

大型ヘリカル装置LHDプロジェクト が切り拓いたプラズマ物理の地平

—乱流と非線形・非局所・非定常現象—

稲垣 滋、徳沢季彦¹、小林達哉¹

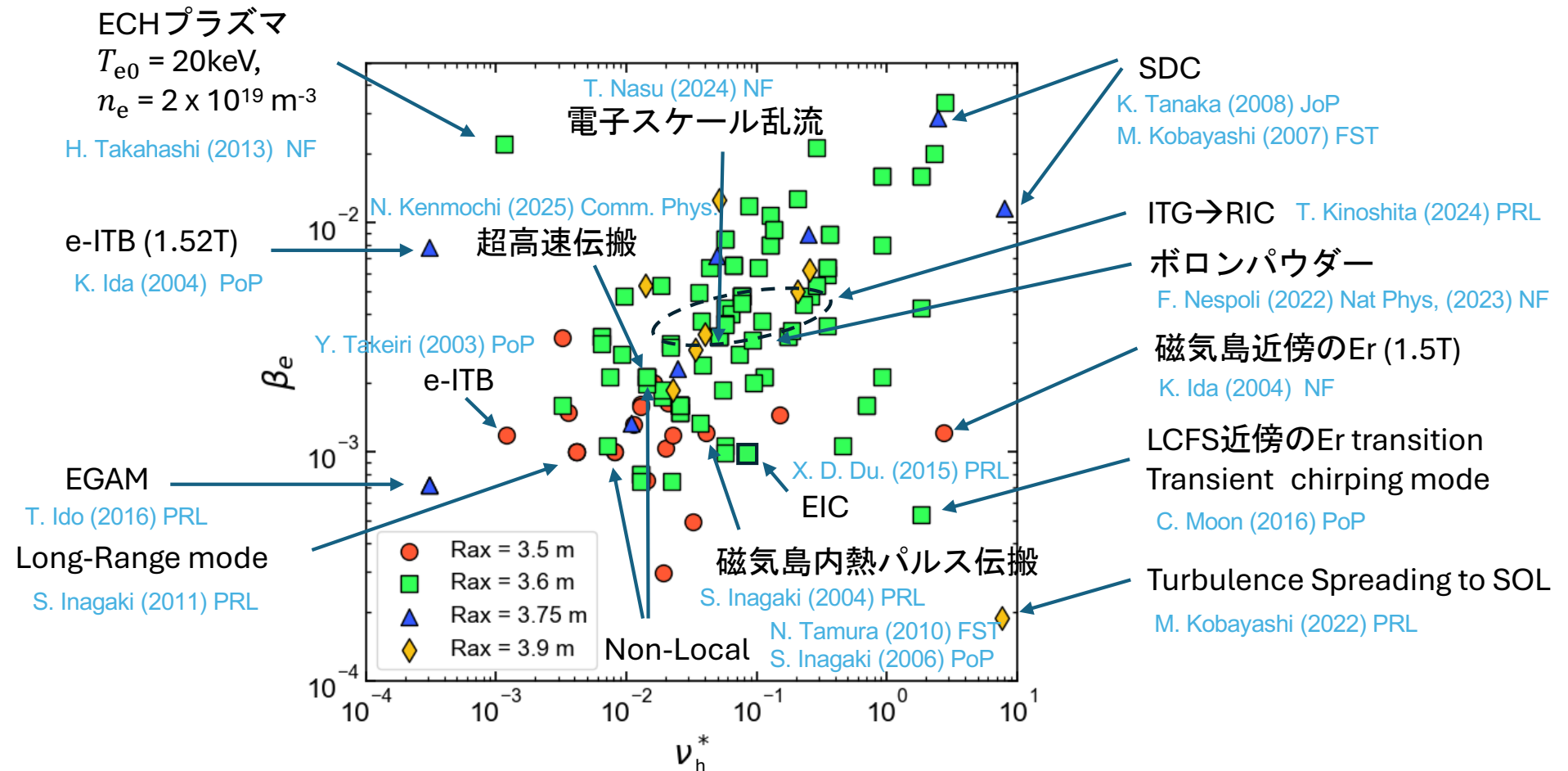
京大工ネ理工研、NIFS¹

Special Thanks To

小菅佑輔（九大）、共同研究者の皆様、LHD実験チーム

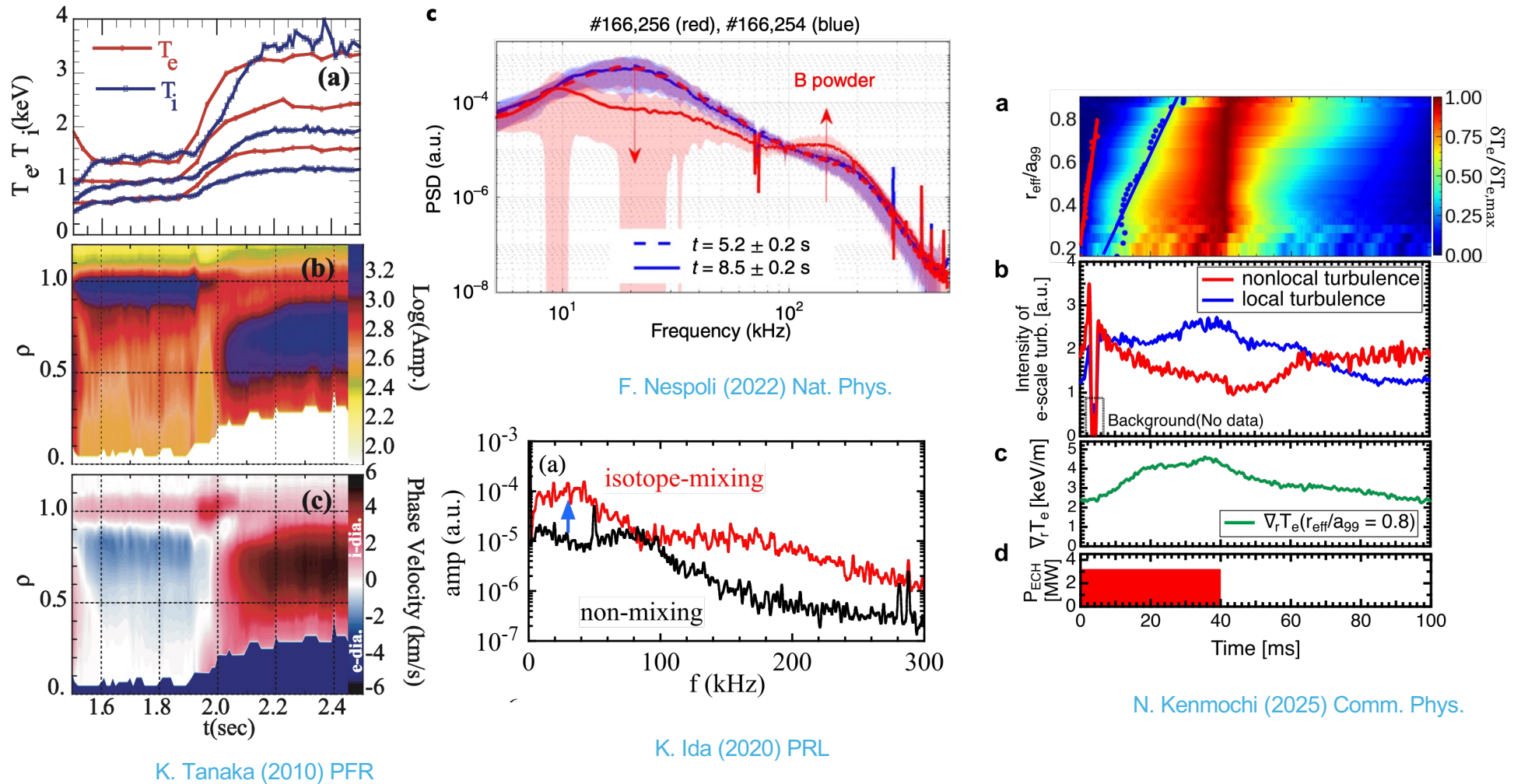
対象となるプラズマ

輸送、乱流のカテゴリーで出版された論文に用いられているデータから抽出



低ベータ、低一中衝突率での多様な乱流輸送現象を対象

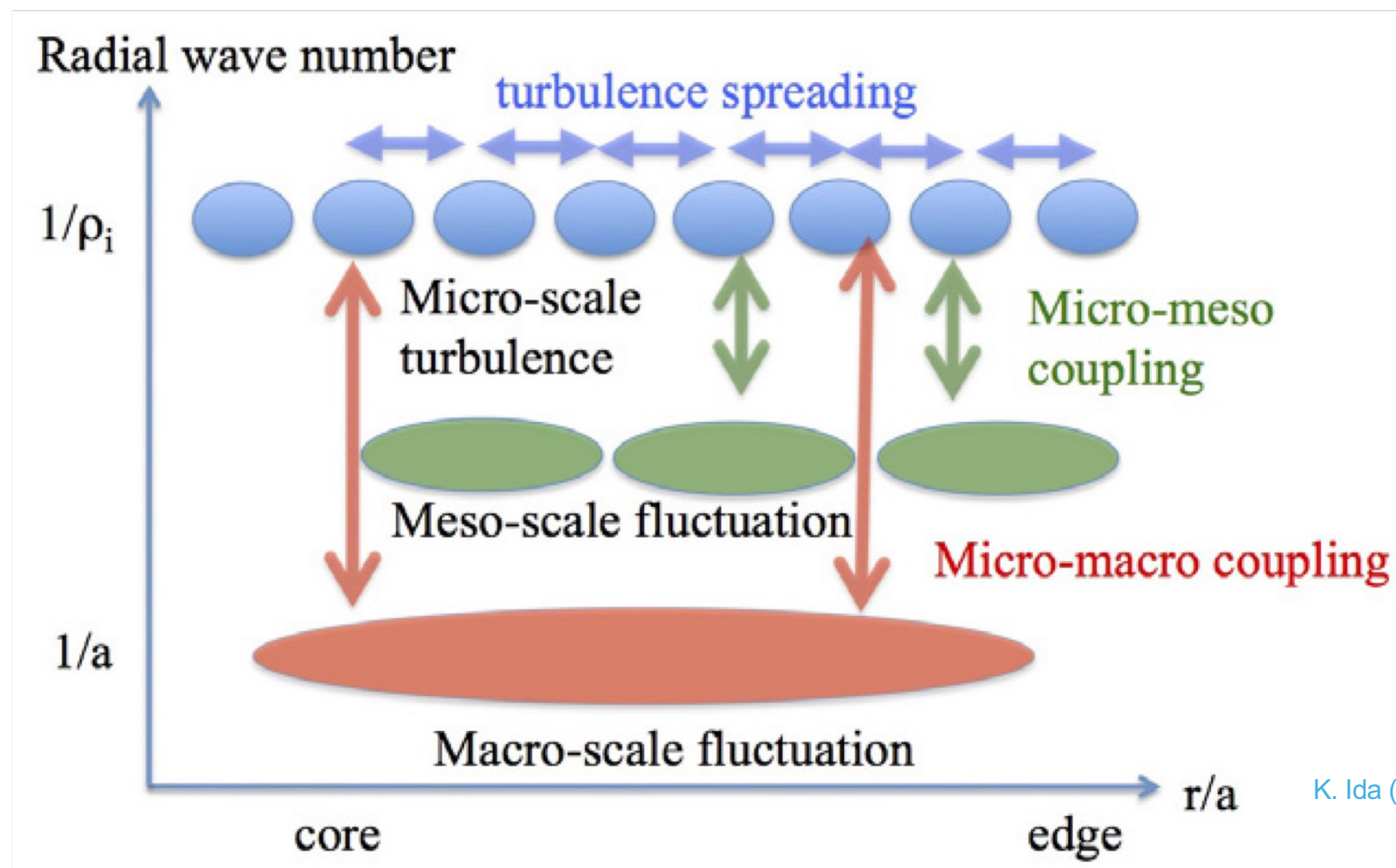
LHDにおける乱流と輸送の関係



勾配の変化と乱流強度の変化、閉じ込めモードと乱流スペクトルの変化が観測されている

何が分かったのか？

Multi-Scale Turbulence という描像とそれによるプラズマの非線形性・非局所性・非定常性の定性的理解

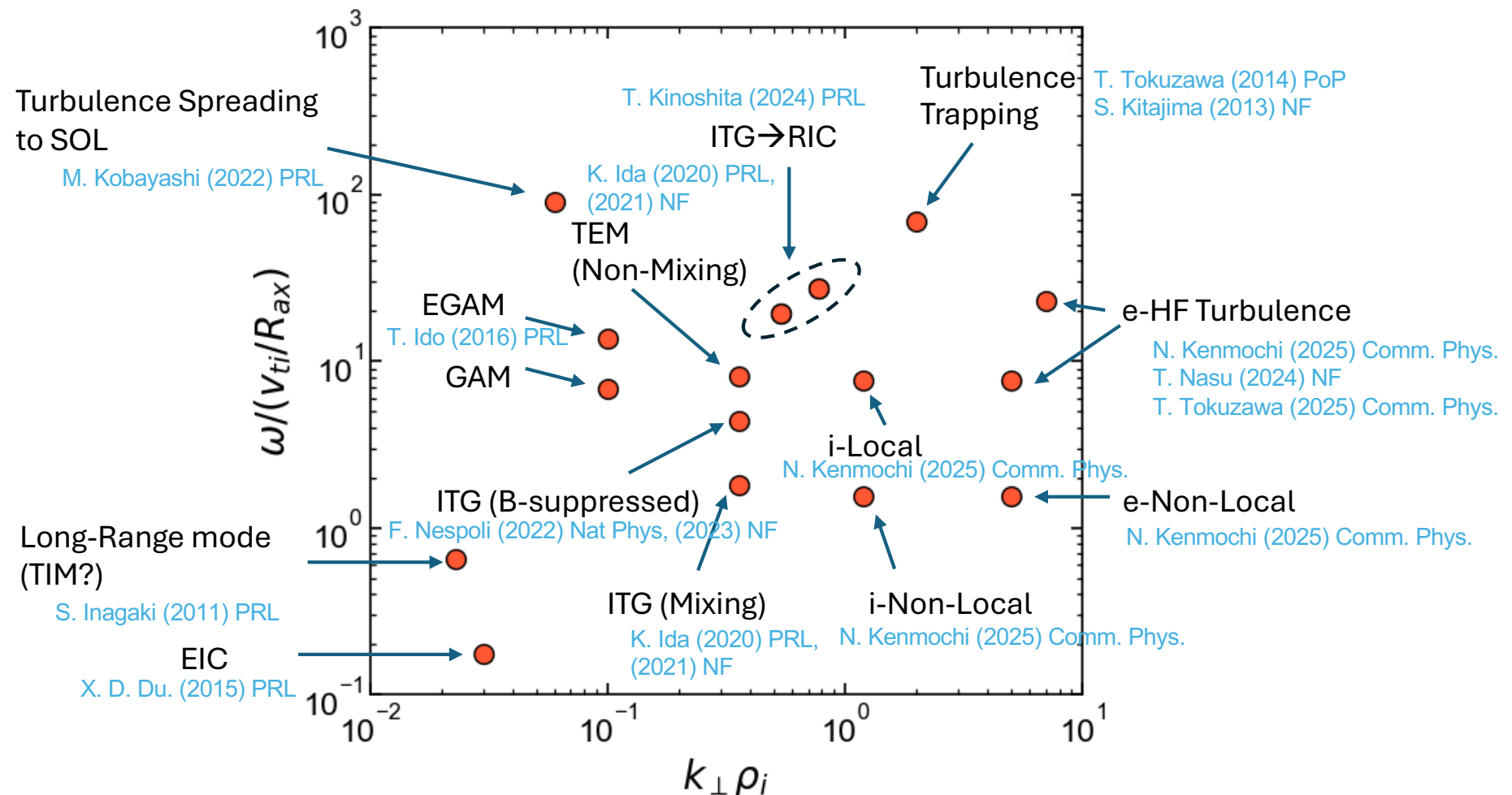


K. Ida (2015) NF

観測された乱流の時空間スケール

3桁に渡る時空間スケール

Long-Range mode や e-scale Turbulence の観測



Multi-Scale Turbulence の実測

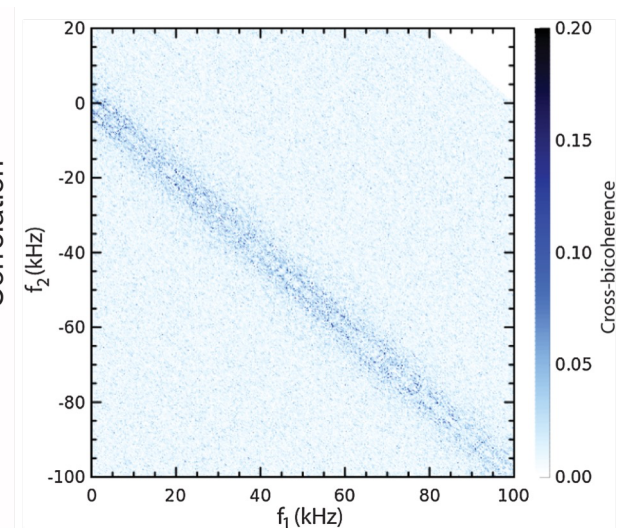
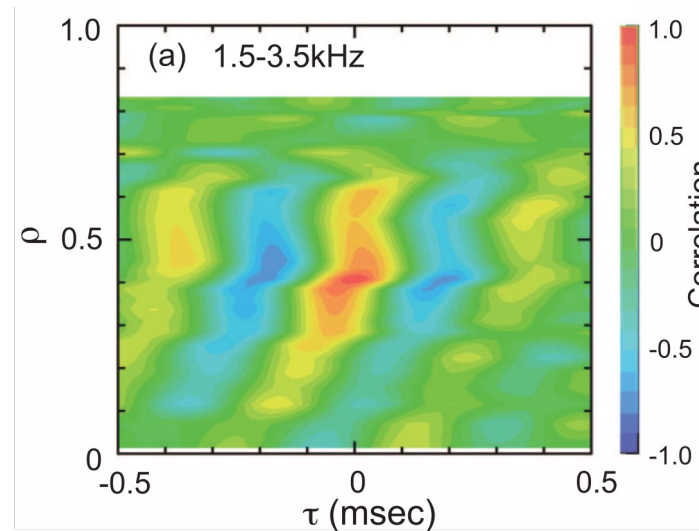
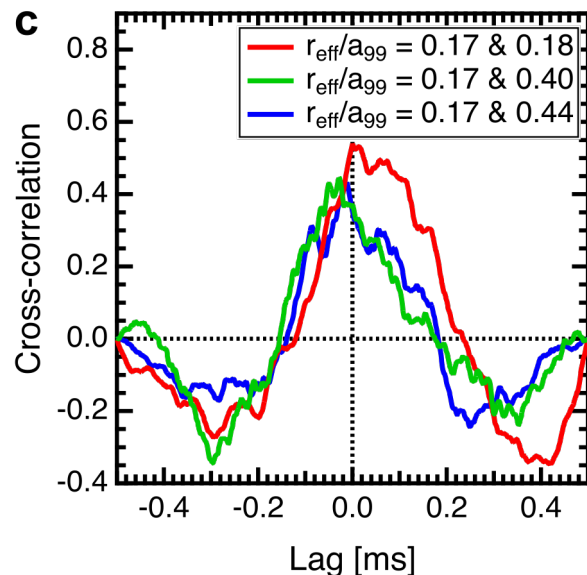
長距離相関モードと異スケールモード結合

6

同時多点広域計測や相関解析の進展

三波結合の観測

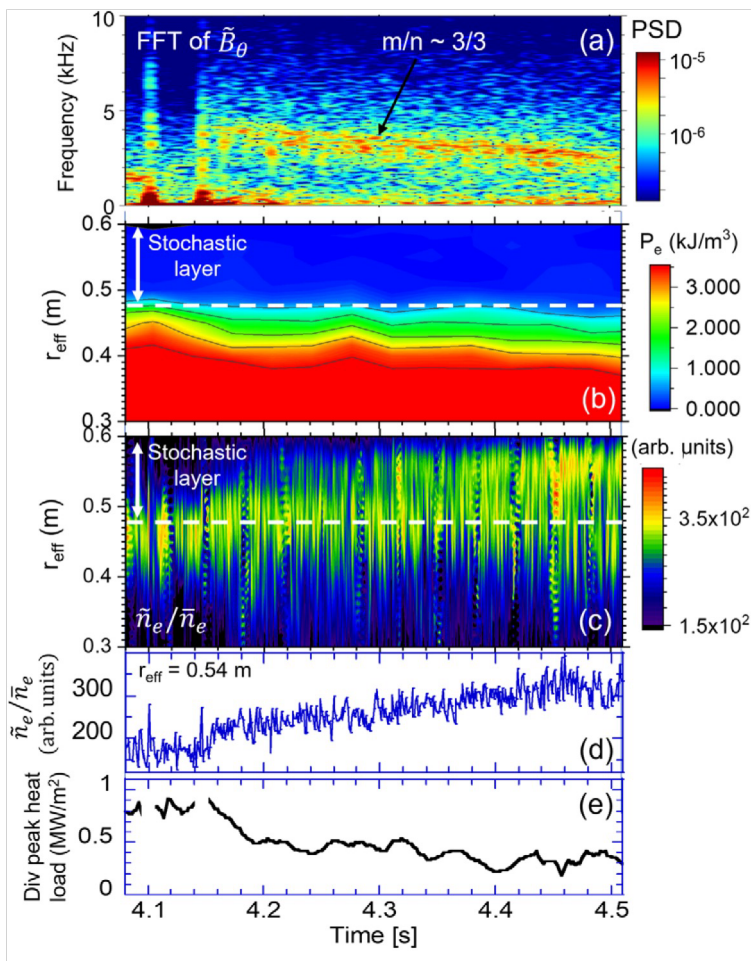
→ パラメトリック崩壊不安定性
モジュレーショナル不安定性
乱流ダイナミクスの観測



エッジ・SOLでの強非線形現象

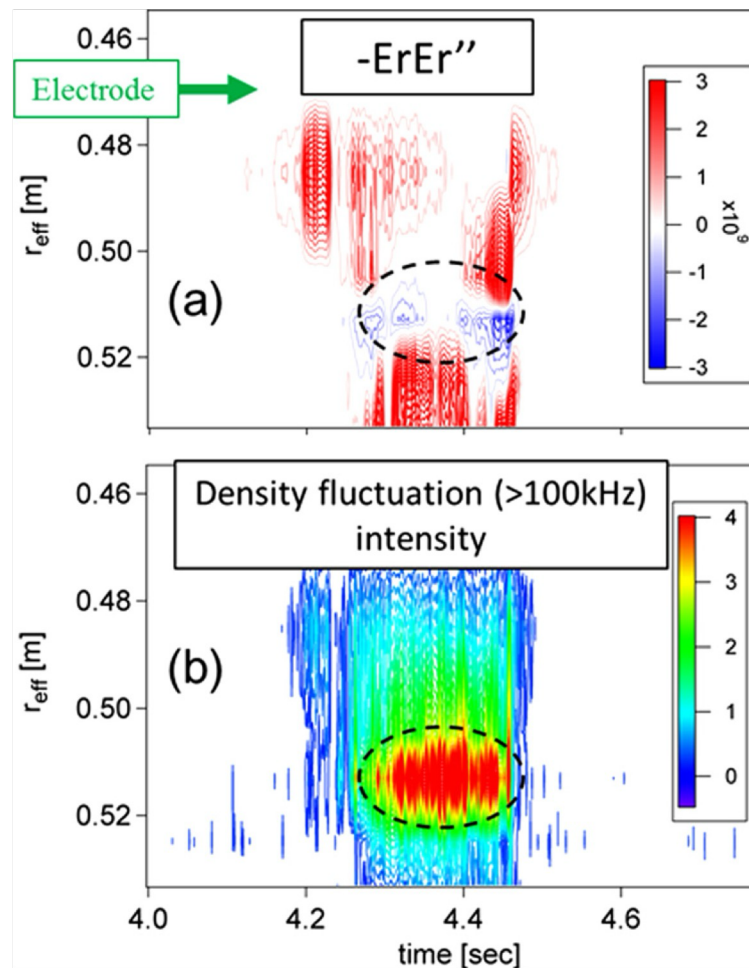
7

Turbulence Spreading to SOL



M. Kobayashi (2022) PRL

Turbulence Trapping



T. Tokuzawa (2014) PoP

LHDでの非線形現象の多様性を示す

多様な乱流の非線形性の統合的理解

8

Kubo Number (K) の導入

磁場擾動に対しては $K = \frac{\tilde{b} l_{\parallel}}{B_0 L_s}$

$$K = \frac{\tilde{u} \tau_c}{L_c}$$

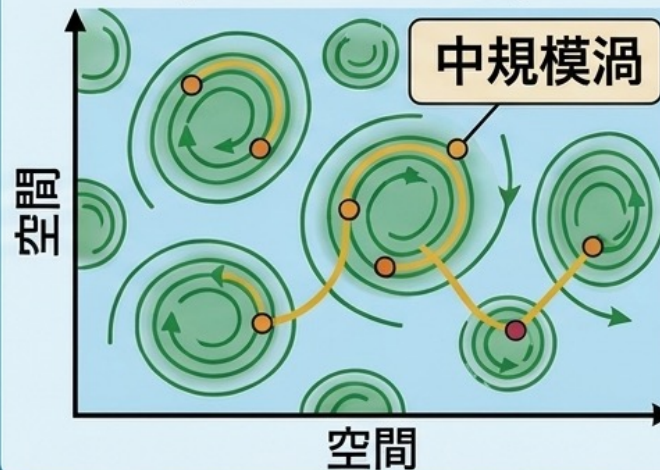
- K - クボ数
- $\tilde{u}$ - 速度ゆらぎ

- τ_c - 相関時間
- L_c - 相関長

$K < 1$: 高速変動・通常拡散
(短時間相関)



$K \sim 1$: 中間領域
(メソスケール渦)



$K \gg 1$: 凍結場・パーコレーション
(長時間相関)



$$K \sim 1 \text{ なら } \chi \sim \frac{(\tilde{u} \tau_c)^2}{\tau_c} = \frac{L_{c,1}^2}{\tau_{c,1}} \approx \chi_{GB}$$

久保数による乱流と輸送との関係の評価

$$K \sim 1 \quad \text{なら} \quad \chi \propto K^2$$

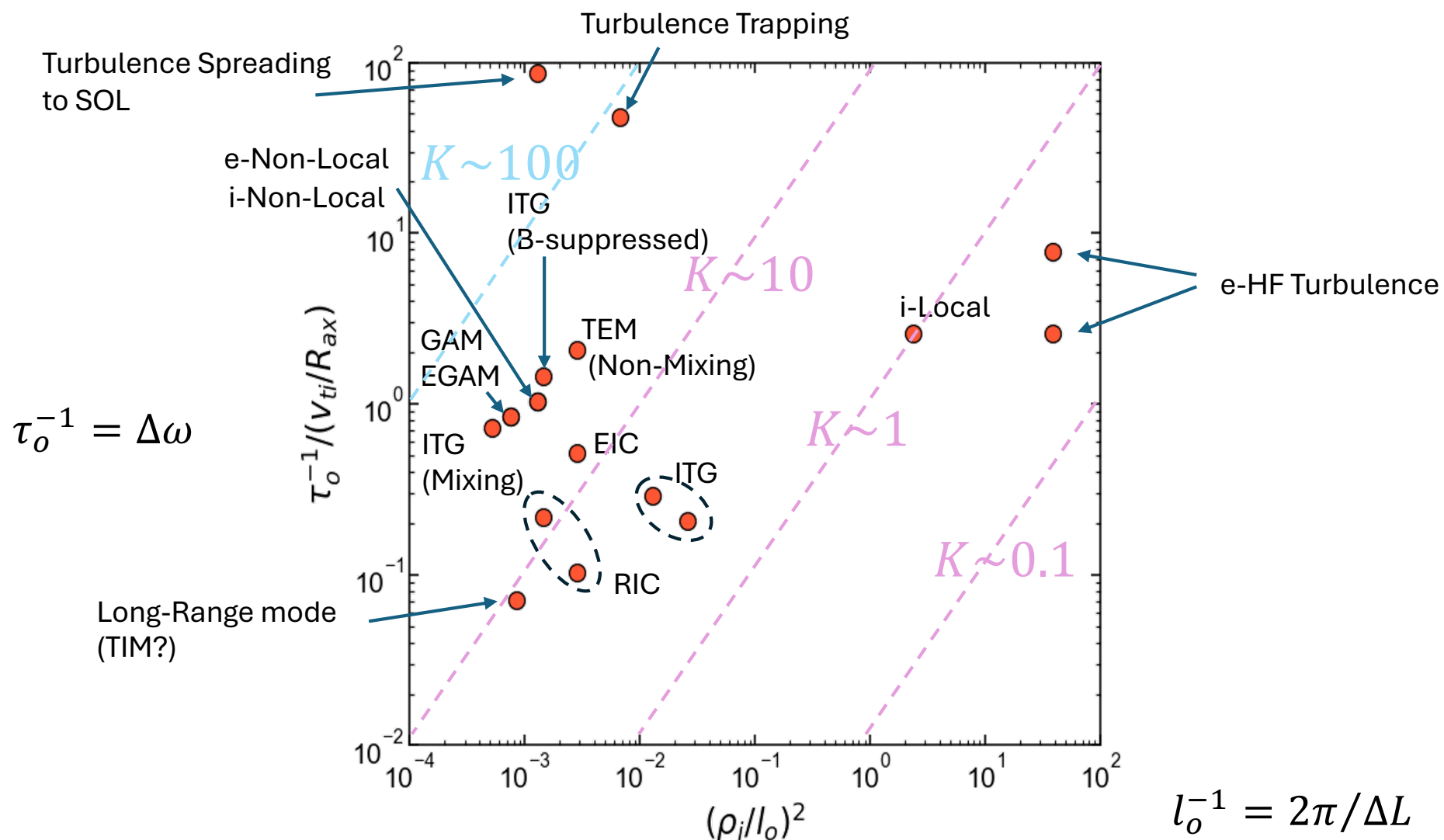
$$\text{観測結果が} \quad \left(\frac{L_o^2}{\tau_o} \right) / \chi_{GB} \gg 1 \quad \text{なら} \quad \frac{L_o^2}{\tau_o} = K^2 \frac{L_c^2}{\tau_c} \quad \text{を示唆}$$

$$\text{そこで} \quad \frac{L_c^2}{\tau_c} \sim \frac{L_{c,1}^2}{\tau_{c,1}} \quad \text{とし} \quad K^2 = \left(\frac{L_o^2}{\tau_o} \right) / \chi_{GB} \quad \text{で評価}$$

$$y = \frac{(\tau_o)^{-1}}{v_{ti}/R_{ax}} \quad x = \frac{\rho_i}{L_o} \quad \frac{y}{x^2} = \left(\frac{L_o^2}{\tau_o} \right) / \left(\rho_i^2 \frac{v_{ti}}{R_{ax}} \right) = K^2$$

$x^2 - y$ プロットから K を評価する

久保数による乱流非線形性の評価



久保数は $K \sim 0.1-10$ (ジャイロボーム領域) 以外にも $K > 10$ も存在

観測された大きな久保数 ($K \gg 1$)

11

コヒーレント構造の介入 ($K \sim 20-30$)

帯状流やGAMは寿命が長く空間的に大きい

これらの共存によりシステムの相関時間と相関長は長くなる

パーコレーション理論 ($K > 100$)

渦の寿命が長くなり電位等高線は迷路のように中心と周辺をつなげる、一方で多くの領域で粒子は渦に捕捉される

M. B. Isichenko (1992) Reviews of Modern Physics

Streamer のような輸送



χ は局所輸送を表すのではなく、系のマクロな空間のつながり方を示す量

K は非線形性ととともに非局所性の指標にもなりうる

プラズマ乱流のレイノルズーレイリー図

12

乱流のパターンや境界(存在すれば)を可視化したい
先例としてRe-Ra図がある

電子の自由度として断熱度 α を考える

$$\alpha = \frac{(k_{\parallel} v_{te})^2}{\nu_{ei} \omega} \quad \nu_{ei} \rightarrow 0 \text{ で } \alpha = \left(\frac{k_{\parallel} v_{te}}{\omega^*} \right)^2 \quad \begin{array}{l} \text{無衝突電子} \\ \text{ランダウ減衰, 電子慣性} \end{array}$$

$(\nu_{ei} < \omega)$

$\alpha \ll 1$ 流体的

$\alpha \sim 1$ 位相混合が最大

$1 \ll \alpha$ 断熱電子

2D Euler

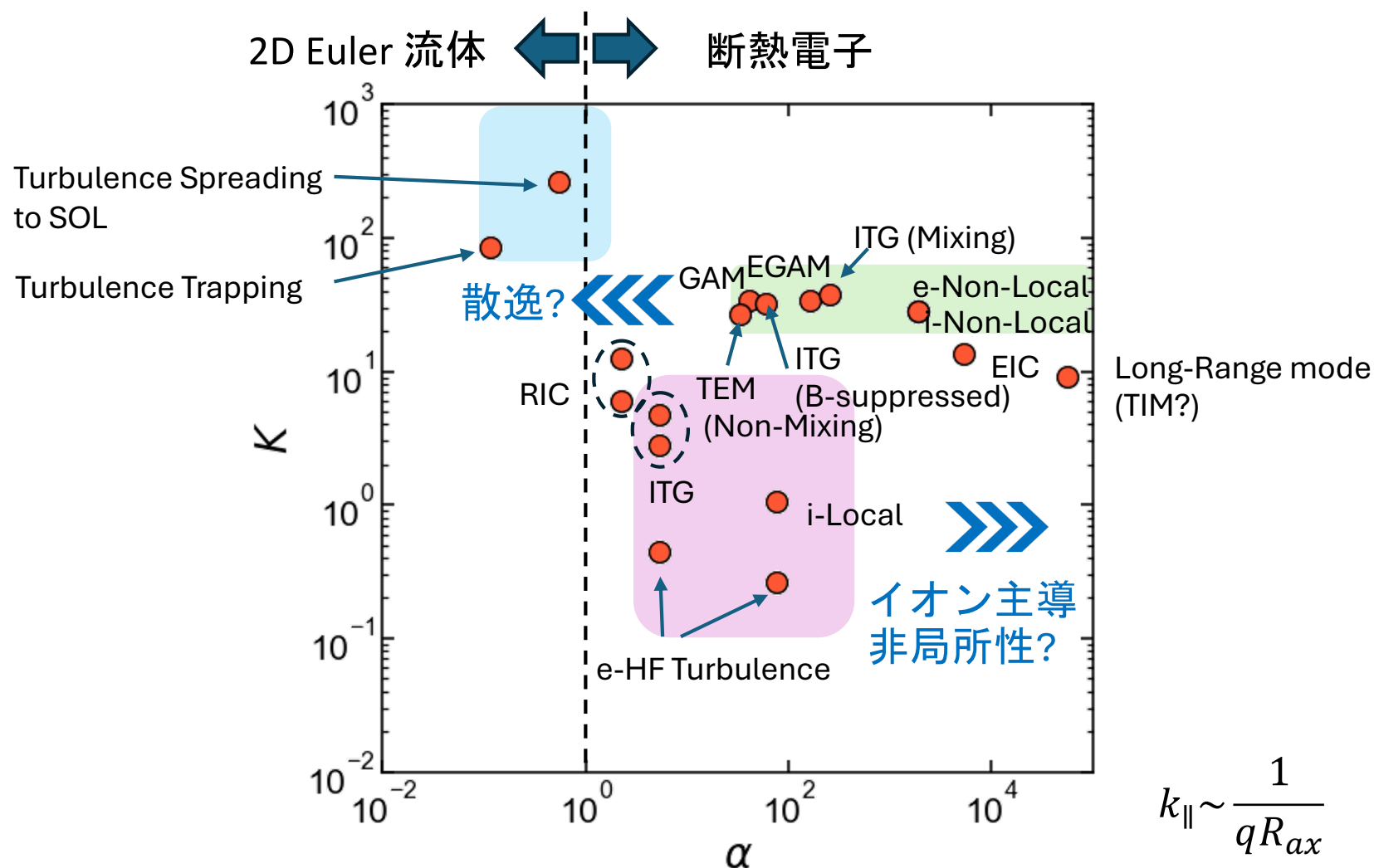
Hasegawa-Wakatani

Hasegawa-Mima

$\alpha - K$ 図を考える

電子の自由度と乱流の非局所性から相図を区切れるのでは?

$\alpha - K$ 図



$\alpha \sim 10-100$ (断熱電子) で $K \sim 0.1-10$ (ジャイロ運動論)

$\alpha \gtrsim 10$ (イオン領域?) で $K \sim 20-30$ (帯状流が卓越)

$\alpha \sim 1$ (輸送最大?) で $K > 100$ (パーコレーション的?)

“非”の正体を探る

相図としての $\alpha - K$ 図



ゾーニングにはある程度成功
物理と対応しそう
乱流相転移を捉えられそう



α はある程度制御できそうだが K は完全に結果で決まる
勾配の強さや外部駆動が明示的に入らない

$\alpha - K$ 図が示していること



幾何トポロジーは多様
流体だったり粒子集団だったりと多様相

これらが“非”の起源?

LHDで明らかになった事

Multi-Scale Turbulence という描像とそれによるプラズマ
の非線形性・非局所性の定性的理解が得られた

豊富な非線形・非局所輸送現象
Multi-Scale Turbulence の実測
Disparate-Scale Coupling の同定



統合的・定量的理解へ

一つの候補としての $\alpha - K$ 図

“非”を超えて”多”の時代へ

Non-Linear/Non-Local/Non-Stationary → Multi-Scale/Multi-Topology/Multi-Regime

LHDで明らかになっていない事

非定常現象の理解

高速伝搬(Ballistic Propagation)

➡ 乱流の非線形性・非局所性による理解

間欠的現象(準周期的バースト、自励振動、揺動歪度)

➡ Predator-Prey model, SOC ($\alpha \sim 1$)

前兆なし現象(一発パルス、相転移、崩壊、雪崩、...)

➡ 亜臨界不安定性? 運動論的突発バースト?

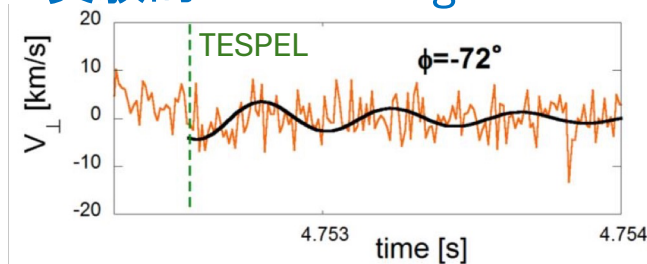
LHDで明らかになっていない事 (Cont.)

17

Zonal Flow の理解

Zonal Flow はいつどこで形成され、どのように散逸するのか？

実験的 Hinton-Sugama Test



T. Tokuzawa (2018) IAEA-CN-258/EX/P3-7



α や K への依存性は？

観測の欠損、未踏領域

輸送障壁や磁気島内における乱流計測



$K \ll 1$ への期待、 α は？

$\alpha \sim 1$ や $\alpha \ll 1$ における乱流計測

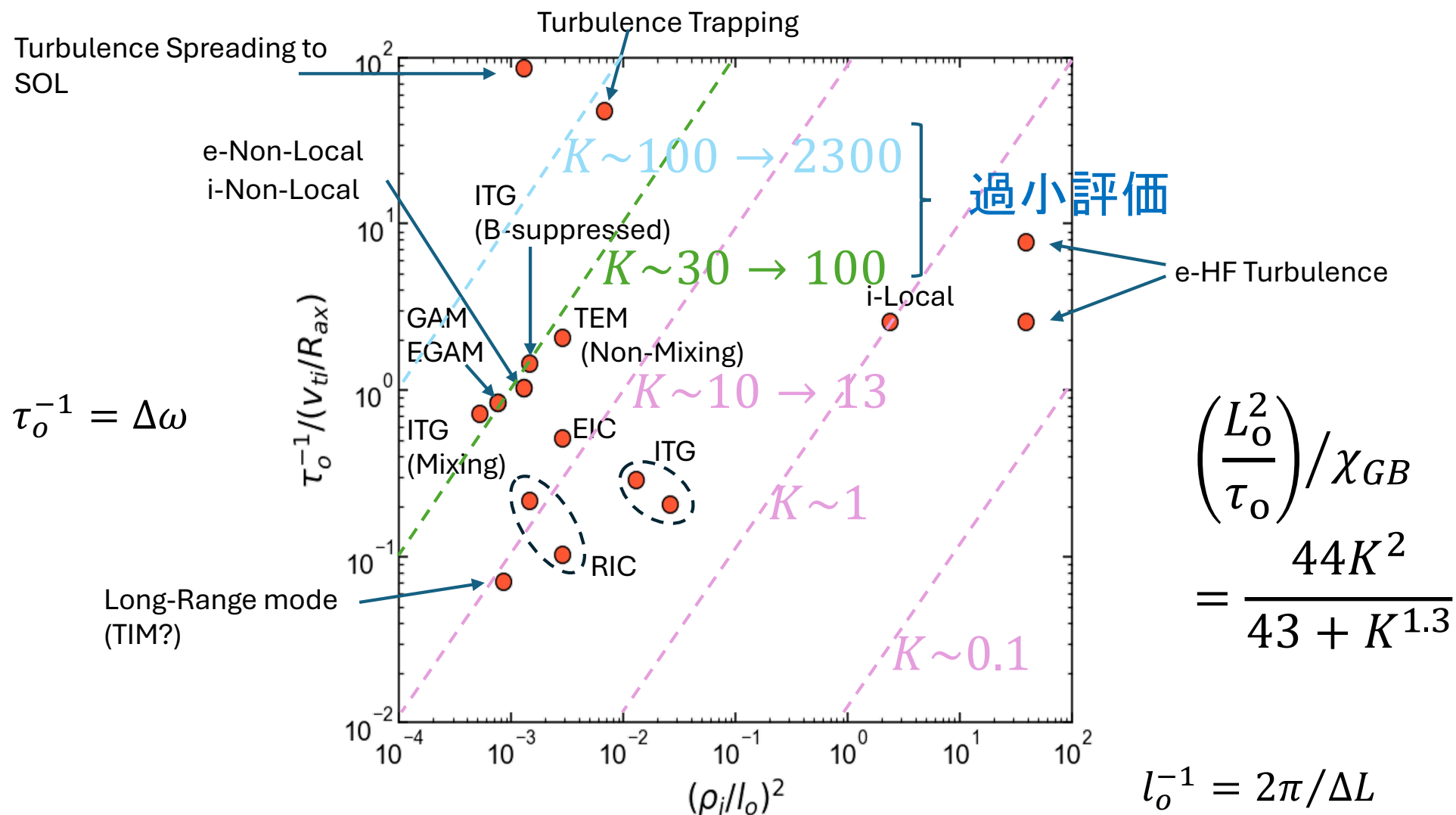


$\alpha \sim 1$ で $K \rightarrow \infty$ が一番面白そう

$\hat{s} \rightarrow 0$ で $k_{\parallel} \sim 0$ となり無衝突で $\alpha \rightarrow 0$

久保数の評価 (より正確に)

$$0 \leq K \leq 10 \quad \chi \propto K^2 \quad 10 \leq K \leq 100 \quad \chi \propto K \quad 100 \leq K \quad \chi \propto K^{0.7}$$



乱流構造と電子断熱度

$\alpha \ll 1$ 流体的

$\alpha \sim 1$ 位相混合が最大

$1 \ll \alpha$ 断熱電子

2D Euler

Hasegawa-Wakatani

Hasegawa-Mima

Drift Waves

不安定性の喪失

不安定性も輸送も最大

ただ波として存在

Zonal Flows

システムサイズの大渦

streamerと激しく競合

逆カスケードにより成長
KHによる崩壊→TIM?

Streamer

消滅

激しく成長

Zonal Flowに負ける

Solitary Vortex

静止流体渦

寿命のある渦

Soliton

ハミルトン系(保存系)
に近い

散逸系(非平衡・開放系)

ハミルトン系(保存系)
に近い

Zonal Flowの大きさは

$$k_r \rho_i \approx 1 (\alpha \gg 1)$$

$$k_r \rho_i > 1 (\alpha \approx 1)$$

実際と違う

HW/HM と突発性

Hasegawa-Wakatani



Hasegawa-Mima



特定の周波数帯の波動のマクロな包絡線
のゆっくりとした時間・空間発展



Complex Ginzburg-Landau Equation

分散 + 非線形 + 散逸・注入

Nonlinear Schrödinger equation

分散 + 非線形

Intermittent Burst, Avalanche,
ソリトンのパルス爆発・パルス反転

Rogue Wave, Wave Collapse
(Peregrine Soliton)

内部局在・一発現象
(外部駆動が無い)