

磁気圏型プラズマにおけるトロイダル イオン流の分光計測及び解析

Spectroscopic measurement and theoretical analysis of toroidal ion flow in
magnetosphere plasmas

東大 新領域 GSFS, Univ. Tokyo

高橋典生, 吉田善章, 川面洋平, 西浦正樹, 矢野善久, 齋藤晴彦,
野上智晃, 山崎美由梨, 虫明敏生, Kashyap Ankur, 中塚正崇

1. 分光器によるトロイダルイオン流の計測・解析

2. Coherence Imaging法導入に向けて

1. 分光器によるトロイダルイオン流の計測・解析

自己組織化・電場・トロイダル流

● 非中性プラズマの平衡

-> 一様磁場中で剛体回転する平衡(電子プラズマの例^[1])
= 電場によって駆動されるトロイダル流

プラズマは”電場を調整”して自己組織化する

(電場をプラズマの持つ”自由度”として注目する)

● 中性プラズマの平衡

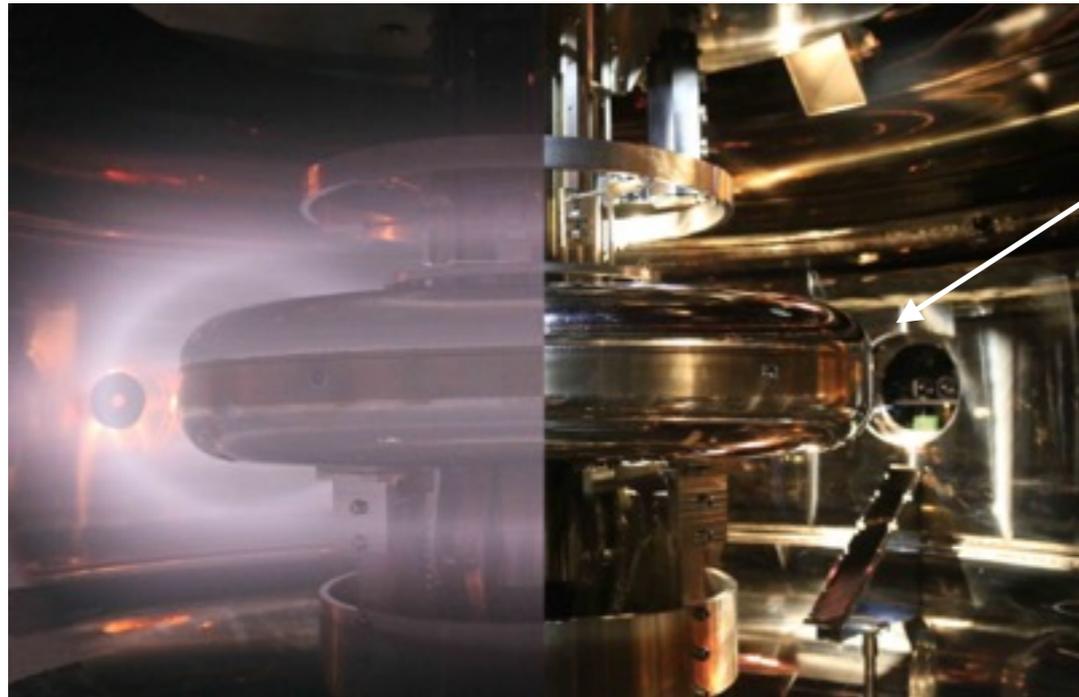
※非中性プラズマの場合…静電エネルギー

熱エネルギーを持ったプラズマは
どのように”電場を調整”しているか？



E×Bドリフトに注目してトロイダル流を計測

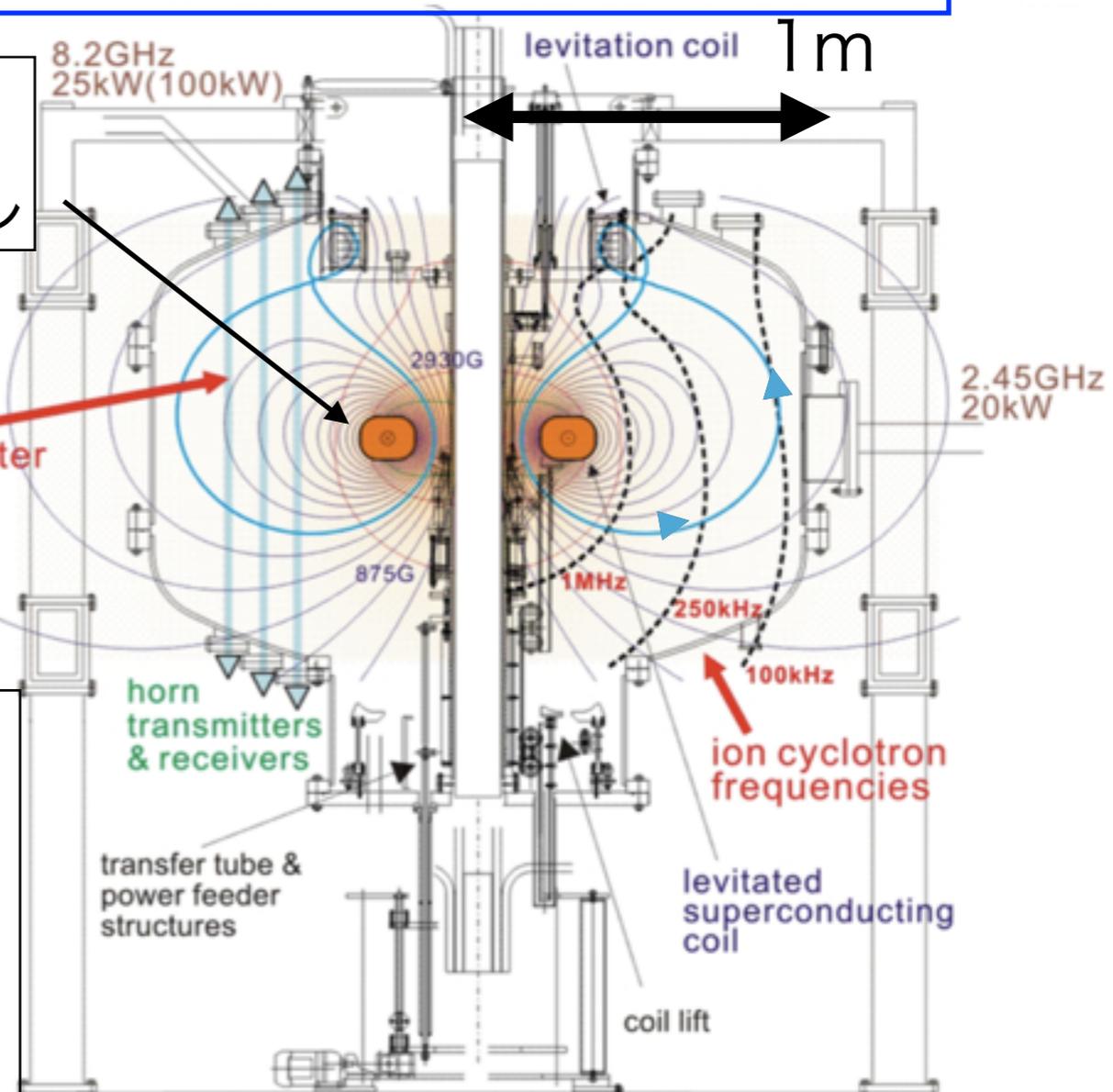
磁気圏型プラズマ実験装置RT-1



超伝導
浮上コイル

multichord
interferometer

75GHz
heterodyne
system



H. Saitoh, et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 063034より引用

コイルを浮上させることで
dipole磁場配位を形成

※トロイダル方向に磁場がない

- ECH(8.2GHz): max 50kW
- local beta ~ max > 1
- 電子密度 ~ 10^{17} m^{-3} - 10^{18} m^{-3}
- 低温電子 (~75eV)と 高温電子 (~10 keV) が存在

ドップラー分光計測(赤道面での T_i , V_i 測定)

- HeII(468.5nm)(微細構造)とCIII(464.7nm)でドップラーシフトを計測
- 赤道面で水平方向に可動ch × 2, 固定ch × 4で計測
- 対向測定で速度の0点を計測

ツェルニーターナー型分光器

F値: 8.5

波長分解能 [nm]: 0.01

逆線分散 [nm/mm]: 0.55

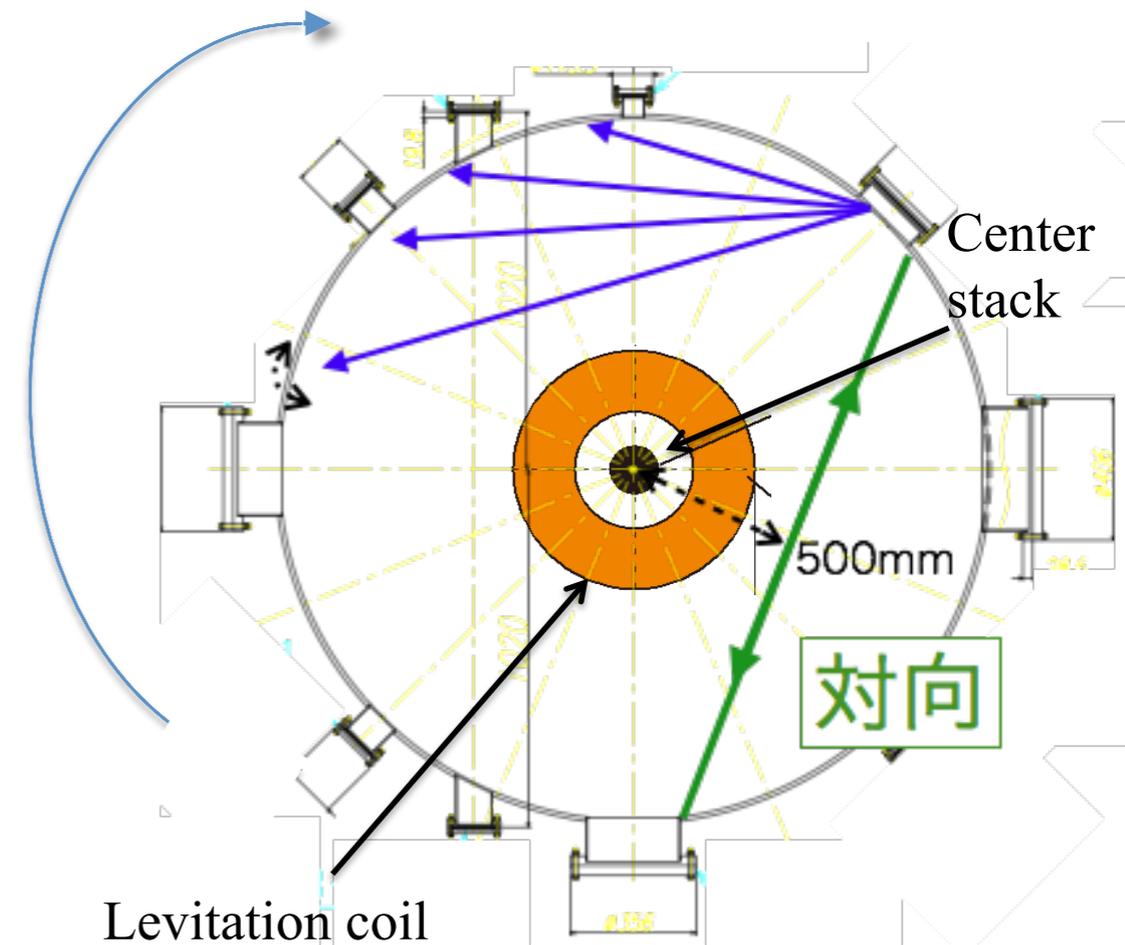
有効グレーティング面積 [mm²]: 102 × 102

グレーティング刻線数 [1/mm]: 1800

焦点距離 [m]: 1

→ 1 pixel は6km/sに相当

フローの向き



RT-1上面図

本研究でのパラメータ領域と緩和時間

- ・ 運動量(速度)緩和時間^[2]

$$\tau_{\text{He}^+ | e} \sim 0.98\text{s}$$

$$\tau_{\text{C}^{2+} | e} \sim 0.74\text{s}$$

$$\tau_{\text{C}^{2+} | \text{He}^+} \sim 0.68\text{ms}$$

電子密度: 10^{17}m^{-3}

イオン密度: 10^{17}m^{-3}

電子温度: 70eV

He⁺温度: 15eV

電子とイオンの相対速度: 100km/s

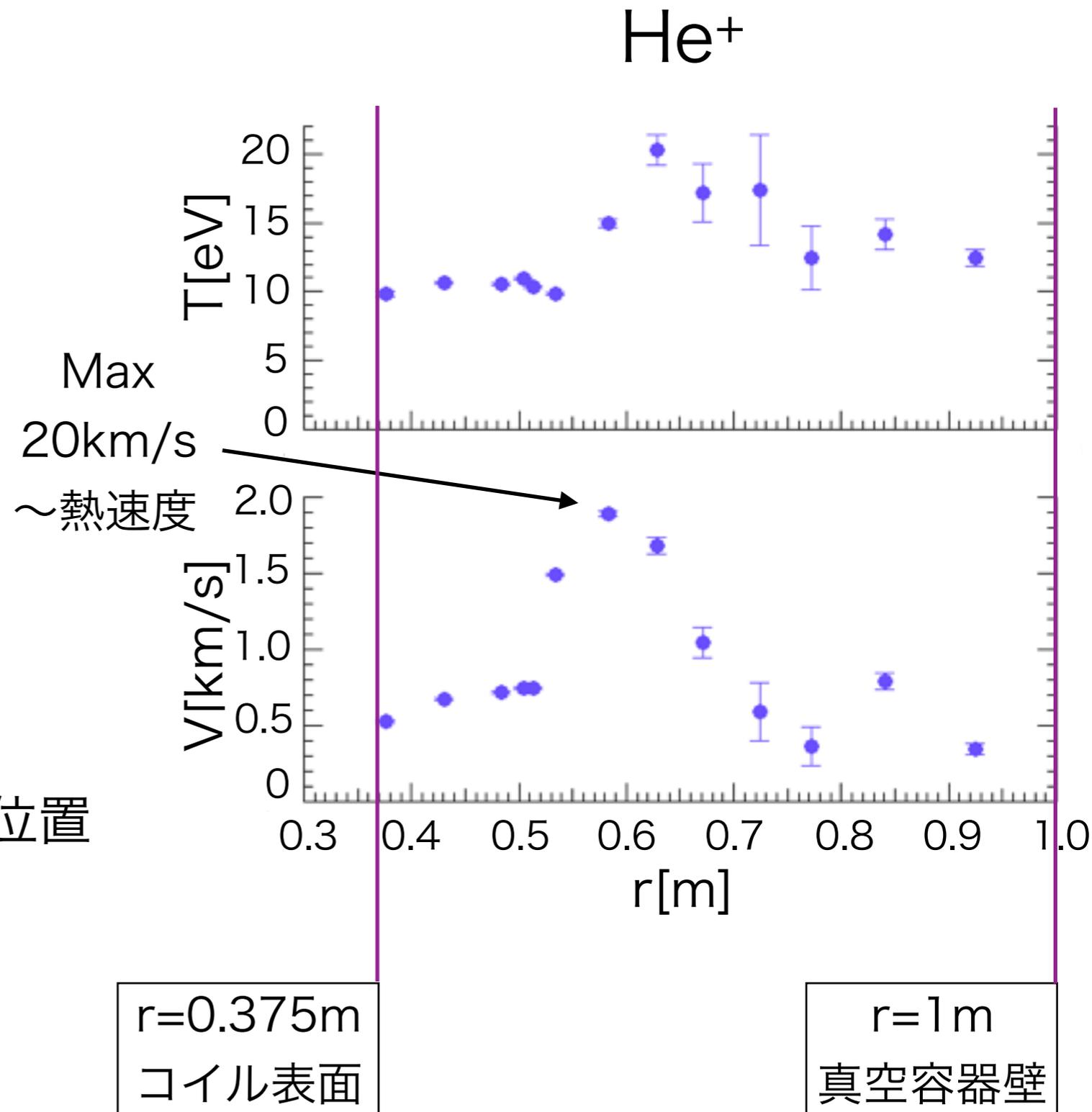
イオン同士の相対速度: 10km/s

ガス圧	He 3mPa
ECH	13kW
local beta	0.02
電子密度(中心部)	$10^{17}-10^{18}\text{m}^{-3}$
電子温度	50-80eV
イオン温度	15-25eV

=> 不純物イオンはバルクイオンの流速に緩和する

RT-1におけるイオン温度とイオン速度

ガス圧	He 3mPa
local beta	0.02
電子密度(中心部)	10^{17} - 10^{18}m^{-3}
電子温度	50-80eV



- ・ 速度のピーク位置 < 温度のピーク位置
- ・ 流速も温度も山型のプロファイル

E×Bドリフトの評価-仮定-

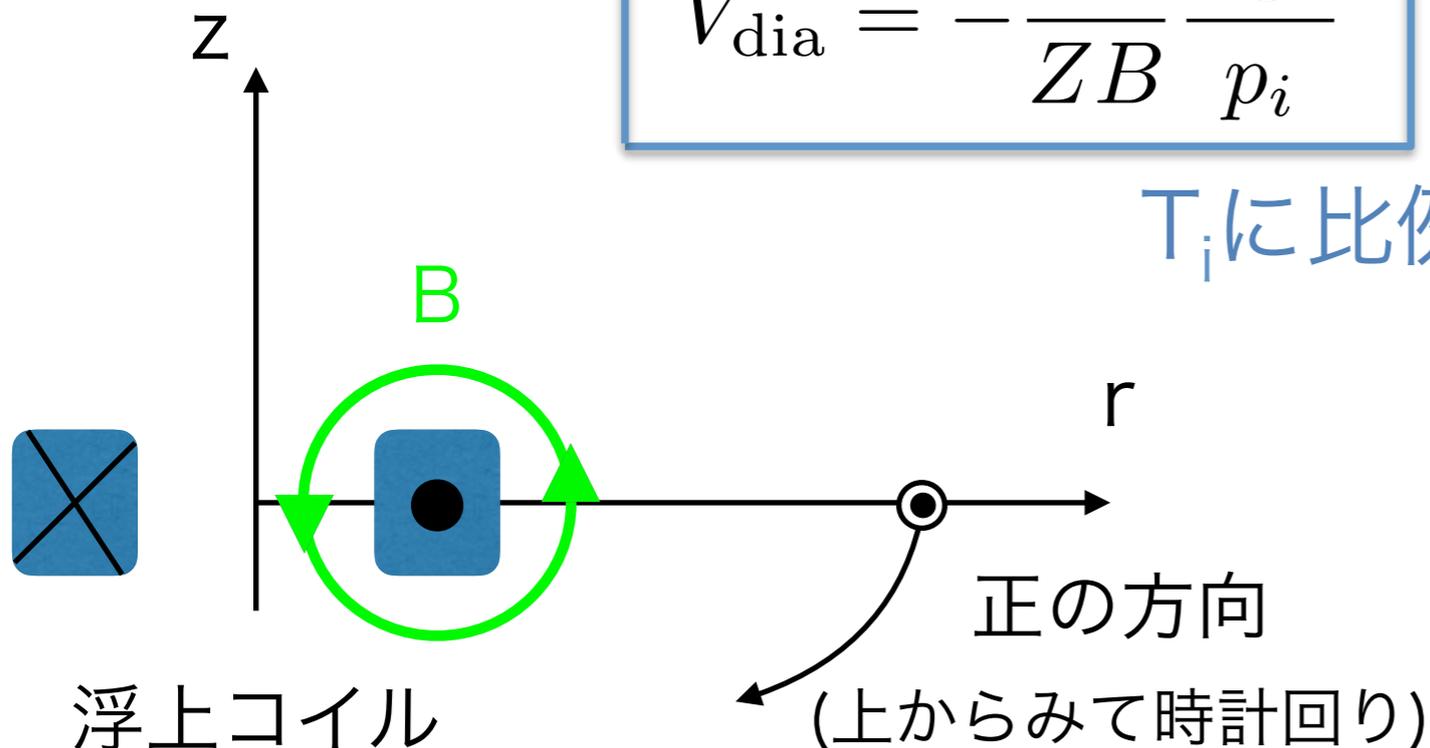
$$V_{\text{curv}} + V_{\nabla B} + V_{\text{dia}} + V_E = (\text{observed velocity})$$

を仮定し，E×Bドリフトを評価する

$$V_{\text{curv}} = \frac{T_i}{ZB} \frac{2}{r} \quad V_{\nabla B} = -\frac{T_i}{ZB} \frac{\nabla B}{B}$$

$$V_{\text{dia}} = -\frac{T_i}{ZB} \frac{\nabla p_i}{p_i} \quad V_E = -\frac{E}{B}$$

T_i に比例(->熱エネルギーで駆動)



$$\begin{pmatrix} E = E_r(r) \\ B = B_z(r) \end{pmatrix}$$

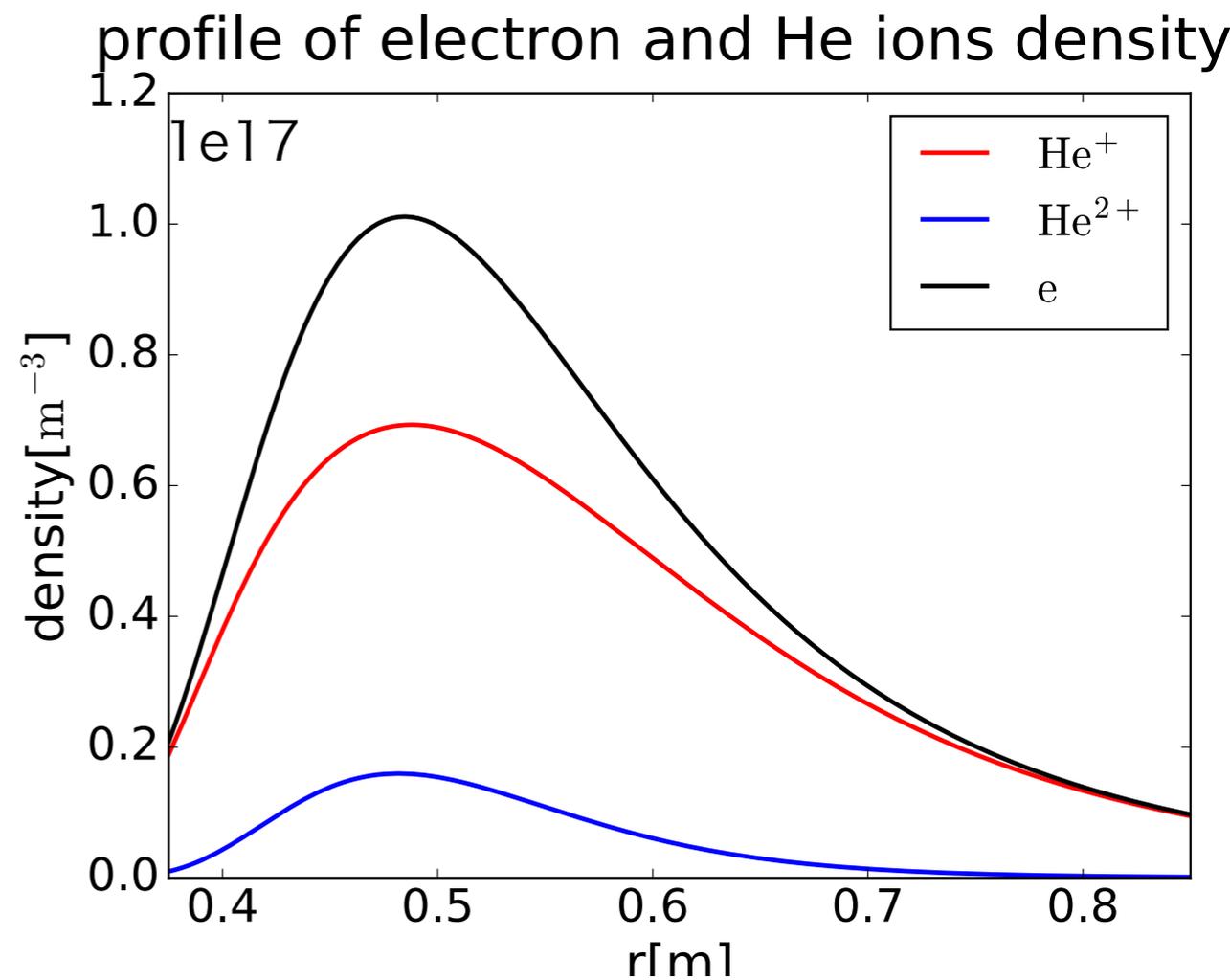
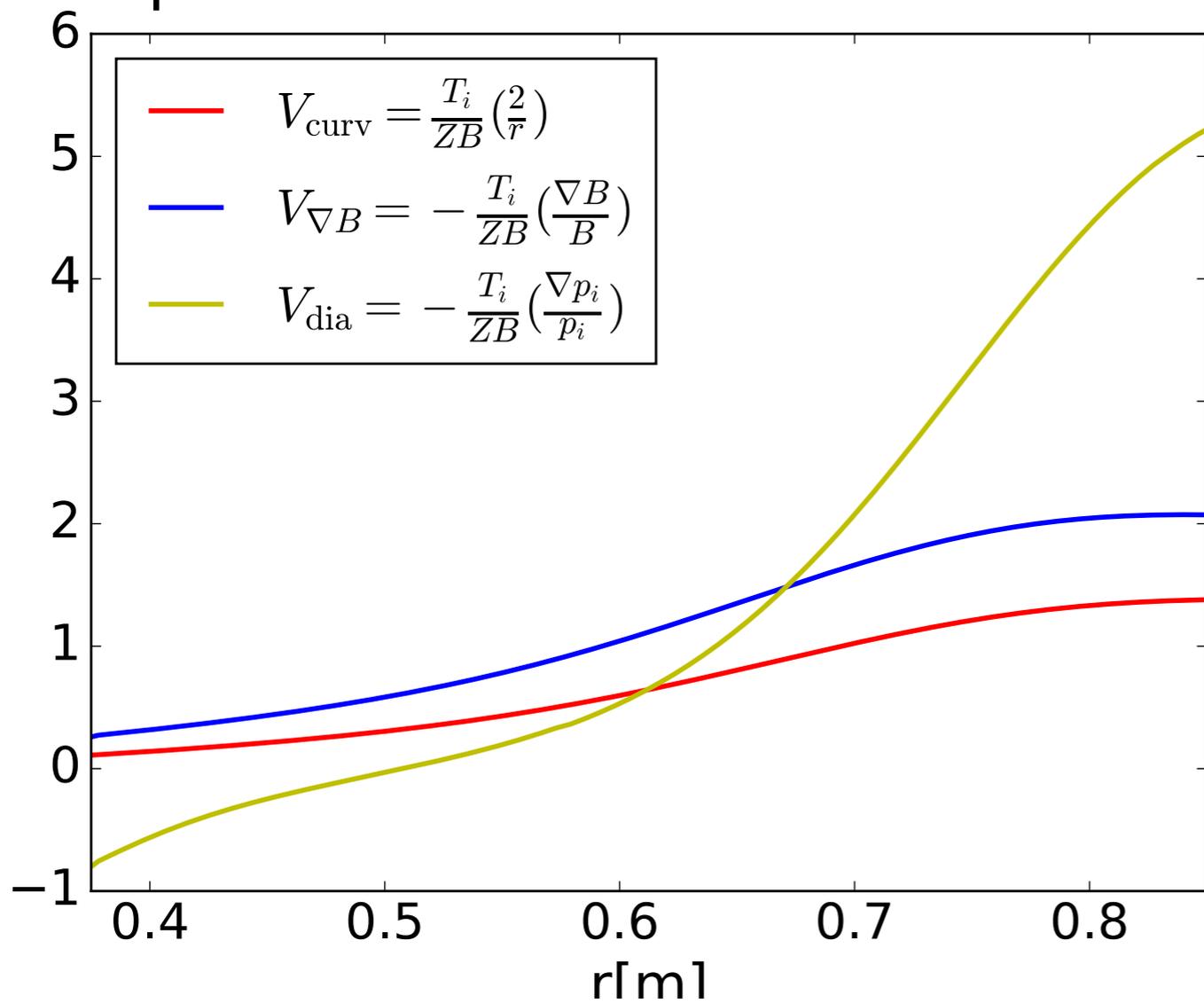
E×Bドリフトの評価-計算結果-

- ✓ 曲率ドリフト ← 真空磁場配位
- ✓ grad Bドリフト ← 真空磁場配位
- ✓ 反磁性ドリフト ← He⁺の密度分布 } + T_i

He⁺とHe²⁺の密度比 + 準中性条件

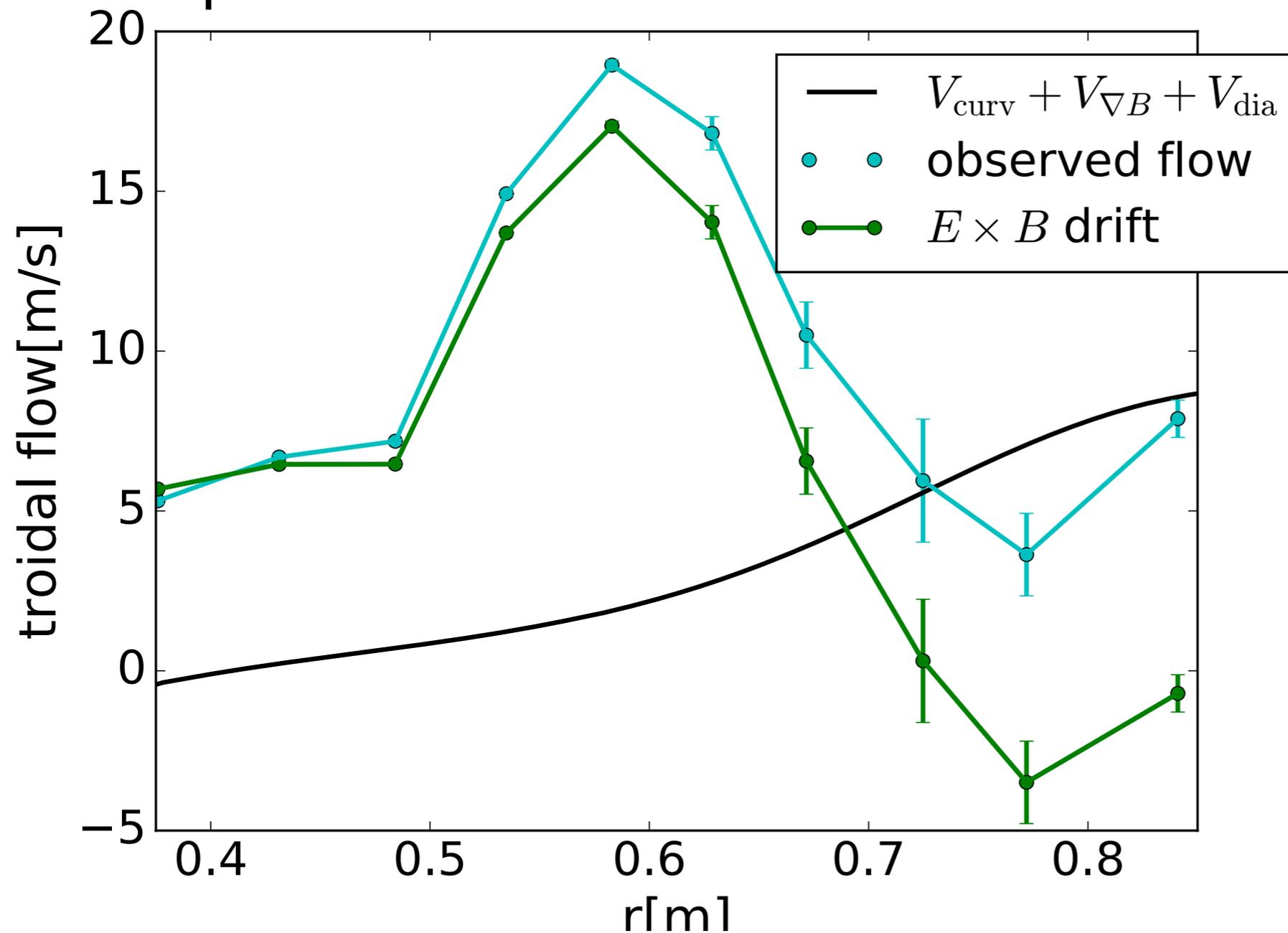
profile of three drift velocities

(レート方程式より) (干渉計からの再構成より)

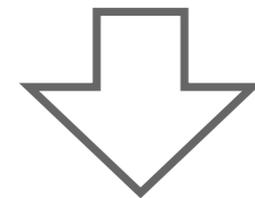


E×Bドリフトの評価-計測との比較-

profile of estimated $E \times B$ drift



3つのドリフトでは
計測した流速を説明
できない



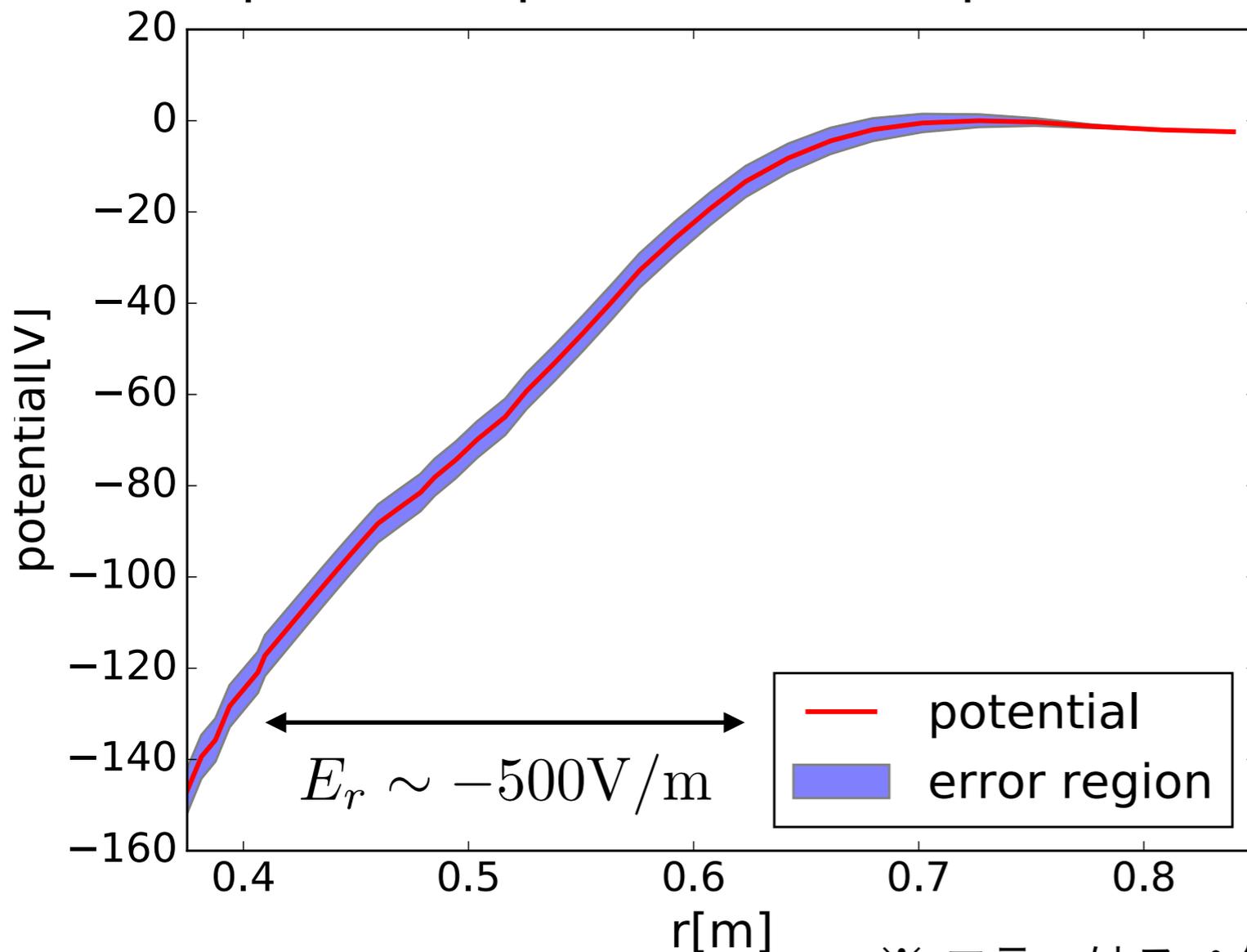
E×Bドリフト
の寄与が大きい

電位分布の評価

$$\phi = - \int E dr = \int V_E B dr$$

$$\begin{pmatrix} E = E_r(r) \\ B = B_z(r) \end{pmatrix}$$

profile of potential of He plasma



グラウンド

最も真空壁($r=1m$)に近いところを電位0Vとして計算

浮上コイルに向かって負の電位を持つ

負に帯電

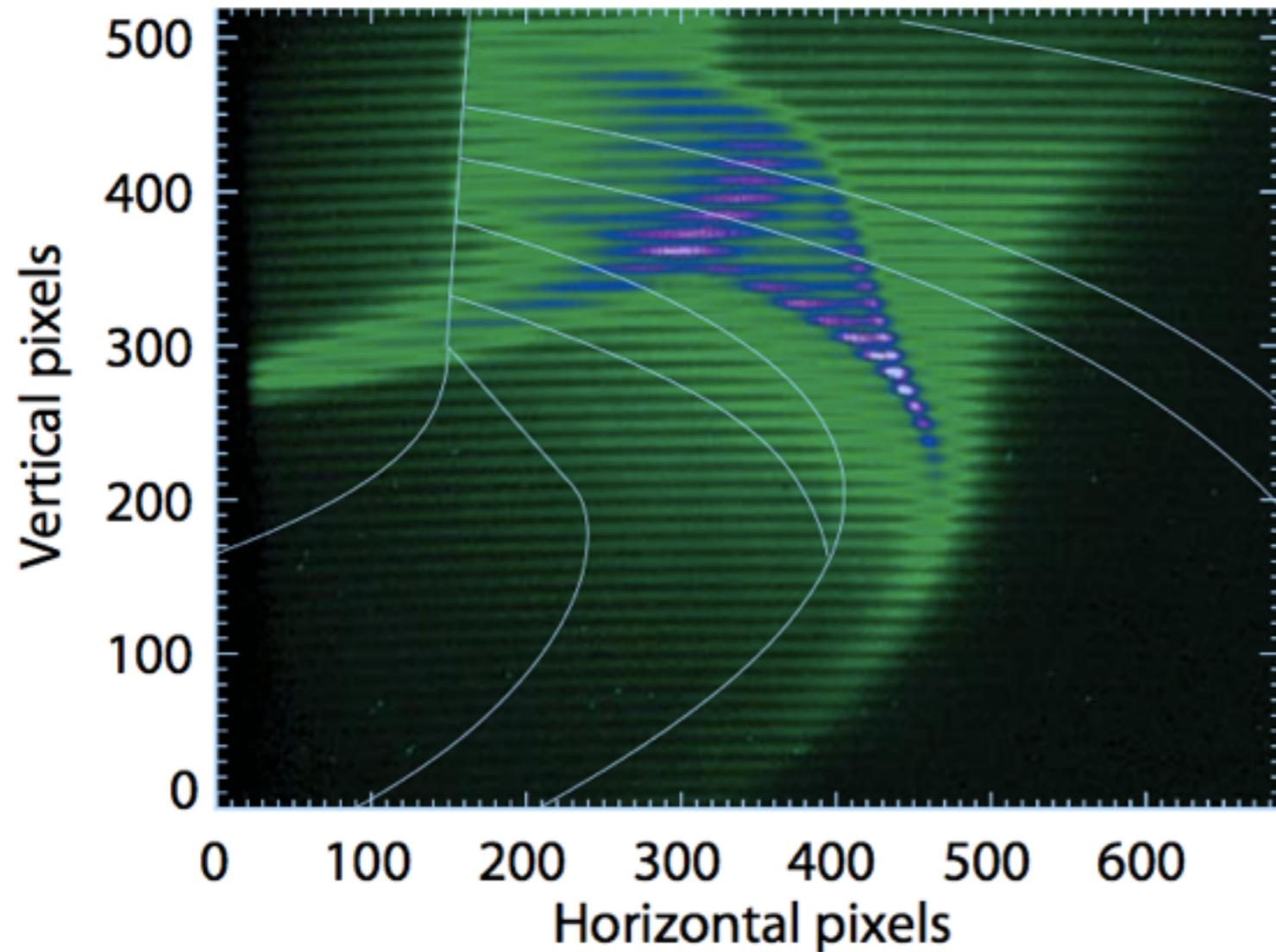
※ エラーはスペクトルに対するガウスフィッティングでのフィッティングエラーを用いて計算

考察・まとめ

- ・ 磁気圏型プラズマにおけるトロイダル流は、 **$E \times B$ ドリフトの寄与が大きい。**
- ・ $E \times B$ ドリフトから評価した**電位は浮上コイル側で負になるプロファイル**を持ち、これがプラズマが”調整”した結果と考えられる。
- ・ 他の放電条件での結果も解析することで、電位の分布を持つ構造のさらなる理解につながる。

2. Coherence Imaging法導入に向けて

Coherence Imagingとは



DIII-DでのCoherence Imaging計測^[3]

- ・ 複屈折結晶を用いて各点で自分自身と干渉させる
- ・ イメージ図として イオン温度・流速 の2次元分布を測定

干渉縞(interferogram)

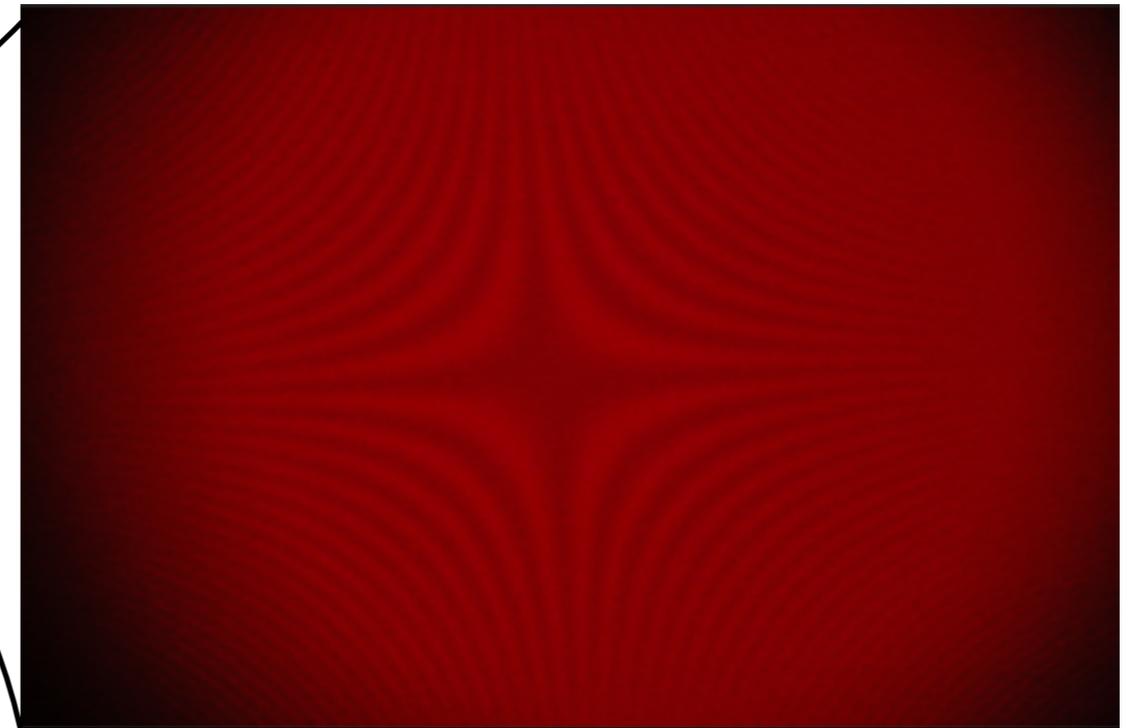
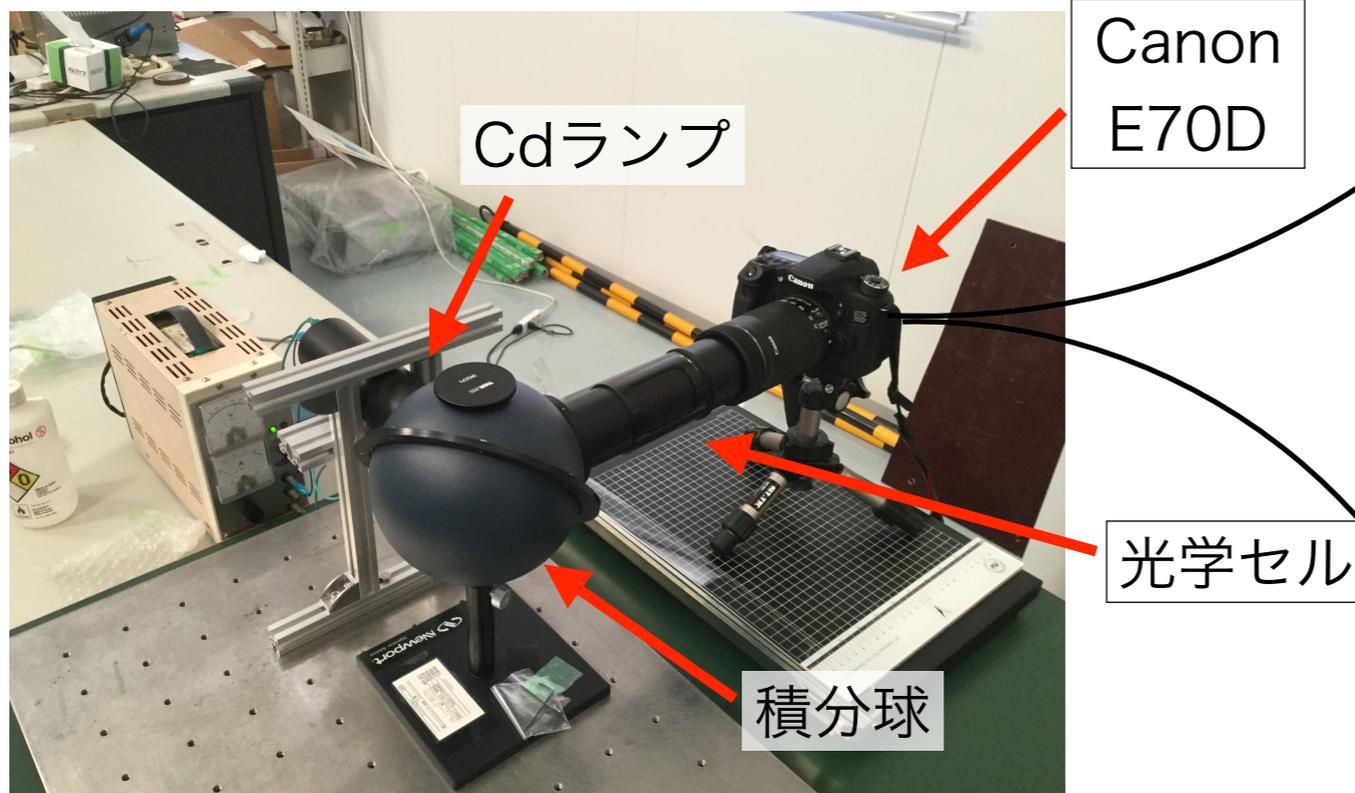
$$S = I_0(1 + \zeta_D \cos(\phi_0 + \phi_D))$$

放射率(emissivity)が視線方向で一定とすると

$$T_i = T_c \ln \zeta_D$$

$$v_D = \frac{\phi_D}{\phi_0} c$$

RT-1への導入状況

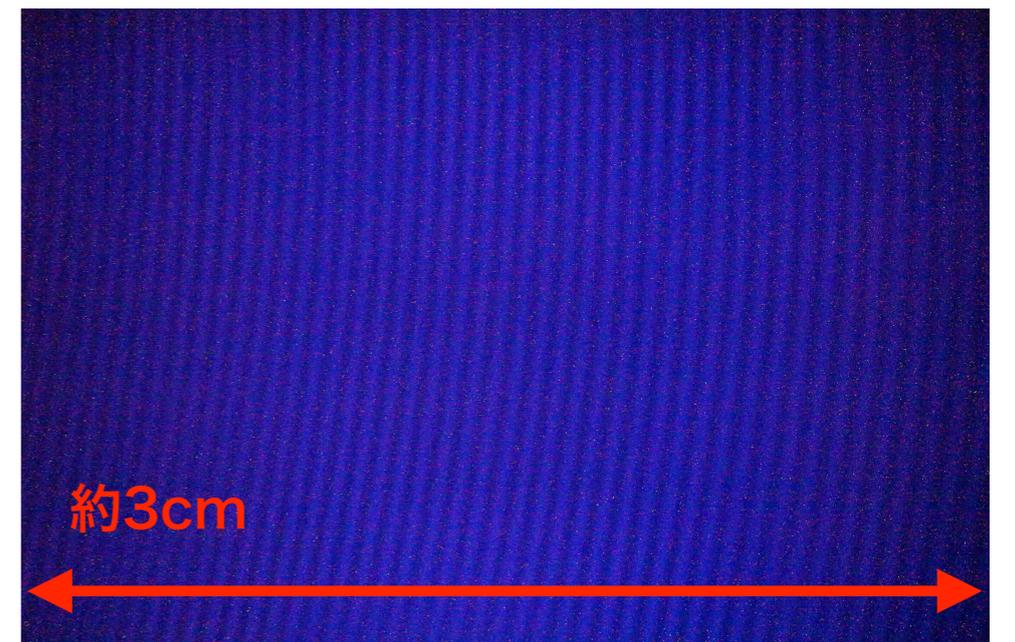


偏向板とBBOだけの場合(displacerなし)

ランプ光による予備実験の様子

残りの道のり

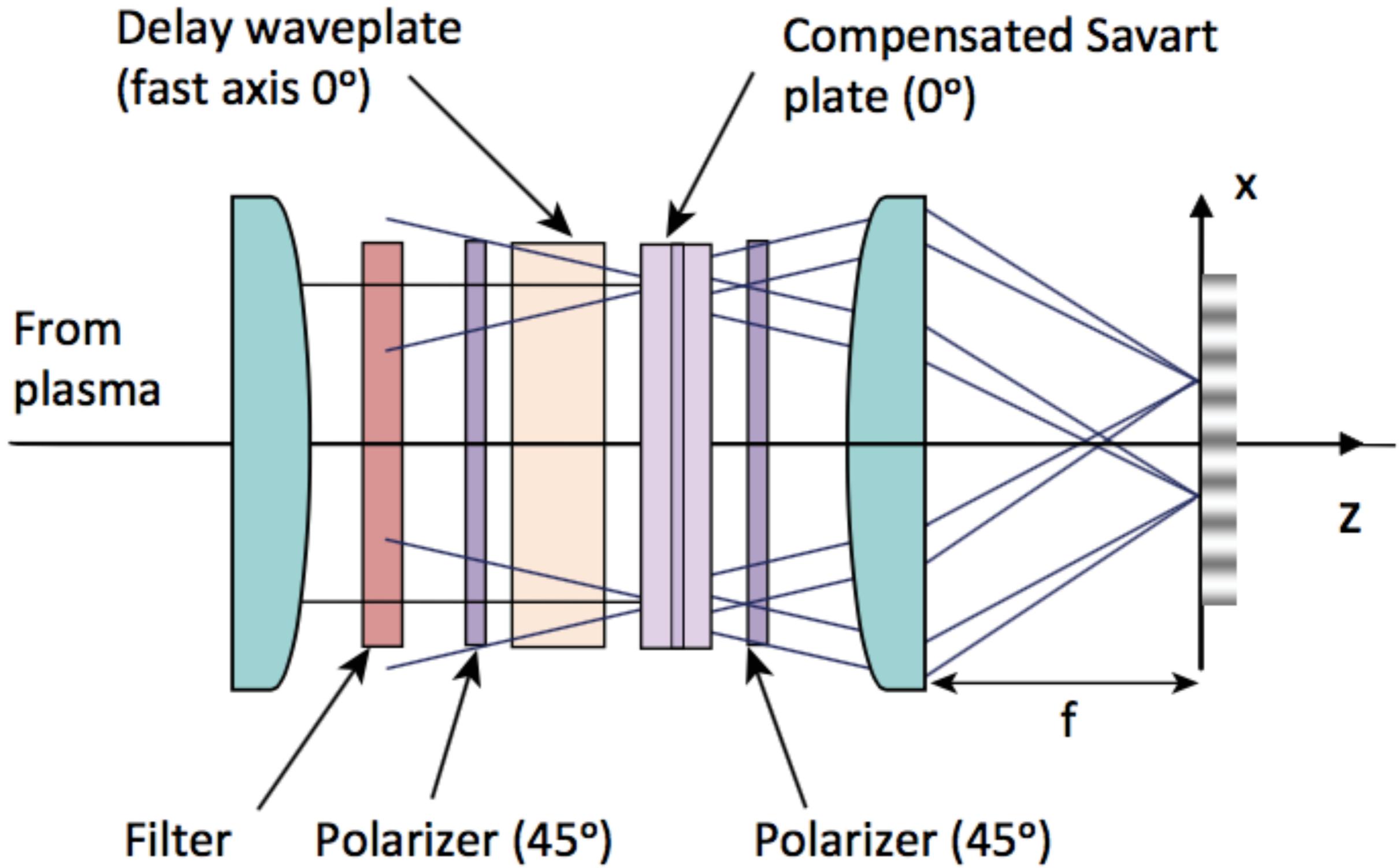
- ・ 光学セルはほぼ完成 -> レンズだけ
- ・ CCD or cMOSの購入(X線によるノイズ, 故障が不安) -> ミラーによる回避?
- ・ 解析コードの実装



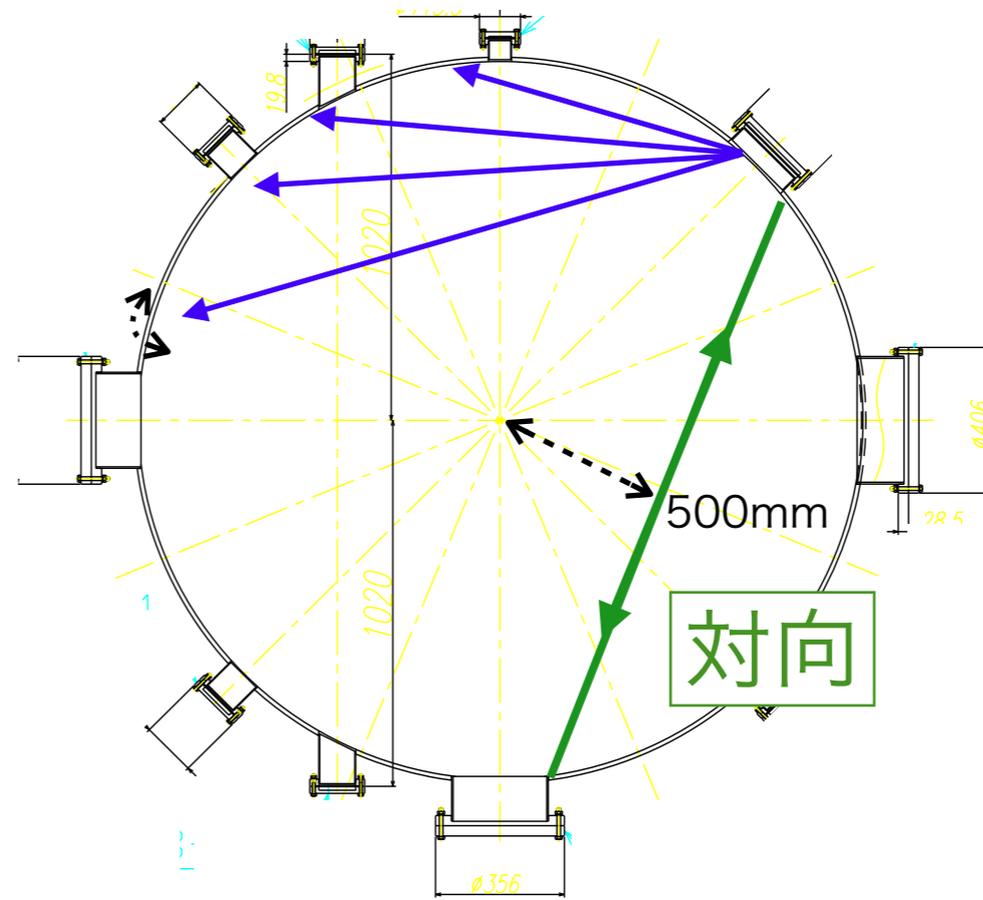
RT-1プラズマで撮影したイメージ図

考察・まとめ

- ・ 磁気圏型プラズマにおけるトロイダル流は、 **$E \times B$ ドリフトの寄与が大きい。**
- ・ $E \times B$ ドリフトから評価した**電位は浮上コイル側で負になるプロファイル**を持ち、これがプラズマが”調整”した結果と考えられる。
- ・ 他の放電条件での結果も解析することで、電位の分布を持つ構造のさらなる理解につながる。
- ・ Coherence Imaging法を用いて時間、空間の両方に関してより詳細なデータを得ることが期待できる。



解釈(内側にマイナスの電場と外側にプラスの電場がある可能性が高く、ポテンシャルのプロファイルは山形になっていることが予想。HeIV > OIIVの話も)



F値: 8.5

波長分解能 [nm]: 0.01

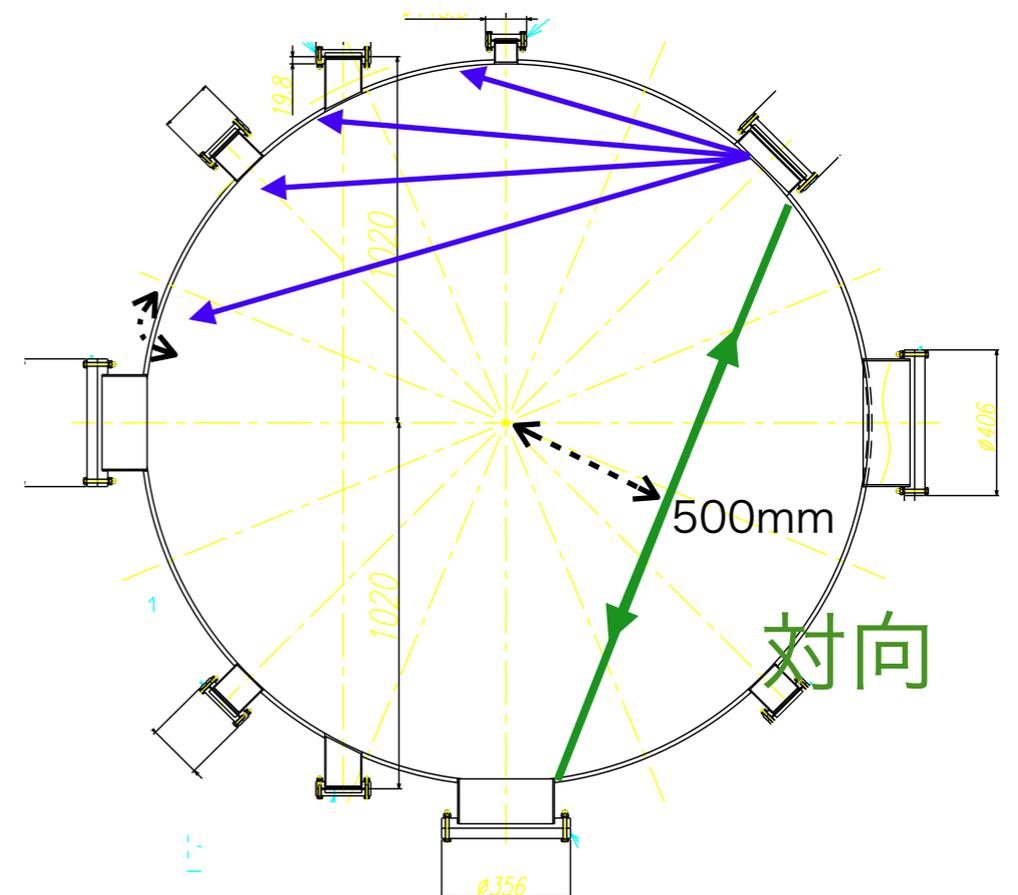
逆線分散 [nm/mm]: 0.55

有効グレーティング面積 [mm²]: 102 × 102

グレーティング刻線数 [1/mm]: 1800

焦点距離 [m]: 1

→ 1/2 pixelで3km/s程度に相当



RT-1のパラメータ領域における運動量緩和時間

・ 運動量(速度)緩和時間^[1]

(test particles)/(field particles)

$$\tau_{e/e} \sim 85\mu\text{sec} < \tau_{e/i} > 1\text{sec}$$

$$\tau_{\alpha/e} \sim 0.15\text{sec} \quad (\alpha = \text{CIII}) > \tau_{\alpha/i} \sim 14\text{msec} \quad (\alpha = \text{CIII})$$

$$\tau_{\alpha/e} \sim 0.20\text{sec} \quad (\alpha = \text{HeII}) > \tau_{\alpha/i} \sim 12\text{msec} \quad (\alpha = \text{HeII})$$

(※放電時間: 1 sec)

不純物(CIIIなど)のフローはイオンの
フローと一致するように緩和する
=> イオンのトロイダル流に注目する

条件

$$i = \text{HeII}$$

$$n_e = n_i = 5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$$

$$T_e = 70\text{eV}, \quad T_i = 15\text{eV}$$

$$v_e = 10\text{km/sec}, \quad v_\alpha = 1000\text{km/sec}$$

(※入射する粒子の熱速度を含んだ速度)

(イオンは低温電子と弱くカップリング)

[1] B. A. Trubnikov, Reviews of plasma physics, Vol. 1 (1965)