

# プラズマに影響を与える中性粒子の挙動とその計測システム開発

荻原公平<sup>1</sup>, 江藤修三<sup>1</sup>, 荒巻光利<sup>2</sup>, 杉原拓実<sup>3</sup>,  
吉村信次<sup>4</sup>, 田中雅慶<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九大総理工, <sup>2</sup>名大工, <sup>3</sup>九大工, <sup>4</sup>核融合研

- 背景

- プラズマ中における中性粒子の挙動
- 反 $E \times B$ 方向に回転する渦

- 中性粒子の流れ計測法 (LIF法)

- 実験

- アルゴン準安定原子の速度分布関数計測
- 径方向・周方向流れ計測

- まとめ

- 今後の展望

# 中性粒子とプラズマが共存する系



- Neutral depletionによるプラズマ密度の減少
  - A. Fruchtman and G. Makrinich, Phys. Rev. Lett. **95**, 115002 (2005).
- 中性粒子の流れによるblobの輸送
  - S. I. Krasheninnikov *et al.*, Phys. Plasmas **10**, 3020 (2003).
- 熱圏・電離圏における諸現象 (スーパーローテーション, プラズマバブル, 伝搬性電離圏擾乱)
  - H. Rishbeth, Nature **229**, 333 (1971).
  - M. Ishii *et al.*, The Japan Geoscience Union Meeting 2006, U054-059 (2006)

中性粒子の流れの計測

→ 中性粒子-プラズマ共存系へのより深い理解

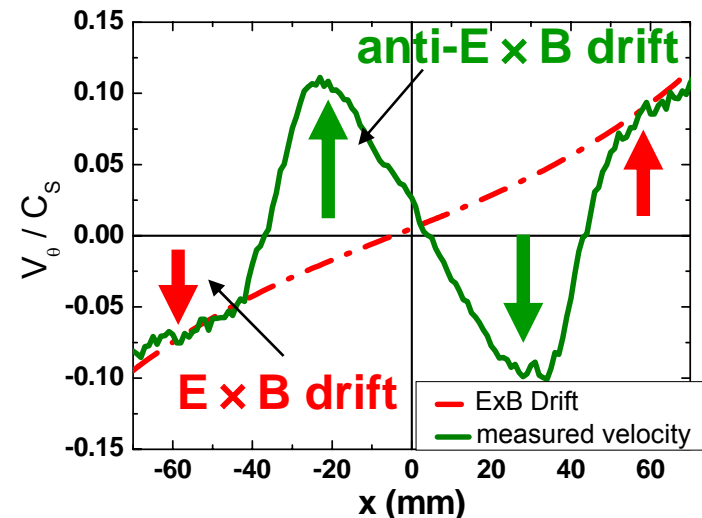
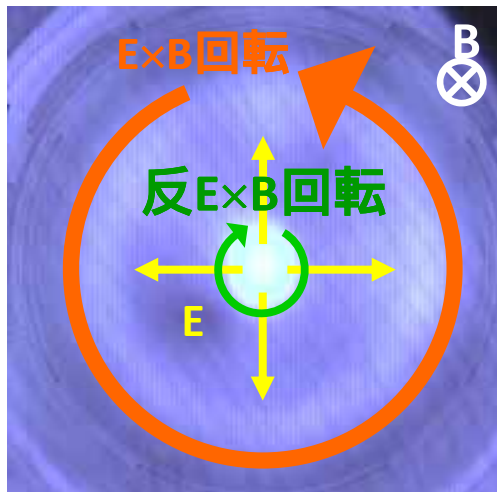
# 反 $E \times B$ 方向に回転するプラズマの渦

磁化プラズマ：電場による力が支配的

→ プラズマの流れ： $E \times B$ ドリフト

$$mn \frac{du}{dt} = \underbrace{qn(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})}_{\text{Electric force}} - \underbrace{\nabla P}_{\text{Pressure term}} - \underbrace{\sum mnv(\mathbf{u} - \mathbf{u}_n)}_{\text{Collision term}} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{u}_\perp \approx \frac{\mathbf{E}_\perp \times \mathbf{B}}{B^2}$$

$E \times B$ ドリフトと逆方向に回転する渦の観測 (反 $E \times B$ 渦) [1]  
電場以外の力が渦を駆動



[1] A. Okamoto, et al., Phys. Plasmas **10**, 2211 (2003).

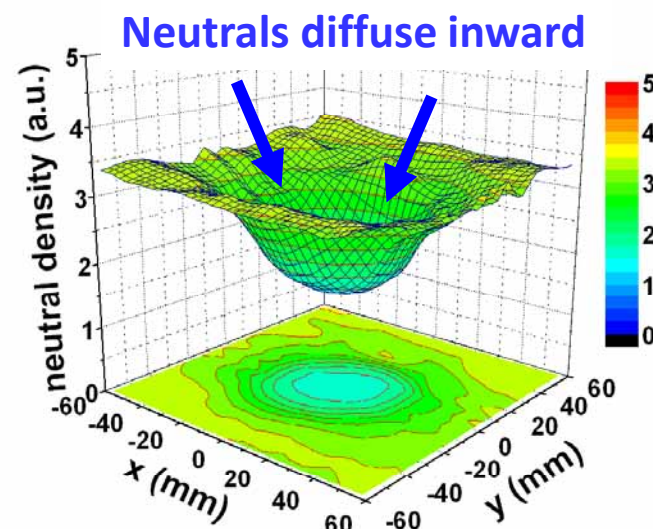
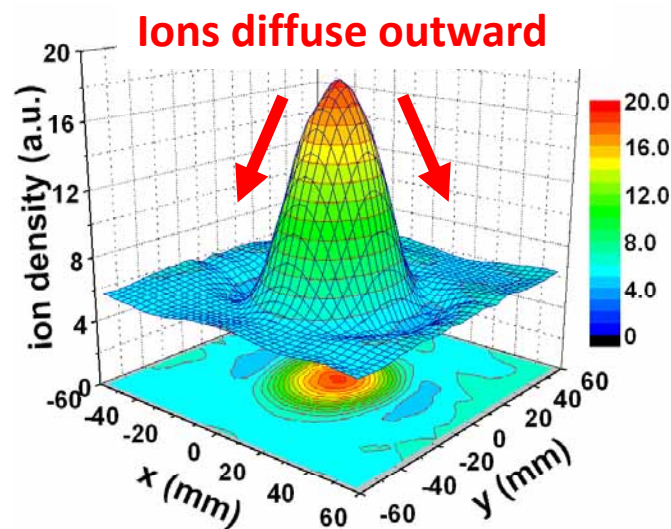
単極渦中のイオンの周方向流速

# イオンと中性粒子の相互作用



- 急峻な密度勾配により、径方向に拡散流が発生  
イオン: 外向き, 中性粒子: 内向き
- 荷電交換衝突を通して内向きの運動量を中性粒子からイオンに輸送 (Sena効果)

➡ 中性粒子とイオンの相互作用により反 $E \times B$ 渦が形成



イオン(左)と中性粒子(右)の2次元密度分布(分光計測)

# 低速の中性粒子流れ計測法

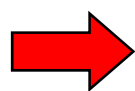
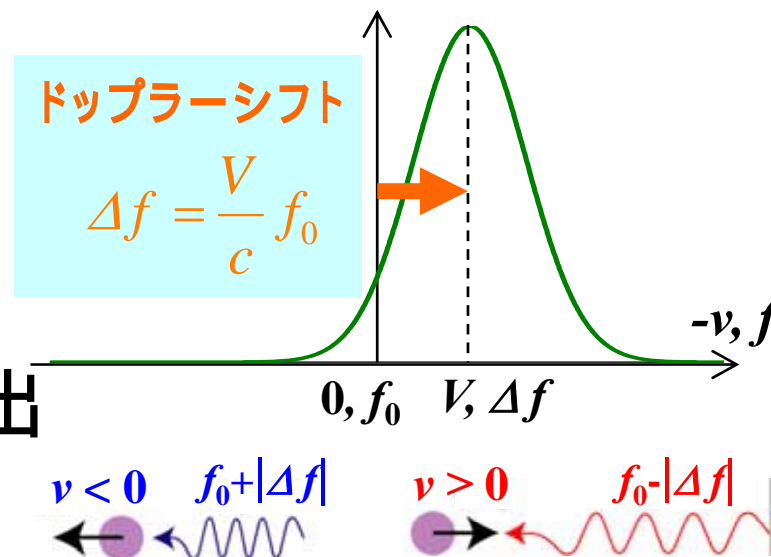


## LIF (レーザー誘起蛍光) 法を用いて中性粒子の流速を計測

- 狭帯域波長可変レーザー  
– 半導体レーザー

- 微弱なLIFシグナル検出  
– 100kHzの高速ロックイン検出

- 高精度波長基準  
– 飽和吸収分光の lamb dip を利用 (自然広がり)

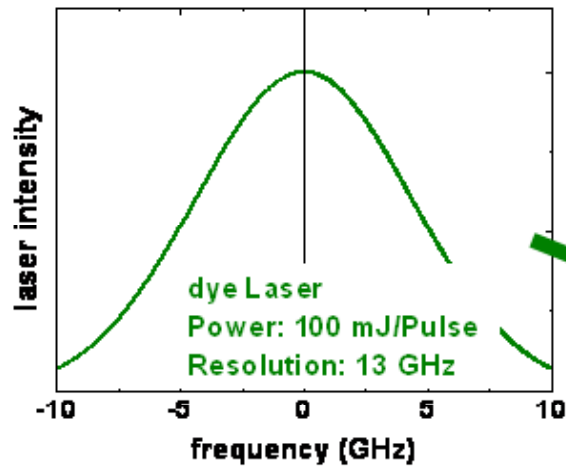


微小なドップラーシフト観測  
(約2m/secの精度)

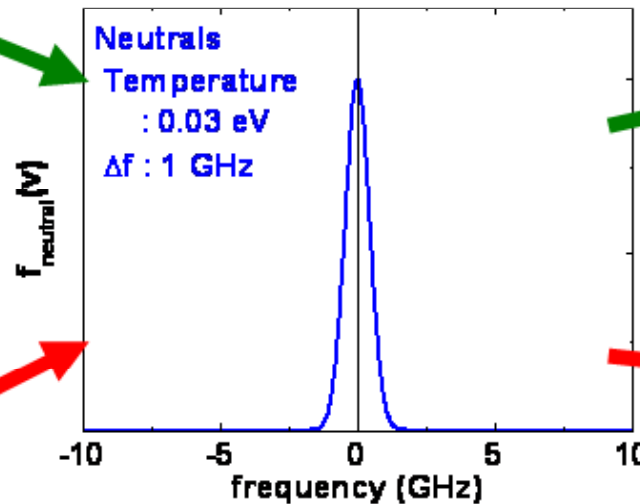
# 中性粒子速度分布関数のLIF計測



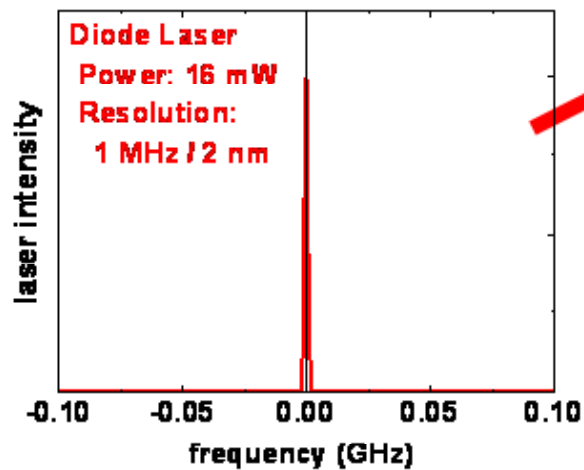
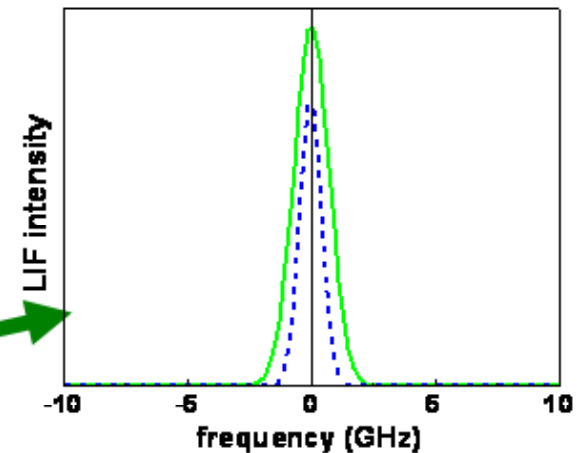
色素レーザー



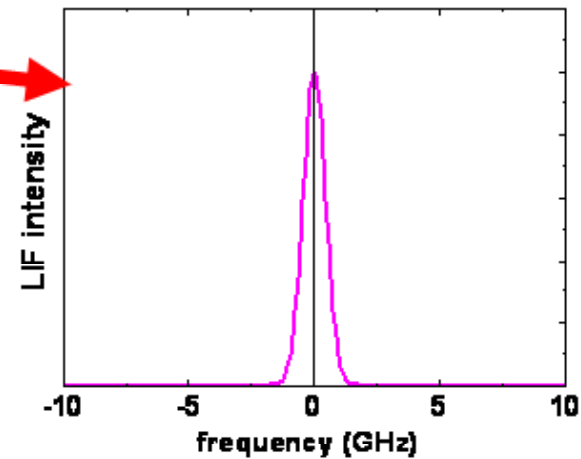
中性粒子速度分布関数



デコンボリューションが必要  
(ノイズの影響を強く受ける)

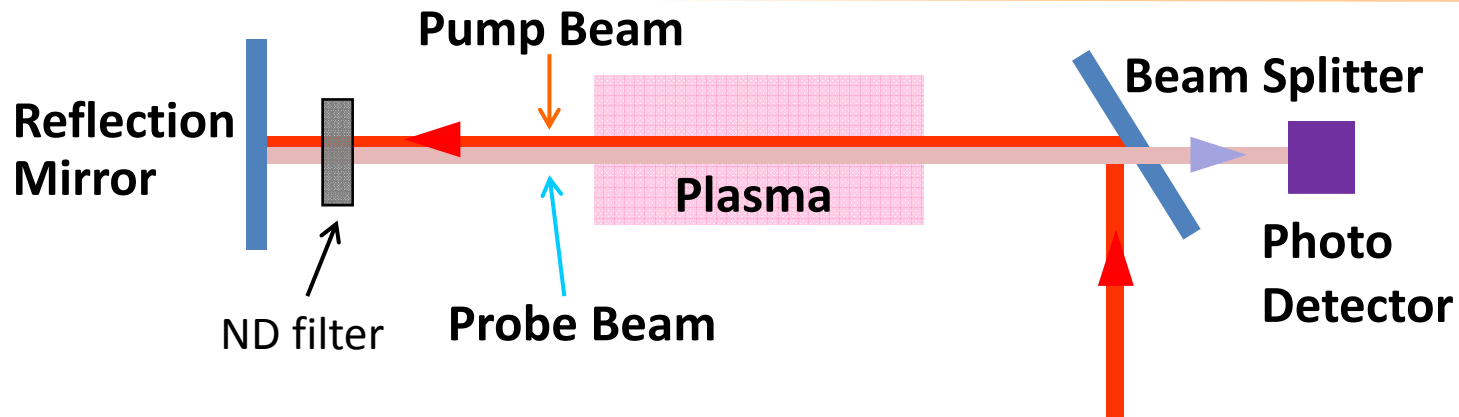


半導体レーザー

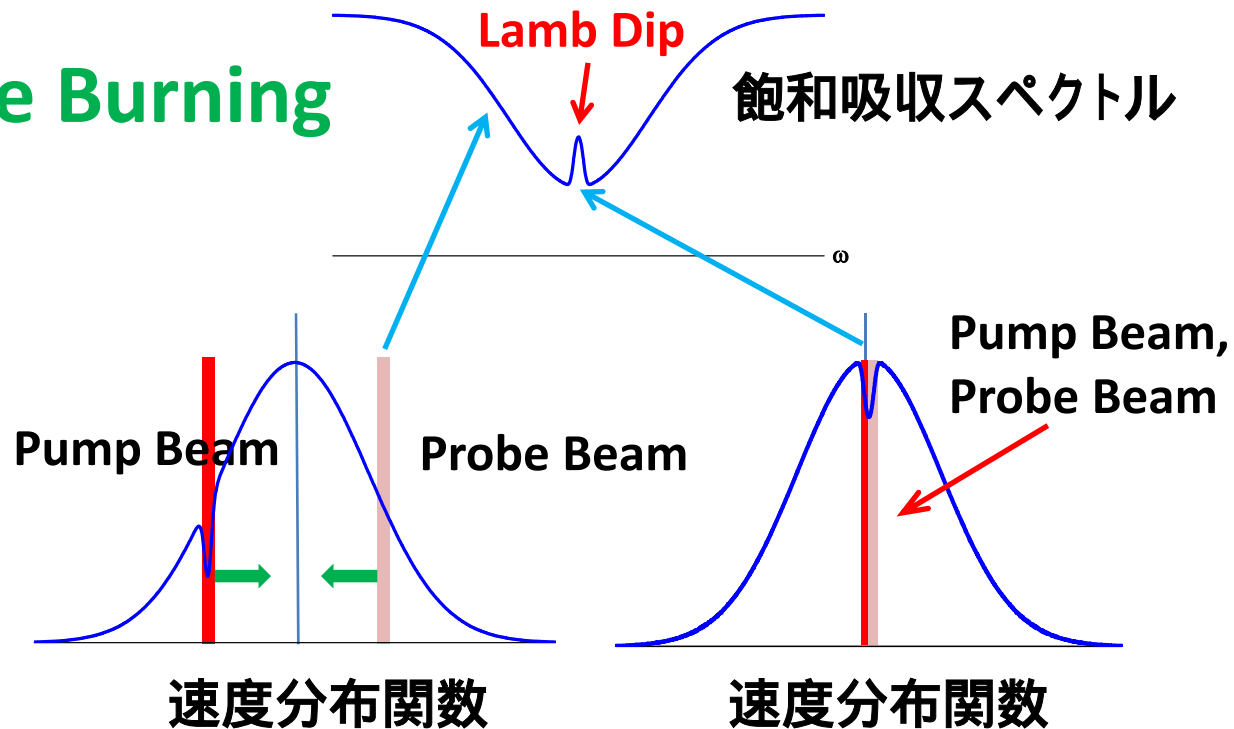


中性粒子速度分布関数  
を忠実に表現

# 飽和吸収分光法



## Hole Burning

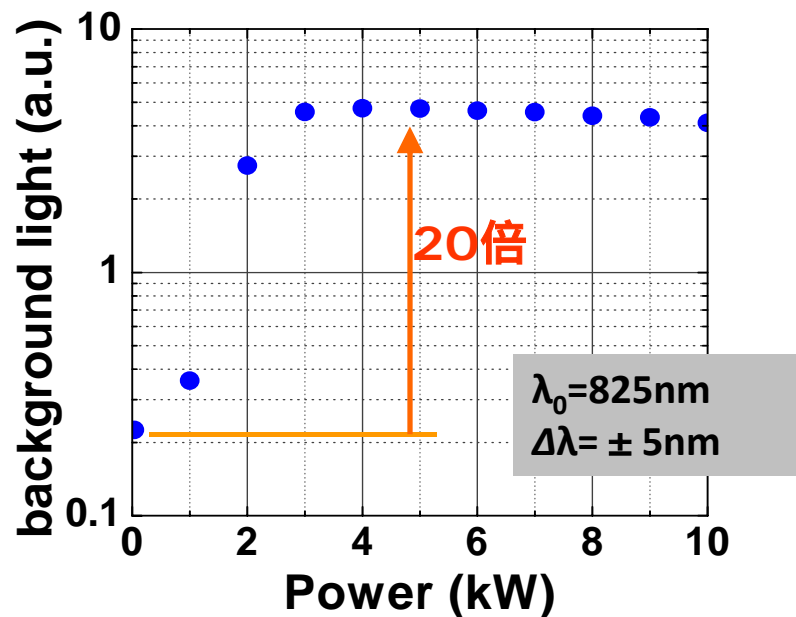




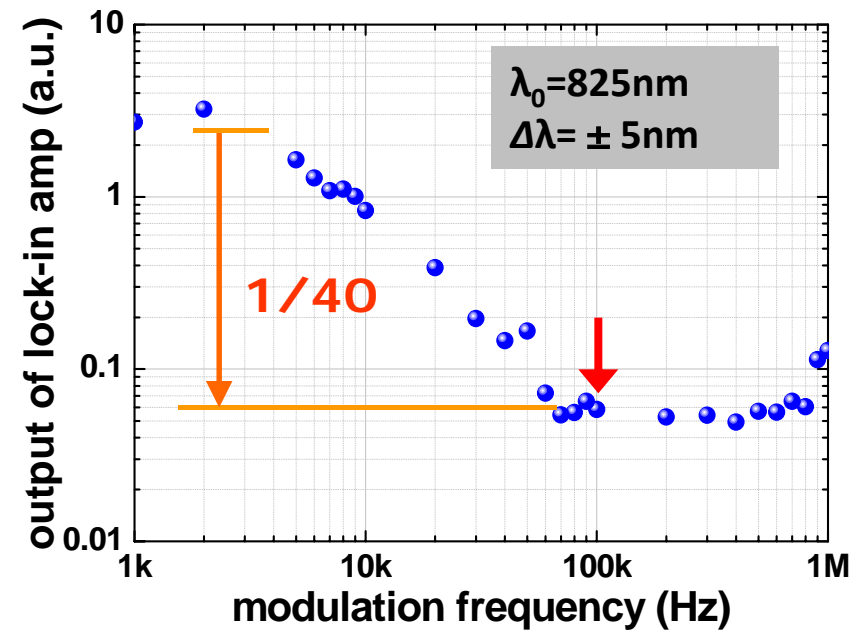
# ノイズの低減



- マイクロ波のパワーを上げると, LIFの検出の難度が上昇
  - プラズマの自発光成分が増加(左図)
- 電気光学変調器を用いた高速ロックイン検出の導入(右図)
  - レーザーの変調周波数を4kHz→100kHzに上げ, ノイズを1/40に低減

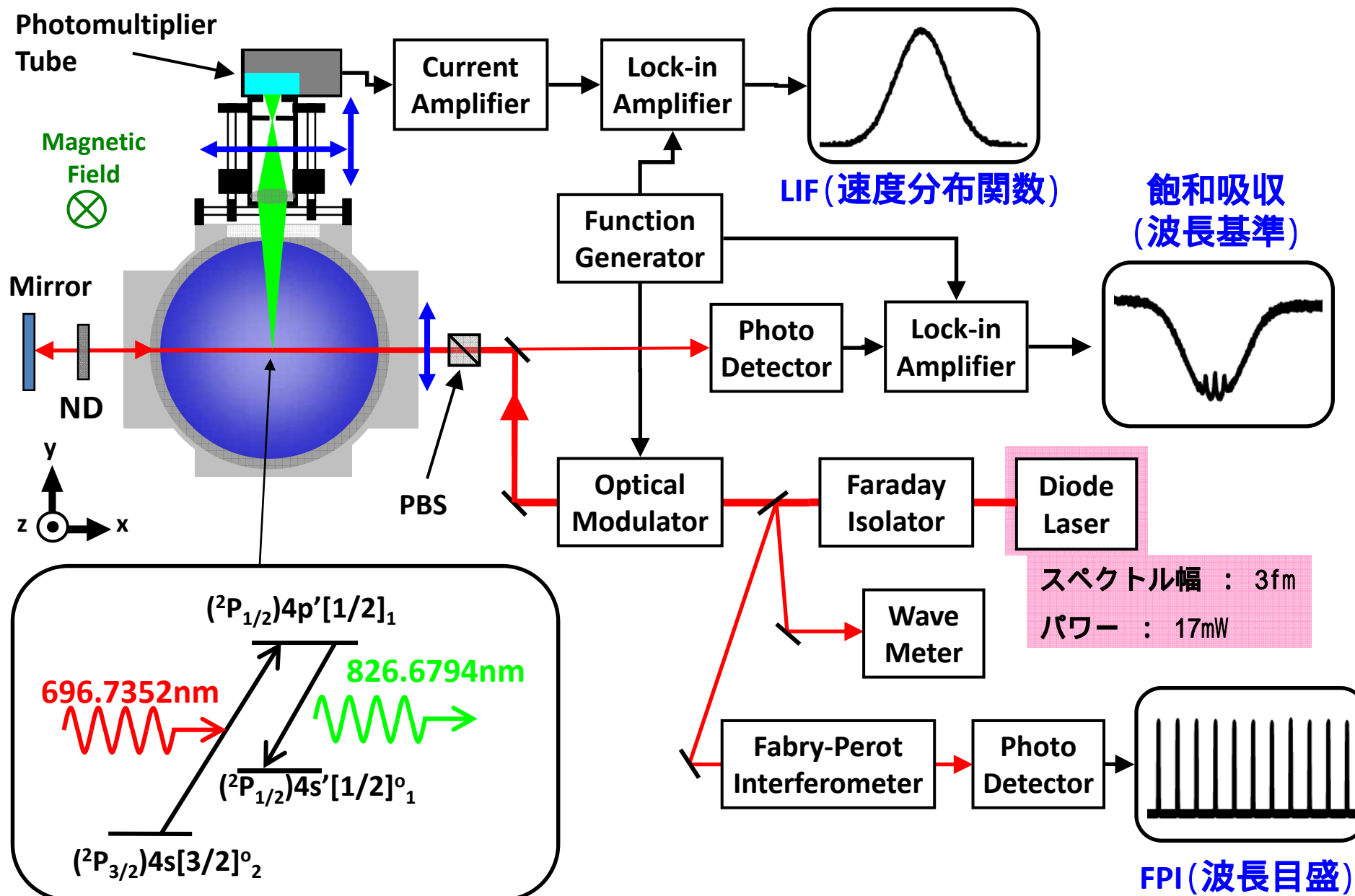


マイクロ波パワーに対する背景光の変化

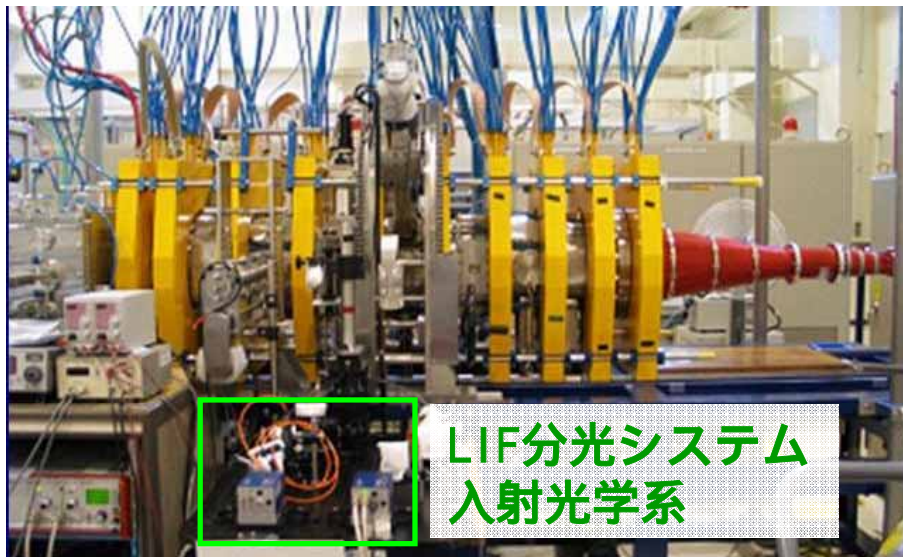
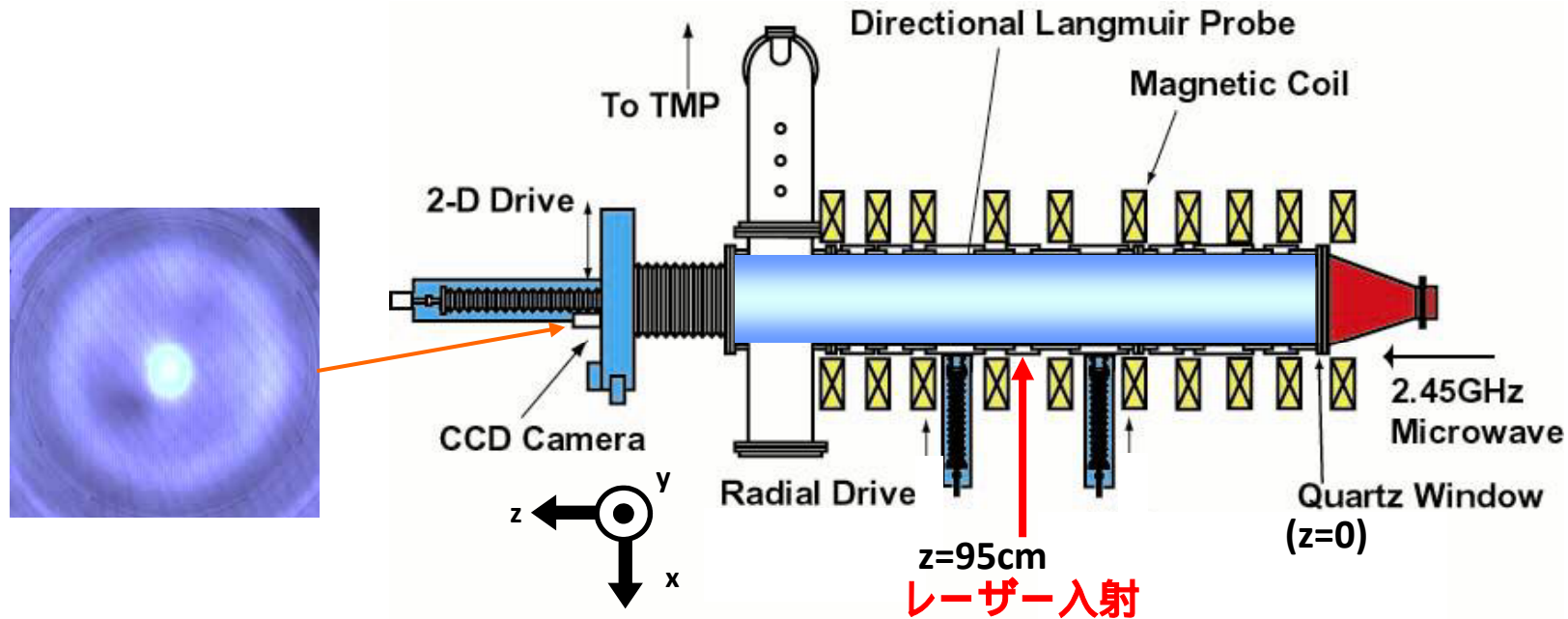


ロックイン検出されるプラズマ自発光

# LIFドップラー分光システム



# 高密度プラズマ発生装置 HYPER-I

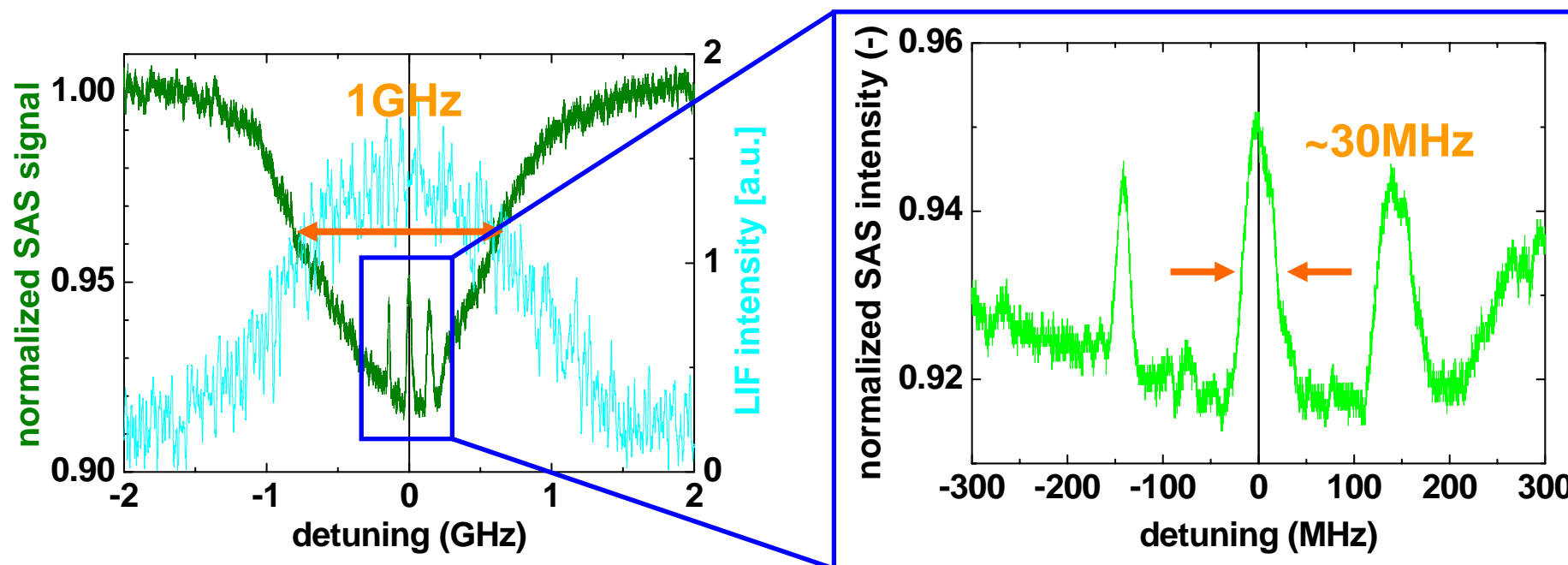


- 真空容器 :  $\phi 30 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$
- プラズマ生成 : 電子サイクロトロン共鳴
- ガス : 10 mTorr (アルゴン)
- 入射マイクロ波 : 2.45GHz, 5kW
- 磁場 :  $\sim 0.1 \text{ T}$  (弱発散型配位)
- 電子温度 : 4.5 eV
- 電子密度 :  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  (渦の外側)

# 速度分布関数の計測(1)



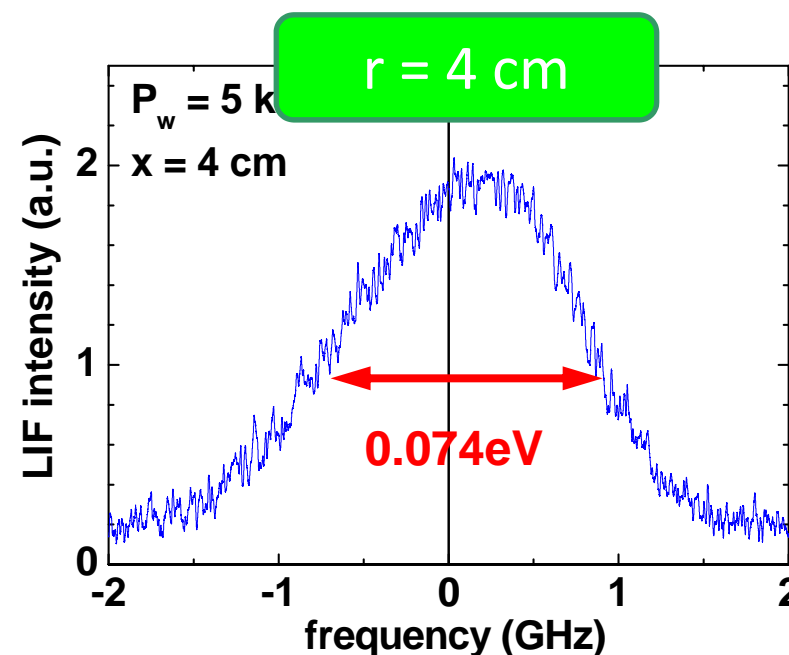
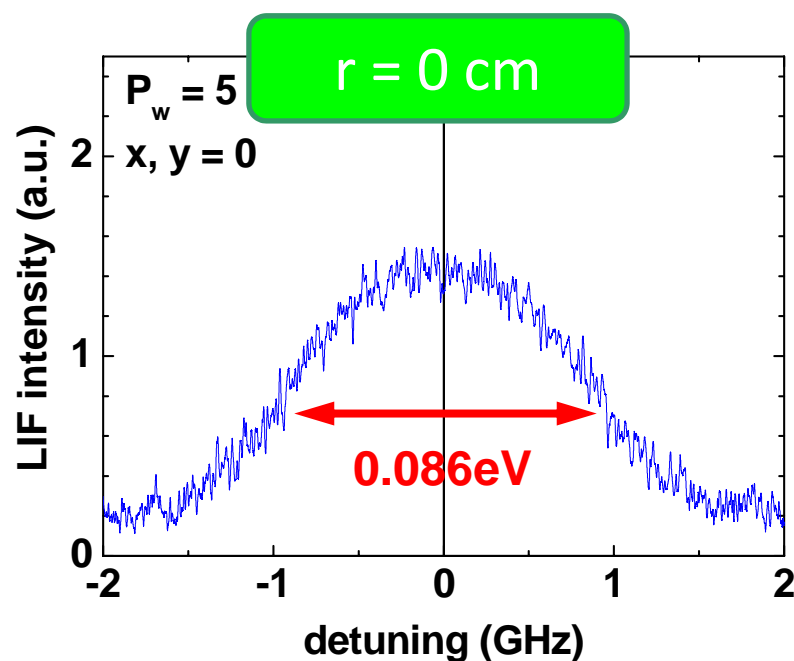
- 飽和吸収スペクトル
  - 熱広がり(1GHz)に対してディップの幅は十分狭い
- アルゴン準安定原子の径方向分布関数を計測
  - 中心の温度は0.086eV
  - 非Maxwellian, 中心以外では非対称な分布



# 速度分布関数の計測(2)



- 飽和吸収スペクトル
  - 熱広がり(1GHz)に対してディップの幅は十分狭い
- アルゴン準安定原子の径方向分布関数を計測
  - 中心の温度は0.086eV
  - 非Maxwellian, 中心以外では非対称な分布

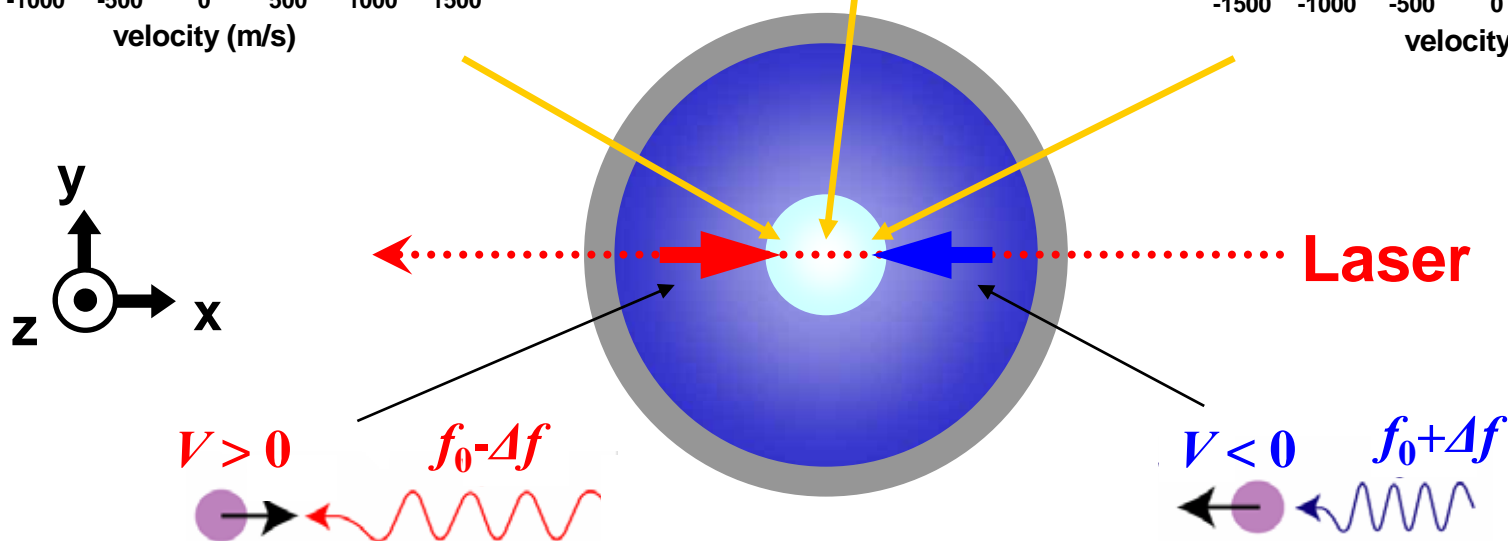
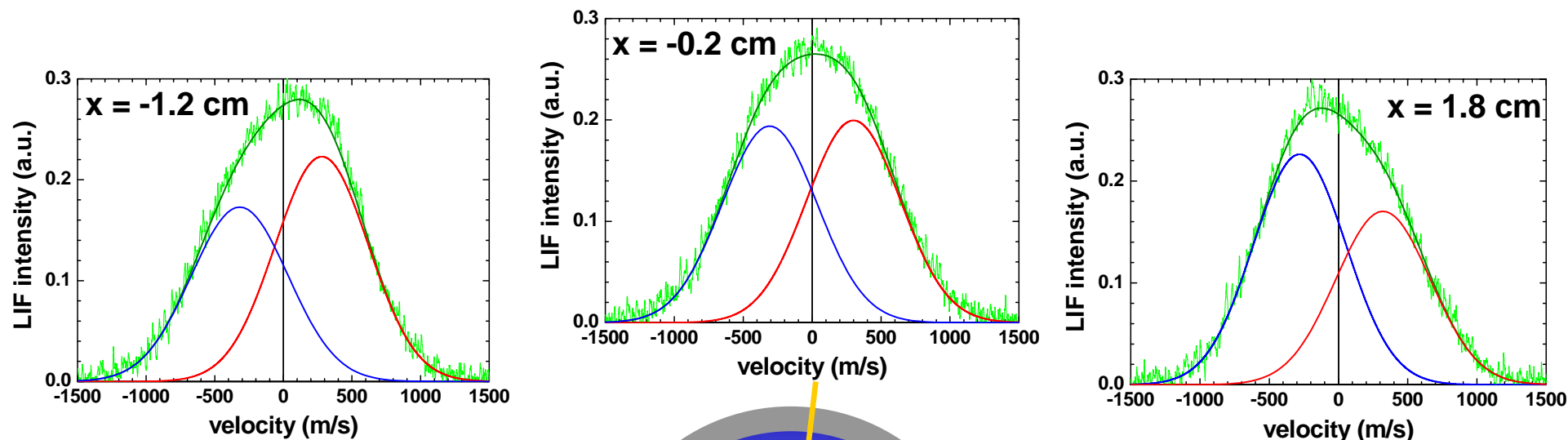


# 径方向速度分布関数の分解(1)



非対称な速度分布関数 → 2つのガウス分布に分離

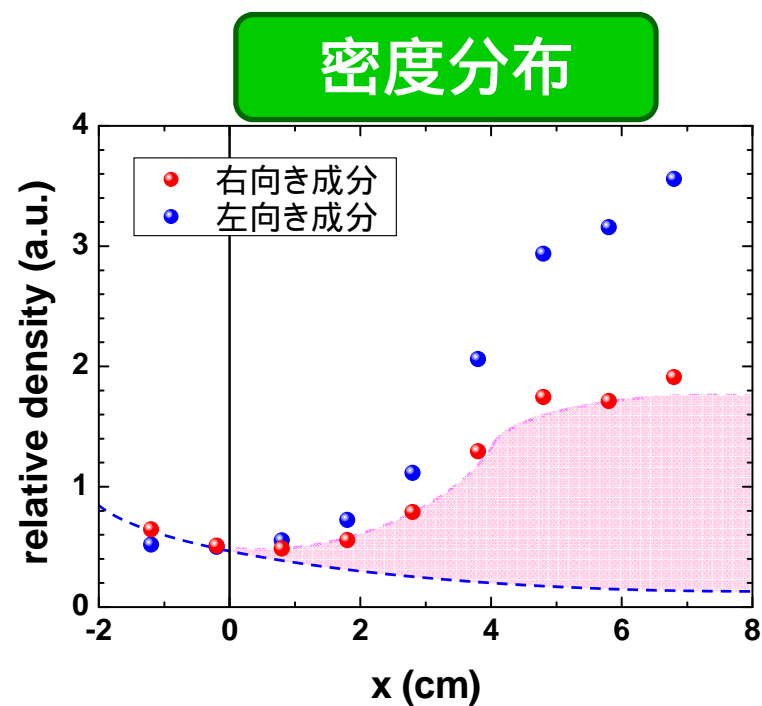
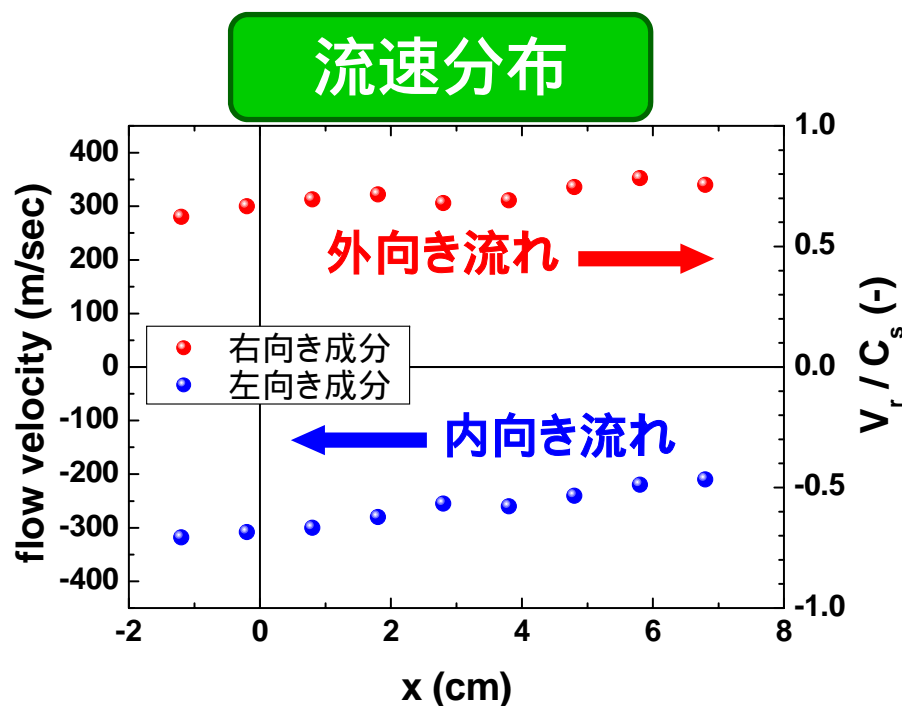
左向き流れと右向き流れの合成



# 径方向速度分布関数の分解(2)



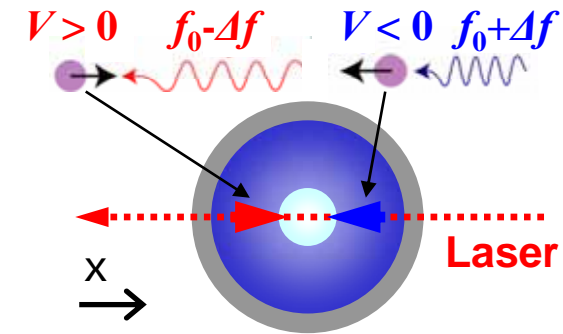
- 流れは徐々に加速, 温度は一様 (0.05 eV)
- 内向き流れがプラズマ中心を貫通し, 外向き流れに転換
- 内向き成分の密度は徐々に減少
- 外向き流れ成分は外に行くほど増加:  
荷電交換衝突によってイオンから中性粒子になった成分?



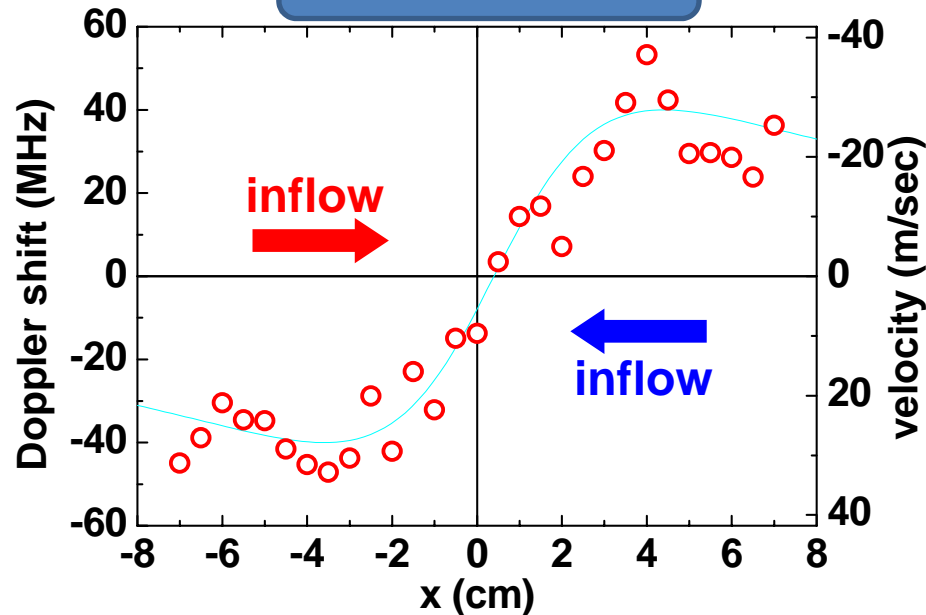
# 径方向流れ



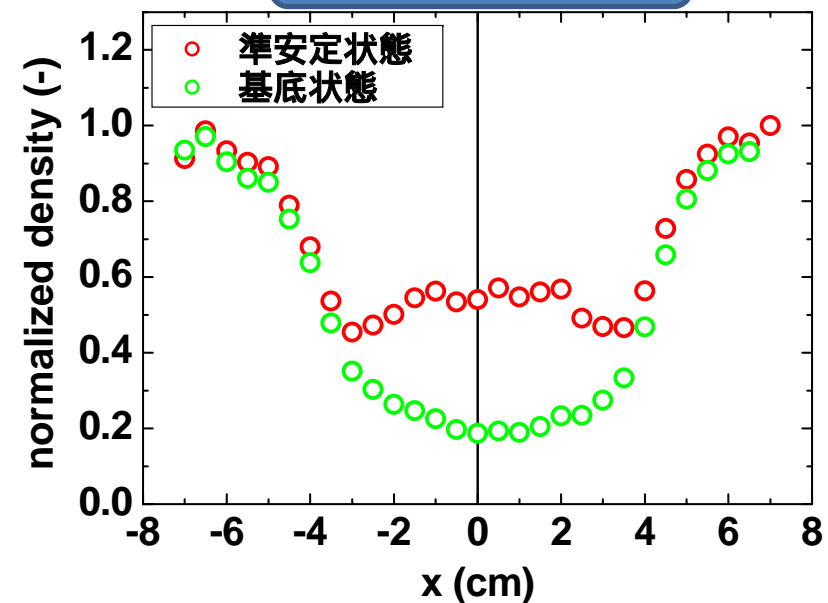
- 中性粒子は径方向内向きに流れている
  - 最大で40m/sec
- 基底状態の密度は中心に深い窪み
  - $r = 3\sim 5\text{cm}$ で急峻な密度勾配 → 流速のピークと一致



径方向流速



密度分布

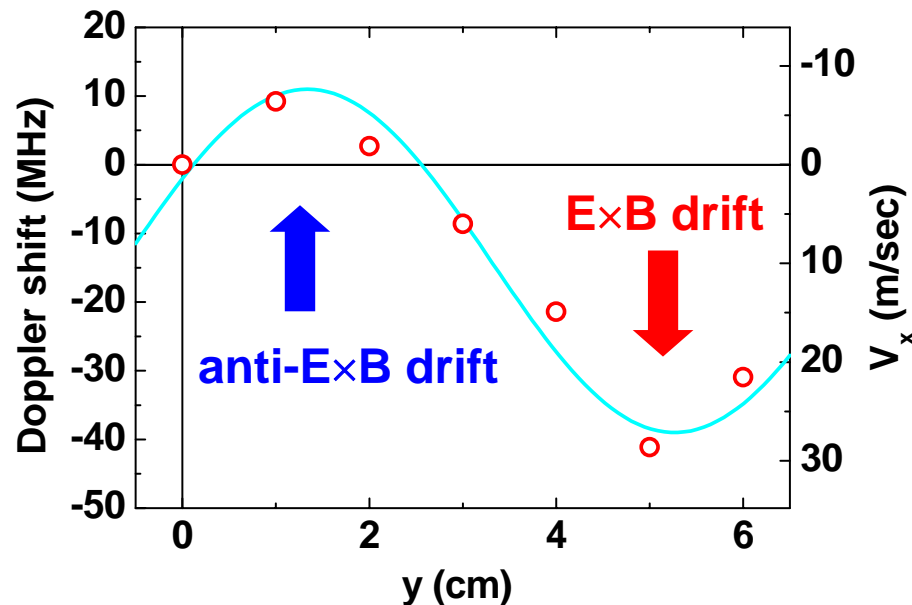




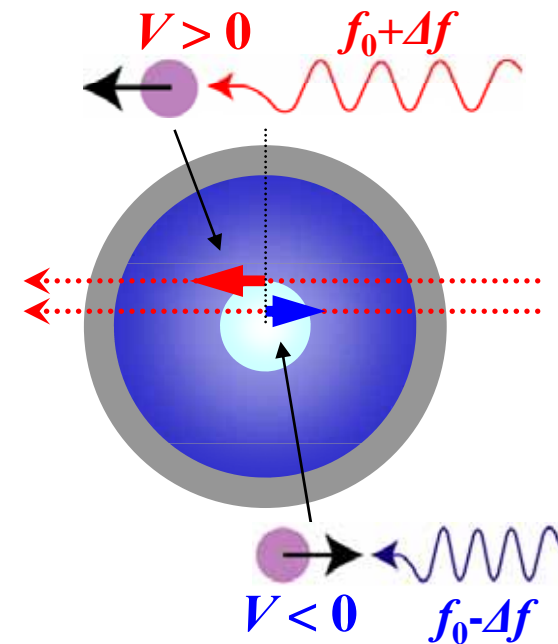
# 中性粒子の周方向回転



- 周方向流速を計測
  - y方向に計測点を変え, ドップラーシフトを計測
- 渦領域で反 $E \times B$ 方向, 周辺で $E \times B$ 方向に回転
  - イオンの回転方向を反映している



渦構造中の中性粒子の周方向流速分布



中性粒子の周方向流れ

- 反 $E \times B$ 方向に回転する渦の観測
  - 中性粒子からイオンへの運動量輸送で駆動
- LIFドップラー分光システムを開発
  - 高精度 (2m/sec) の計測システム
- 中性粒子の速度分布関数を計測
  - 内向きの流れと外向きの流れに分解
- 反 $E \times B$ 渦中の中性粒子の2次元流れ場を計測
  - 径方向流れ: 内向き, 密度勾配によって加速
  - 周方向流れ: イオンと同じ方向に回転

# 今後の展望(計測システム編)



- 3次元流れ場の計測
  - ファイバを用いてレーザーを輸送
- イオンにLIF計測を適用
  - 運動量輸送量の計測
  - プローブとの比較・校正
- レーザー入射・LIF集光一体型システムの開発
  - 空間分布計測の簡便化
  - 使用ポートを1つに縮小 → 他装置にも導入しやすい

# 各種パラメータ



- 電子熱速度  $v_{the} = 8.9 \times 10^5$  m/s
- イオン熱速度  $v_{thi} = 5.4 \times 10^2$  m/s ( $T_i \sim 0.1$  eVと仮定)
- イオン音波速度  $C_s = 3.3 \times 10^3$  m/s
- 電子サイクロトロン周波数  $f_{ce} = 2.2$  GHz
- イオンサイクロトロン周波数  $f_{ci} = 31$  kHz
- 電子ラーマー半径  $r_{Le} = 63$   $\mu$ m
- イオンラーマー半径  $r_{Li} = 2.8$  mm
- イオン 中性粒子間電荷交換衝突の平均自由行程 ( $r = 4$  cm)  
 $\lambda_i = 5.7$  cm ( $n_n \sim 2.5 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>,  $\sigma_{cx} \sim 7 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup> [1])
- 単極渦直径 : 約 6 cm

[1] J. W. Sheldon, Phys. Rev. Lett. **8**, 64 (1962)