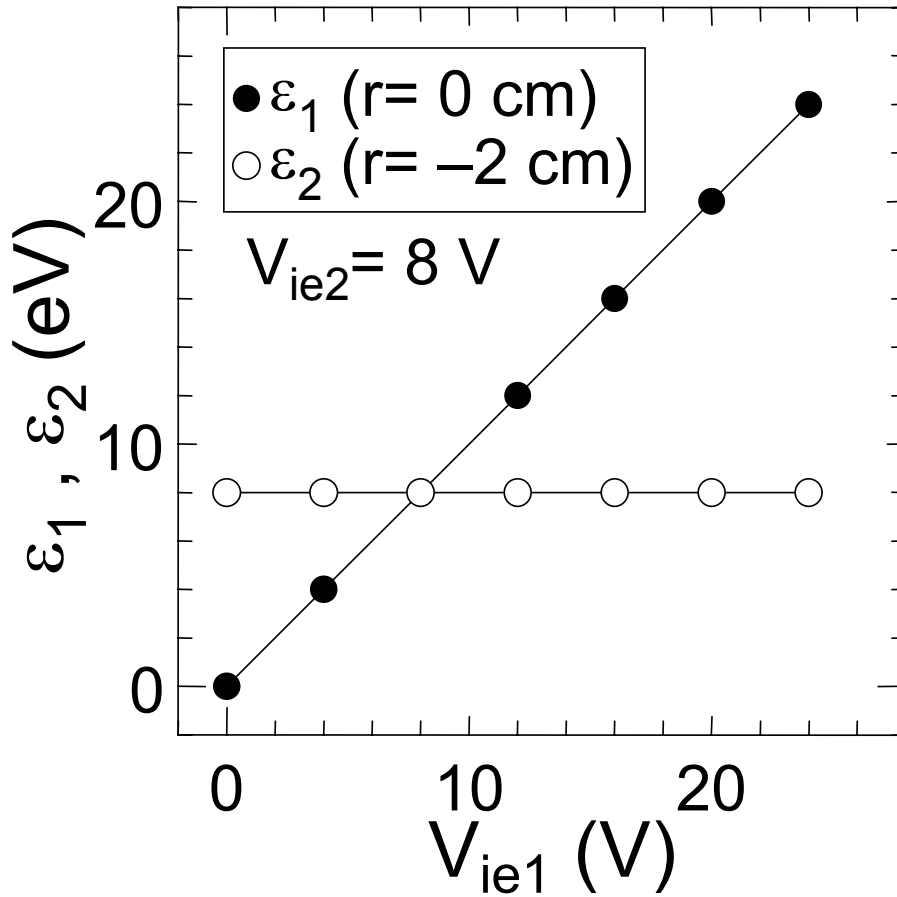


$r=0$ cm (correspond to the first electrode)

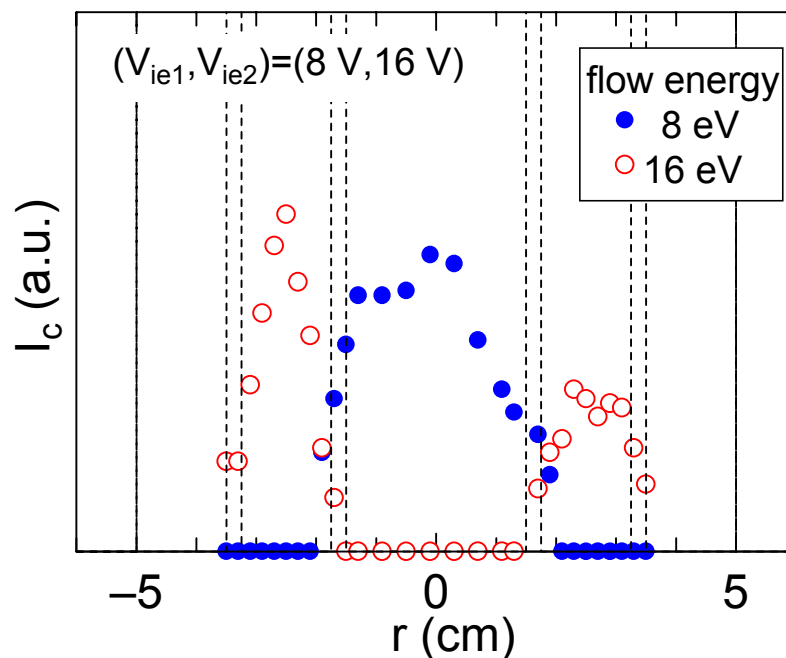
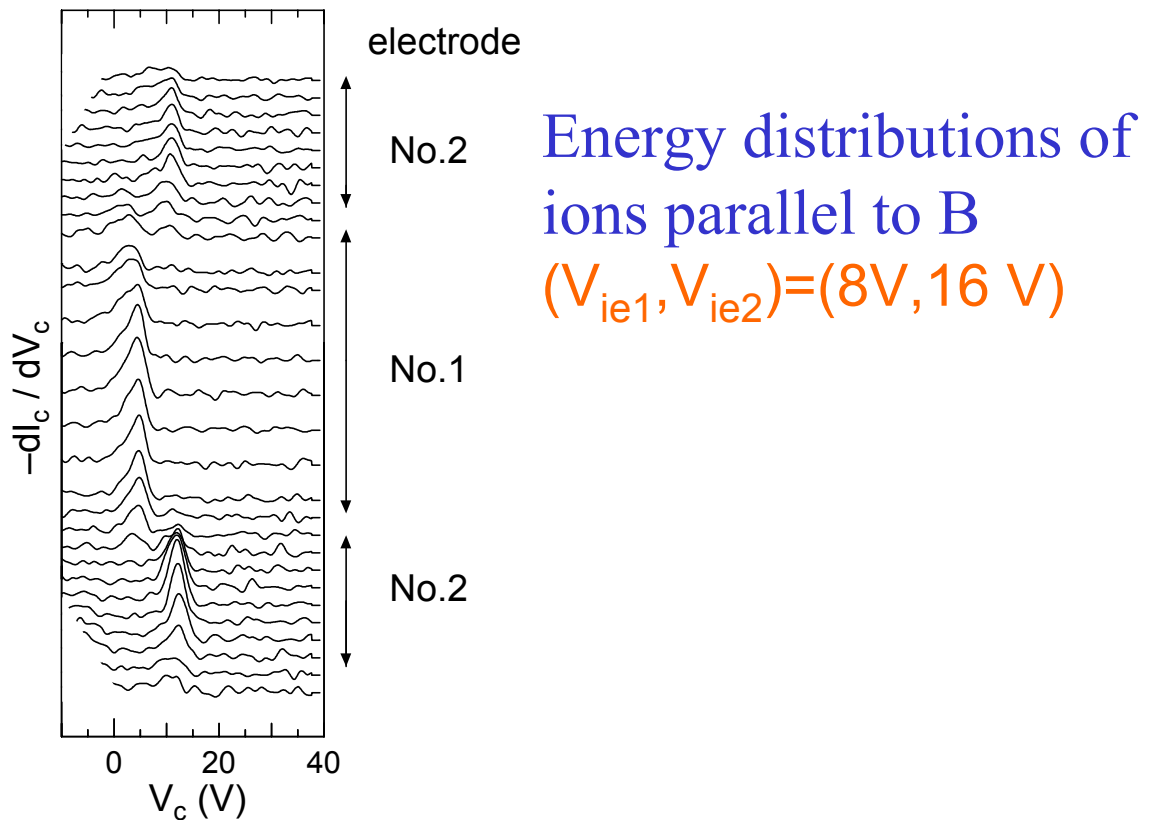


$r=-2$ cm (correspond to the second electrode)

Ion Energy Distribution

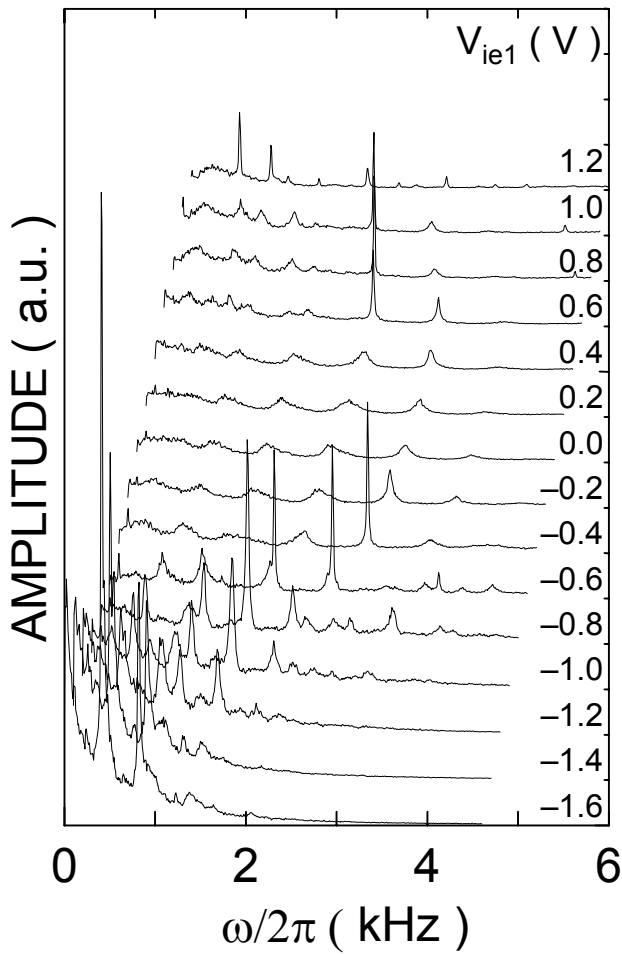


Radial Profiles of Ion Flow Energy

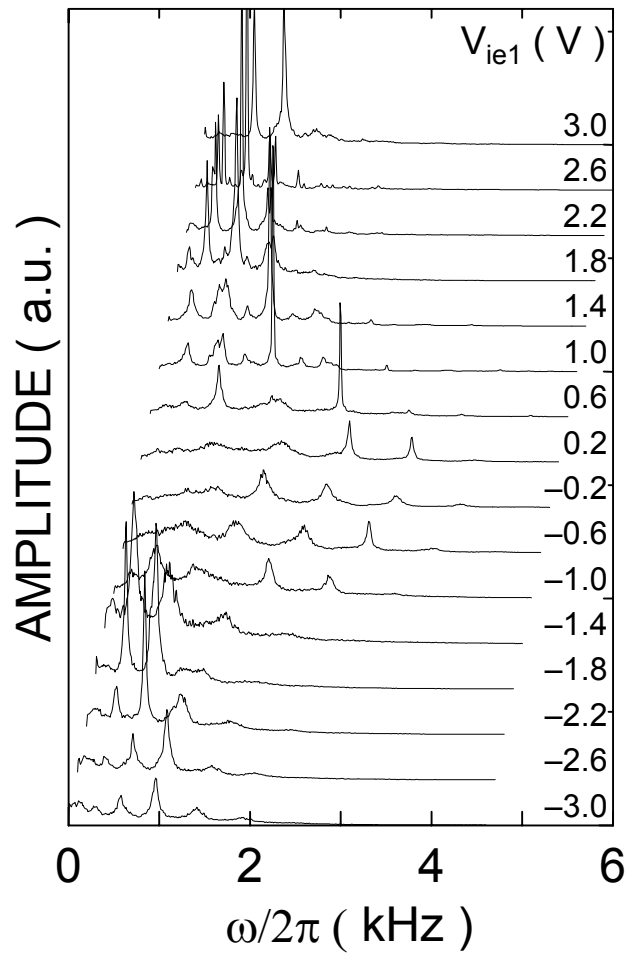
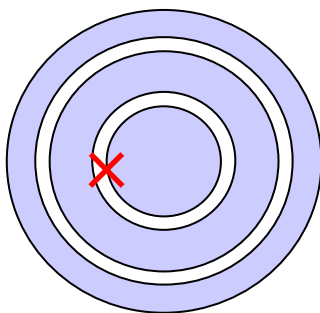


Signal intensities of ion energy distributions at V_c corresponding to $\varepsilon = 8$ eV and 16 eV.

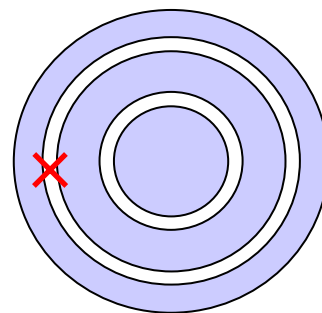
Frequency Spectra of I_{es}



$r = -1.0 \text{ cm}$



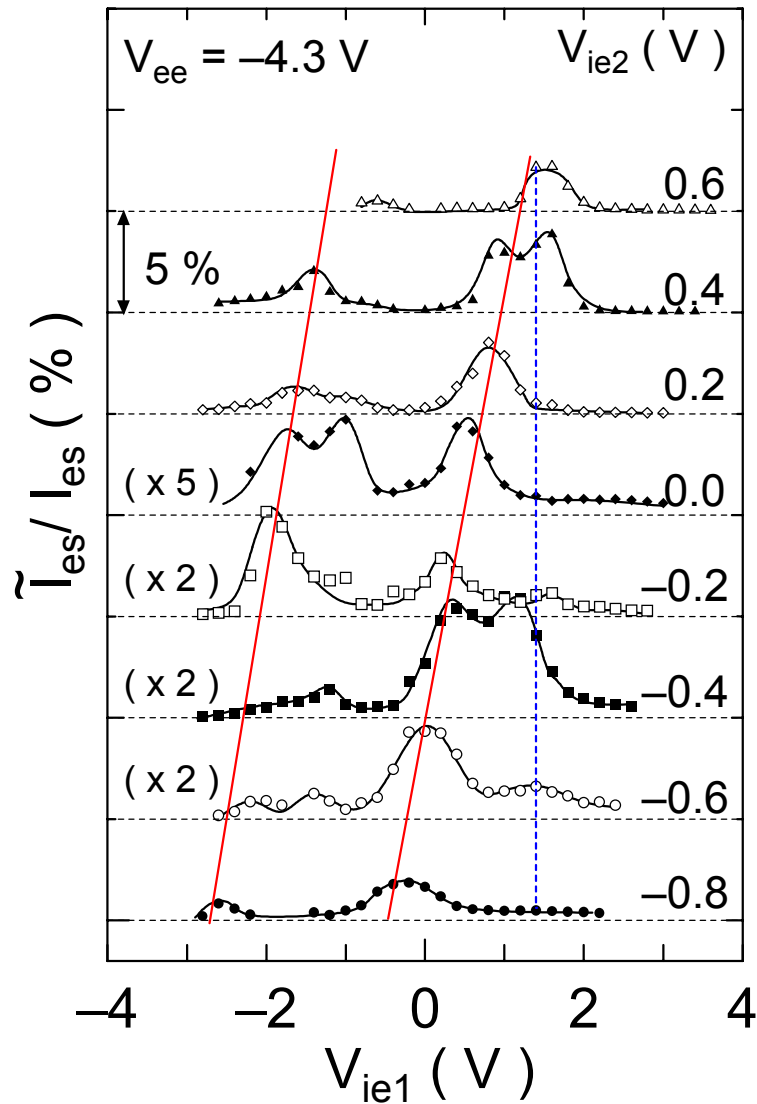
$r = -2.7 \text{ cm}$



$$V_{ie2} = 0.0 \text{ V}, V_{ee} = -4.3 \text{ V}$$

Dependence of \tilde{I}_{es} on V_{ie1} , V_{ie2}

$r = -1.0 \text{ cm}$



速度シアー強度に依存

イオン電流量に依存

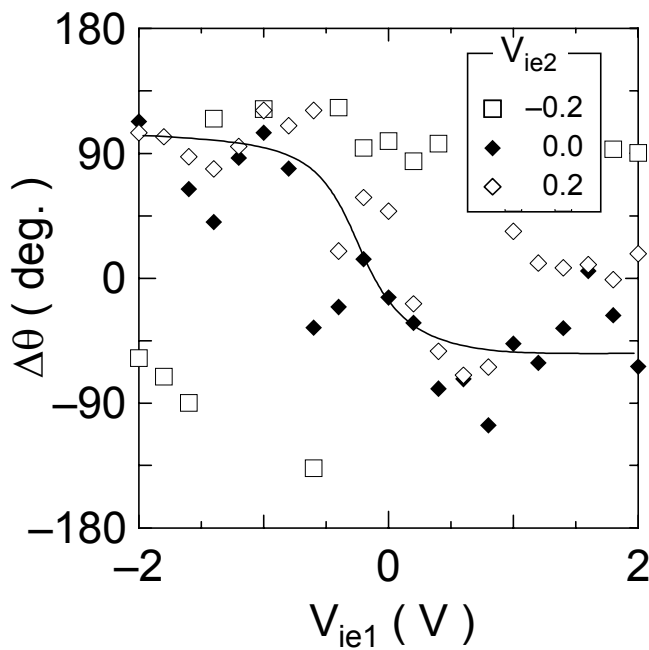
KH不安定性

イオン音波不安定性

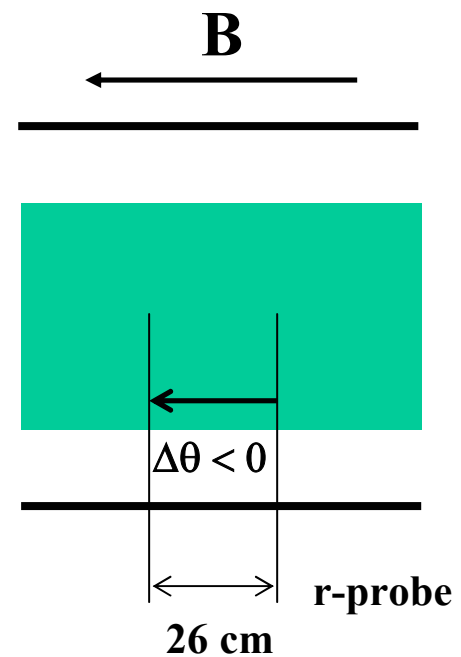
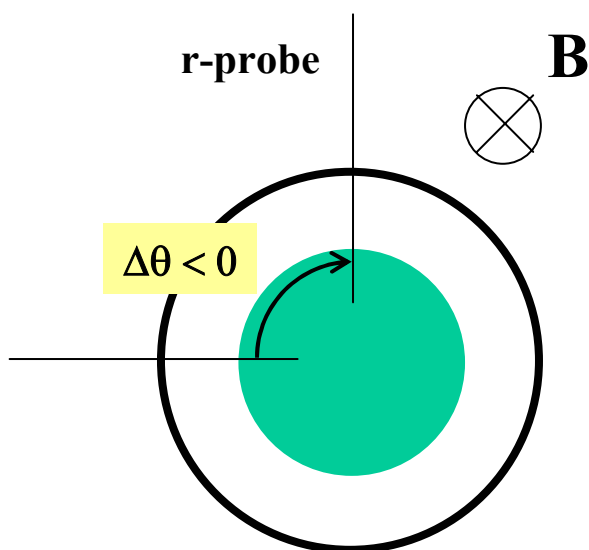
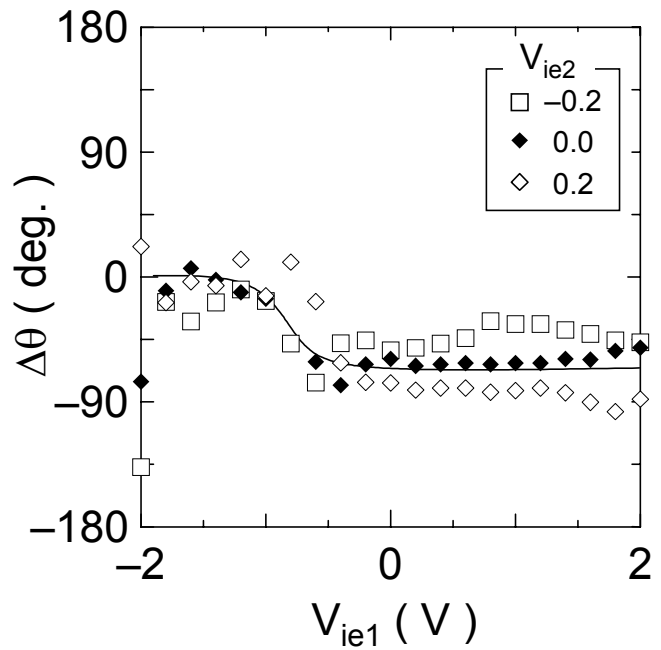
Dependence of $\Delta\theta$ on V_{ie1} , V_{ie2}

$r = -1.0$ cm

Azimuthal Direction

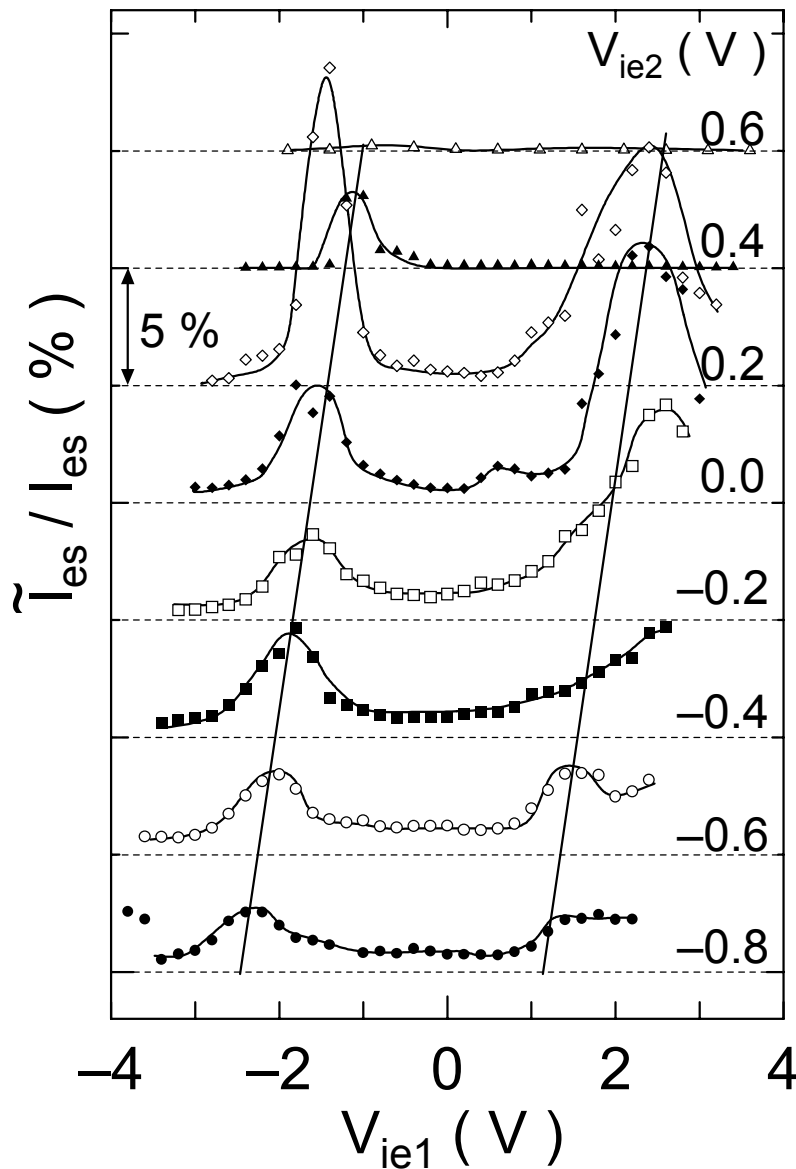


Axial Direction



Dependence of \tilde{I}_{es} on V_{ie1} , V_{ie2}

$r = -2.7 \text{ cm}$



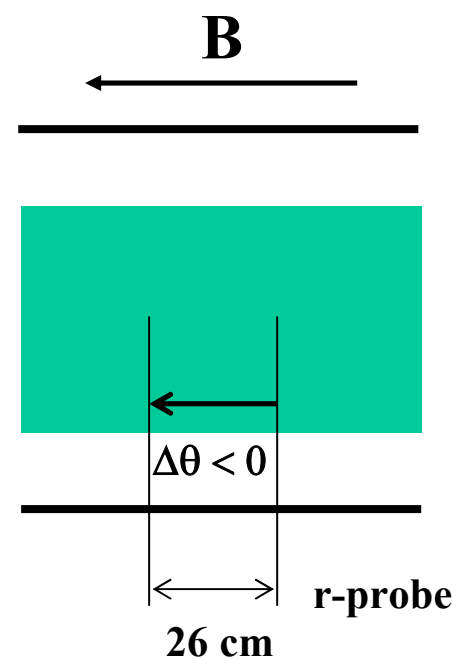
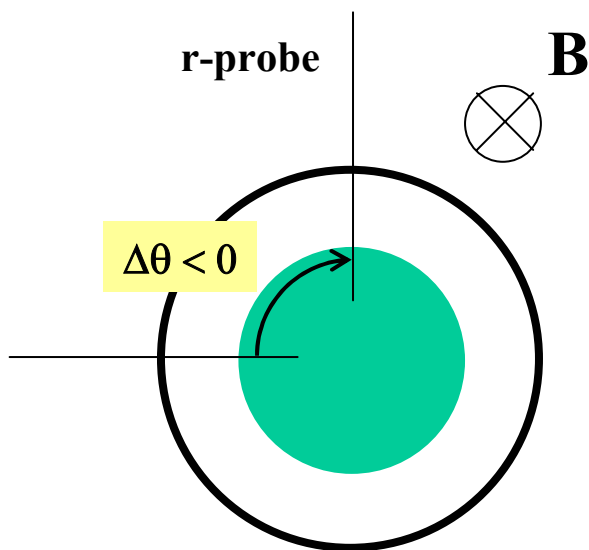
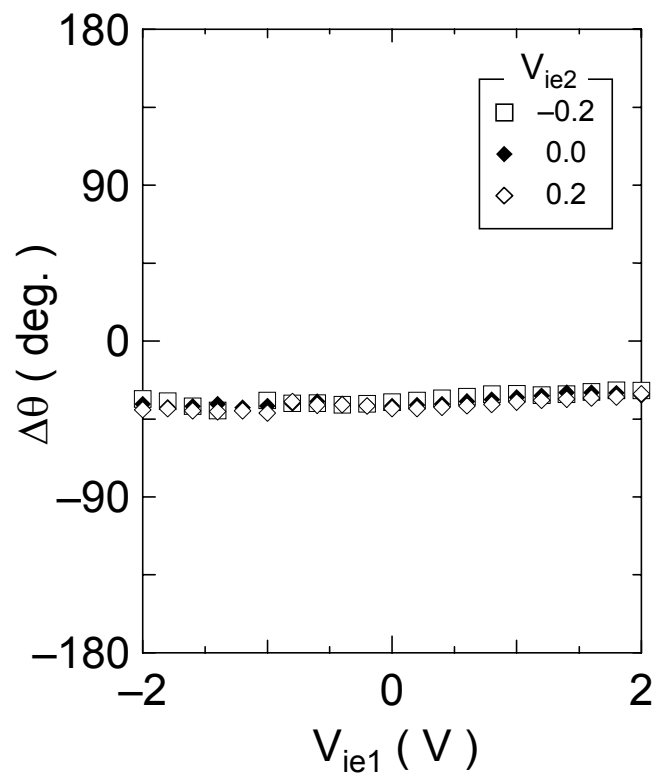
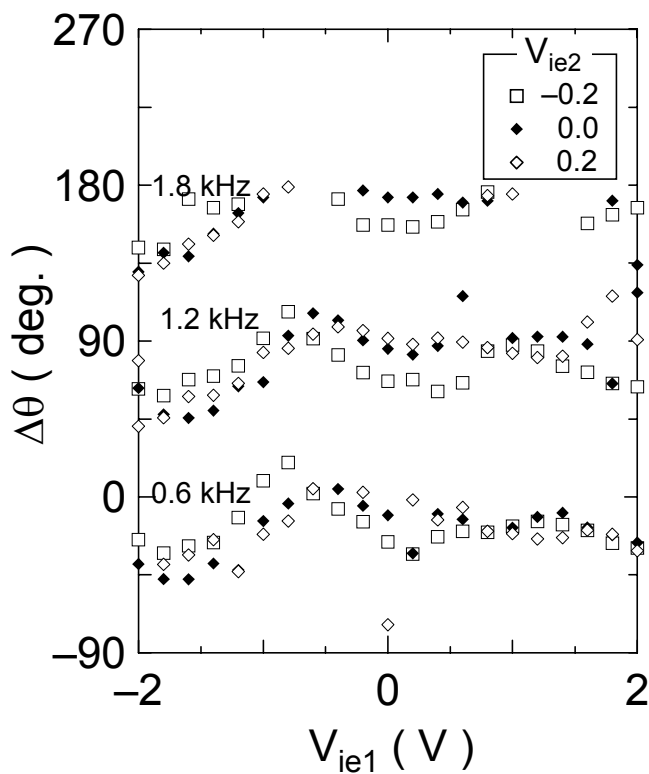
周辺領域でも、揺動は V_{ie1} に依存している

Dependence of $\Delta\theta$ on V_{ie1} , V_{ie2}

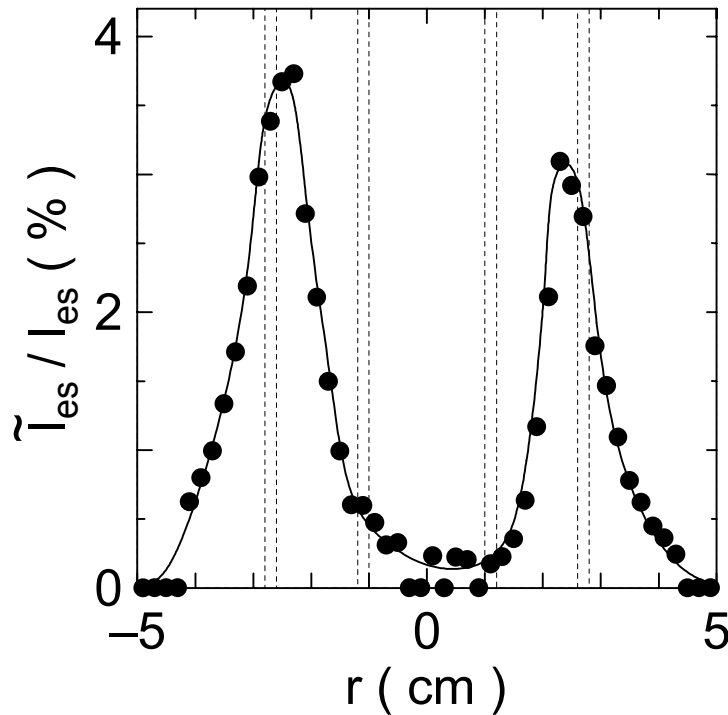
$r = -2.7 \text{ cm}$

Azimuthal Direction

Axial Direction

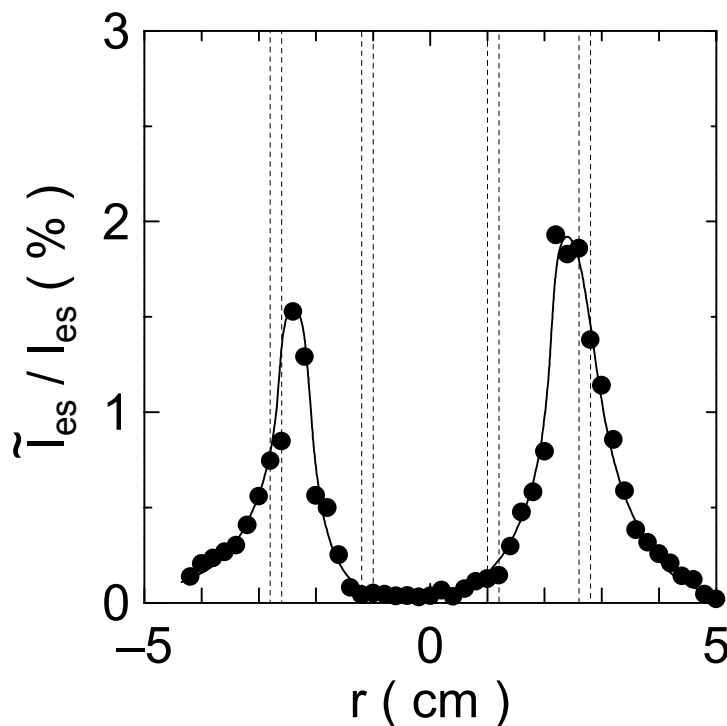


Radial Profile of Amplitude



$$V_{ie1} = -1.5 \text{ V}$$

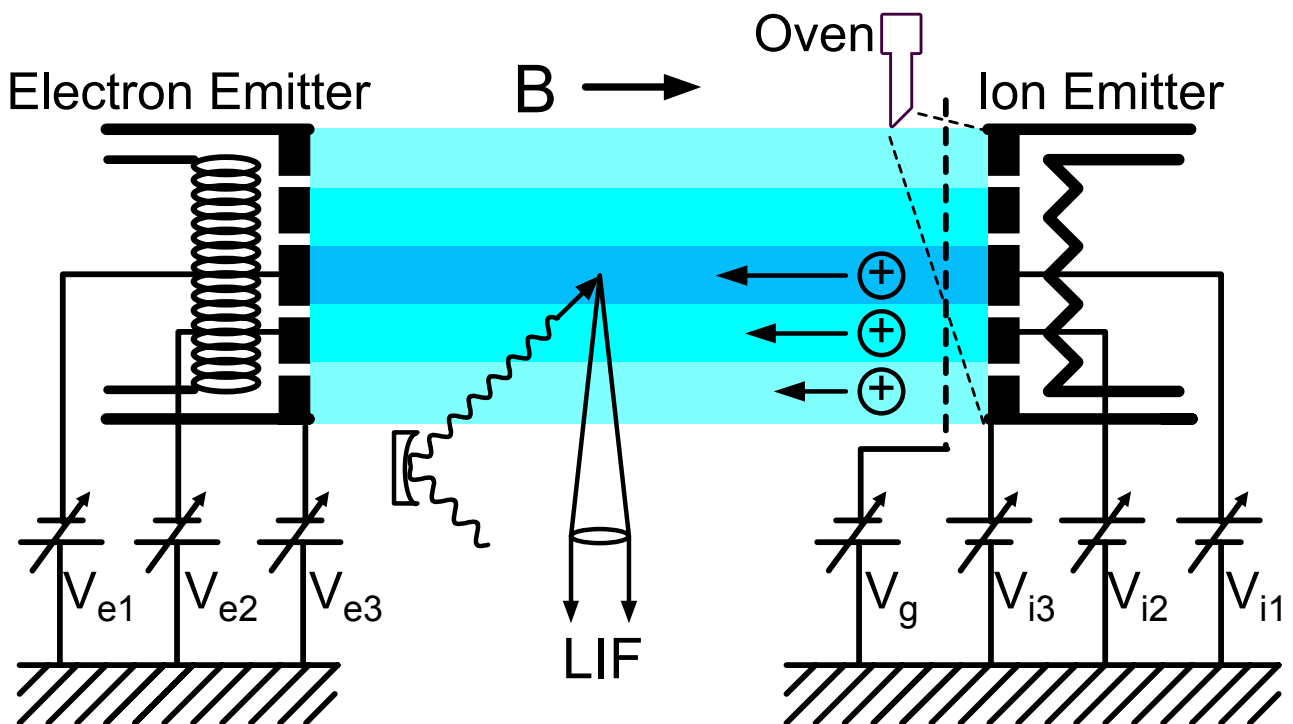
$$V_{ie2} = 0.0 \text{ V}$$



$$V_{ie1} = 1.0 \text{ V}$$

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

Parallel & Perpendicular Flow Shear



まとめ

分割型プラズマ源を用いて磁力線平行・垂直フローシアーを生成・制御し、そのとき励起される揺動の詳細な観測を行った

平行フローシアー

平行フロー速度とそのシアーを系統的に制御することによって、中心領域において、シアーの大きさに依存するケルビンヘルムホルツ不安定性と、フロー速度に依存するイオン音波不安定性と考えられる揺動を、周辺領域においてドリフト波と考えられる揺動を、独立に区別して観測することに成功した。

また、これらの不安定化条件から、フロー速度とそのシアーの各種低周波揺動への相乗的効果を初めて定量的に明らかにした。

垂直フローシアー

Qマシーンプラズマにおいても半径方向の電位分布を制御することが可能となった。周辺領域に局在して観測された揺動はドリフト波であると考えられ、中心領域の径方向電場、すなわち垂直フローシアーによって抑制されることが分かった。さらに、シアーを強くすると、再び揺動が励起され、これはケルビンヘルムホルツ不安定性に関係している揺動であると考えている。

なお、これらの揺動はさらにシアーを強くすると抑制されるなど、これまでの理論では説明できない現象が観測されている。