

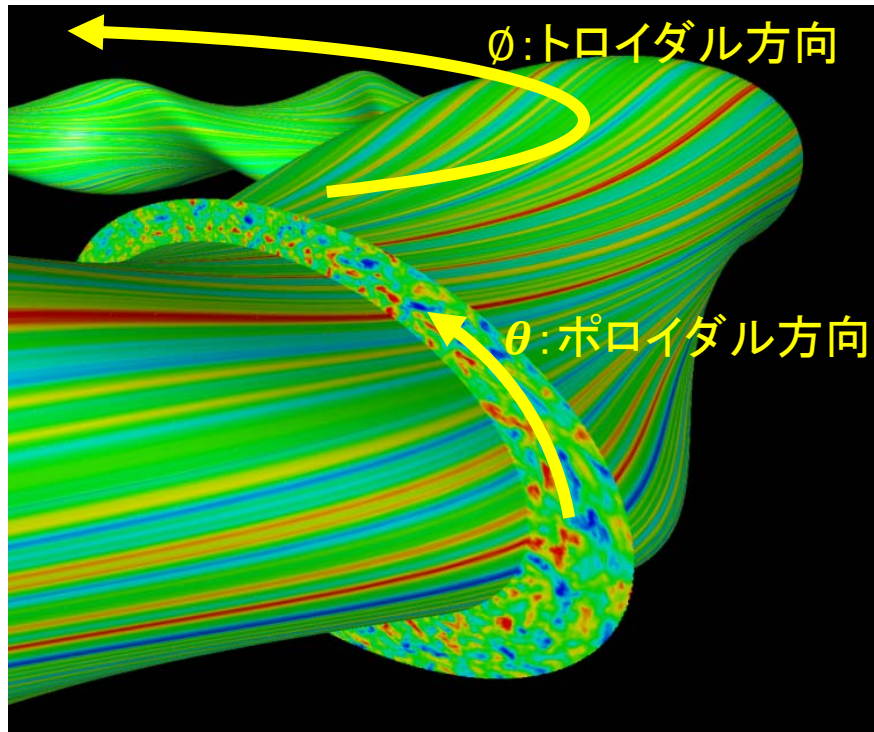
シンポジウム  
「乱流が引き起こす角運動量輸送」  
—実験室プラズマから宇宙プラズマまで—

28pEA-3

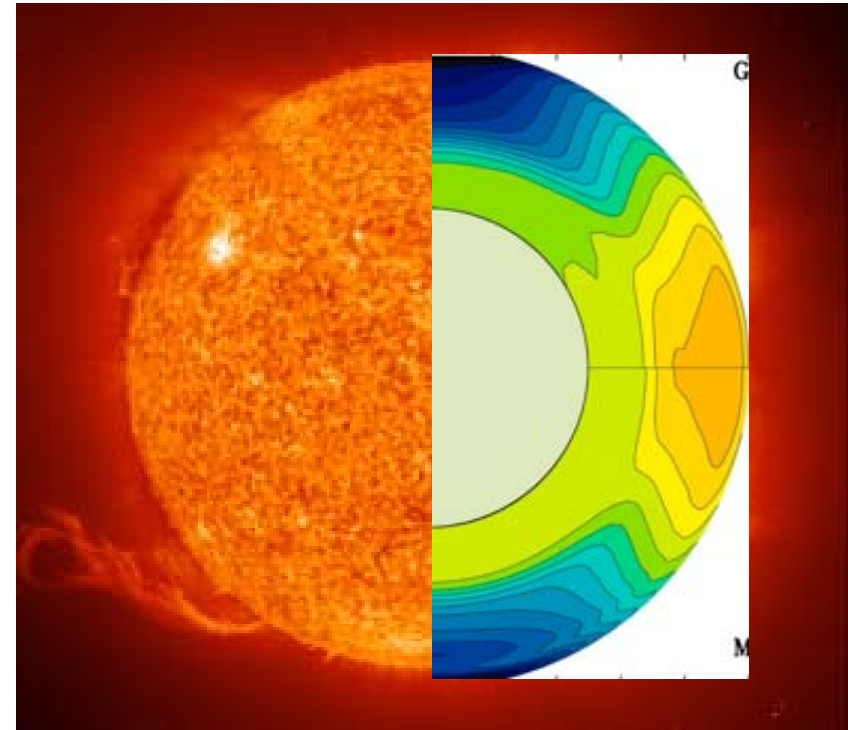
# トーラスプラズマの 自発回転

永岡賢一（核融合科学研究所）

# 乱流が引き起こす角運動量輸送



- トーラスプラズマ:
- 異常粘性
  - 自発トロイダル回転
  - MHD安定性制御に重要



- 太陽対流層:
- 差動回転
  - 子午面還流(?)
  - ダイナモの理解に重要

乱流(非平衡)状態のプラズマ中に  
自発的な回転が生じる

# 講演内容

---

## 1. イントロダクション

- 拡散輸送と非拡散輸送
- 乱流が支配する輸送現象

## 2. プラズマ回転の実験観測

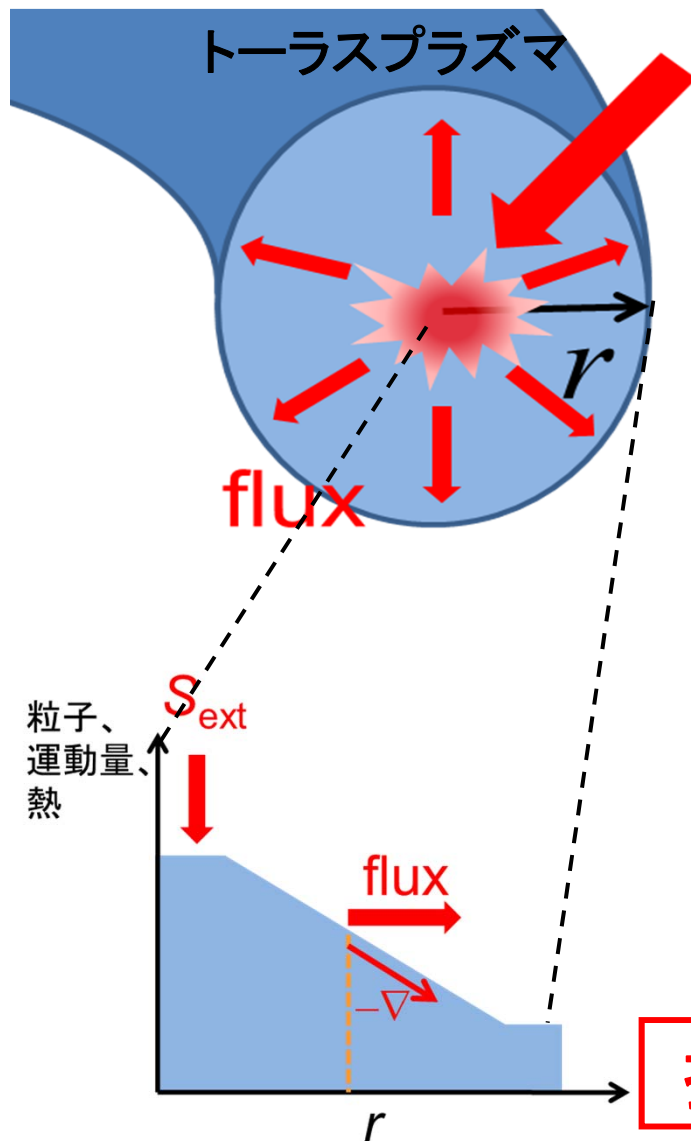
- 粘性拡散で説明できない(角)運動量輸送の存在
- convectionでも説明できない(角)運動量輸送
- プラズマ回転の反転と乱流揺動特性の変化

## 3. 理論研究の簡単な紹介

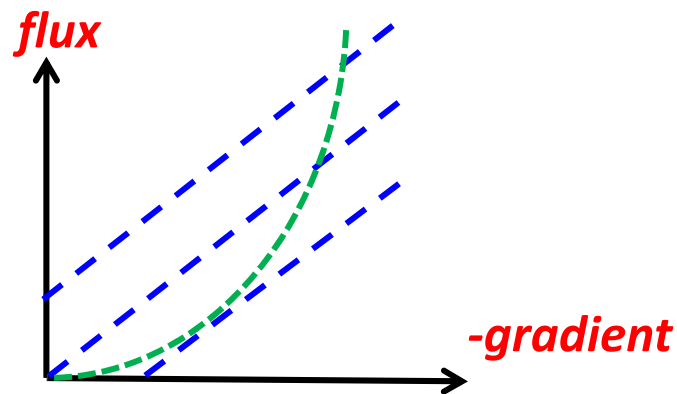
- Symmetry breakingとResidual stress

## 4. まとめ

# トーラスプラズマの輸送研究



外部入力  
(加熱等)



輸送研究とは、fluxと勾配の関係を理解すること

粒子:

運動量:

熱量:

$$\frac{\Gamma}{n} = -D \frac{\nabla n}{n} - X_1$$

$$\frac{P_\phi}{mn} = -\mu \nabla V_\phi - X_2$$

$$\frac{Q}{n} = -\chi \nabla T - X_3$$

拡散輸送

非拡散輸送

拡散輸送と非拡散輸送の性質の理解

# 拡散輸送と非拡散輸送

NC: 新古典輸送 (粒子衝突と粒子軌道に起因する輸送)

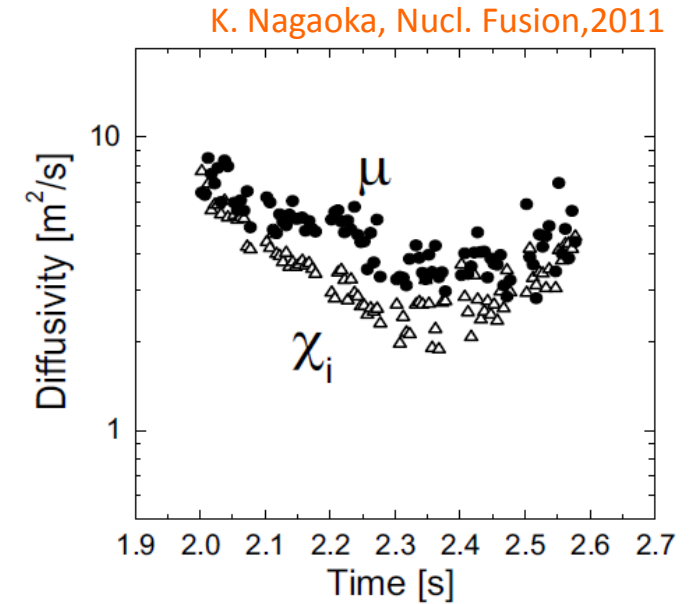
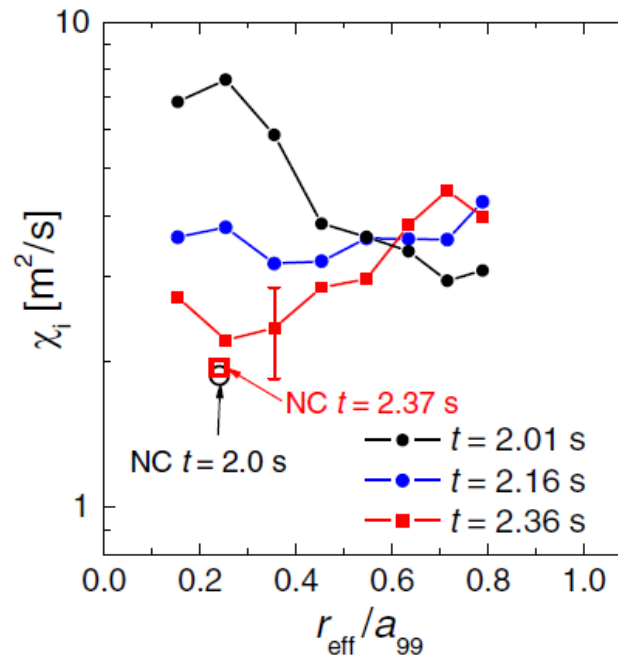
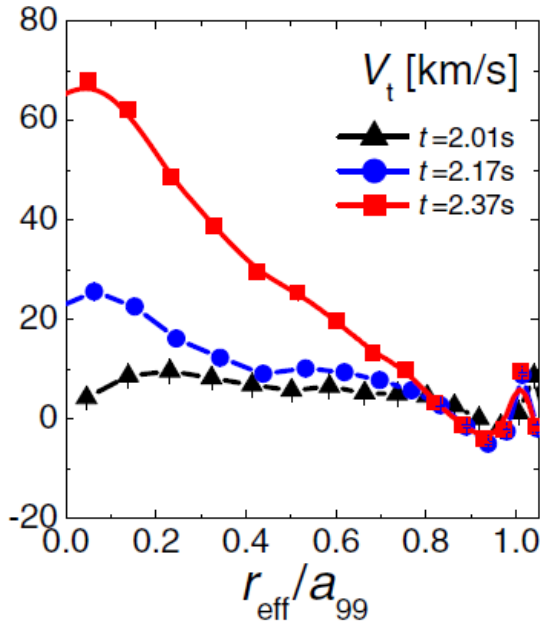
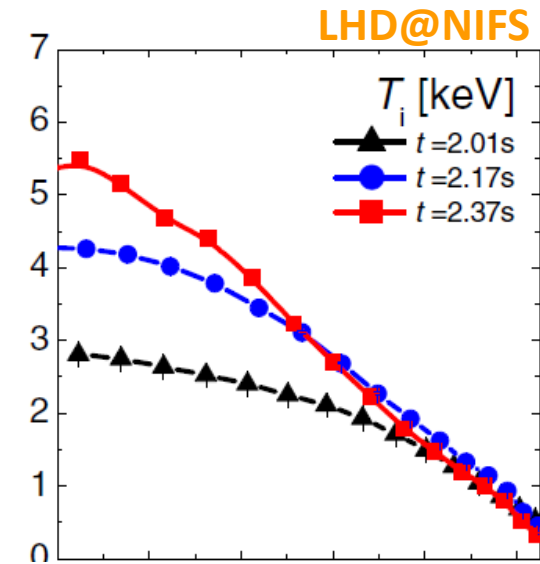
turb: 乱流に起因する輸送

|       |  |  |                            |
|-------|--|--|----------------------------|
| 熱輸送   | $\frac{Q}{n} = -(\chi_{\text{NC}} + \chi_{\text{turb}}) \nabla T + X_{\text{NC}} + X_{\text{turb}}$ <p style="text-align: center;"><math>\chi_{\text{NC}} &lt; \chi_{\text{turb}}</math></p> | 拡散輸送   | 非拡散輸送                      |
| 運動量輸送 |  | $\frac{P_{\phi}}{mn} = -(\mu_{\text{NC}} + \mu_{\text{turb}}) \nabla V_{\phi} + X_{\text{NC}} + X_{\text{turb}}$ <p style="text-align: center;"><math>\mu_{\text{NC}} \ll \mu_{\text{turb}}</math></p> | $E_r$<br>$\nabla T_i$<br>他 |

○非拡散運動量輸送を **residual stress** (Reynolds stressの一部) で理解する試みが進展

○本講演では、**乱流の寄与**に特化して紹介

# 乱流拡散輸送—熱輸送と運動量輸送の相関—



○乱流拡散が、熱輸送 ( $\chi_i$ ) を決めている。

○熱拡散係数 ( $\chi_i$ ) は、プラズマの状態 (乱流) によって変化

○乱流粘性 ( $\mu$ ) は、乱流熱拡散係数 ( $\chi_i$ ) と相関:

$$\mu \sim \chi_i$$

# 講演内容

## 1. イントロダクション

- 拡散輸送と非拡散輸送
- 乱流が支配する輸送現象

## 2. プラズマ回転の実験観測

- 粘性拡散で説明できない(角)運動量輸送の存在
- convectionでも説明できない(角)運動量輸送
- プラズマ回転の反転と乱流揺動特性の変化

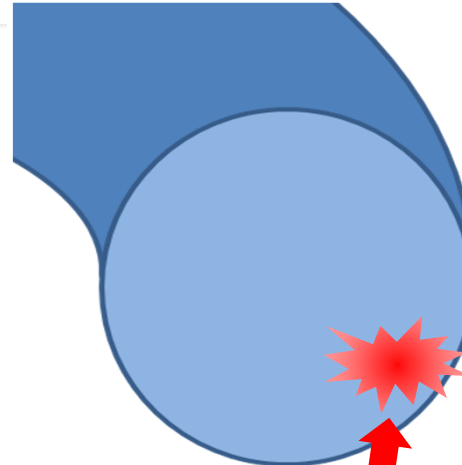
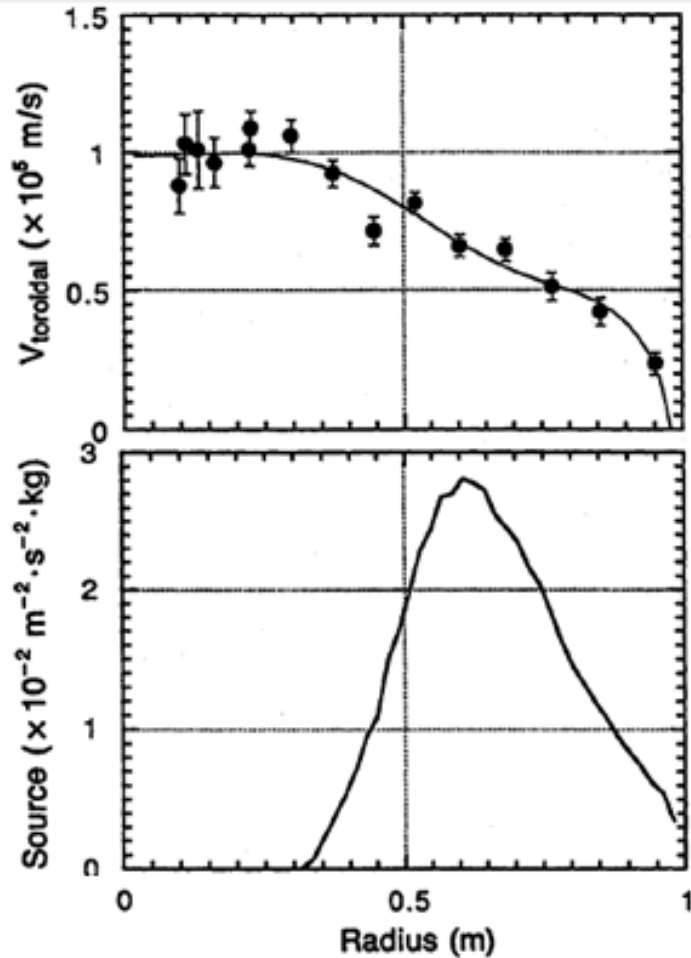
## 3. 理論研究の簡単な紹介

- Symmetry breakingとResidual stress

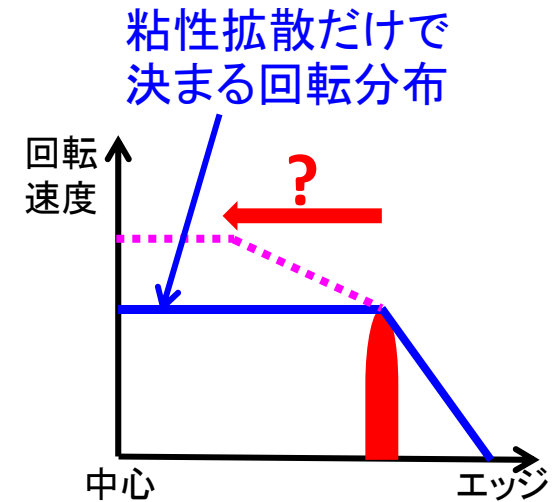
## 4. まとめ

# 外部駆動したトロイダル回転の観測

K. Nagashima, Nucl. Fusion, 1994



Off-axisの  
ビームトルク入力



Off-axisトルク入力の場合でも  
中心ピークした回転速度分布が観測

$$\frac{P_\phi}{mn} = -\mu \nabla V_\phi + \mathbf{V}_r V_\phi + X_{21} \quad \mathbf{V}_r < 0$$

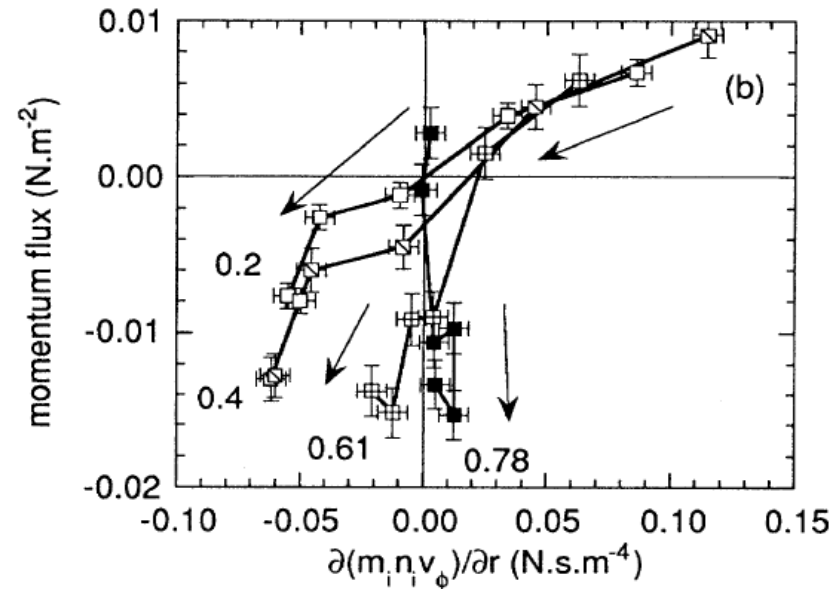
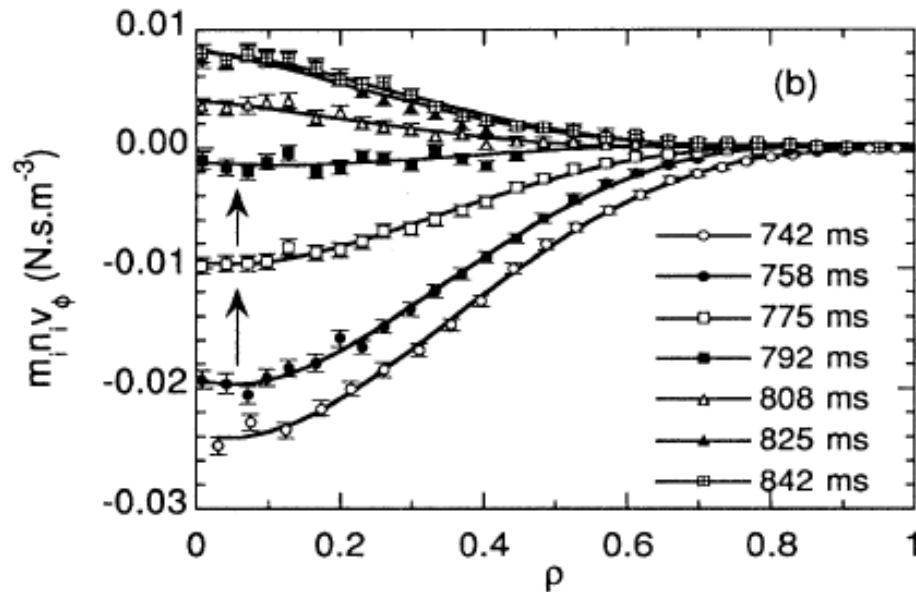
(角)運動量の内向きconvection( $V_r < 0$ )が存在すると解釈



# オフセット回転の観測

ビームスイッチ時のプラズマ回転分布の変化

K. Ida, Phys. Rev. Lett., 1995



- ビーム(外部トルク入力)の向きをスイッチすると回転の向きが反転
- 外部トルクの非対称以上に大きな回転分布の非対称を観測。

⇒トルク入力無しでも回転が存在

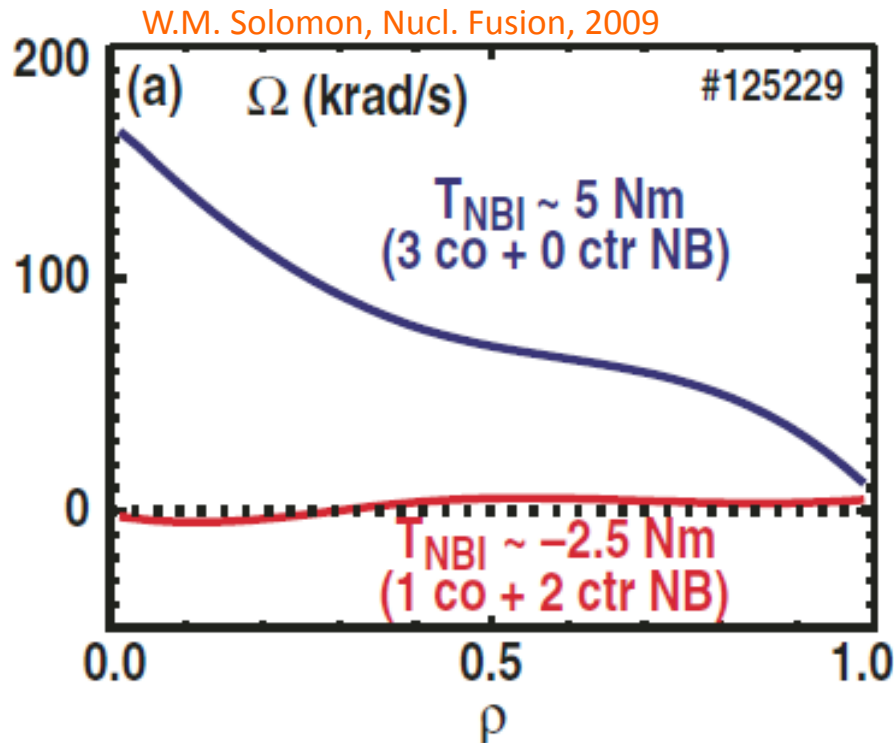
自発回転を示唆:  $X_{21} \neq 0$

$$\frac{P_\phi}{mn} = -\mu \nabla V_\phi + V_r V_\phi + X_{21}$$

# convectionで説明できない(角)運動量輸送

$X_{21} \sim 0$  と仮定した実験解析で回転を説明する試み

$$\frac{P_\phi}{mn} = -\mu \nabla V_\phi + V_r V_\phi + X_{21}$$



外部トルク入力  $\neq 0$

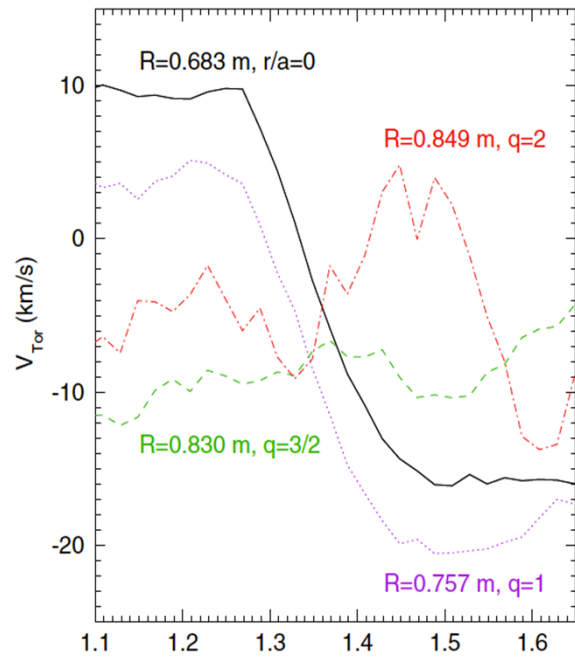
のプラズマにおいて、

$$\nabla V_\phi \sim 0 \quad \& \quad V_\phi \sim 0$$

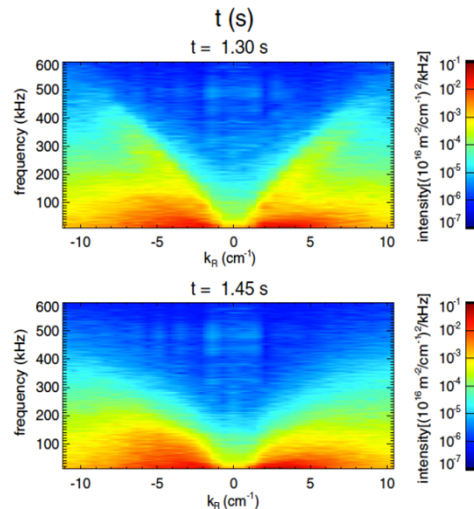
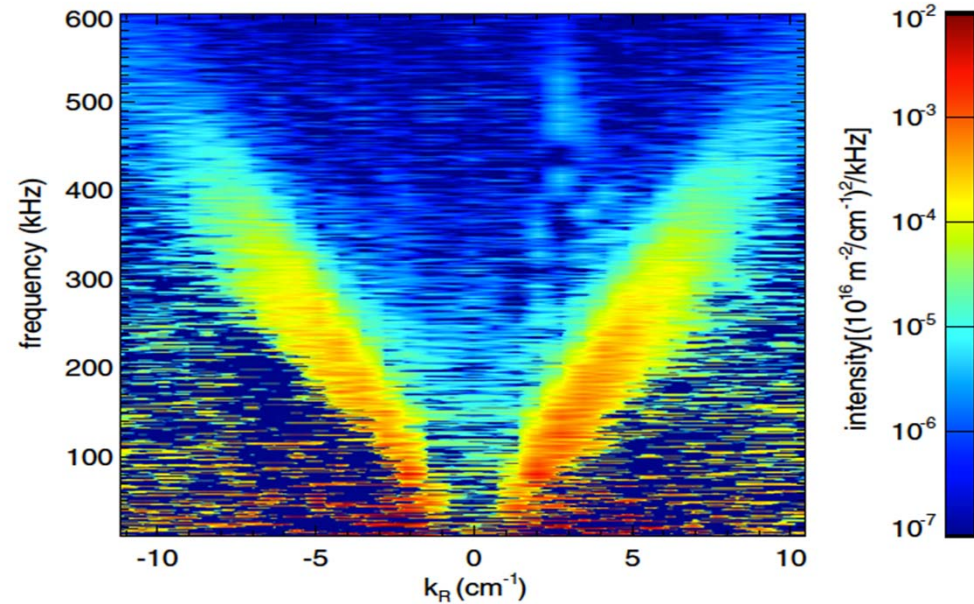
を観測(実験)。

$\Rightarrow X_{21} \neq 0$  を証明

# 回転の反転現象と乱流揺動特性の変化



J.Rice, Nucl. Fusion, 2011



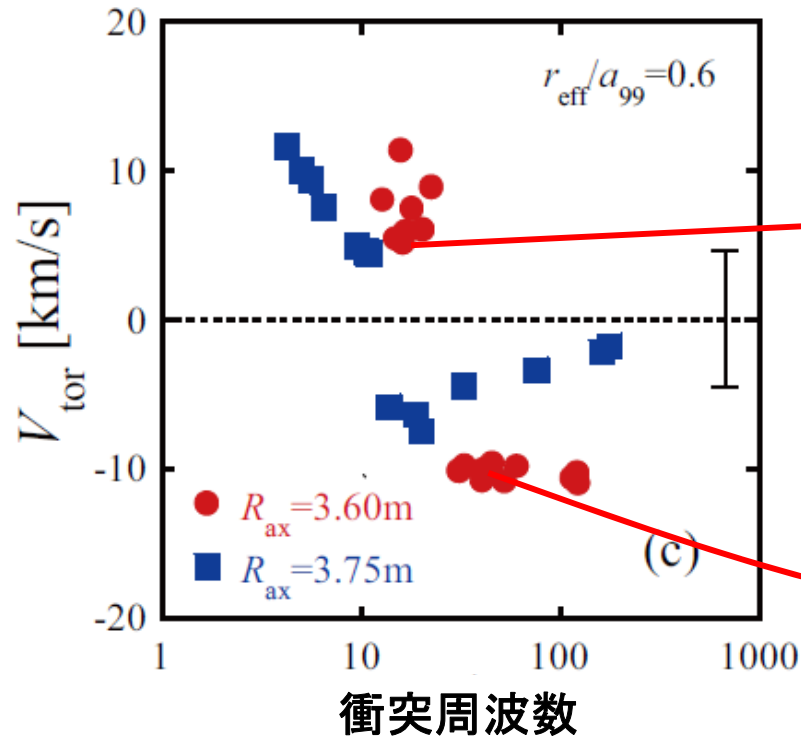
○密度上昇時にプラズマ回転が**自発的に反転**

○回転が反転する前後で**密度揺動特性の変化**を観測

○静電揺動(電子)の回転駆動への**関与**を示唆

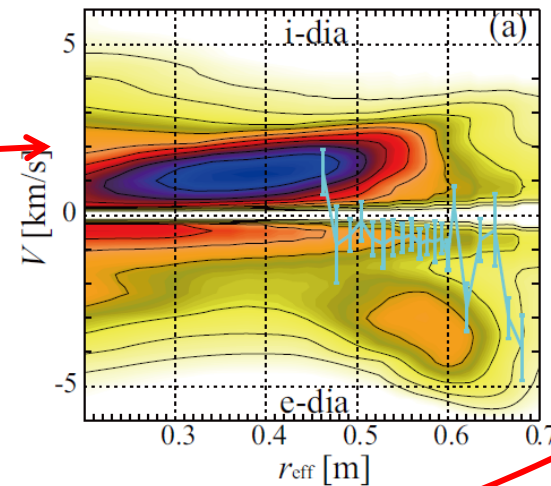
# 自発回転の向きと乱流揺動特性

ゼロトル入力プラズマの  
トロイダル回転

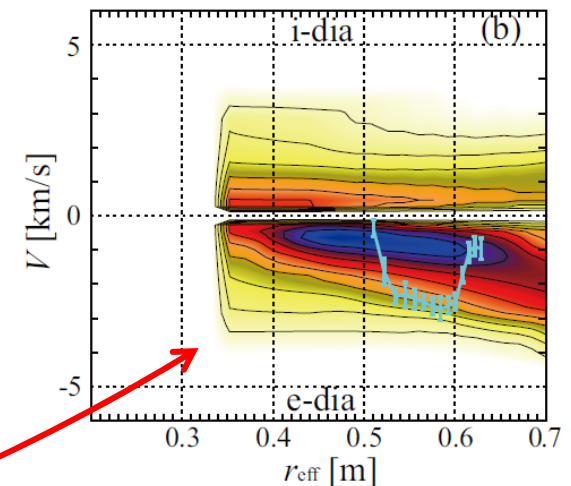


密度揺動の伝搬方向及び径方向分布

順回転プラズマ



逆回転プラズマ



K. Nagaoka, submitted to Phys. Plasmas

- 自発回転(ゼロ外部駆動時の回転)は、衝突周波数依存性を持つ。
- 順方向回転時と逆方向回転時では、密度揺動の空間構造及び伝搬特性が異なる

# 講演内容

## 1. イントロダクション

- 拡散輸送と非拡散輸送
- 乱流が支配する輸送現象

## 2. プラズマ回転の実験観測

- 粘性拡散で説明できない(角)運動量輸送の存在
- convectionでも説明できない(角)運動量輸送
- プラズマ回転の反転と乱流揺動特性の変化

## 3. 理論研究の簡単な紹介

- Symmetry breakingとResidual stress

## 4. まとめ

# トロイダルプラズマは、Heat Engine

## Heat engineの比較

P. Diamond, IAEA-FEC 2012

|            |                |  |
|------------|----------------|--|
|            | Car            | Intrinsic Rotation   |
| Fuel       | Gas            | Heating $\Rightarrow \nabla T$                               |
| Conversion | Burn           | $\nabla T$ driven DW Turbulence                              |
| Work       | Cylinder/Cam   | Residual Stress<br>symmetry breaking $\rightarrow$ direction |
| Result     | Wheel Rotation | Flow   |

Table 2. Table comparing two heat engines, a car and intrinsic rotation in tokamaks.

$$\langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\phi \rangle = -\mu \frac{\partial \langle v_\phi \rangle}{\partial r} + V \langle v_\phi \rangle + \Pi_{r,\phi}^R$$

Symmetry breakingが流れを駆動

# 乱流(レイノルズ応力)による(角)運動量輸送

レイノルズ応力によるトーラスプラズマの(角)運動量輸送

$$\langle \tilde{v}_r \tilde{v}_\phi \rangle = -\mu \frac{\partial \langle v_\phi \rangle}{\partial r} + V \langle v_\phi \rangle + \Pi_{r,\phi}^R$$

Reynolds stress

viscosity

momentum  
convection

residual stress

速度シアに比例  
速度シアを弱める

速度に比例  
径方向の移流  
(内向き)

勾配(温度、密度、  
圧力)に依存  
速度シアの生成  
自発回転駆動

○トーラス(実験室)プラズマでは、多種多様な回転現象が観測

○乱流の影響はviscosity, convection, residual stressに分類されて理解が進展

# Symmetry breakingによるResidual stress

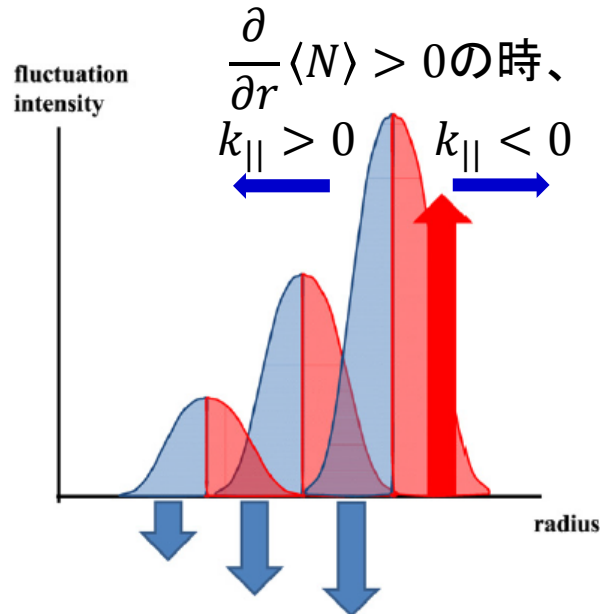
P. Diamond, Phys. Plasmas 2008

wave population density ( $N(k, x)$ )による表式:

$$\Pi_{r\parallel}^R \simeq \int d\mathbf{k} k_{\parallel} \left\{ -\tau_{c,\mathbf{k}} v_{gr}^2 \frac{\partial}{\partial r} \langle N \rangle + \tau_{c,\mathbf{k}} v_{gr} k_{\theta} \langle V_E \rangle' \frac{\partial}{\partial k_r} \langle N \rangle \right\}$$

## Intensity gradient効果

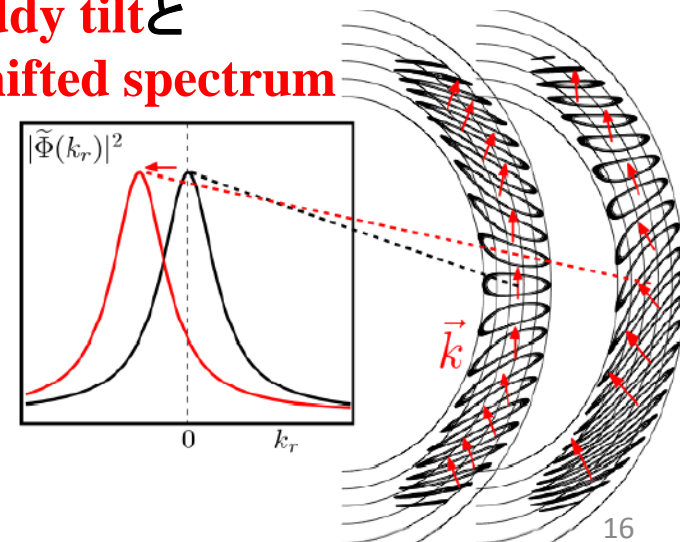
- ・周辺領域で重要



## ExBシアー効果

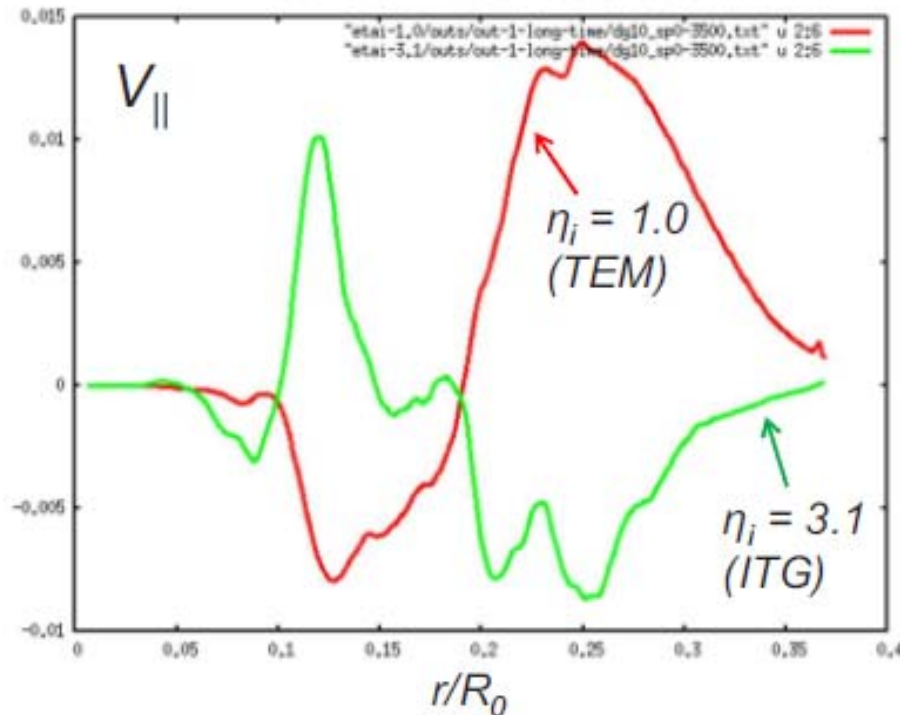
- ・伝搬方向 ( $v_{gr}$ ) に依存

eddy tiltと shifted spectrum



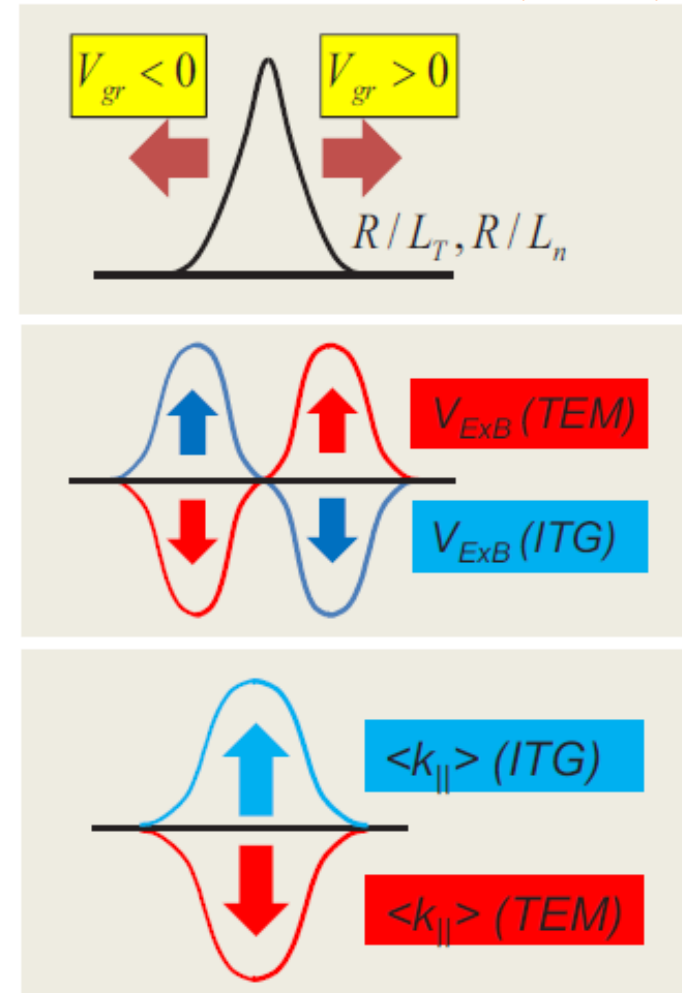


# シミュレーション研究の例

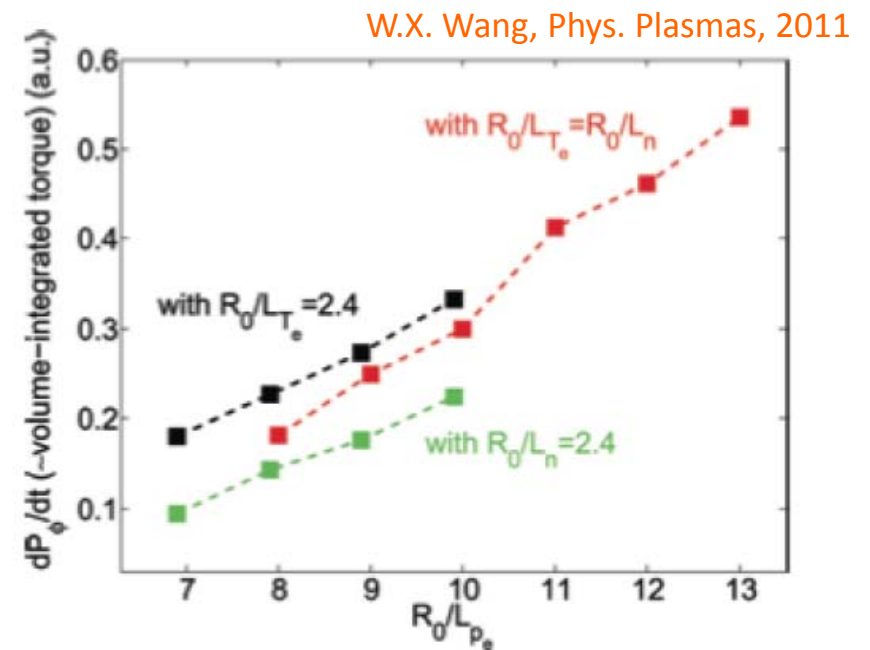
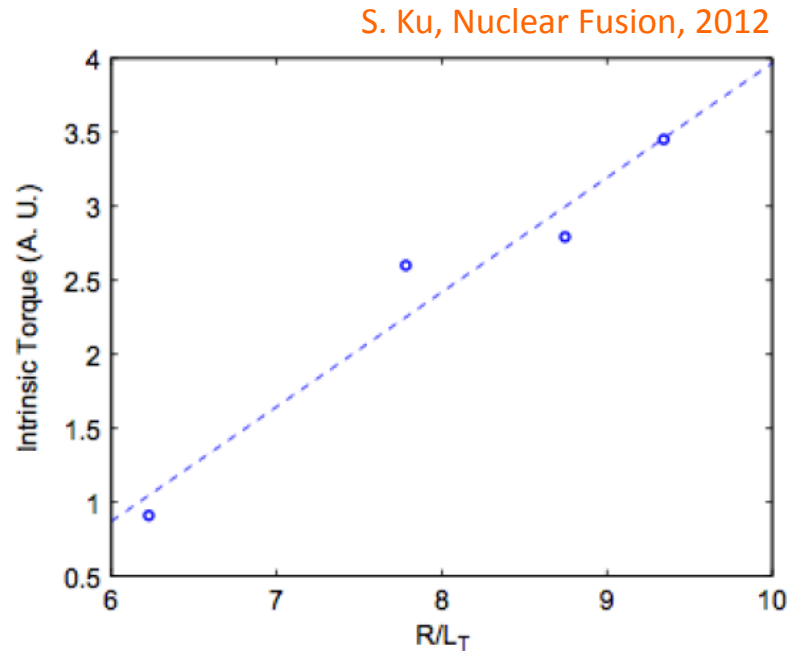


- ITGモード(イオンが関与する乱流)とTEMモード(電子が関与する乱流)で、トロイダル方向の乱流駆動の向きが反転。

J.M Kown, APTWG, 2011



# シミュレーション研究—residual stress の評価—



- **イオン**が関与する乱流 (ITG) による residual stress
- **イオン温度勾配**に依存して増加。

- **電子**が関与する乱流 (CTEM) による residual stress。
- **電子温度勾配**や**電子密度勾配**に依存して増加。

## まとめ

- 乱流による(角)運動量輸送研究がトーラスプラズマで進展。
- 実験観測
  - 非拡散輸送の存在を示した。
  - 自発回転が反転する時に乱流揺動特性の変化を観測。
- 理論的解釈
  - Symmetry breakingによりresidual stressが有限となり(角)運動量を輸送(勾配の生成)

実験室プラズマでは、residual stress (Reynolds stress) による(角)運動量輸送の検証が可能である。

- 現状では、計測機器の開発(複数の物理量同時計測、多地点同時計測)が必要。
- 基礎実験装置(計測が比較的容易)での検証実験。=> 28pEA-5稲垣講演

# 太陽とトーラスプラズマの比較

P. Diamond, IAEA-FEC 2012

|                    | Sun  | Tokamak  |
|--------------------|--|--|
| Heat Source        | fusion reaction in the core  | Heat deposition  |
| Turbulence Source  | $\nabla T$   | $\nabla T$   |
| Threshold          | Schwarzschild Criteria<br>$\frac{1}{T} \left  \frac{dT}{dz} \right  > (\gamma - 1) \frac{1}{\rho} \left  \frac{d\rho}{dz} \right $ | ITG<br>$R/L_T > R/L_{T,c}$   |
| Turbulence         | Convective Turbulence  | Drift-ITG Turbulence   |
| Symmetry Breaking  | Rotation, $\beta$<br>Stratification  | velocity shear, $\langle V_E \rangle'$<br>Intensity gradient, $I(x)$ , ... |
| Resultant Flow     | Polar Differential Rotation<br>$v_\phi(\theta)$  | Intrinsic Rotation<br>$v_{\parallel}(r)$                                   |
| Boundary Condition | Momentum loss to<br>solar wind   | Edge stresses, SOL flow<br>effects, neutral drag                           |