

高速プラズマ流中の不安定性の発生とその制御

東北大・工 戸張 博之

Outline

1. Introduction ~ プラズマの流れと不安定性 ~
2. 東北大学における電磁加速プラズマ流の生成 制御実験
3. 宇宙プラズマとの接点の模索
4. まとめ



Introduction

プラズマの“流れ”と“不安定性”

プラズマの閉じ込め改善

径電場とポロイダルフローシア



流れによる渦の分断



断熱層の形成

ディスラプション
異常輸送

電気推進機の開発

人工衛星の姿勢制御で
実用化



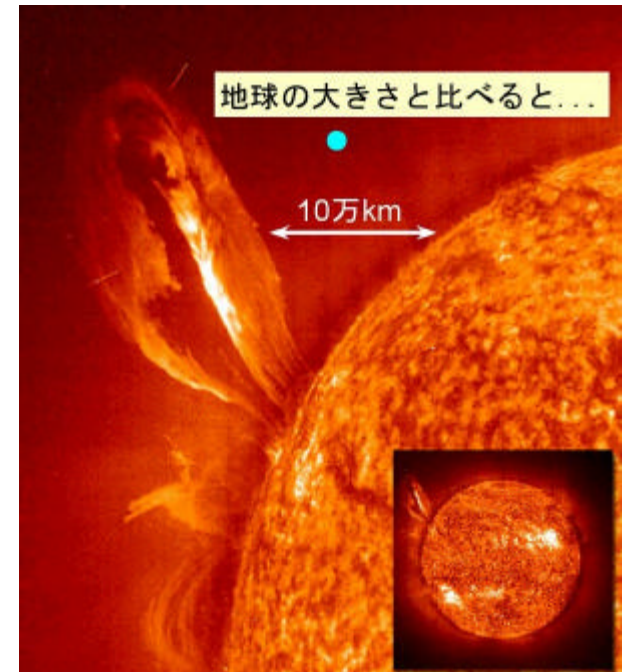
不安定性の発生と推進性能
の劣化



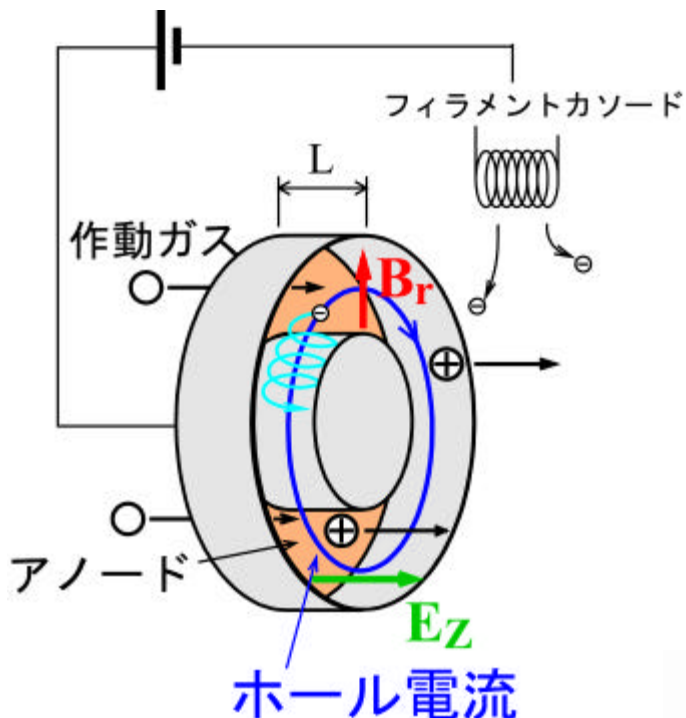
JAXA :宇宙科学研究本部より

天体プラズマの物理

宇宙ジェット, 太陽フレア
磁気エネルギーの解放現象

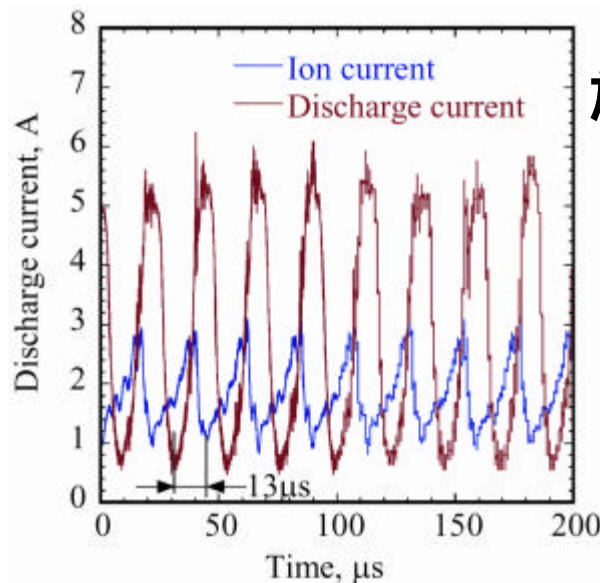
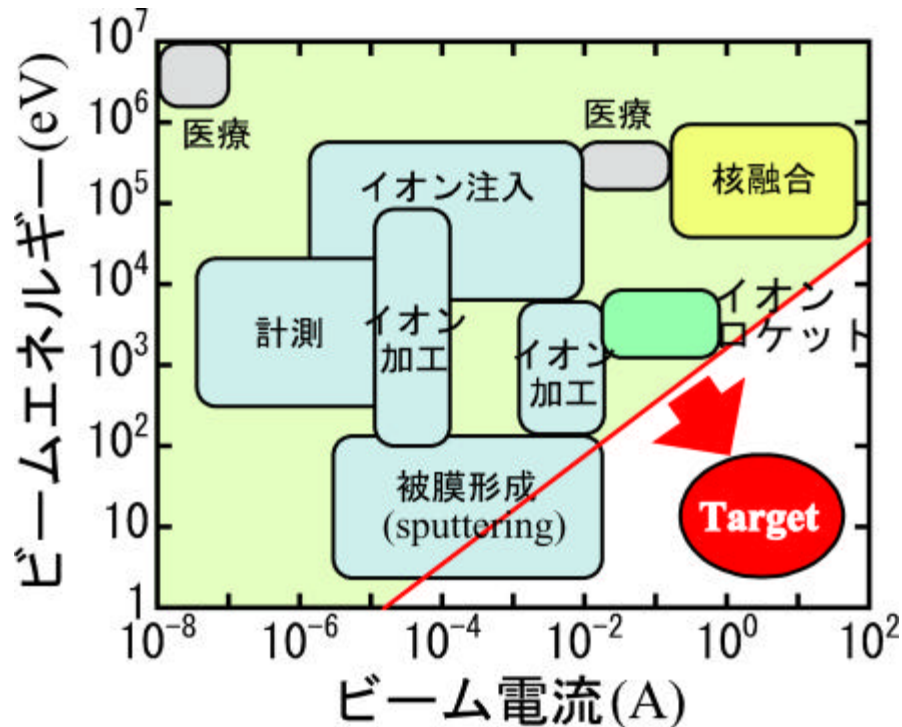


ホールスラスタ



- チャイルド・ラングミュア則による電流制限がない
- 低エネルギー・大電流ビーム源として有望

$$j_b = \frac{4e}{9} \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{d^2}$$

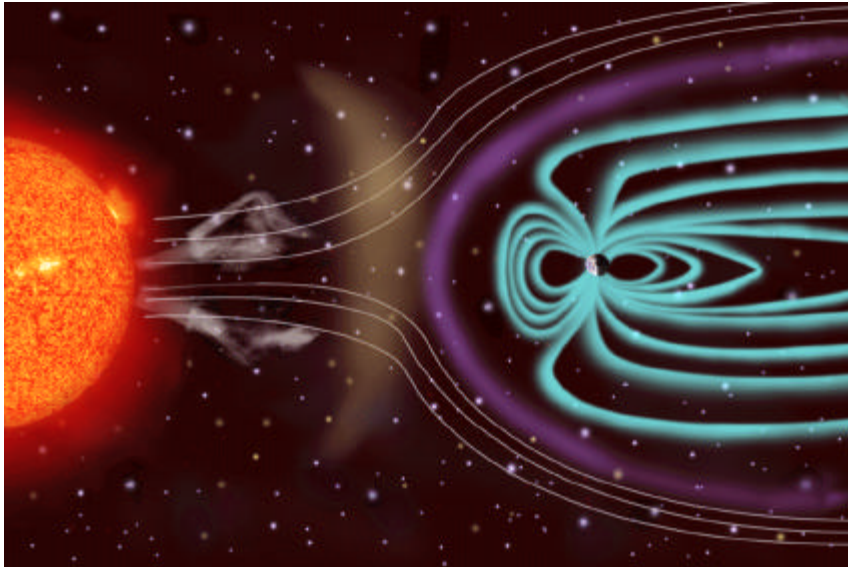


放電電流の振動現象
(東大, 荒川)

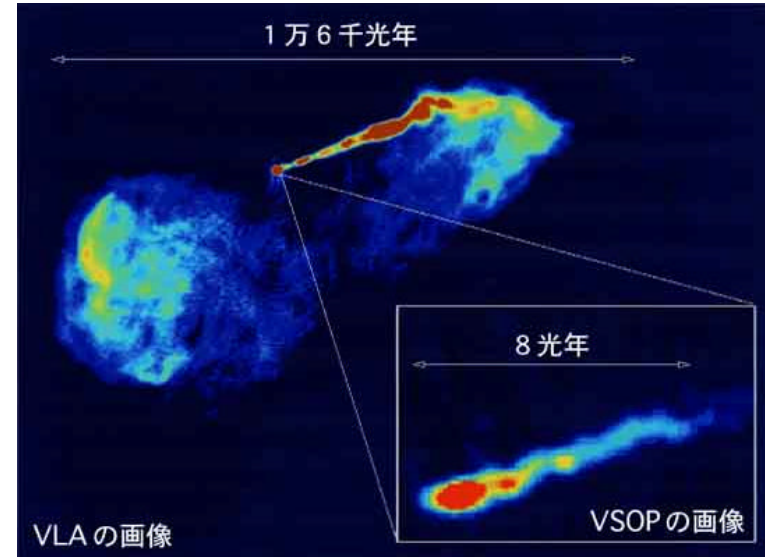


宇宙プラズマに目を向けて

宇宙はダイナミカル (large-scale) なMHD現象の宝庫



太陽風と地球磁場の相互作用
~バウショック形成,オーロラ~



宇宙ジェットの形成とコリメーション機構の解明

太陽フレア
磁気リコネクションとエネルギー散逸

世界初のスペースVLB観測システムVSOPによる観測
(国立天文台)



TOHOKU UNIV.

東北大学における超音速プラズマ流制御に関する 基礎実験

➤ 高ベータプラズマの電磁加速機構の解明 ~ MPDアークジェット ~

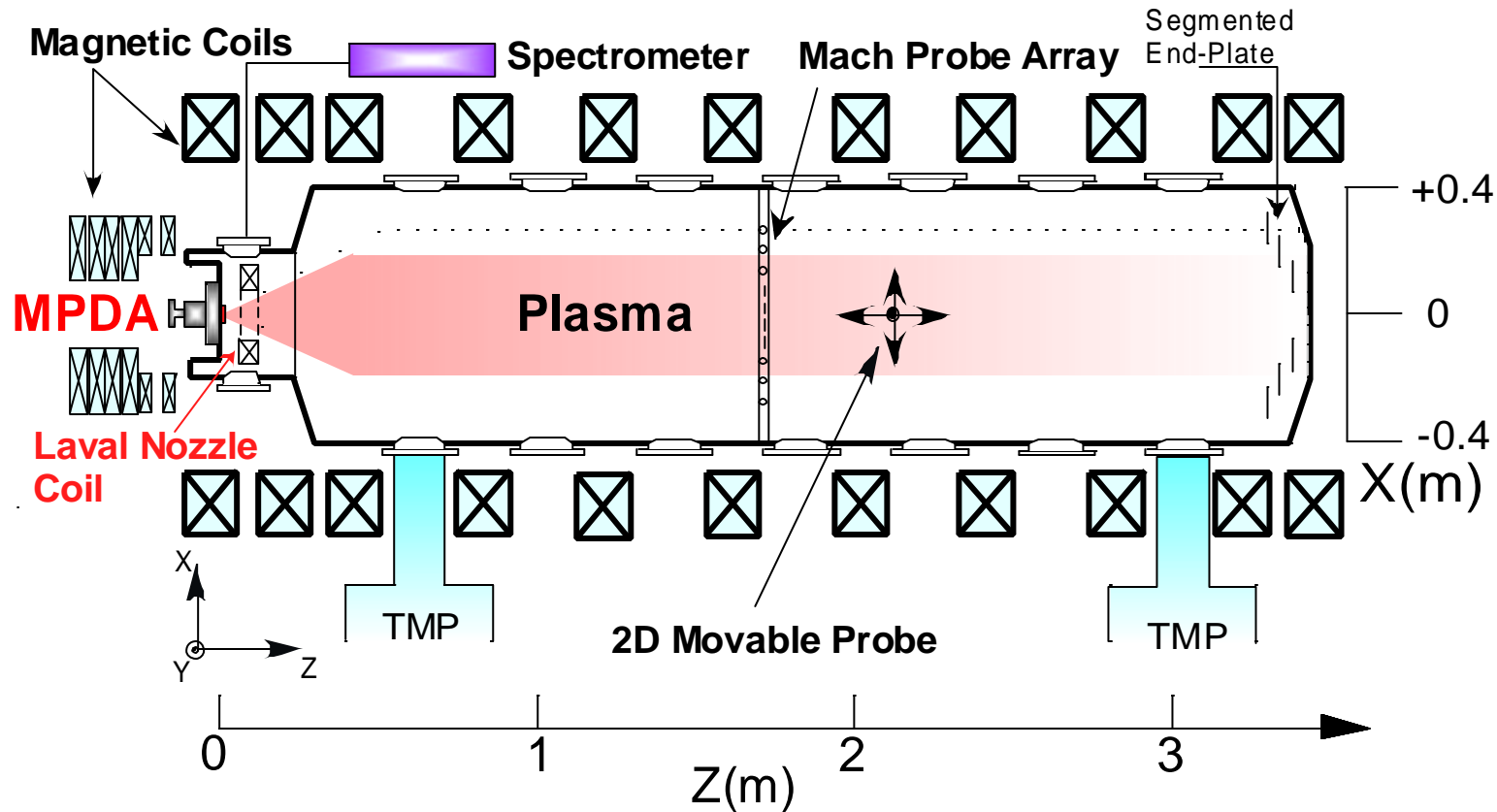
➤ 磁気ノズル中プラズマ流の基礎特性
~ マツハプローブ計測 , choking , 衝撃波形成 , ノズル加速 , 不安定性制御 ~

➤ 高速プラズマ流中の電磁流体波の伝播と高周波プラズマ加熱
~ VASIMR , 地球磁気圏 , オーロラ , ホーキング輻射模擬実験 ~

➤ Super-Alfvénic flowの生成 , 特異現象の検証
~ plasma detachment , 磁気圏のバウショック , 電気推進機 ~



HITOP(High density TOhoku Plasma) Device



Typical Parameters

Cylindrical chamber : length = 3.3 m, inner diameter = 0.8 m

Magnetic field : up to 0.1 T

Ion temperature : 20 - 40eV

Plasma density : $\sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (near the MPDA)

Plasma source : MPD Arcjet

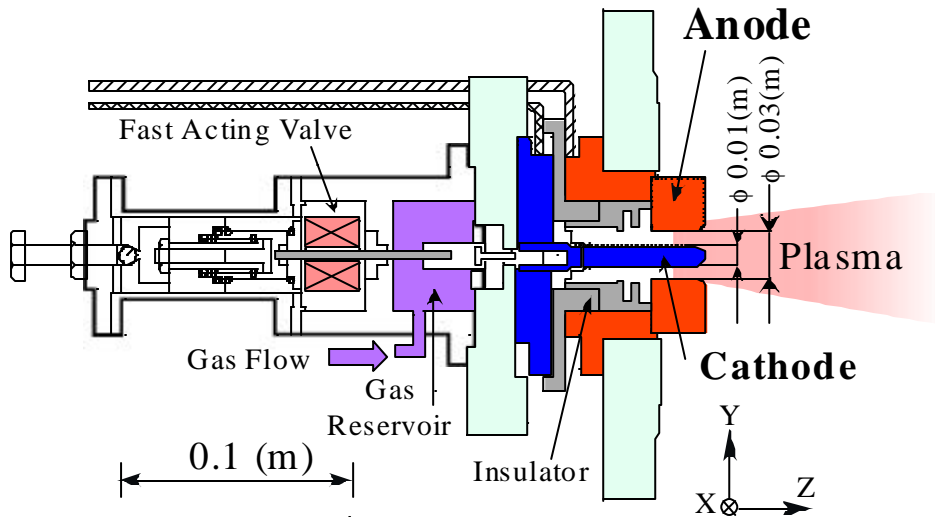
Electron temperature : 3 - 10 eV

Ionization degree : 50 - 90%



MPD(Magneto-Plasma-Dynamic) Arcjet

Cross Section of MPDA

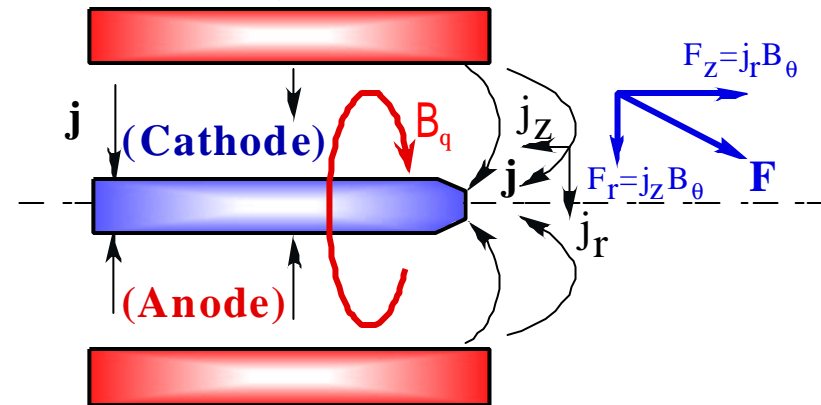


The MPDA has a coaxial structure with a center tungsten rod cathode and an annular molybdenum anode.

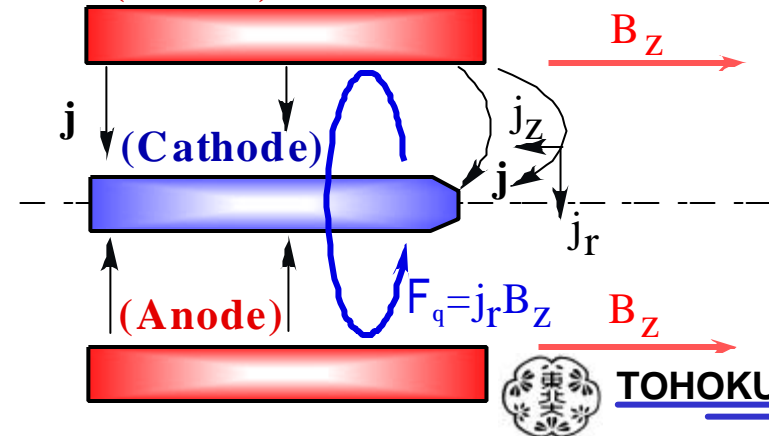
By use of a fast-acting gas-puff valve, a **quasi-steady** (~ 1 msec), high-density (up to 10^{15}cm^{-3} near the MPD outlet), highly-ionized plasma is produced.

Principle of Plasma Acceleration

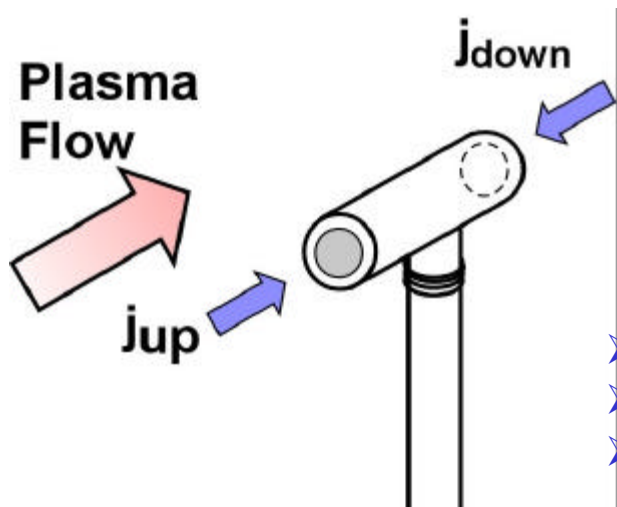
(a) Self-Field Acceleration (Anode)



(b) With Externally-Applied Field (Anode)



Mach Probe Calibration

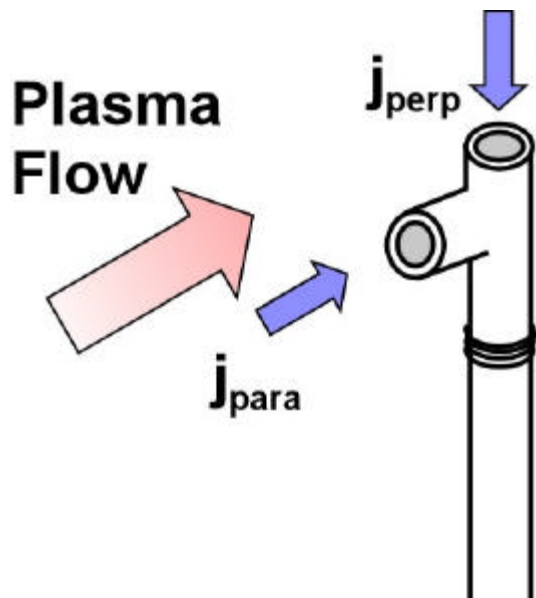


up – down type モデル式 :

$$\frac{j_{up}}{j_{down}} = \exp\left(\frac{M_i}{M_c}\right) \quad M_c : \text{const.}$$

M_c, k の真の値は?

- Hudis and Ridsky model : 0.5
- Hutchinson model(fluid) : 0.44
- Stangeby model : 1.0



$$\frac{j_{para}}{j_{perp}} = \frac{U}{\sqrt{\frac{g_e T_e + g_i T_i}{m_i}}} = \frac{M_i}{k} \quad (\text{for } M_i > 1) \dots (i)$$

$$\frac{j_{para}}{j_{perp}} = \exp\left(\frac{M_i^2}{2}\right) \dots (ii) \quad \text{Stangeby and Allen(1971)}$$

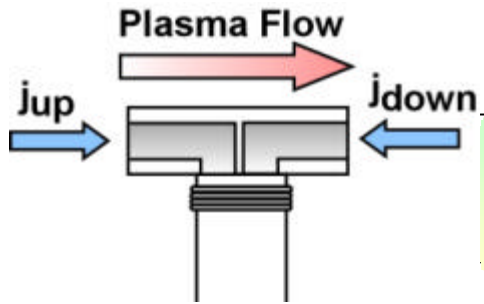
$$\frac{j_{para}}{j_{perp}} = \exp\left(a \cdot M_i^{\frac{1}{a}}\right) \quad (a = -\ln k) \quad (\text{for } M_i < 1)$$

(i) ,(ii) が $M_i = 1$ でなめらかに接続するように を導入

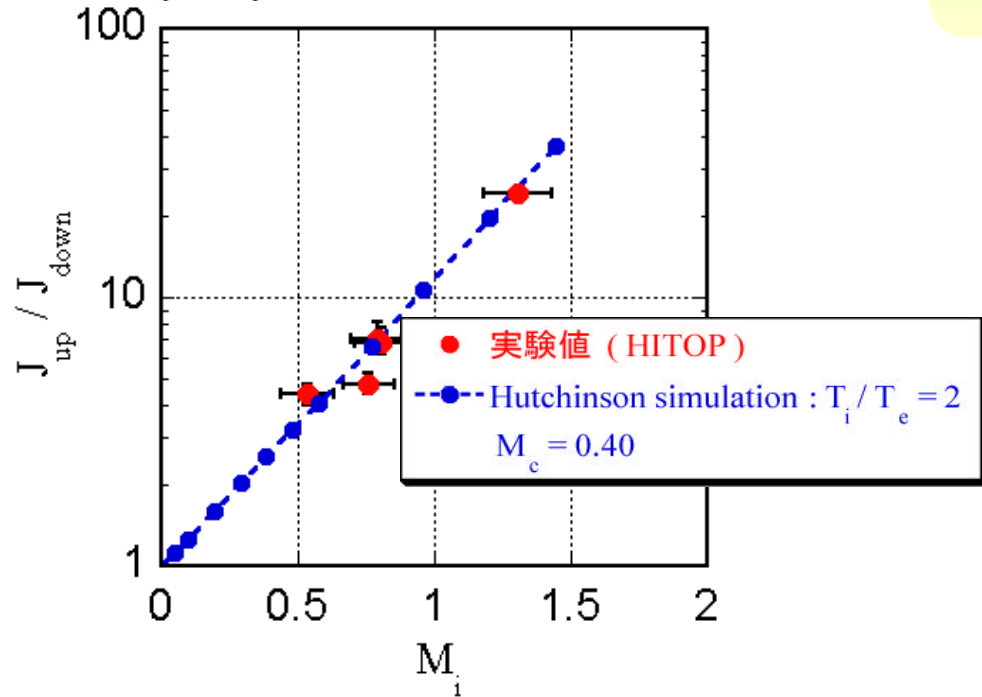


Mach Probe Calibration ~ 分光計測による校正実験 ~

up - down type

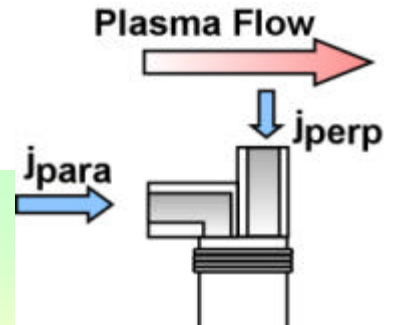


$$\frac{j_{\text{up}}}{j_{\text{down}}} = \exp\left(\frac{M_i}{M_c}\right)$$



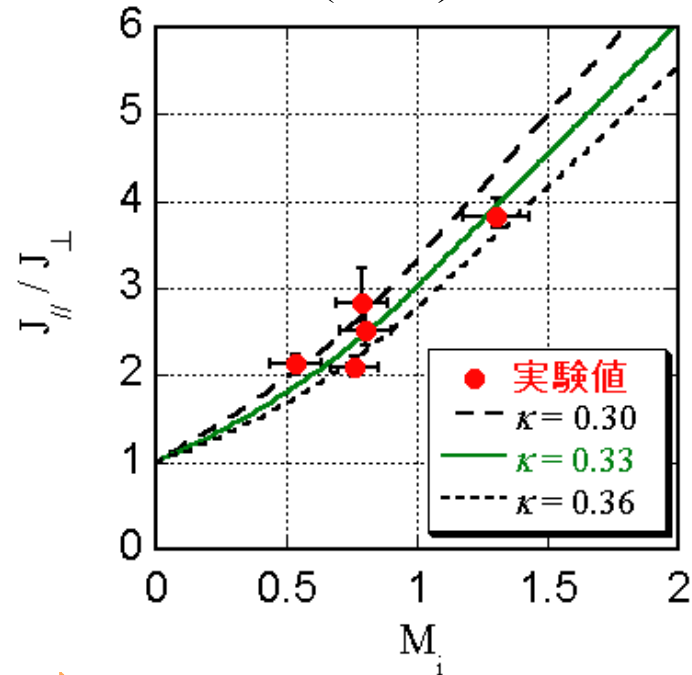
$M_c = 0.40$

para-perp type



$$M_i > 1 : \frac{j_{\parallel}}{j_{\perp}} = \frac{M_i}{\kappa}$$

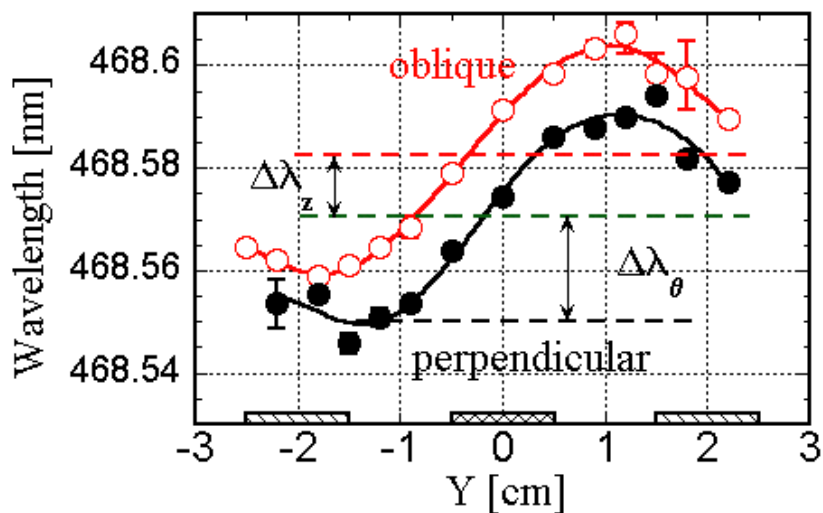
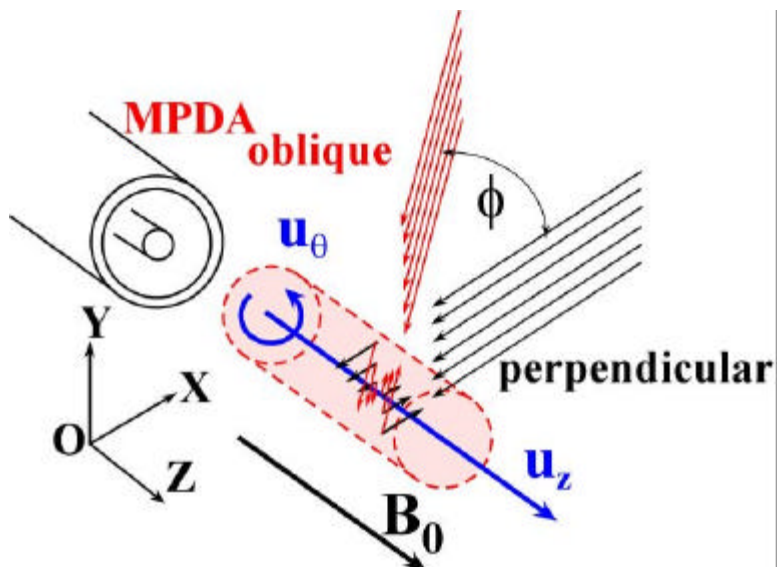
$$M_i < 1 : \frac{j_{\parallel}}{j_{\perp}} = \exp\left(\frac{M_i^{\alpha}}{\alpha}\right) \left(\alpha = -\frac{1}{\ln \kappa}\right)$$



$\kappa = 0.33$

Diagnostics

~ Spectroscopic Technique ~



Particle Temperature

$$T = \frac{m c^2}{2k I_0} \Delta I_{1/e} \quad (\text{Doppler Broadening})$$

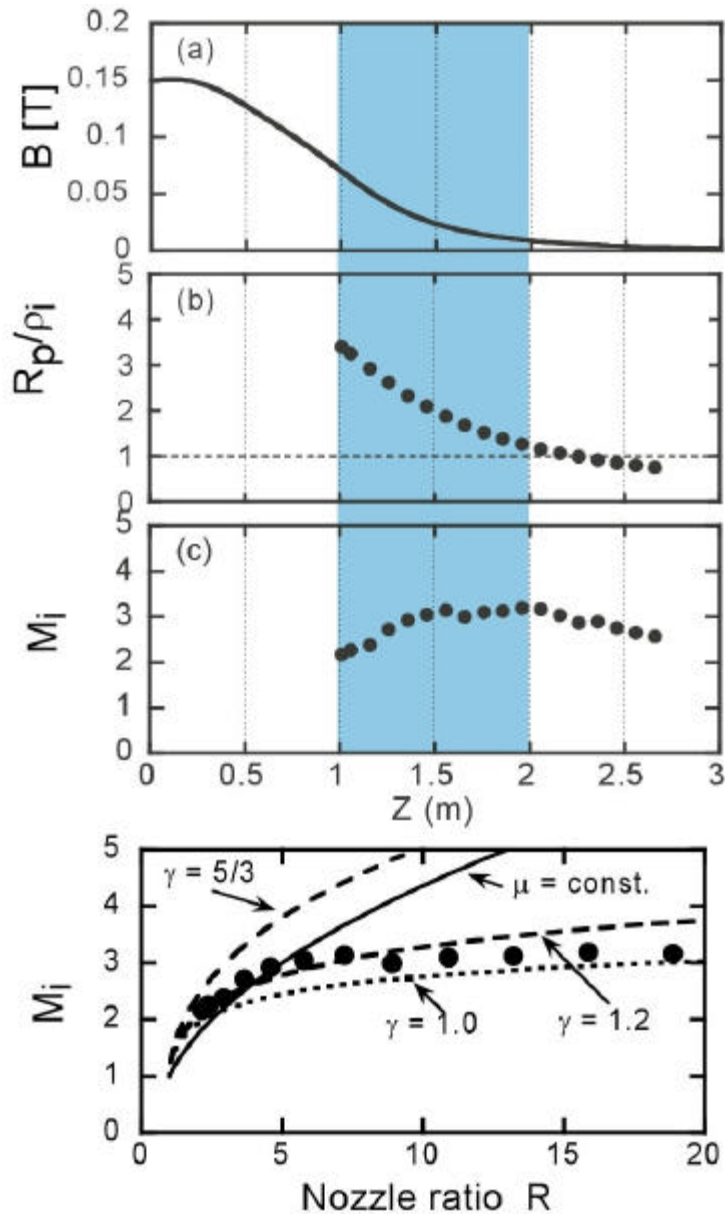
Flow Velocities

$$u_z = c \frac{\Delta I_z / \sin f}{I_0}, \quad u_q = c \frac{\Delta I_q}{I_0} \quad (\text{Doppler Shift})$$

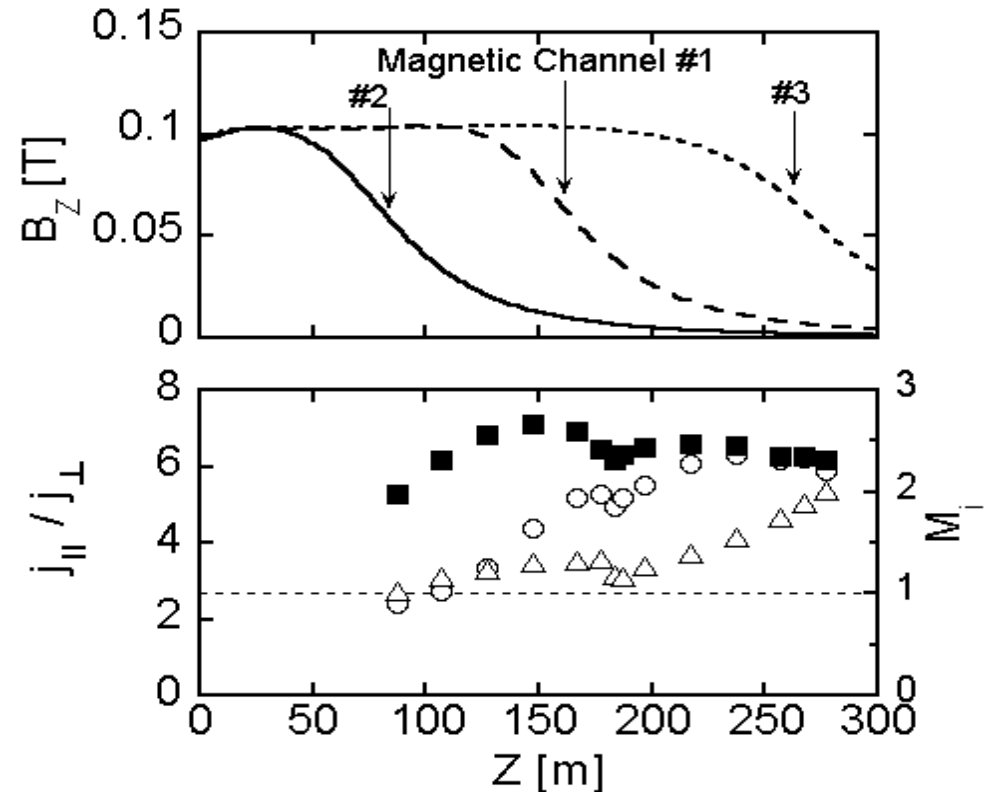
Measured Spectrum Lines

HeI(atom) : 587.762 nm
HeII(ion) : 468.575 nm

Flow Characteristics of MPD Plasma



Plasma behavior in a diverging magnetic nozzle

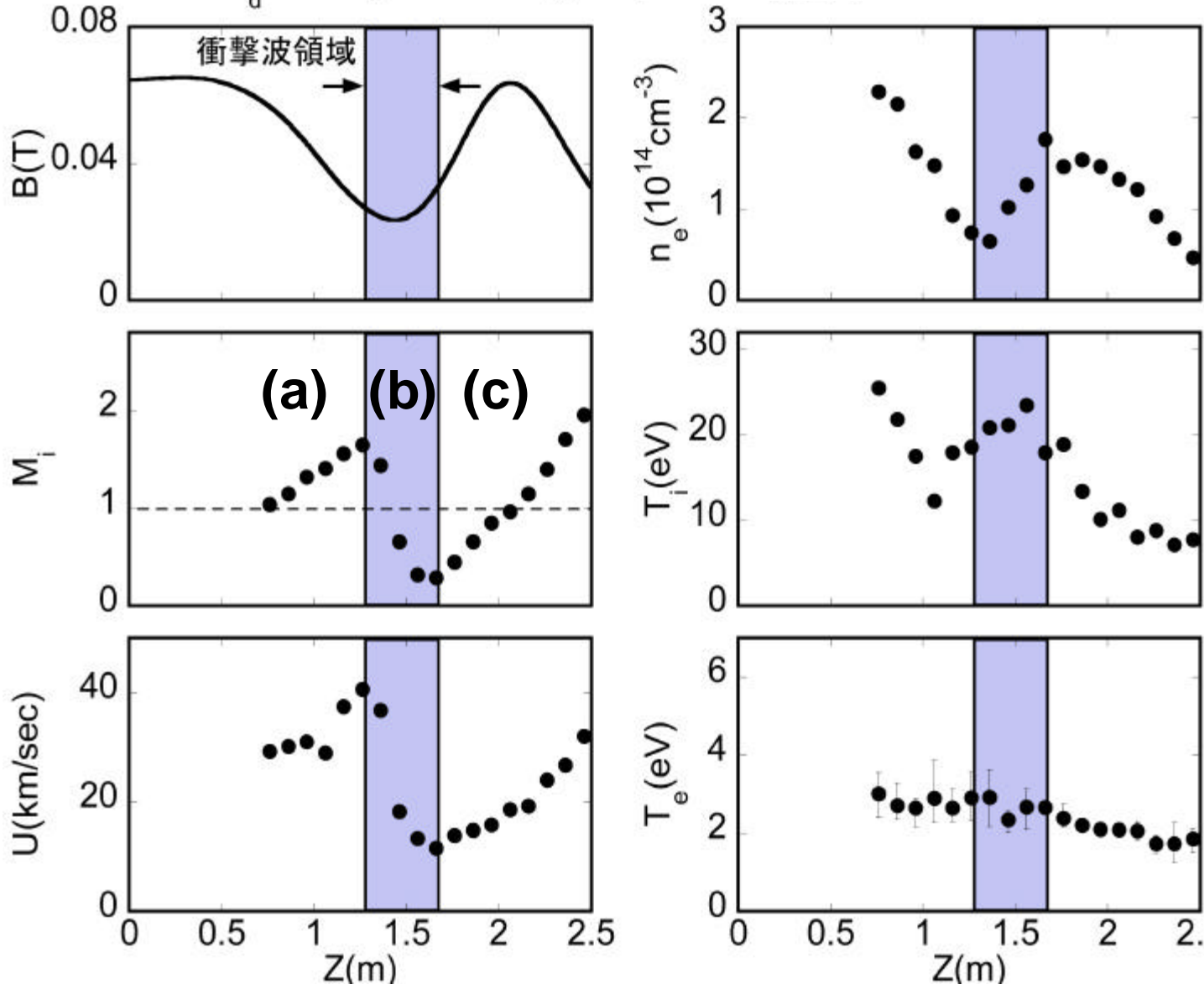


#1, #2, #3

$I_d = 8.2 \text{ kA}$, $dm/dt = 0.27 \text{ g/s}$,
He plasma

Standing Shock Formation in an MPD Plasma Flow

$I_d = 8.2\text{kA}$, $dm/dt = 0.2\text{g/sec(He)}$, measured with the Mach probe at $X=0$



(a) Supersonic flow in a diverging field



(b) Shock formation and deceleration in a bump field



(c) Re-acceleration in a Laval nozzle

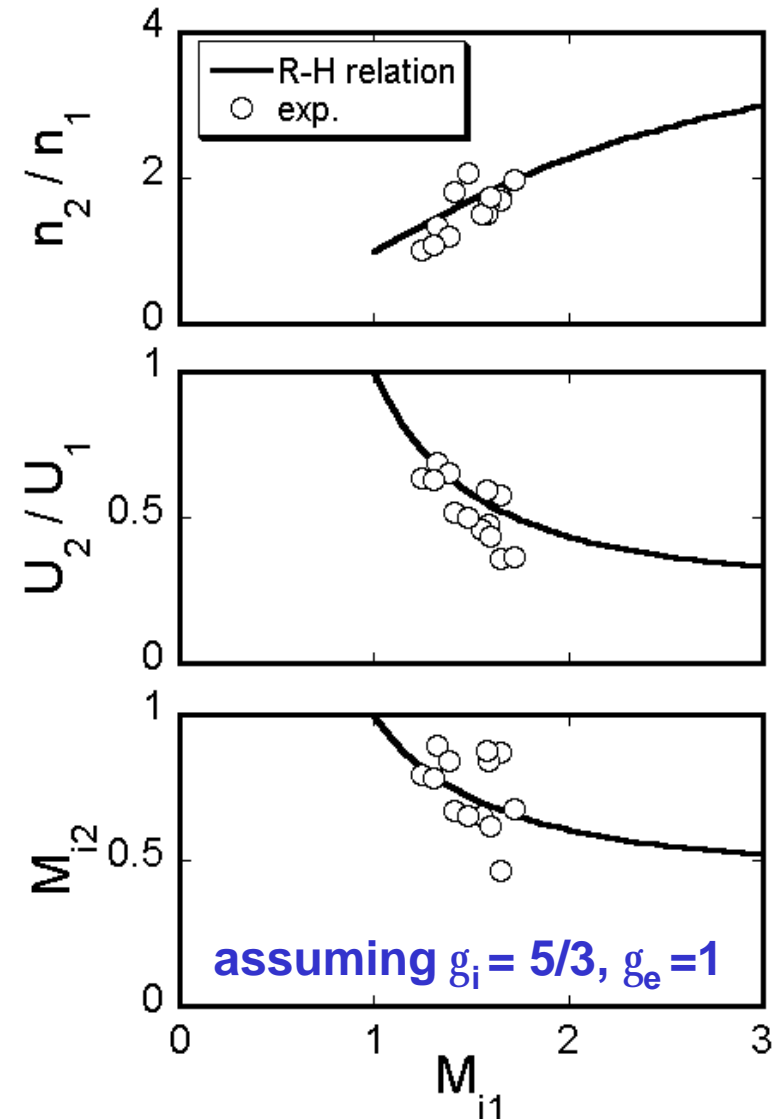


Rankine - Hugoniot Relations

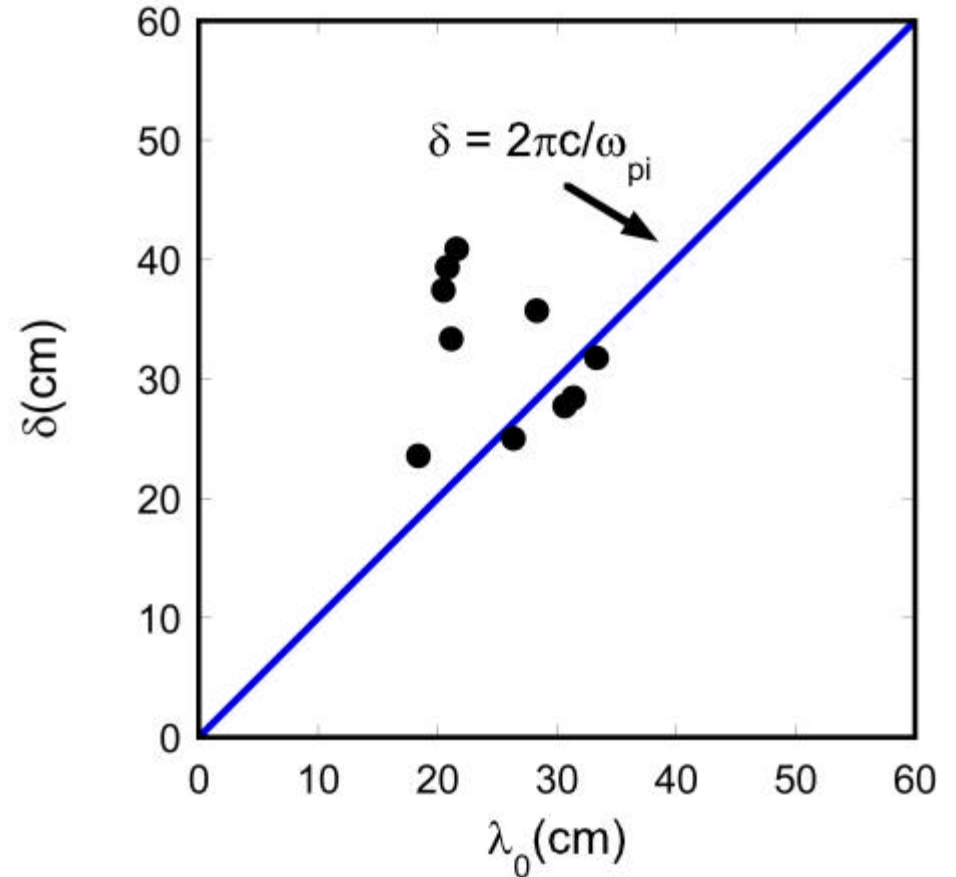
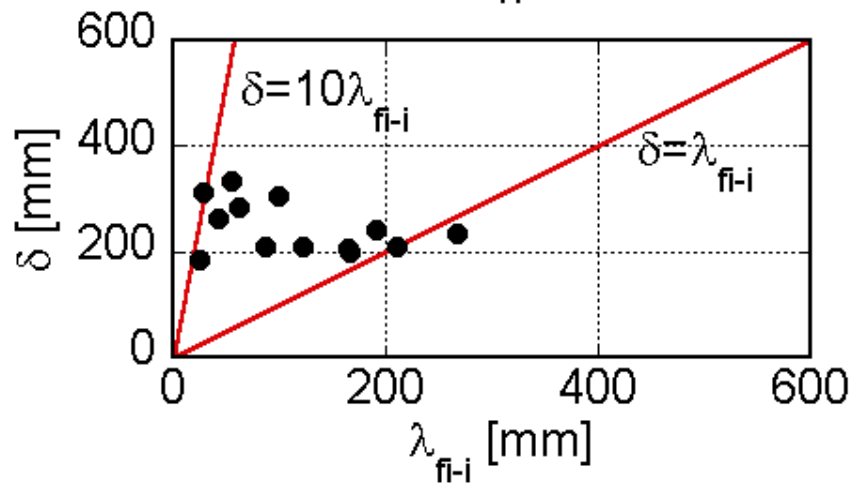
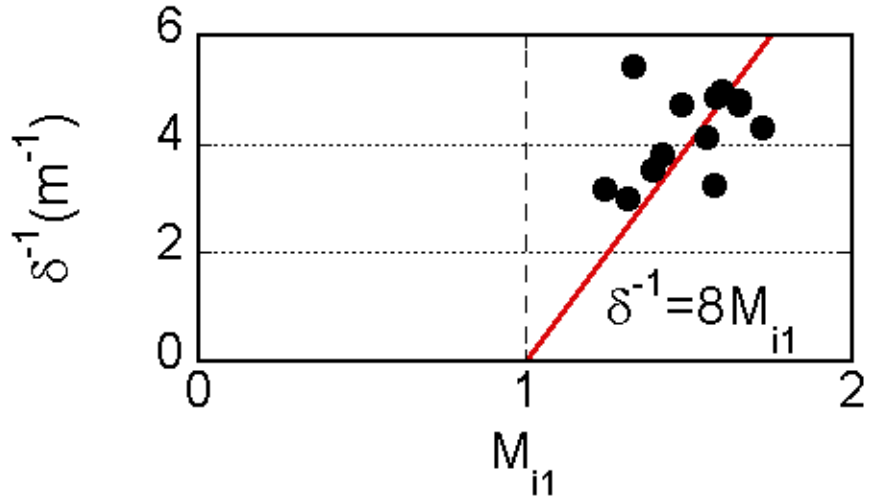
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{(g_i + 1) + M_{i1}^2}{(g_i - 1)M_{i1}^2 + 2}$$

$$M_{i2}^2 = \frac{(g_i - 1)M_{i1}^2 + 2}{2g_i M_{i1}^2 - (g_i - 1)}$$

Subscripts 1 and 2 indicate quantities upstream and downstream of shock region, respectively.



Shock Thickness



Bow shockなどの垂直衝撃波では, 衝撃波の厚さがイオンの慣性長 $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_{pi}$ 程度になることが知られている。

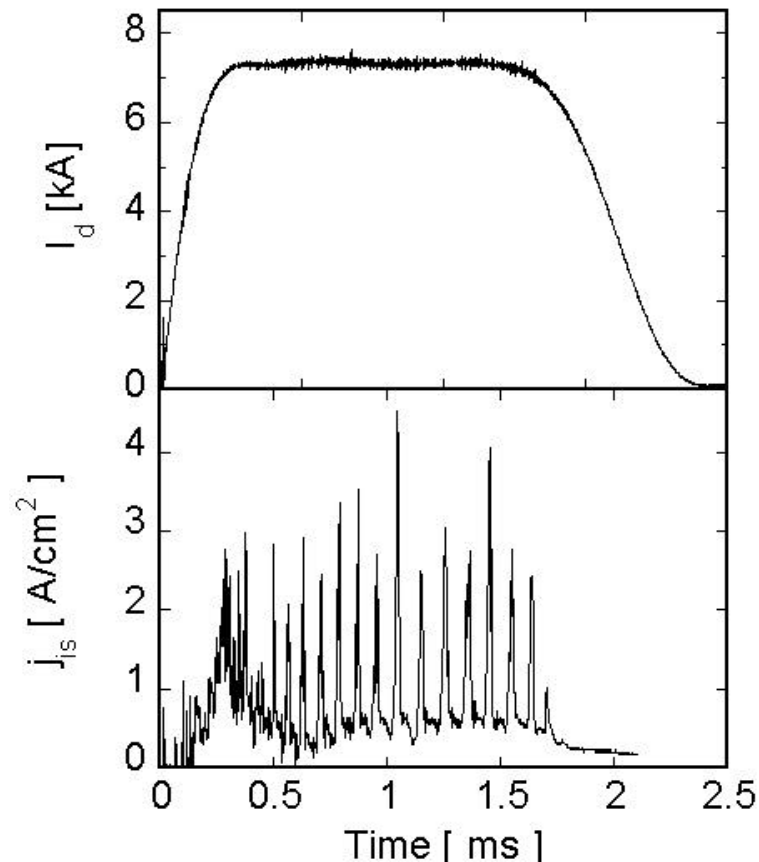
衝撃波の厚みはイオンの慣性長 $2\pi c / \omega_{pi}$ にほぼ一致する。



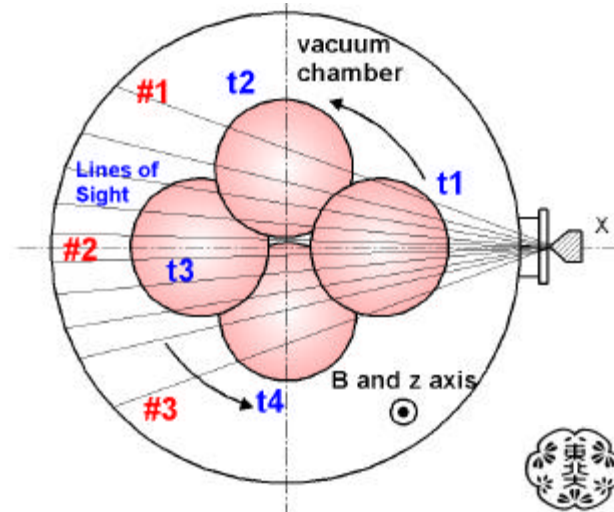
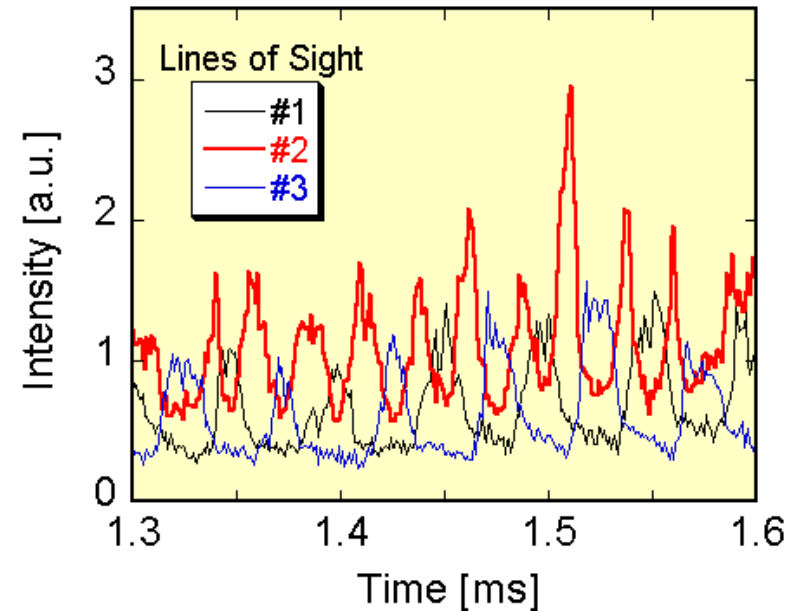
Instabilities in an MPD Plasma Flow

大電流(>8kA) ,低ガス流量条件下
の放電で不安定性発生

➡ プローブの振動波形

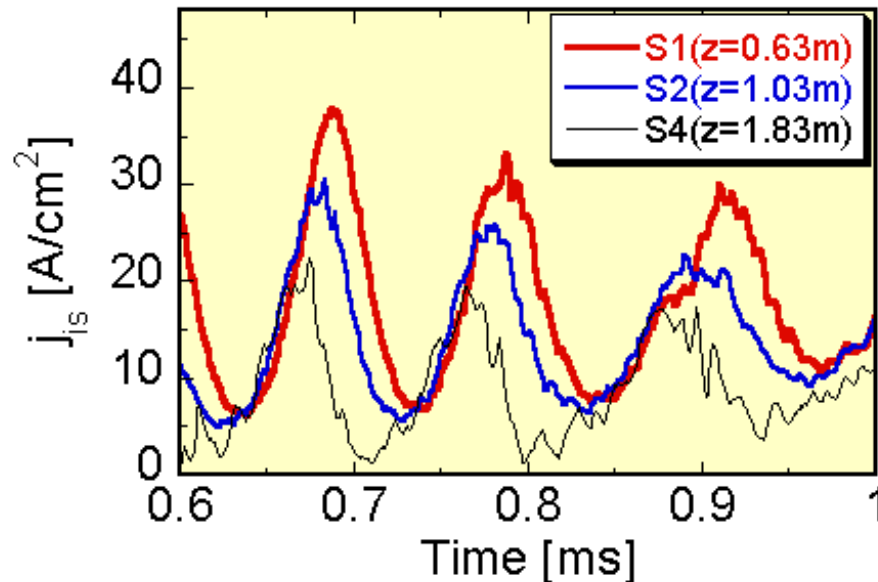
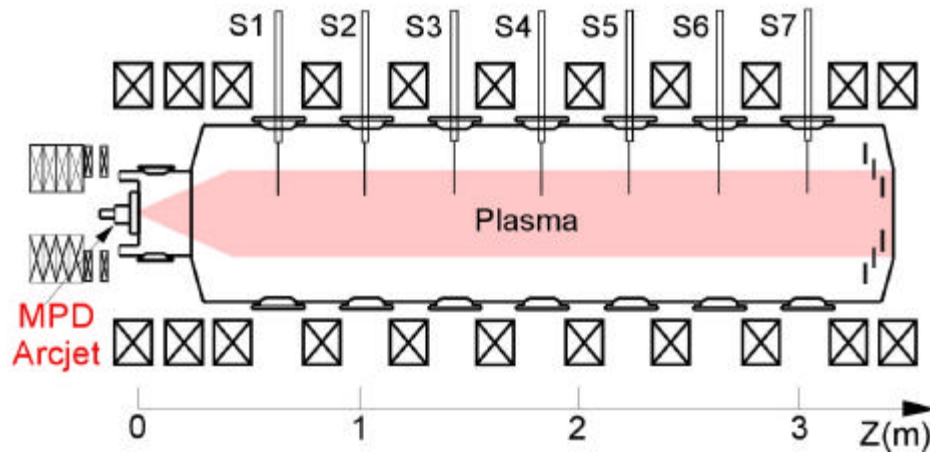


Plasma behavior in azimuthal direction

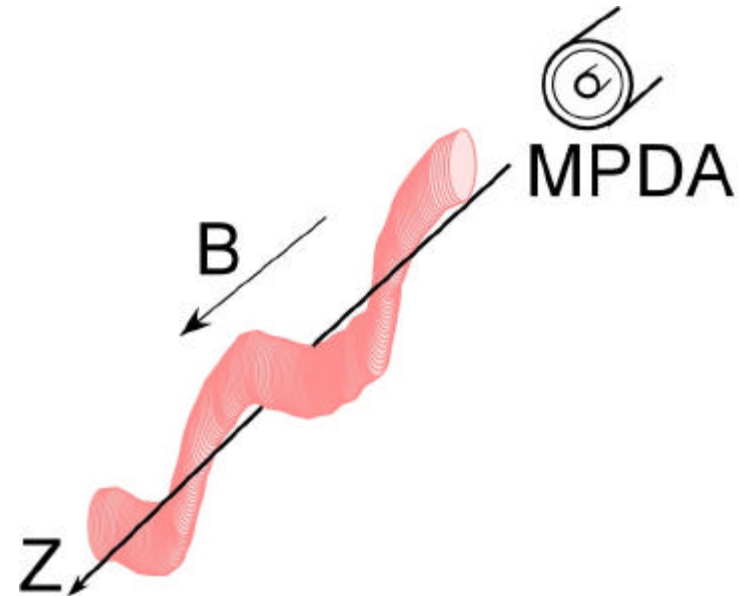


Instabilities in an MPD Plasma Flow

Plasma behavior in axial direction



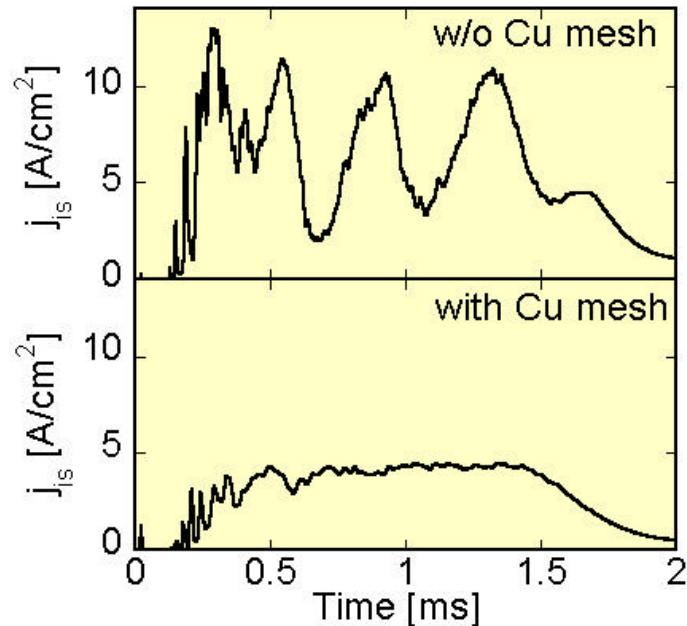
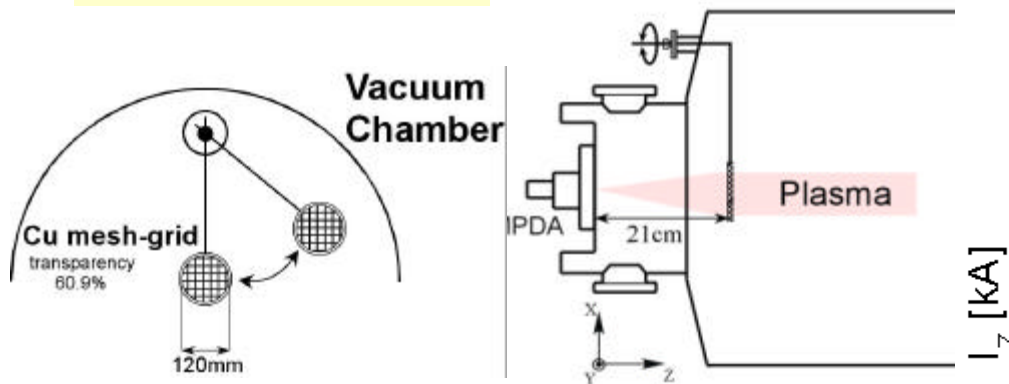
Schematic helically-twisted plasma column



From the phase difference of azimuthal and axial probe array signal, the plasma has **twisted structure** and it rotates in the same direction of the twist.

Control of Instabilities in an MPD Plasma

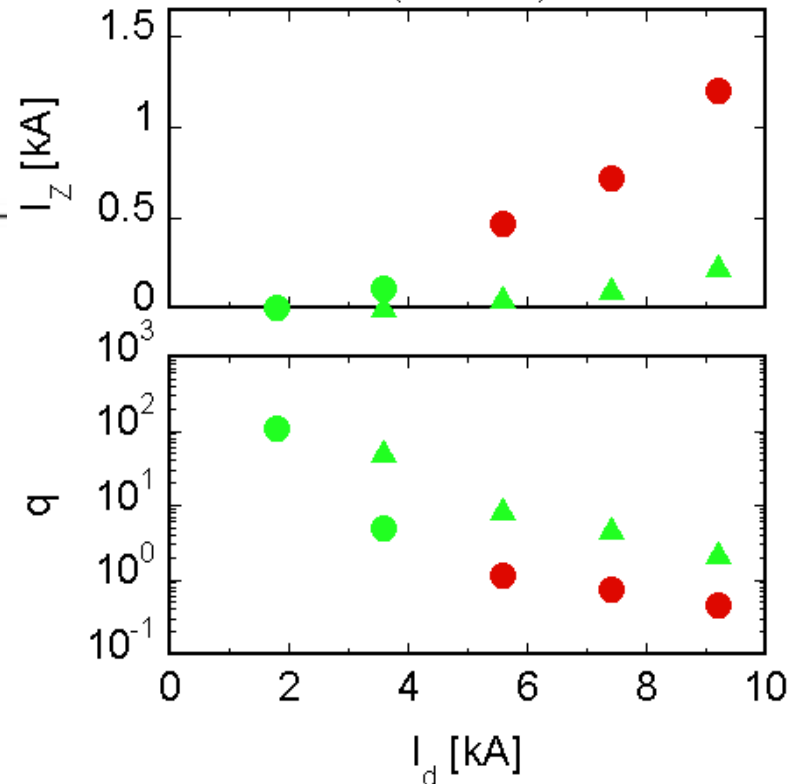
Control of plasma instability by adjusting plasma current



Kruskal-Shafranov Criterion

$$q = \frac{4p^2 a^2 B_z}{m_0 L I_z}$$

w/o Cu-mesh (stable ●, unstable ●)
with Cu-mesh (stable ▲)



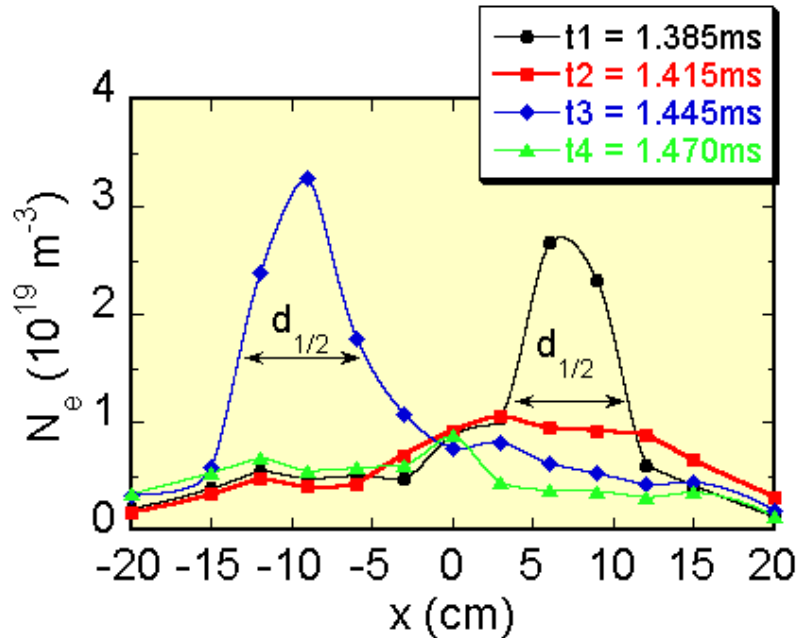
Helical Kink Insta.



TOHOKU UNIV.

Instabilities in an MPD Plasma Flow

Helical Insta.発生時の密度分布

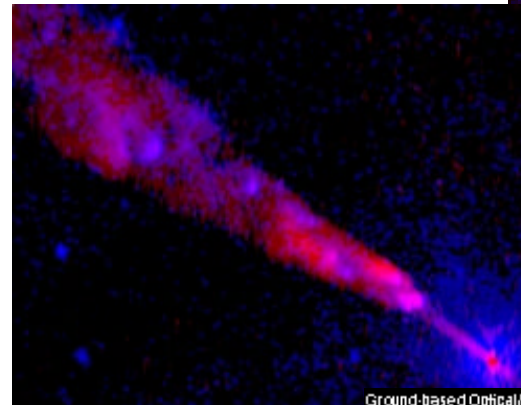
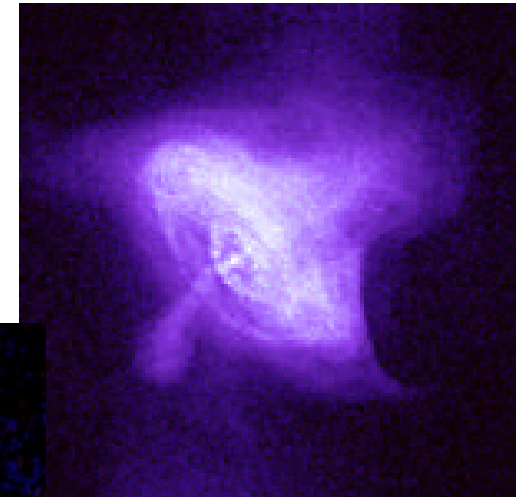


偏心回転するもののプラズマの急激な拡散は小さい。



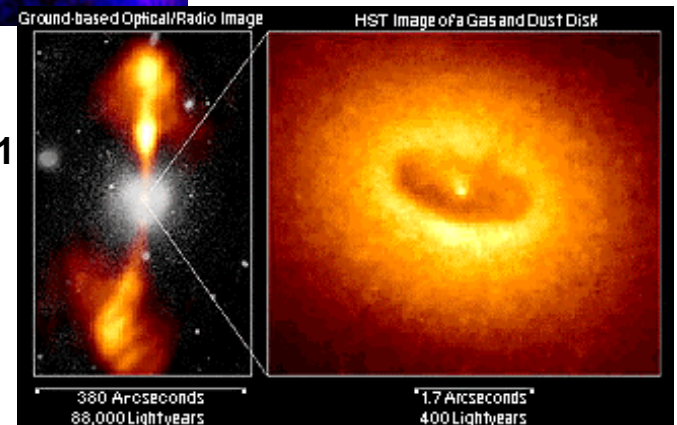
何らかのコリメーション機構がはたらく。宇宙ジェットのコリメーションとの共通点が見いだせないか。

降着円盤とパルサージェット



ケンタウルス座：宇宙ジェット放出

活動銀河:NGC4261



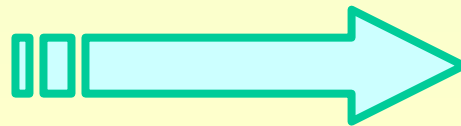
写真はNASAより引用



TOHOKU UNIV.

Summary

- ▶ 東北大学における高速プラズマ流の生成 制御実験について紹介した .
- ▶ 磁気ノズルに入射した高速プラズマ中の衝撃波構造を観測した .
- ▶ プラズマ電流によって駆動されるヘリカルキンク不安定性を観測した .
- ▶ 宇宙プラズマのダイナミックな振る舞いと共通の物理機構
 - プラズマサイズ
 - プラズマパラメータ
 - 時間スケール



相似則を見いだすことが重要

