

フローが乱流輸送に 及ぼす影響

2021.7.20 小林達哉

背景

フローが乱流輸送にどのように影響を与えるかは開放系プラズマの散逸構造形成の背景物理を理解する上で重要

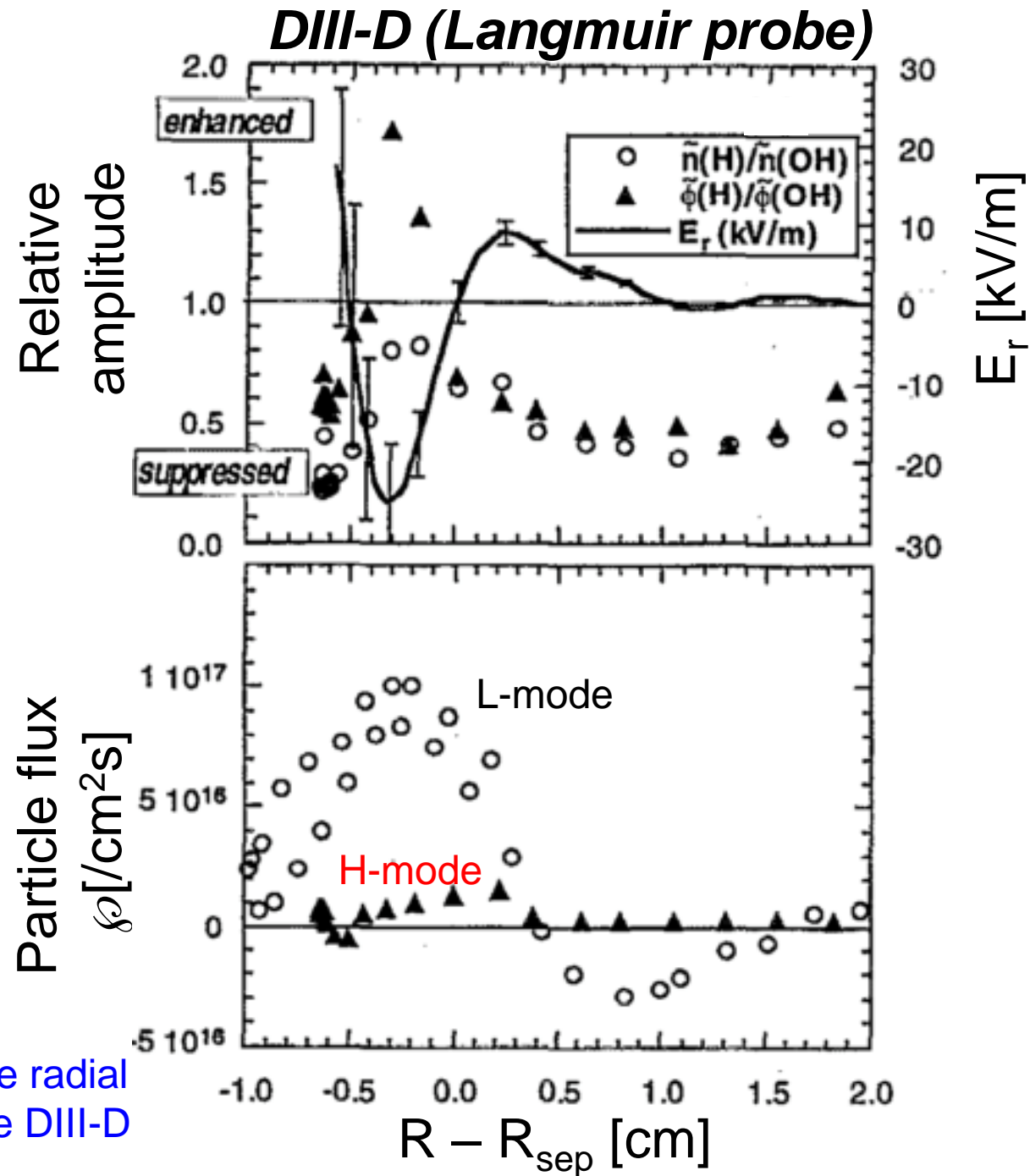
例：粒子輸送

$$\varphi = B^{-1} k_{\theta} |\tilde{n}| |\tilde{\varphi}| \sin(\langle n \rangle)$$

計測しやすい密度揺動振幅だけではなく、電位揺動、位相差、波数を同時計測する必要がある

振幅分布と輸送分布は大きく異なる

電場シア・密度振幅だけでは説明不可能



“Beyond paradigm: Turbulence, transport, and the origin of the radial electric field in low to high confinement mode transitions in the DIII-D tokamak”, R. A. Moyer et al., Phys. Plasmas **2** 2397 (1995)

Contents

ボトルネックは電場シア・密度振幅に基づく研究のパラダイム

ボトルネックを解消できた例を示す

1. LH遷移の際の電場励起が輸送に及ぼす影響 (JFT-2Mトカマク)

“Turbulent transport reduction induced by transition on radial electric field shear and curvature through amplitude and cross-phase in torus plasma”, T. Kobayashi et al., Scientific Reports **7**, 14971 (2017)

2. 直線装置における輸送結合素過程の研究 (直線プラズマPANTA)

“A Concept of Cross-Ferroic Plasma Turbulence”, S. Inagaki et al., Scientific Reports **6**, 22189 (2016)

“Structure formation in parallel ion flow and density profiles by cross-ferroic turbulent transport in linear magnetized plasma”, T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas **23**, 102311 (2016)

JFT-2MにおけるLH遷移研究

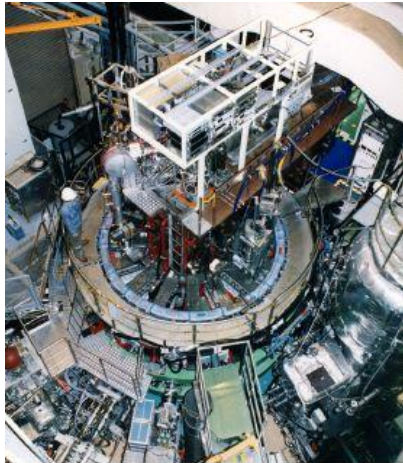
JFT-2M tokamak

$$R = 1.3 \text{ m}, a = 0.3 \text{ m}$$

$$B_t = 1.17 \text{ T}$$

$$I_p = 170 \text{ kA}$$

$$q_{95} = 2.9$$

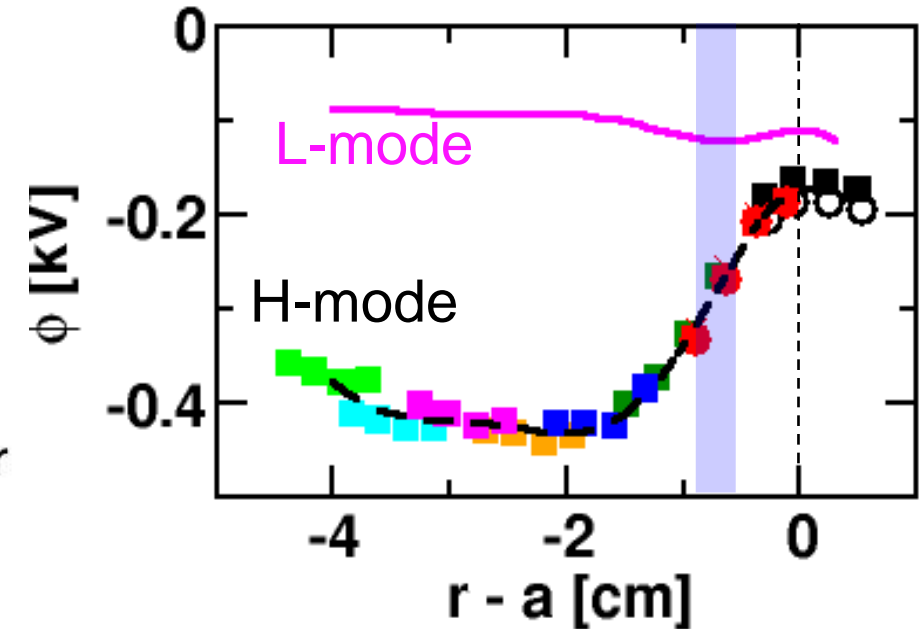
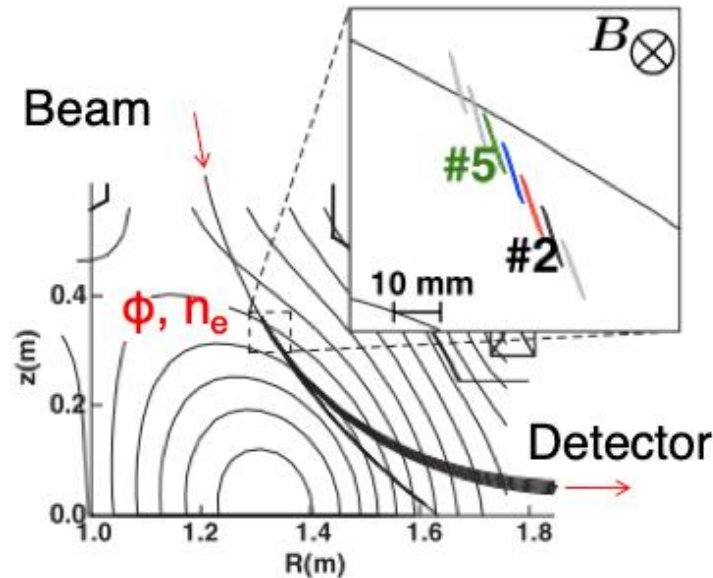


$$\bar{n}_e = 1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{NBI power} = 750 \text{ kW}$$

(Threshold power)

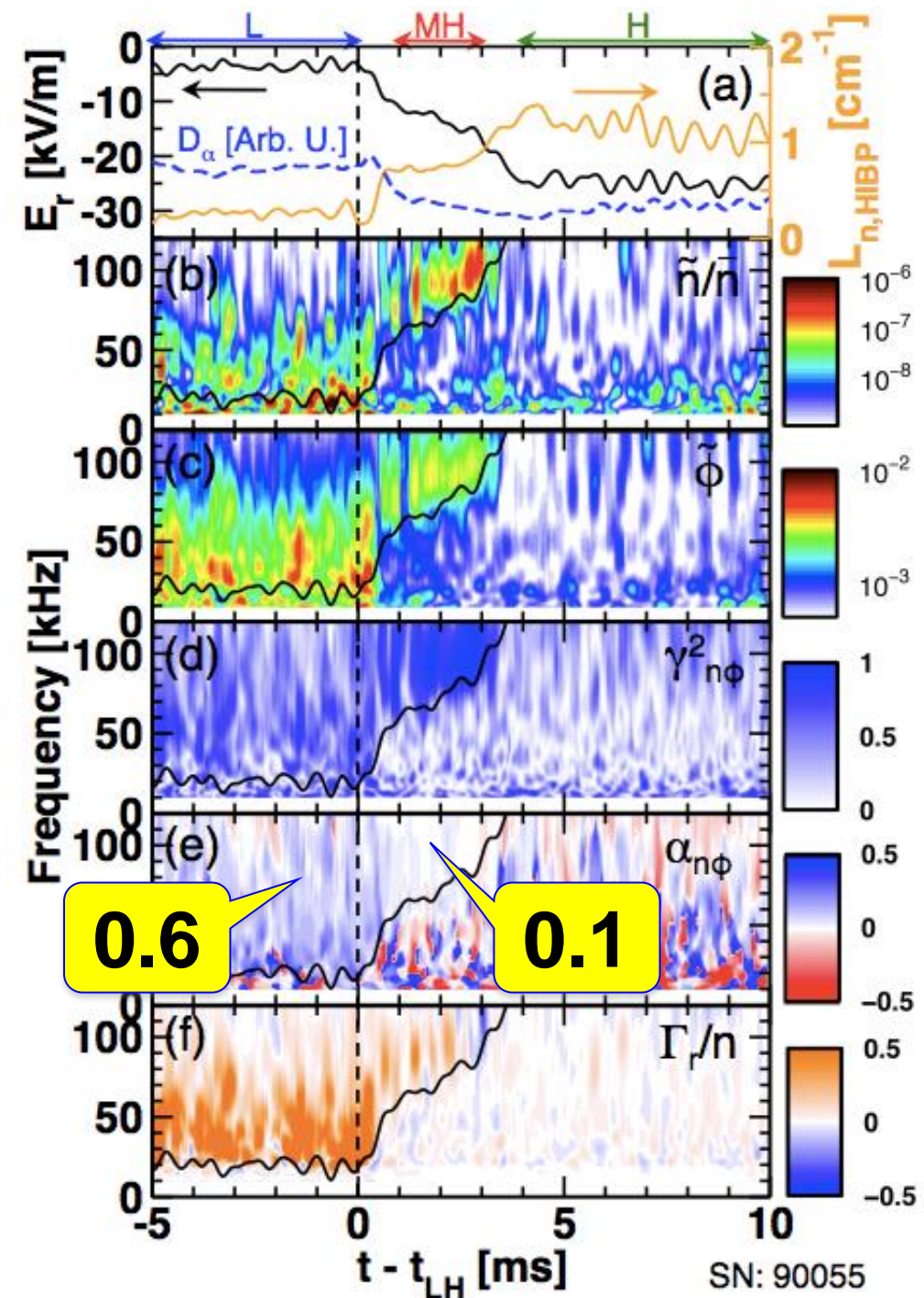
Heavy Ion Beam Probe



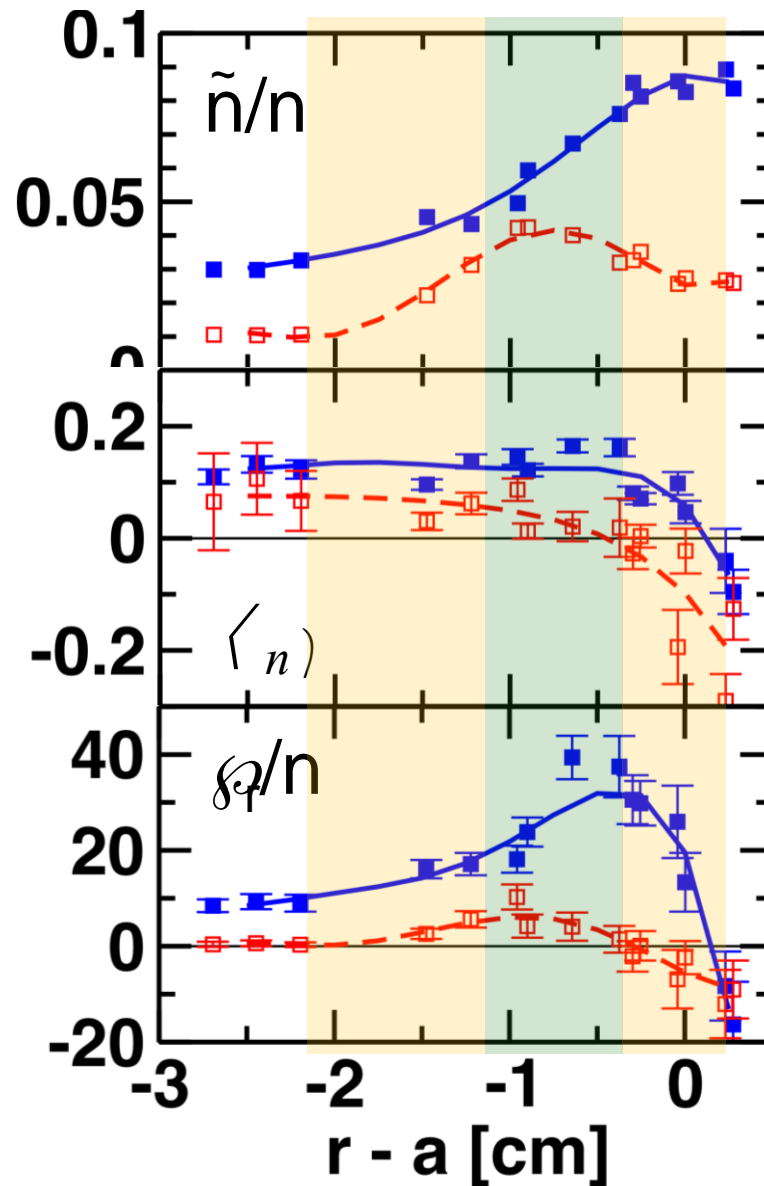
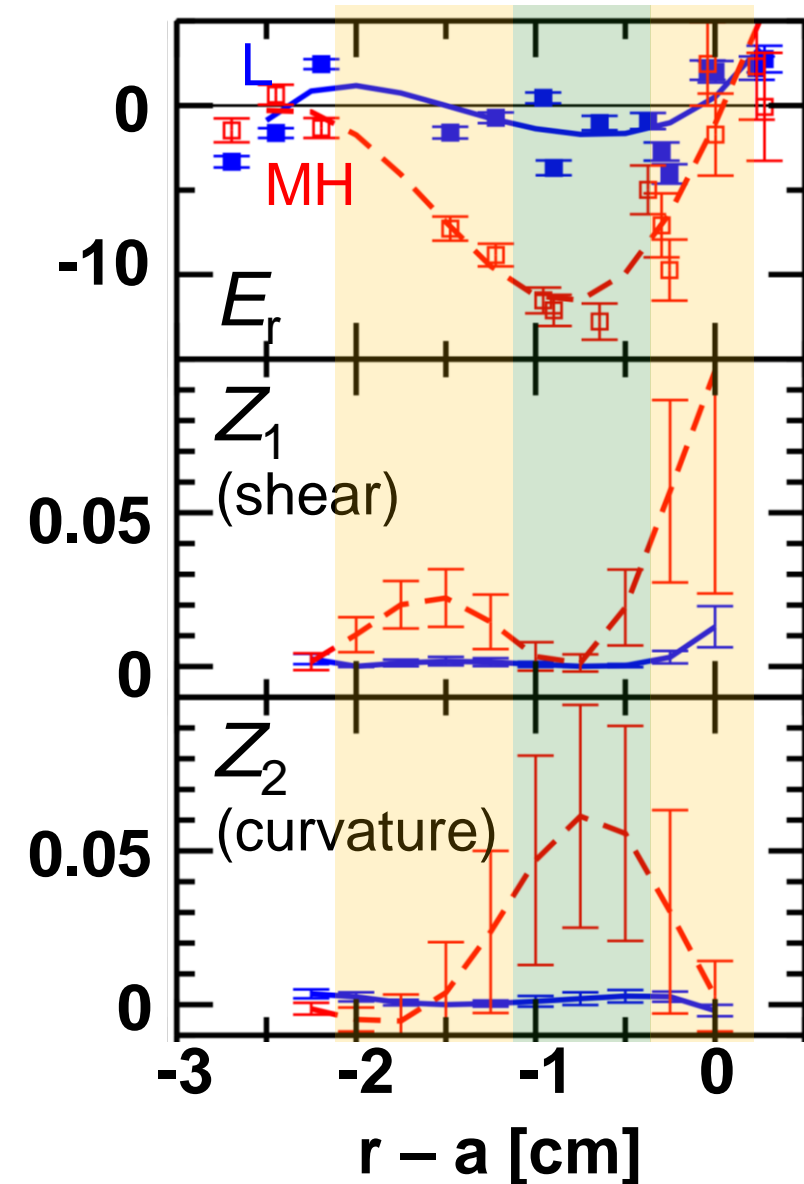
- 電位 ϕ と密度 n_e を同時計測
- LH遷移後に負電場構造が形成される

乱流スペクトルの時間発展

- L → M-H → Hモードへの遷移
- M-Hモードでは乱流は完全に消滅しない
- 位相差が減少し輸送が抑制される



乱流分布の変化



- Er well構造はシア領域と曲率領域に分けられる

- **Shear effect**

Biglari, Diamond, Terry 1990

$$Z_1 = \rho_i^2 (V_d B)^{-2} E_r'^2$$

- **Curvature effect**

(c.f. Modulational coupling)

Diamond, Itoh, Itoh, Hahm PPCF 2005

Itoh NF 2017

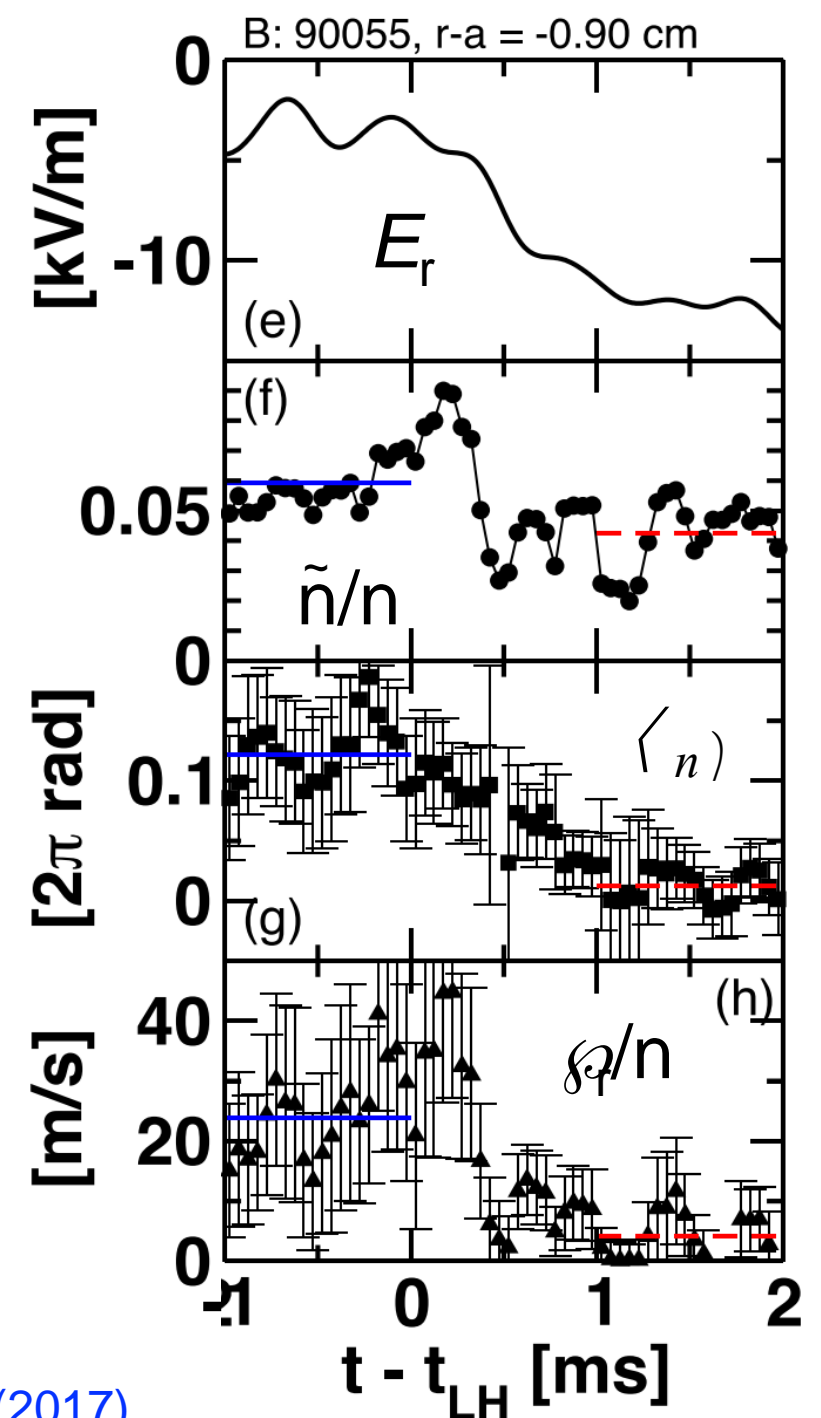
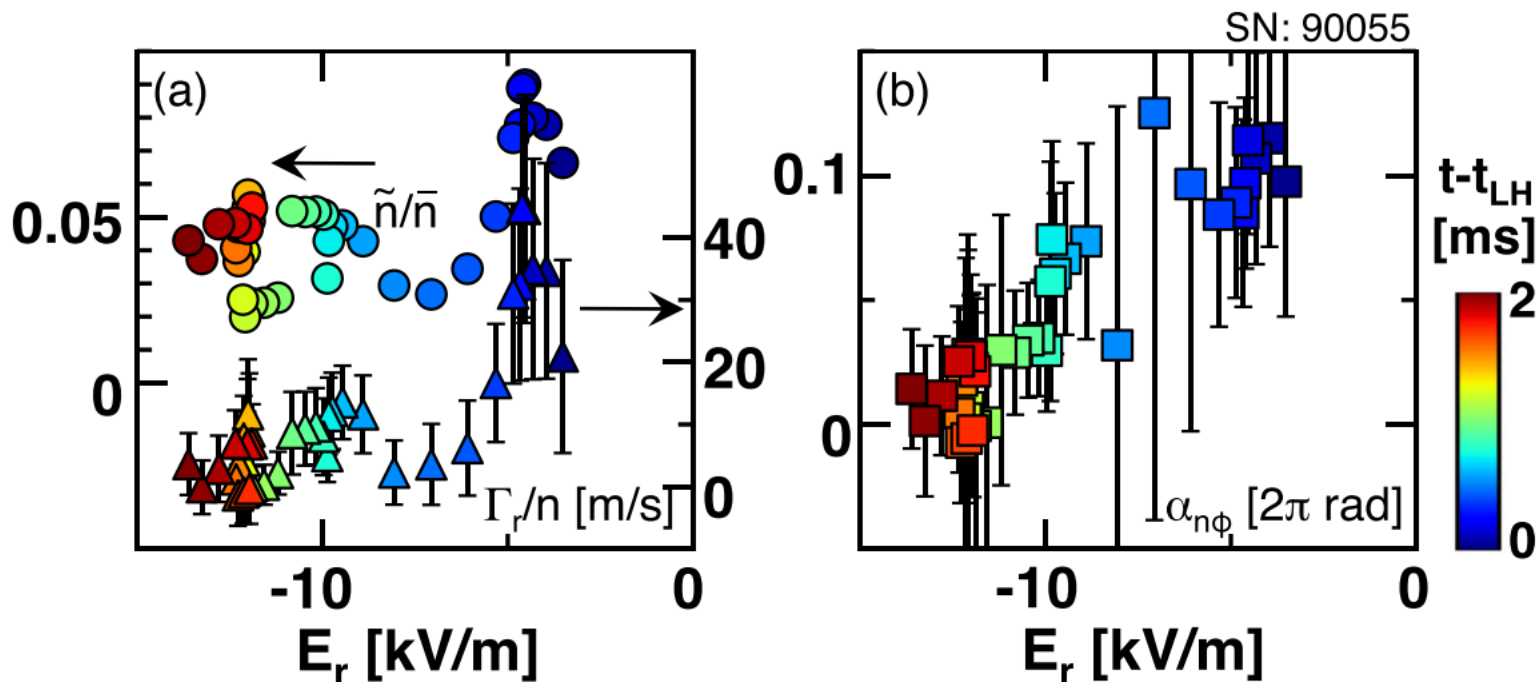
$$Z_2 = \rho_i^2 (V_d B)^{-2} (E_r - V_{\text{tor}} B_\theta) E_r'$$

$$l = \frac{1}{1 + (k\rho_i)^{-2} (Z_1 + Z_2)} l_0$$

Kamiya et al., Sci. Rep. 6, 30585 (2016)

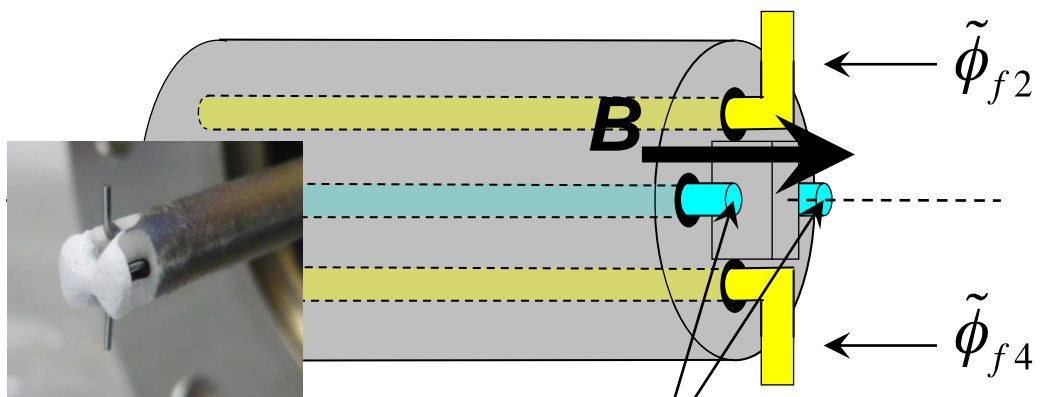
乱流振幅・位相の変化の時間スケール, 電場依存性

- 振幅と位相は10倍程度の時間スケールの違い
- 振幅は電場のわずかな変化で抑制, その後飽和
- 位相は電場の値によらず徐々に減少
- 振幅, 位相抑制の両方の効果で輸送が減少する



PANTAにおけるフロ－構造形成研究

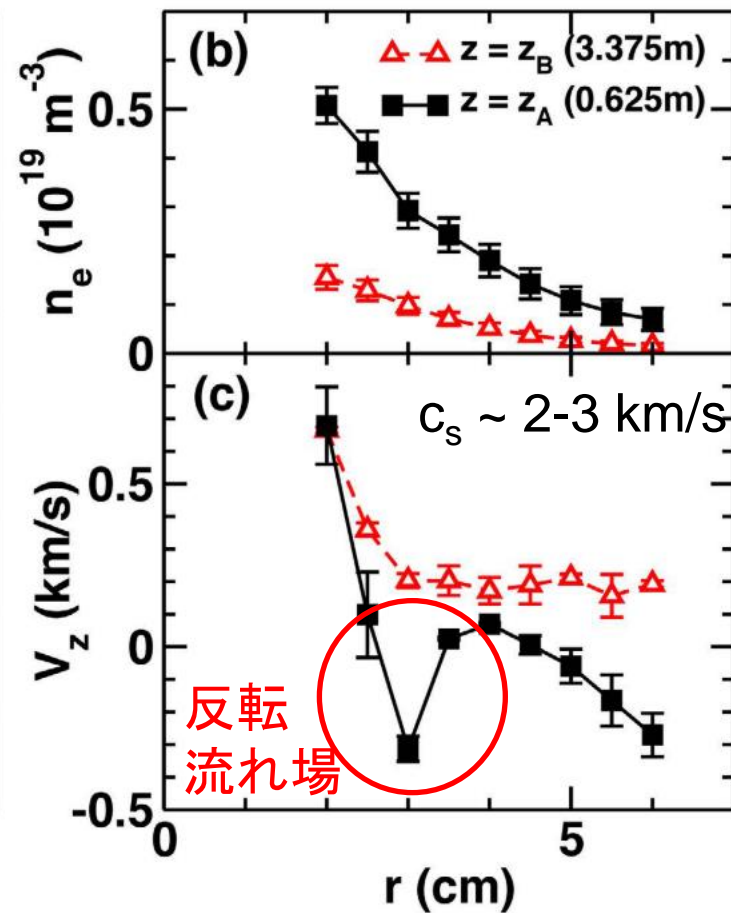
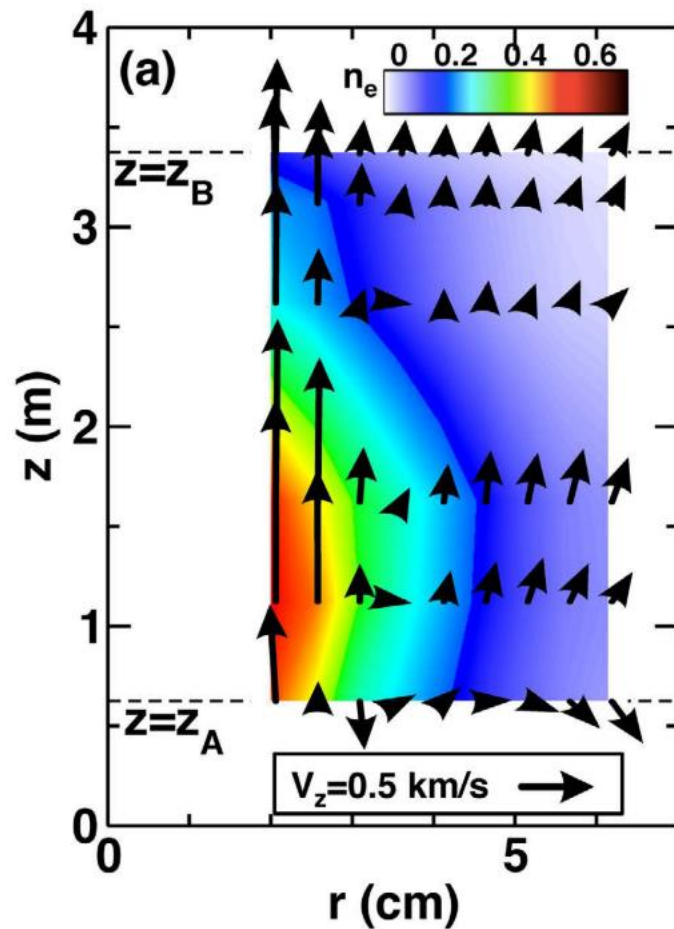
Mach probe array



Mach probe (I⁺, I⁻)

速度場, 電子密度, 電場(浮遊電位)

r-z 2次元計測



ドリフト波による平行方向流の励起

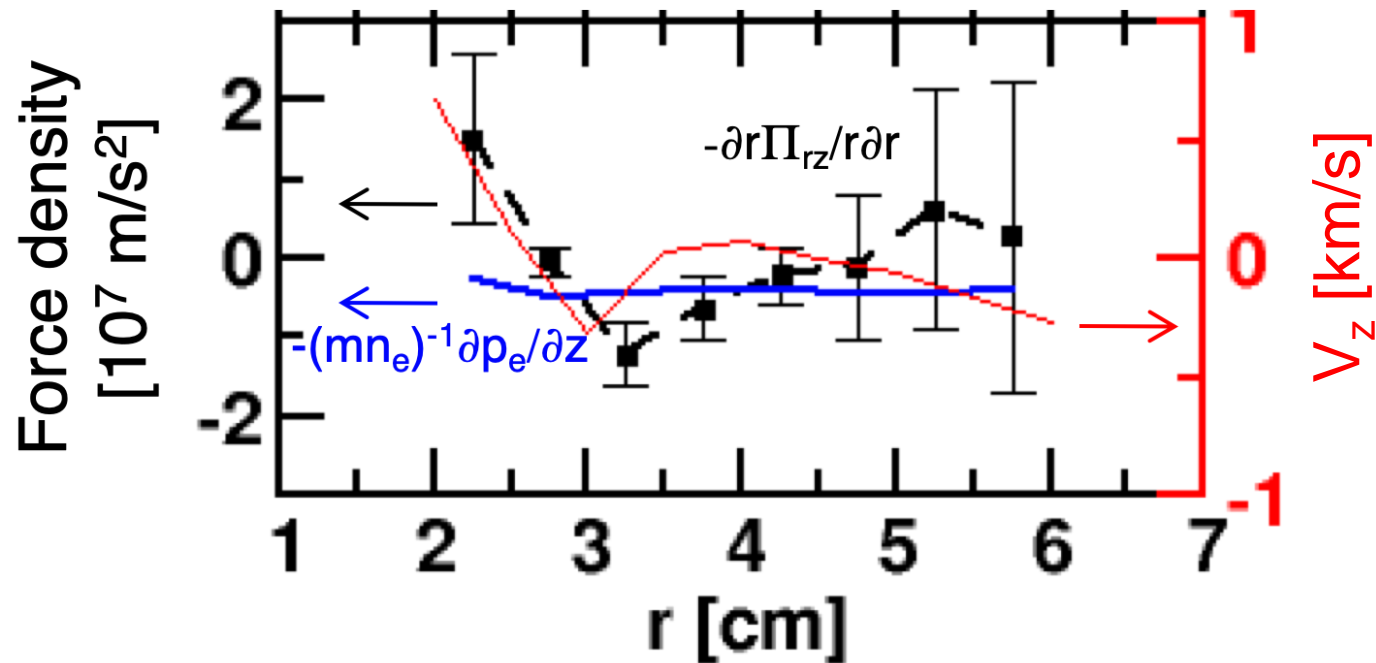
定常運動方程式

$$0 = \underbrace{-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z}}_{\text{圧力項}} - \underbrace{m_i n \frac{1}{r} \frac{\partial (r \Pi_{rz})}{\partial r}}_{\text{レイノルズ応力}} - \underbrace{m_i n n_{in} V_z}_{\text{中性粒子によるドラッグ}}$$

Force balance

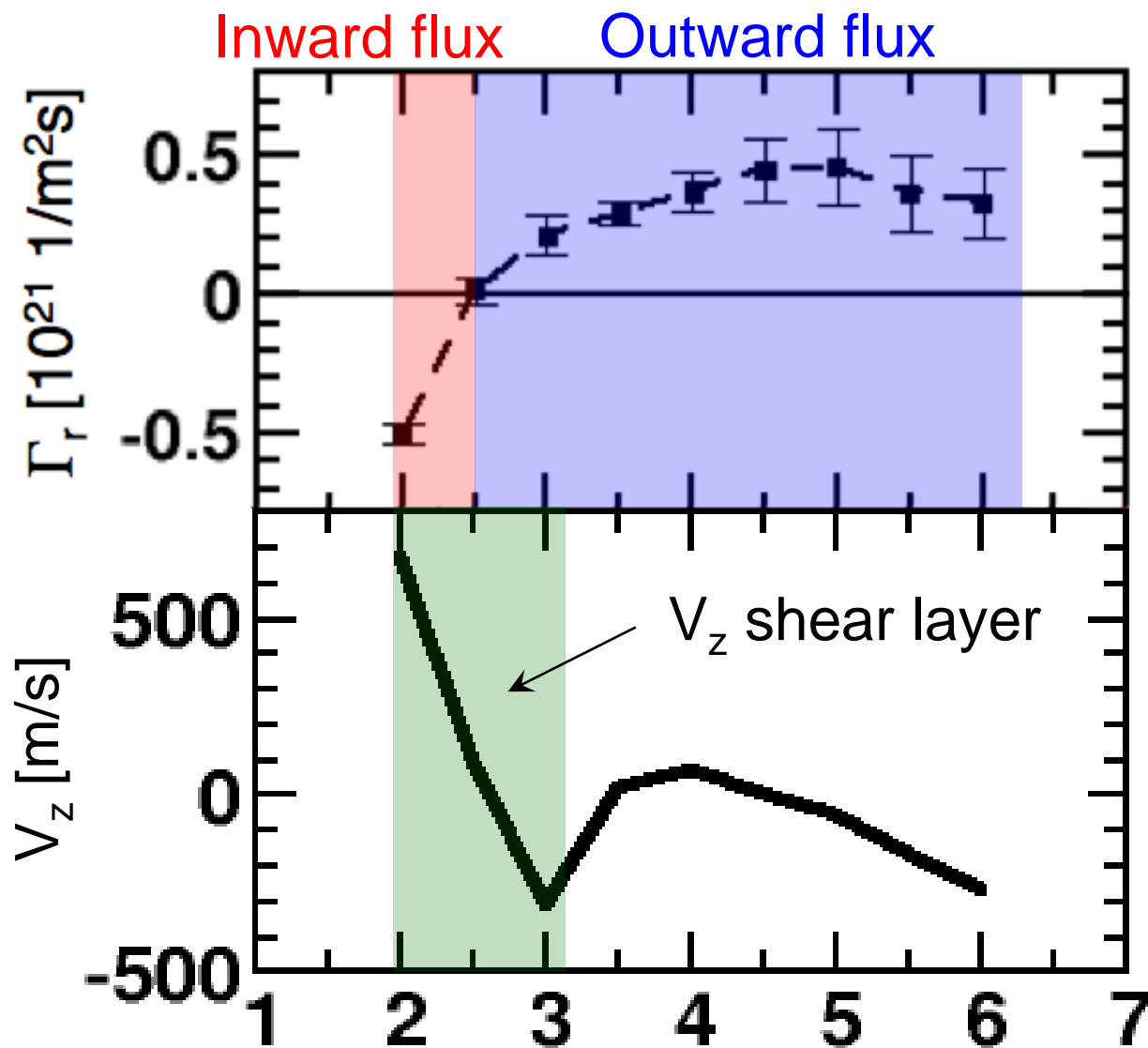
$$V_z = \frac{1}{v_{in}} \left(\underbrace{-\frac{1}{m_i n} \frac{\partial p}{\partial z}}_{\text{圧力項}} - \underbrace{\frac{\partial (r \Pi_{rz})}{r \partial r}}_{\text{レイノルズ応力}} \right)$$

$10^4 - 10^5 \text{ [s}^{-1}\text{]},$



- ・レイノルズ応力が駆動する流れ場は, ドラッグと釣り合う
- ドリフト波が線形不安定化し, reversed flowを作る.

流れ場構造の飽和機構

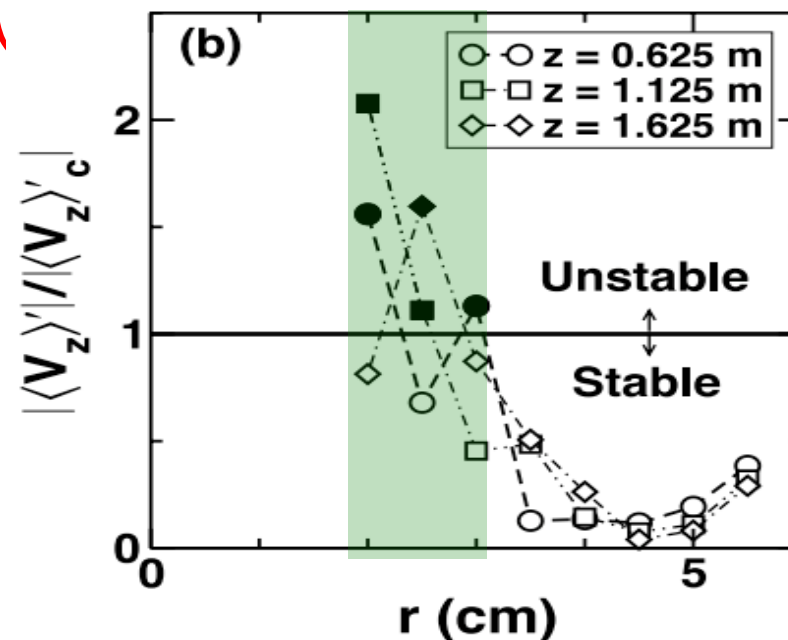


外向き粒子輸送:ドリフト波 **不安定**

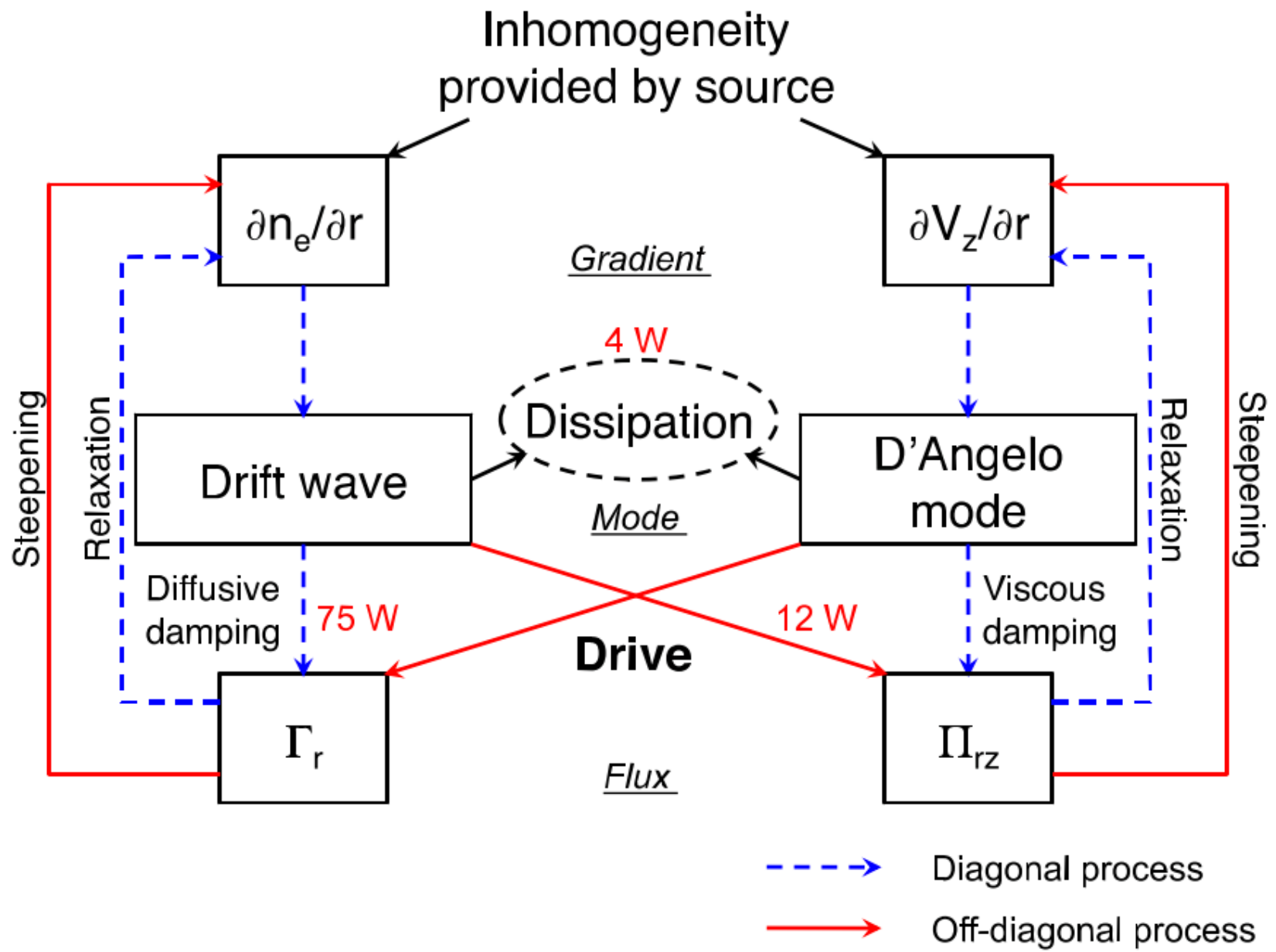
内向き粒子輸送:ドリフト波 **安定**

内向き粒子輸送を作っている不安定性は何か?

➤ **平行流シアが駆動する不安定性(Diagonal mode)が原因**



Drift wave と D'Angelo mode が共存する輸送システム



- 単一輸送チャンネルで見ればエントロピーが下がって見える場合がある
- 乱流プラズマで構造形成機構を理解するためには、乱流輸送の定量化と不安定性の同定が欠かせない

S. Inagaki et al., Scientific Reports **6**, 22189 (2016)
 T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas **23**, 102311 (2016)

まとめ

1. LH遷移の際の電場励起が輸送に及ぼす影響 (JFT-2Mトカマク)

LH遷移の際の乱流輸送抑制を観測

密度揺動振幅は輸送抑制の一部を表すにすぎない。位相差の観測が重要

電場シアだけでなく曲率も輸送抑制に効果を示す

T. Kobayashi et al., Scientific Reports **7**, 14971 (2017)

2. 直線装置における輸送結合素過程の研究 (直線プラズマPANTA)

ドリフト波の不安定化→速度場構造の形成→D'Angelo modeの生成と速度場の飽和

乱流と構造形成が複雑に作用し合うシステムの物理機構を解明

S. Inagaki et al., Scientific Reports **6**, 22189 (2016)

T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas **23**, 102311 (2016)

乱流輸送の定量的・同時多点計測が現象を解明する鍵となった