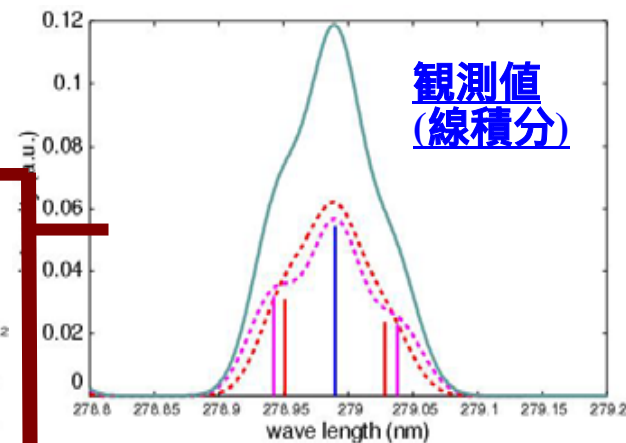
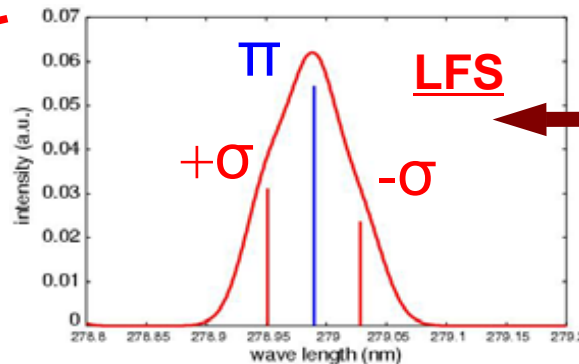
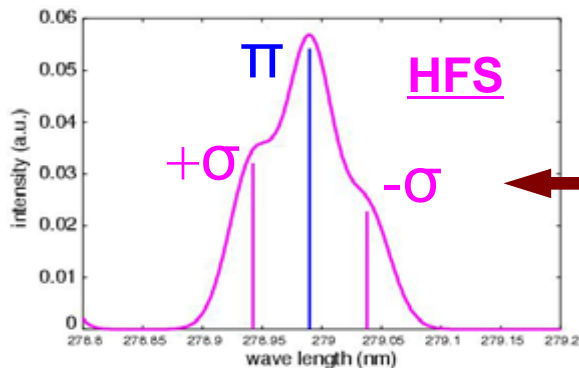
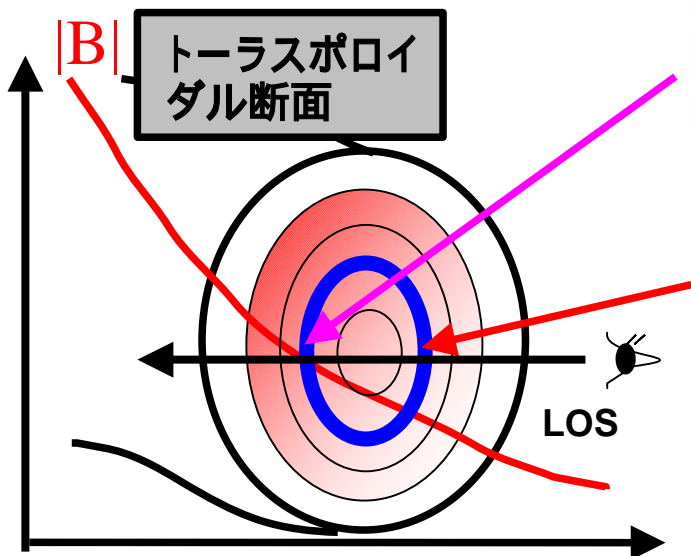


Zeeman効果を利用した TRIAM-1Mトカマクにおける発光の局所計測

四電 泰一, 門 信一郎¹, 飯田 洋平, 田中 知 (東京大学大学院工学系研究科, ¹東京大学高温プラズマ研究センター)

磁場強度が大きく、かつ観測視線方向に磁場強度が勾配を持つような条件下で受動的な分光計測から、プラズマの局所計測を行うことが可能。



Zeemanプロファイル
の違いを利用して
スペクトルを分離

発光位置間の磁場強度差が大きいことが必要
Zeemanシフトに比べDoppler拡がり小さいことが必要

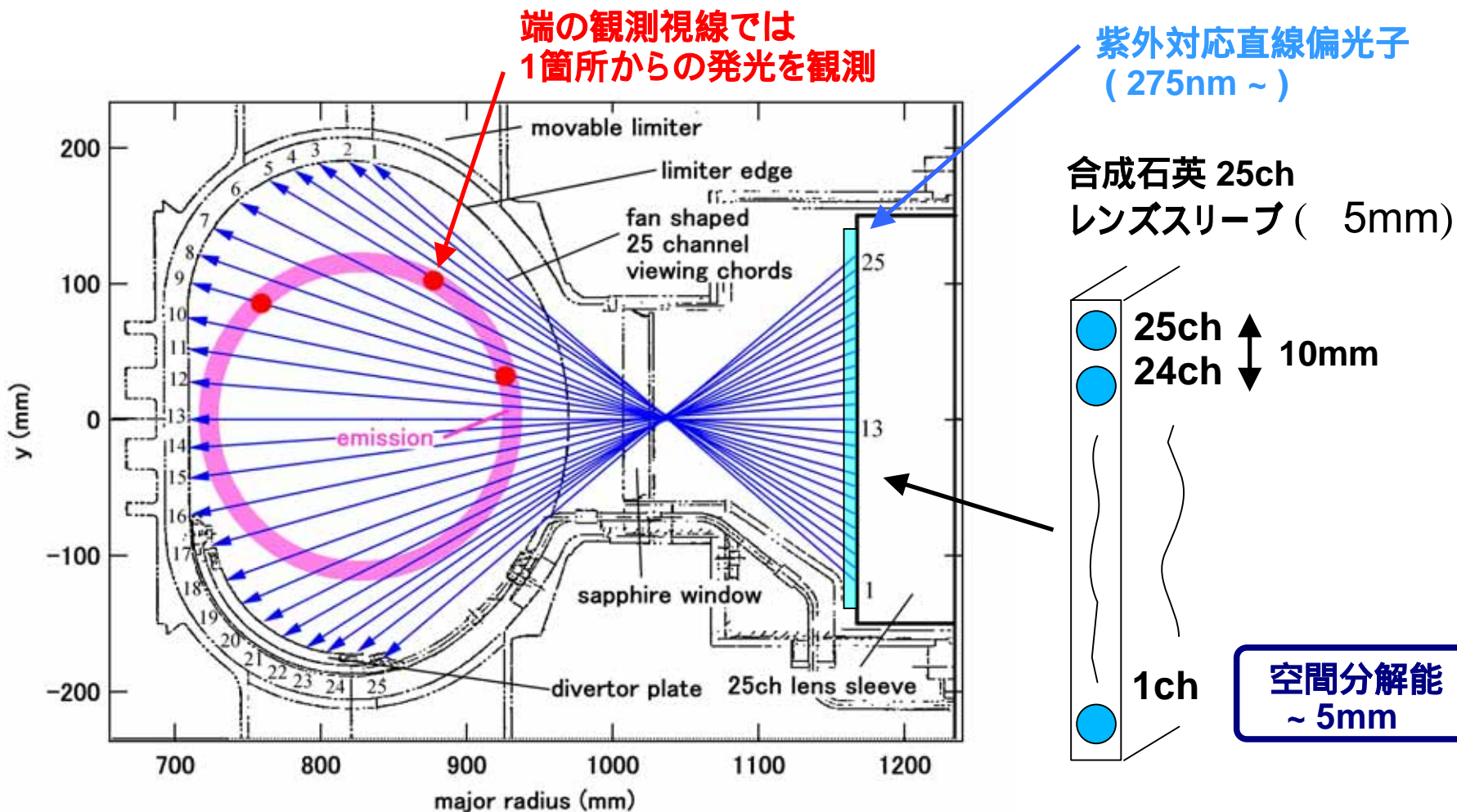
→ 周辺領域、炉心領域における
局所的な温度や流れの速度を計測する。

既存の研究例

- DIII-D: R.Isler, et al. (1997, 1998).
- Alcator C-Mod: J.Weaver, et al. (2001).
- LHD: M.Goto, et al. (2002).
- ASDEX: T.Putterich, et al. (2003).



TRIAM-1M 25ch poloidal 観測視線

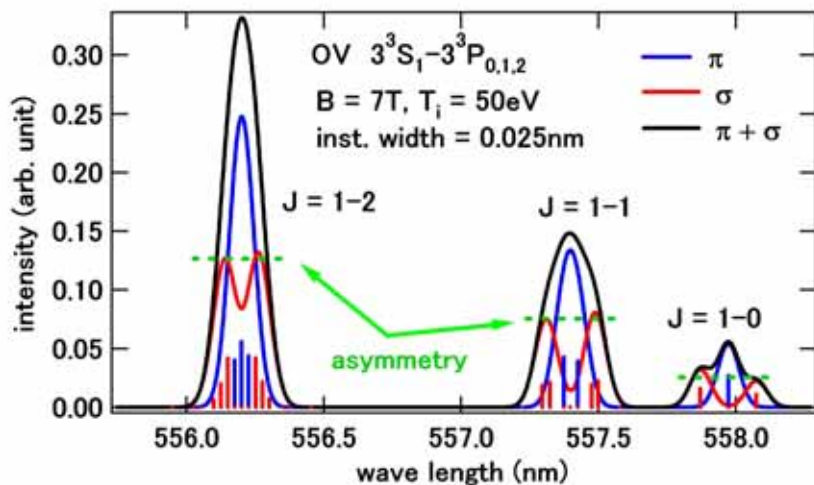


光ファイバ : 25本バンドル 12 m 伝送 (core 230 μm , clad 250 μm)
 分光器 : Acton Research AM-510 ($f = 1.0$ m, $F/8.7$, 1800 G/mm)
 CCD : Andor DU440-BU2 (Back Illumination, 13.5x13.5 μm^2 , 2048x512 pixels)

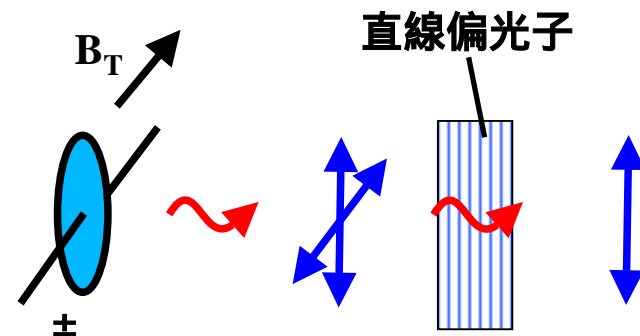


計算によるスペクトル形状の評価と 光の分離

摂動計算コードを作成し、Zeeman効果を受けたスペクトル形状の評価を行う。



OVスペクトル (計算結果)



Zeemanシフトの大きさに対するDoppler
 拡がりの大きさを小さくするため、**直線偏光子**
 を用いてスペクトルの **成分のみ**を**選択的**
 に計測する。

イオン・中性粒子種に応じて
 Zeeman効果の度合いが異なる

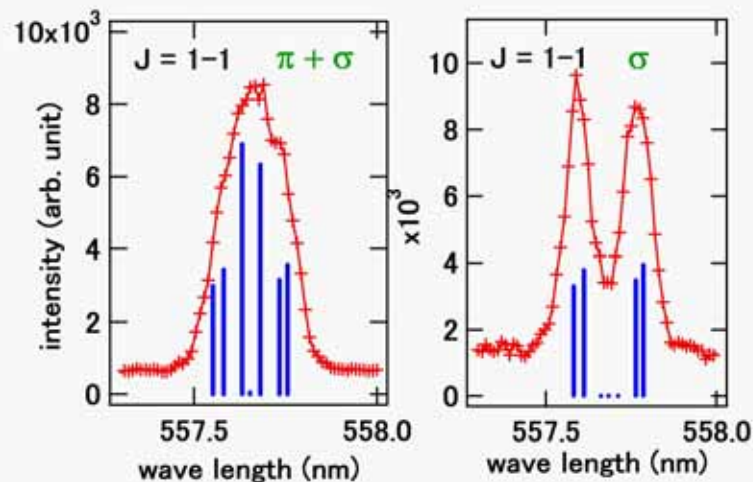
例えば、 $B = 7T$ では

H : Paschen-Back極限

O : 異常Zeeman

C : 中間的な状態

計算コードにより**統一**的にZeeman
 効果を取り扱うことが**可能**。



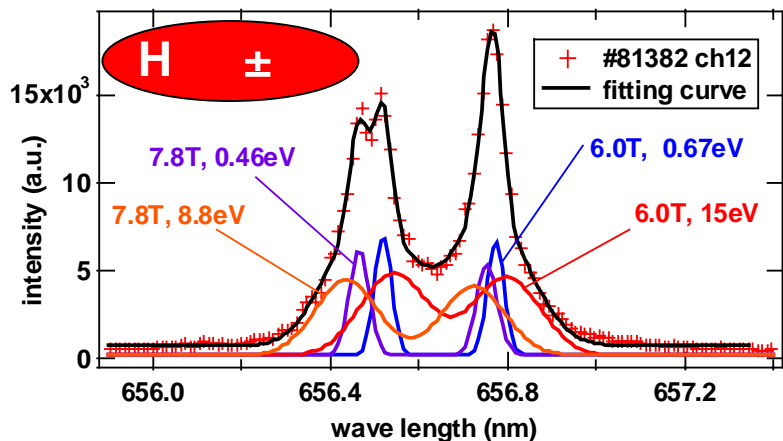


これまでの研究成果

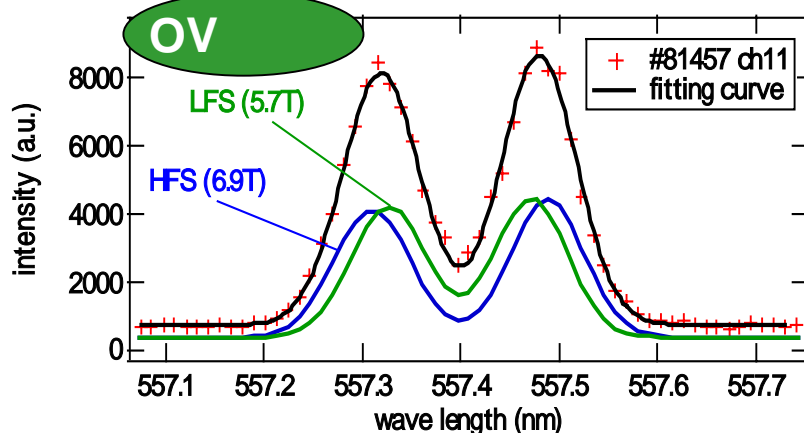
検出器としてICCDを使用
(P.I. 製 1024 × 256 pixel, 26 × 26 μm²)

問題点

MCPのアンプノイズによりS/N比が低下
波長分解能の上限がMCPによって決ま

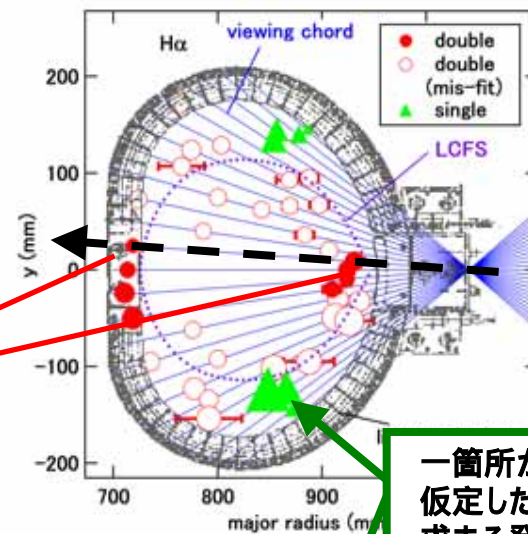


周辺領域の中性原子に対する適用 (B=7.0T)

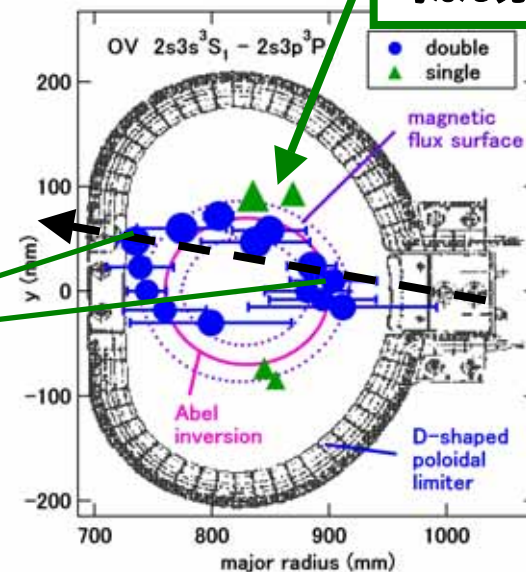


炉心近傍の多価イオンに対する適用 (B=7.0T)

T. Shikama, S. Kado, H. Zushi, A. Iwamae,
and S. Tanaka : Phys. Plasmas 11 (2004) 4701.



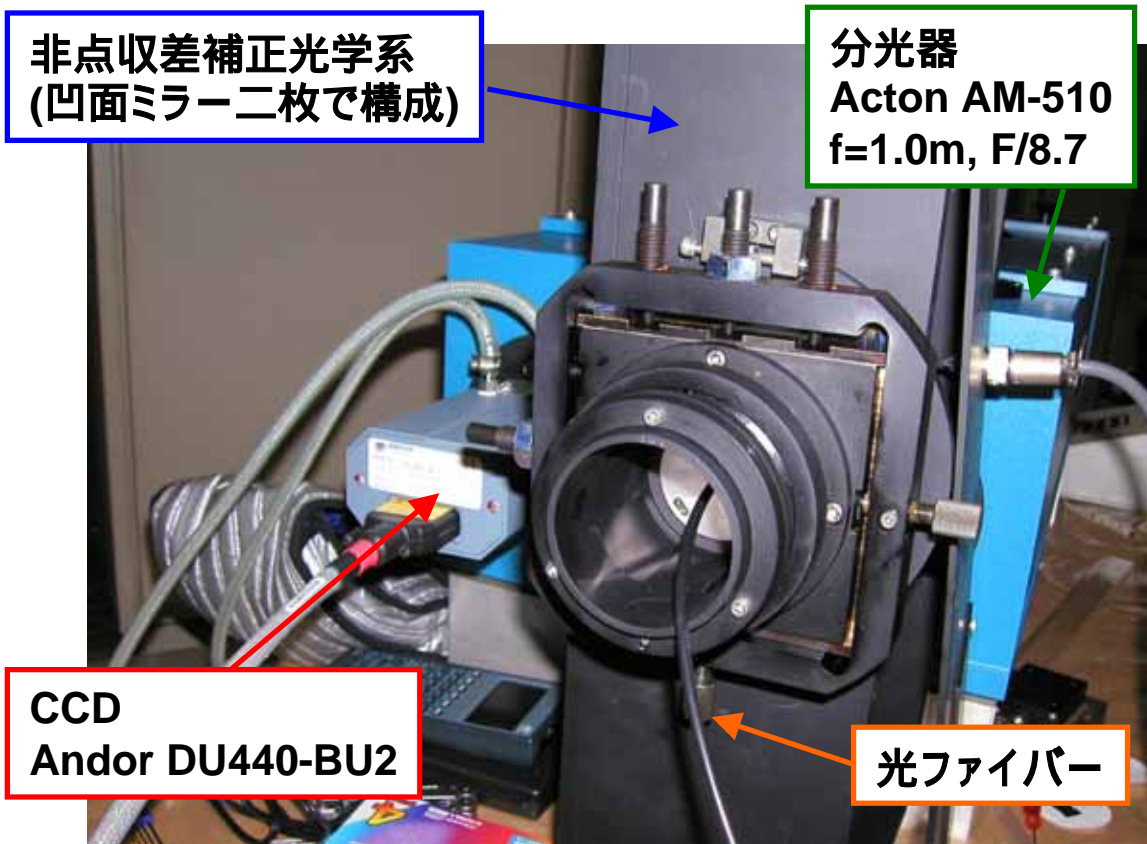
一箇所からの発光
仮定した場合に
求まる発光位置





背面照射型冷却CCD + 非点収差補正光学系

計測精度を向上させるため、背面照射型冷却CCDの導入を行った。



P.I. ICCD-1024-MG-E/I

$26 \times 26 \mu\text{m}^2$

1024 × 256 pixel

入り口ファイバー位置で
非点収差を補正



Andor DU440-BU2
+ 非点収差補正光学系

$13.5 \times 13.5 \mu\text{m}^2$

2048 × 512 pixel

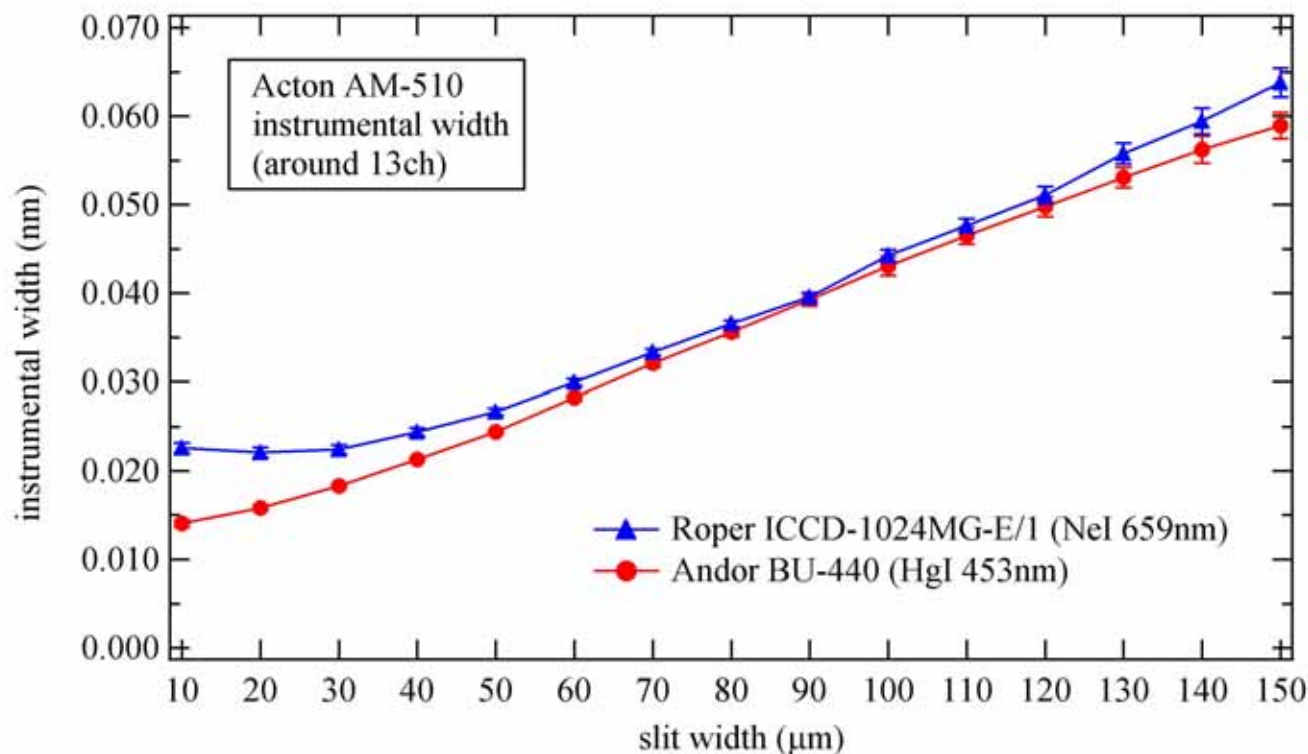
- ✓ 背面照射型で高量子効率
- ✓ 補正光学系により、光量が増加
- ✓ 素子サイズが小さいため、逆線分散が低減



装置関数

ICCD (P.I. ICCD-1024MG-E/I) と背面照射型冷却CCD (Andor DU440-BU2) との比較

スリット幅 $\sim 40 \mu\text{m}$ 以下では、MCP分解能の制限により、ICCDでは装置関数がそれ以上良くなるしない。



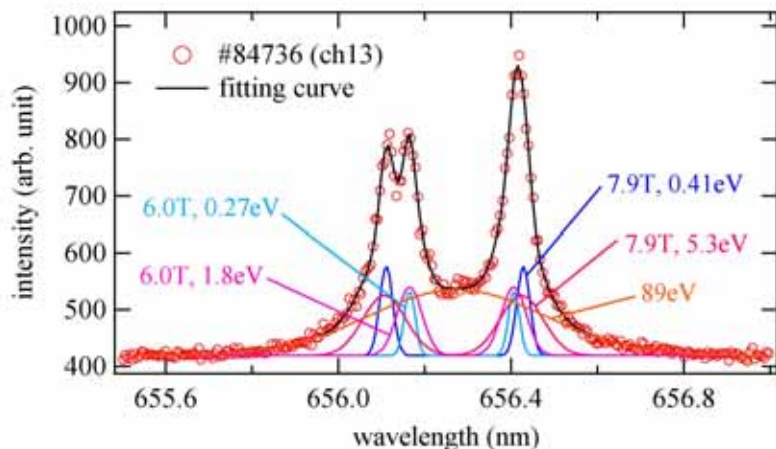


Poloidal 断面発光分布計測 (H 線)

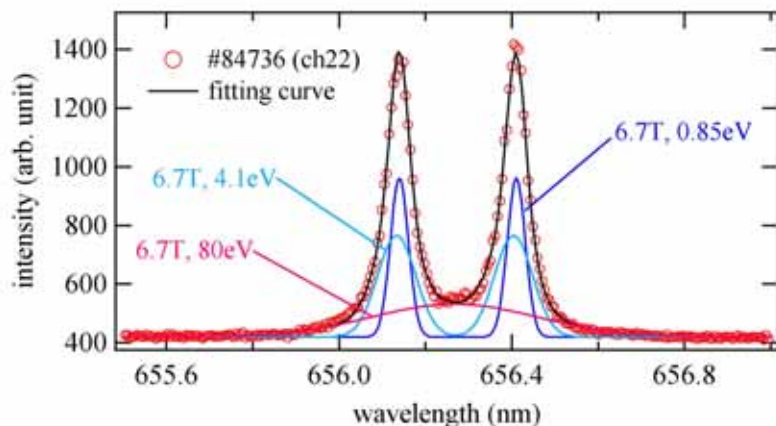
収差補正光学系 + 背面照射型冷却CCD
 (800 msec 露光) スリット幅 20 μm
 disp = 0.00546 nm/pixel (@ 656nm)

B = 7.0T
 8.2GHz LHCD放電

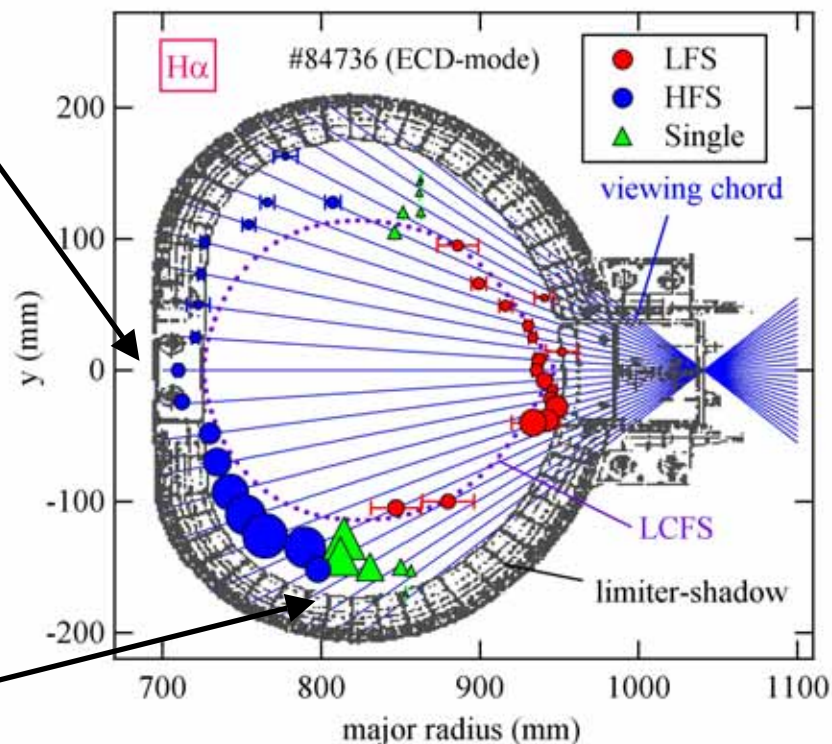
cold(1eV以下), warm(数eV), hot (~数十eV)
 の三温度成分でフィッティング可能。



中心付近 (2箇所からの発光)



周辺領域 (1箇所からの発光)



水素原子低温成分からのH 線発光分布

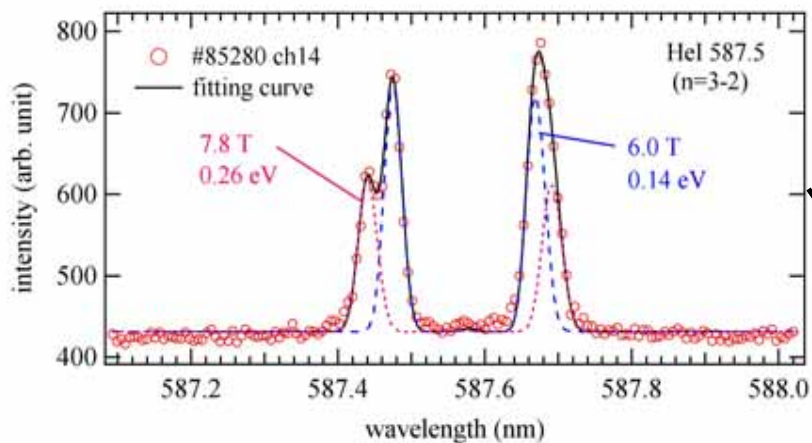
周辺の観測視線に対しても計測精度が大幅に向上



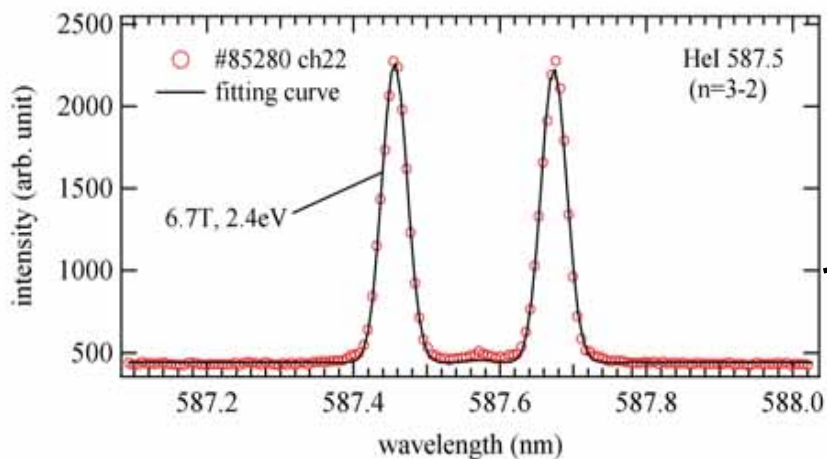
Poloidal 断面発光分布計測 (HeI線)

(2sec 露光) スリット幅 20 μm

disp = 0.00583 nm/pixel (@ 587nm)



中心付近 (2箇所からの発光)

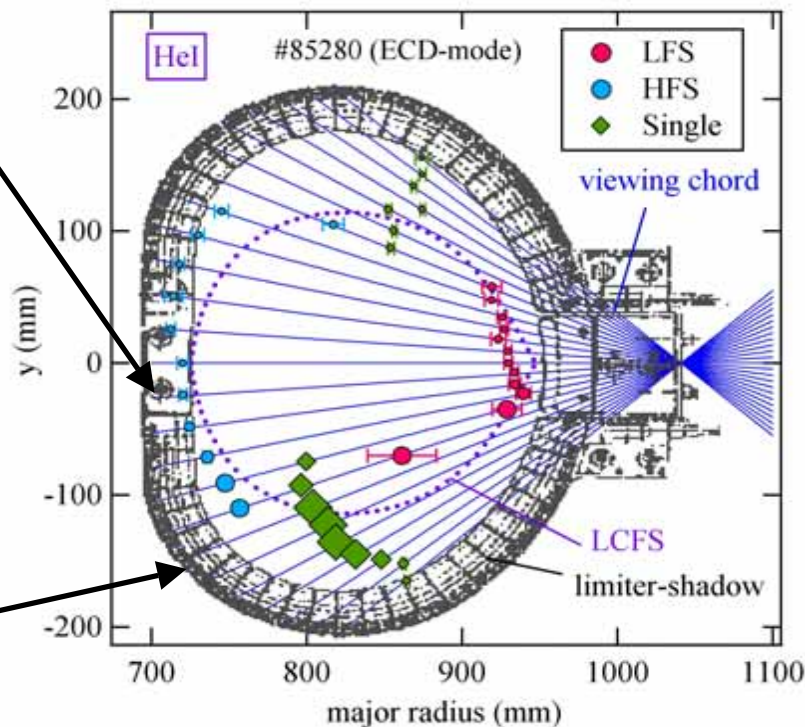


周辺領域 (1箇所からの発光)

B = 7.0 T

8.2GHz LHCD放電 + He puff

一温度成分でフィッティング可能



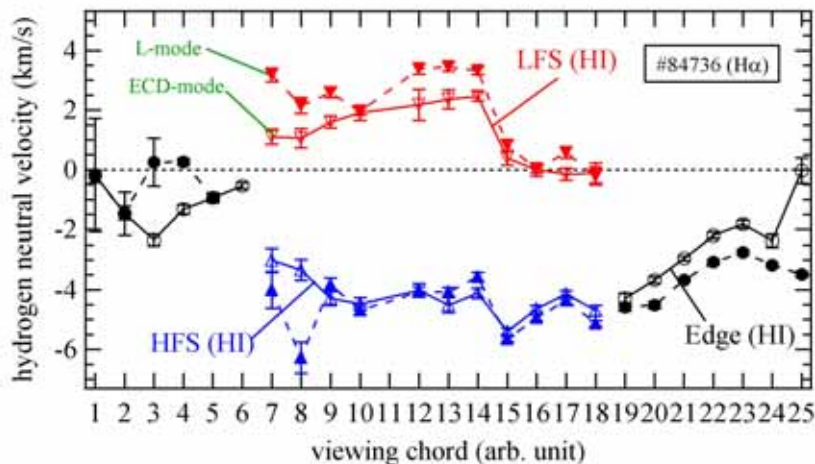
ヘリウム原子からの Hel(n=3-2) 線発光分布

H 線と同様にLCFSに沿って発光が存在

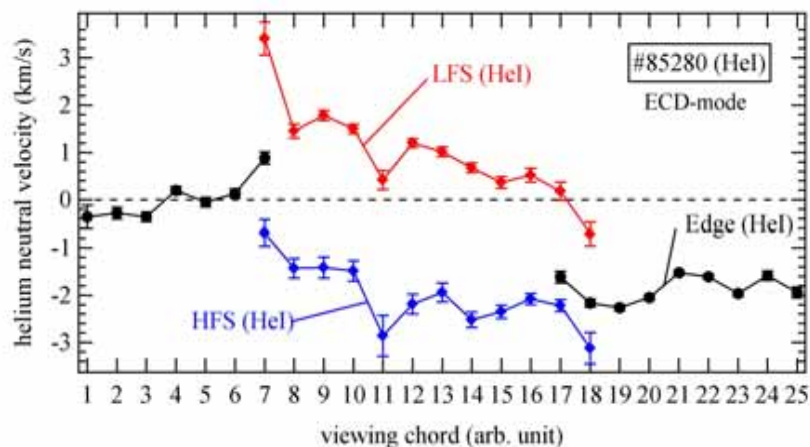


Poloidal 方向への流れ (水素, ヘリウム原子)

分離したスペクトルのDopplerシフトから流れを評価

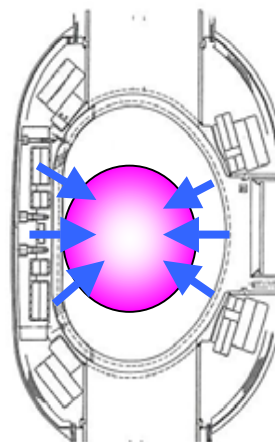


水素原子低温成分 ($|v_{HFS} - v_{LFS}| = \sim 6 \text{ km/s}$)



ヘリウム原子 ($|v_{HFS} - v_{LFS}| = \sim 3 \text{ km/s}$)

*Heは波長リファレンスの欠如により流速の絶対値は不正確



壁から炉心
へと向かう流れ

水素、ヘリウムで共に
観測される。
流速が質量に反比例する。

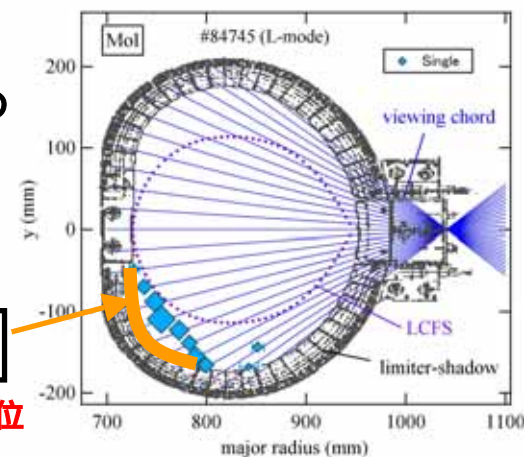
➡ p_0 により駆動されていると推測される。

$$m_0 \frac{dv_0}{dt} = \underbrace{\nabla p_0}_{\text{周辺 炉心}} + \underbrace{f_{friction}}_{\text{炉心 周辺}}$$

上部・下部観測
視線での流速の
違いは、
ダイバータ板
の影響？

ダイバータ板

* 磁場はリミター配位

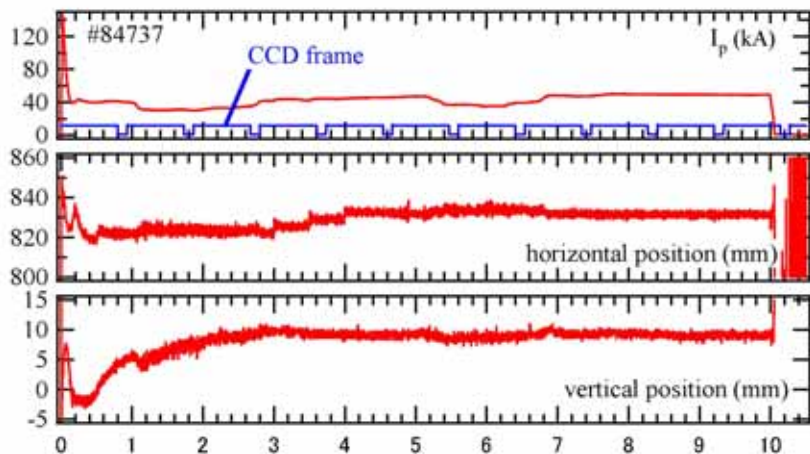


Mol 386.4nm (${}^7S_3 - {}^7P_3$) 発光分布



H 線発光位置時間変化の計測 (中心付近)

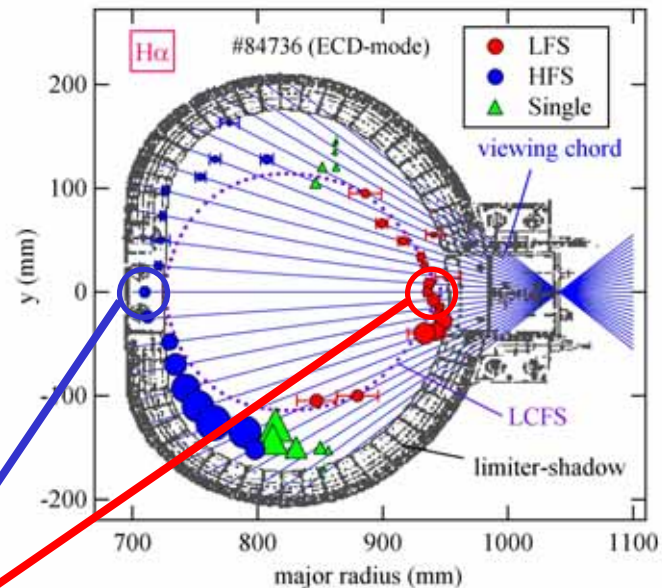
ショットデータ (B=7.0T, 8.2GHz LHCD)



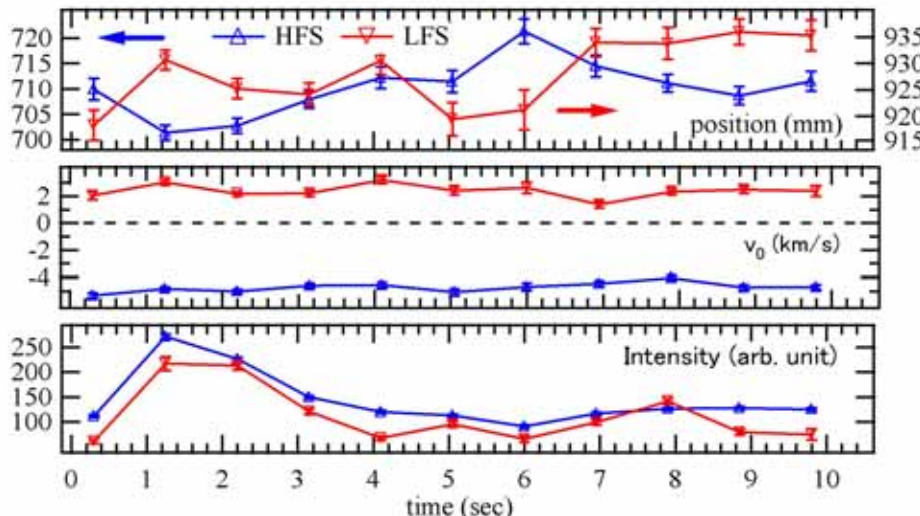
プラズマ電流

水平位置

垂直位置



Ch13 (プラズマ中心付近)



発光位置

プラズマ電流に同期しているように見えるが、詳細は要検討。

電流 発光位置が外側に動く
電流 発光位置が内側に動く

流速

プラズマパラメータに依存した変化は無い。
P.L.と観測位置との間に距離が存在するため、ローカルな p はあまり変わらない?

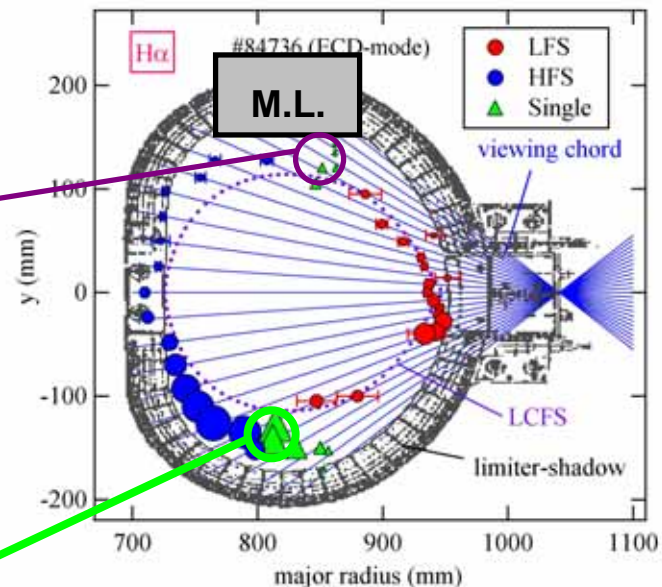
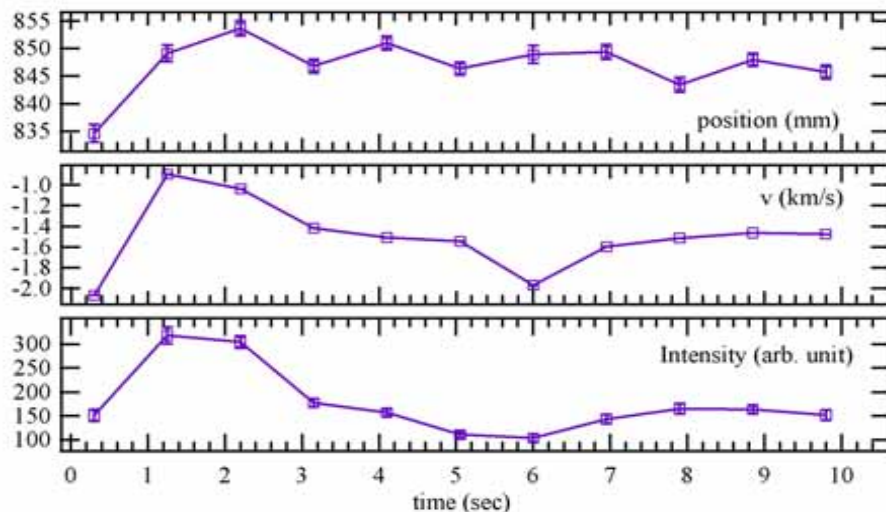
発光強度

PMTによる計測値と定性的に一致。



H 線発光位置時間変化の計測 (周辺領域)

Ch5 (M.L.近傍)

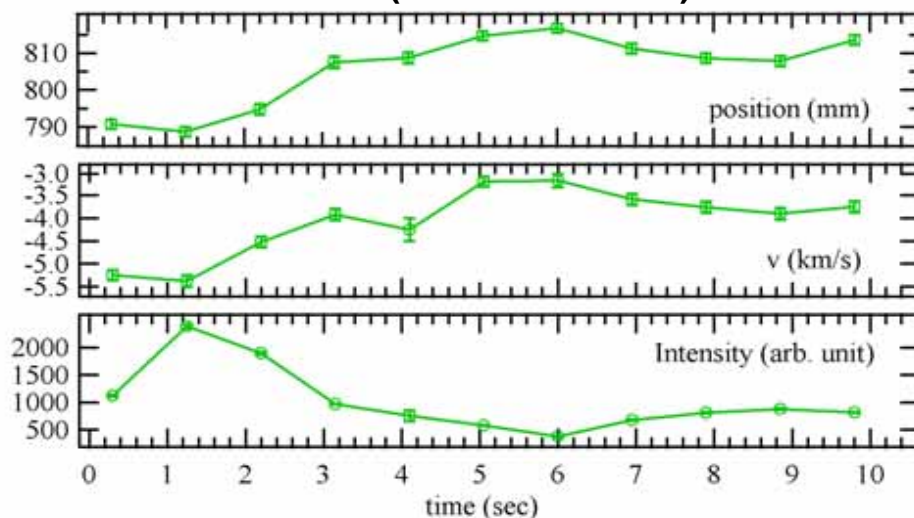


Ch5 (M.L.近傍)

発光位置、流速とプラズマパラメータとの相関は無い。

M.L.との距離が遠いため、ローカルな p はあまり変わらない。

Ch22 (ダイバータ板近傍)



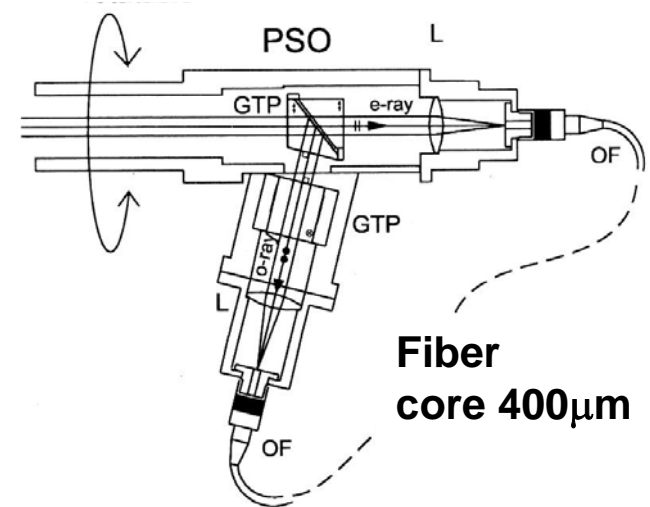
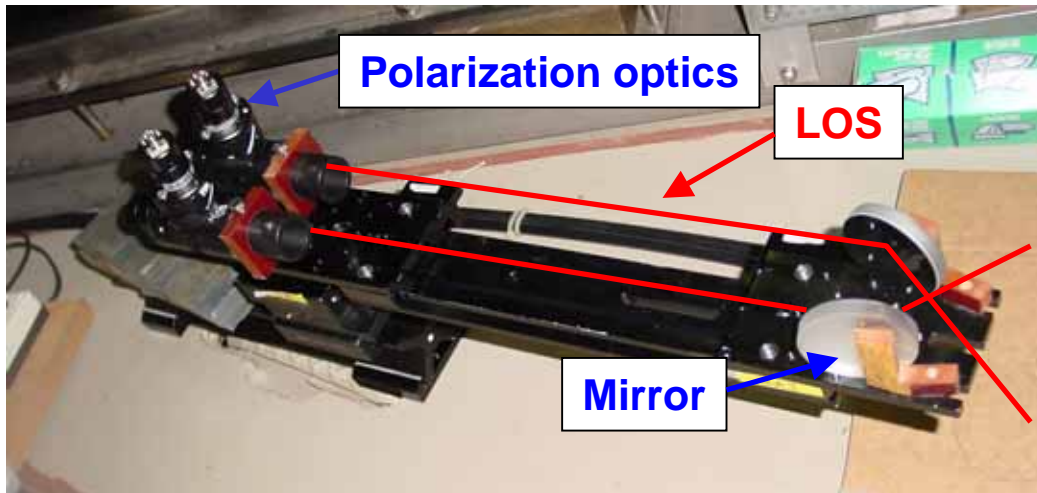
Ch22 (ダイバータ板近傍)

発光位置、流速と磁気軸水平位置が同期している。

ローカルに存在するダイバータ板の影響を受けている。

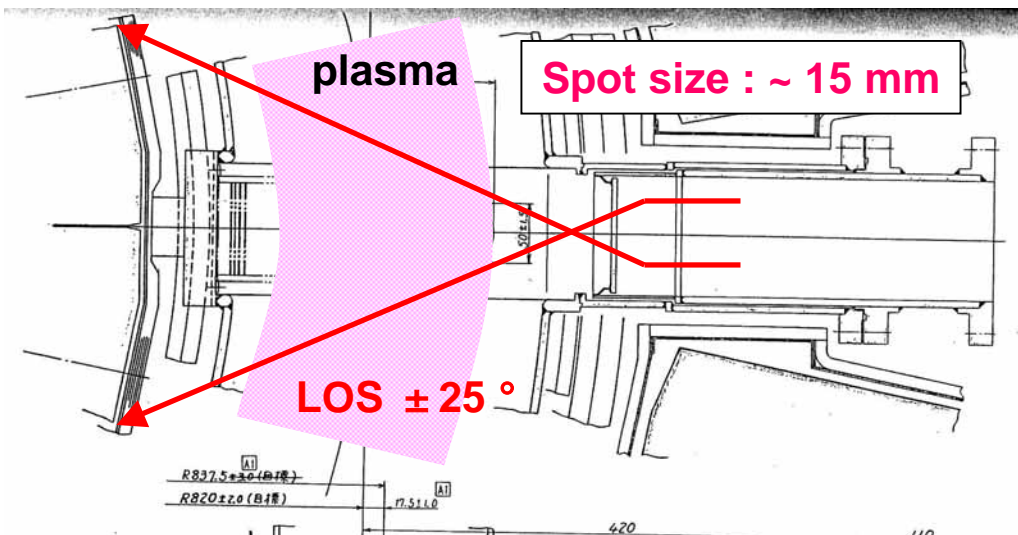


Toroidal方向への計測



L: Lens, GTP: Glan-Taylor Prism

[A. Iwamae, et al.:Phys. Plasmas in press.]



TRIAM-1M toroidal section (Top View)

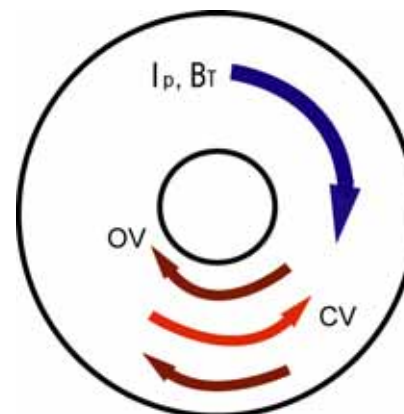
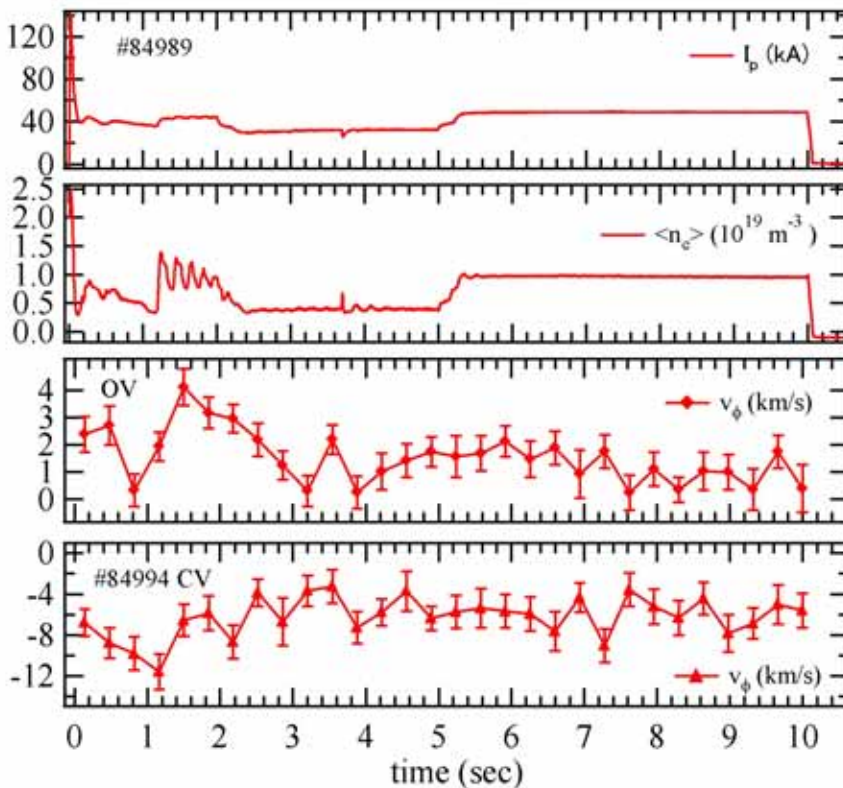
光と 光を分離し、磁場の影響を受けない 光のDopplerシフトからToroidal方向への流れの計測を行う。



OV, CV不純物イオン Toroidal 流速

分離した 光のDopplerシフトからToroidal方向の流れを計測

B=7.0T, 8.2GHz LHCD



トーラスを上から見た
Toroidal磁場・電流
・流れの方向

OV : ~ 50 eV, $\approx 0.7 \sim 0.8$
co-current方向へ $0 \sim 4$ km/s の流速

CV : ~ 100 eV, $< \sim 0.7$
counter-current 方向へ $4 \sim 12$ km/s の流速

周辺で電場の方向が逆転しているために
流れの向きが逆転している？

M.G.Bell : Nucl. Fusion 19, 33 (1979).



他のイオン等についても現在解析を行っている。